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 5 - Análise de Risco Climático

Dezembro de 2022

Consultoria: Associação GITEC/COPPE

Comitê gestor:

REVISÕES

DATA	AUTOR	VERSÃO
07/10/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	1.0
21/10/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	2.0
08/11/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	3.0
30/11/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	4.0
08/12/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	5.0 (FINAL)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias..... 11
Figura 2 - Fatores que contribuem para o Risco Climático. 14
Figura 3. Hierarquia dos indicadores e subíndices..... 15
Figura 4 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos..... 20
Figura 5 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o período base. 21
Figura 6 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 23
Figura 7 Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 24
Figura 8 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)..... 25
Figura 9 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065). ... 26
Figura 10 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de deslizamentos..... 28
Figura 11 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 29
Figura 12 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a erosão..... 32
Figura 13 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o período base. 33
Figura 14 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). 35
Figura 15 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065). 36
Figura 16. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)..... 38
Figura 17 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065). 39
Figura 18 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão..... 41
Figura 19 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados..... 42
Figura 20 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático na infraestrutura ferroviária devido ao impacto direto de altas temperaturas..... 44
Figura 21. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o período base. 45
Figura 22 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). 47
Figura 23 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065). 48

Figura 24 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045). 49
Figura 25. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065). 51
Figura 26 - Síntese: Mapa de Risco Climático de impacto a infraestrutura devido a altas temperaturas. 53
Figura 27 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados. 54
Figura 28 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação. 60
Figura 29 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o período base. 61
Figura 30- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 63
Figura 31- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 64
Figura 32- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045). 65
Figura 33- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). 66
Figura 34 - Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação. 67
Figura 35 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação para cada um dos cenários analisados. 68
Figura 36 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento 70
Figura 37 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o período base. 71
Figura 38 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 73
Figura 39 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 74
Figura 40 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045). 75
Figura 41- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). .. 76
Figura 42- Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de deslizamento 77
Figura 43 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 78
Figura 44 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a erosão/assoreamento 80
Figura 45 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o período base. 81

Figura 46. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 83
Figura 47- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 84
Figura 48 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)..... 85
Figura 49 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). 86
Figura 50 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão. 87
Figura 51. Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para cada um dos cenários analisados..... 88
Figura 52 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada/ incêndio. 89
Figura 53 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à queimada, para o período base. 91
Figura 54 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 92
Figura 55 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 94
Figura 56 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)..... 95
Figura 57 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 5-2046-2065). 96
Figura 58 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de queimada. 97
Figura 59 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para cada um dos cenários analisados. 98
Figura 60 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas. 100
Figura 61 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o período base. 101
Figura 62 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 103
Figura 63 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 104
Figura 64 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 105
Figura 65 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 107
Figura 66 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas..... 108
Figura 67 - Distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido às altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados..... 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Situação das ferrovias federais..... 19
Tabela 2 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados..... 30
Tabela 3 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 31
Tabela 4 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados..... 43
Tabela 5 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados. 43
Tabela 6 - Quilometragem (em %) de ferrovias, por graus de ameaças climáticas, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados. 55
Tabela 7 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados. 56
Tabela 8 - Quilometragem (em %) de rodovias, por graus de ameaças climáticas, para cada um dos cenários analisados para alagamento/inundação. 68
Tabela 9 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas em cada um dos cenários analisados para deslizamento. 79
Tabela 10 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para erosão..... 89
Tabela 11 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para queimada/ incêndios. 99
Tabela 12 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para impactos diretos devido às altas temperaturas. 110

LISTA DE SIGLAS

AbE	Adaptação baseada em Ecossistemas
ACM	Análise de Máxima Covariância
AR5	*IPCC Fifth Assessment Report* (em português, Quinto Relatório de Avaliação do IPCC)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BIRD	Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento
DER/DF	Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFPO	Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
FCA	Ferrovia Centro Atlântica S.A.
FI	Fator de Impacto
FWD	*Falling Weight Deflectometer*
FTC	Ferrovia Tereza Cristina
FTL	Ferrovia Transnordestina Logística
GIZ	*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*
IGG	Índice de Gravidade Global
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	*Internet of Things*
IRC	Índice de Risco Climático
IRI	*International Roughness Index*
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (em português, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MInfra	Ministério da Infraestrutura
MRS	MRS Logística S.A.
MRV	Mensuração, Reporte e Verificação
OAE	Obras de Arte Especiais
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNL	Plano Nacional de Logística

PROADAPTA	Projeto Apoio ao Brasil na Implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima
RMN	Rumo Malha Norte S.A.
RMO	Rumo Logística
RMP	Rumo Malha Paulista S.A.
RMS	Rumo Malha Sul S.A.
SAM	Sistema de Administração da Manutenção
SBN	Soluções Baseadas na Natureza
SGO	Sistema de Gestão de Obras de Artes Especiais
SSP	*Shared Socio-Economic Pathways*
TdR	Termo de Referência
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
VLI	VLI Multimodal S.A.
VMA	Velocidade Máxima Autorizada

Índice

1. Introdução 11
2. Abordagem Metodológica 14
2.1. Normalização dos indicadores 16
2.2. Ponderação dos indicadores 16
2.3. Agregação dos indicadores 18
3. Modo Ferroviário 19
3.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 20
3.1.1 Período base | Impacto devido a deslizamentos 21
3.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 22
3.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 22
3.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 24
3.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 25
3.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 25
3.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 26
3.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a deslizamentos 27
3.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão 31
3.2.1 Período base | Erosão 33
3.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 34
3.2.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 34
3.2.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 36
3.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 37
3.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 37
3.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 39
3.2.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto de erosão 40
3.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 44
3.3.1. Período base | Altas temperaturas 45
3.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 46
3.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 46
3.3.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 48
3.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 49
3.3.3.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 49
3.3.3.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 50
3.3.4 Análise do Risco Climático devido ao Impacto Direto de Altas temperaturas 52
4. Conclusão - Modo Ferroviário 56
5. Modo Rodoviário 59
5.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de alagamento/inundação 60

5.1.1 Período base | Impacto devido a alagamento/inundação 61
5.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 62
5.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 62
5.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 63
5.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 64
5.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 65
5.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 66
5.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a alagamento/inundação 67
5.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 69
5.2.1 Período base | Impacto devido ao deslizamento 71
5.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 72
5.2.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 72
5.2.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 73
5.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 74
5.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 75
5.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 75
5.2.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 76
5.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão 79
5.3.1 Período base | Erosão 81
5.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 82
5.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 82
5.3.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 83
5.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 85
5.3.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 85
5.3.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 86
5.3.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a erosão 87
5.4. Índice de Risco Climático devido ao impacto de queimada/ incêndio 89
5.4.1 Período base | Queimada 90
5.4.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 92
5.4.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 92
5.4.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 93
5.4.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 95
5.4.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 95
5.4.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 96
5.4.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a queimada 97
5.5. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 99
5.5.1 Período base | Impacto direto de altas temperaturas 101

5.5.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 102
5.5.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 102
5.5.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 104
5.5.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 105
5.5.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 105
5.5.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 106
5.5.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 107
6. Conclusão - Modo Rodoviário 110
7. Referências Bibliográficas 114
8. Referências da Base de Dados Cartográficos 116

Anexos:

- Anexo I. Mapas (A3)

1. Introdução

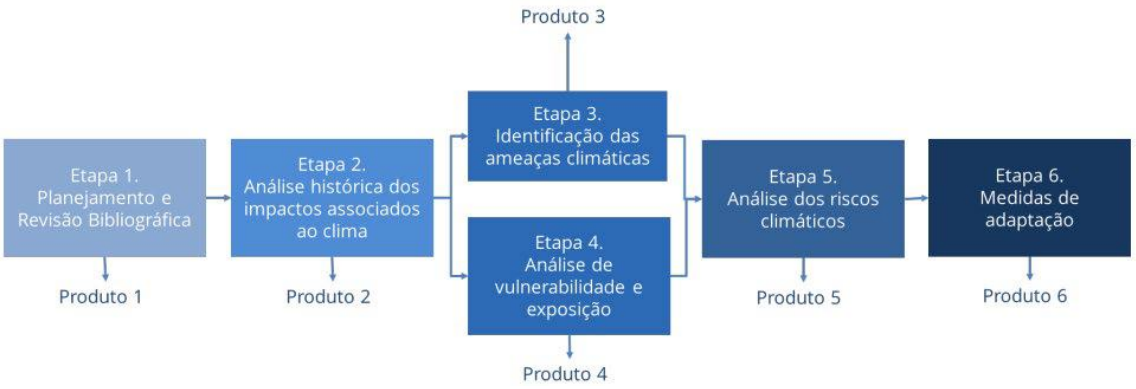
O presente relatório é parte do estudo "Levantamento de impactos e riscos climáticos sobre a infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) existente e projetada" (ou "Estudo AdaptaVias"), que tem como objetivo fornecer informações que sirvam como subsídio para o desenvolvimento de estratégias de adaptação à mudança do clima para o setor, no âmbito do Memorando de Entendimento celebrado entre o Ministério da Infraestrutura (MInfra) com a *Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH no Brasil, que conta com o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e é executado pela parceria formada entre a GITEC Brasil, GITEC-IGIP GmbH e o Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, no Projeto "Apoio ao Brasil na Implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima - PROADAPTA".

Esse estudo, conforme apresentado no Produto 1 (Parte 1 - Plano de Trabalho), está dividido em 6 (seis) etapas:

- **Etapa 1** - Consiste no levantamento de dados e estudos existentes e descreve a lógica empregada para o planejamento do estudo e a realização da revisão bibliográfica;
- **Etapa 2** - Busca identificar os impactos do clima na infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) brasileira, com base em análise de dados e séries históricas;
- **Etapa 3** - Visa identificar as ameaças climáticas aplicáveis à realidade da infraestrutura de transporte terrestre brasileira;
- **Etapa 4** - Consiste na identificação e na análise das vulnerabilidades existentes e do grau de exposição da infraestrutura de transporte terrestre brasileira;
- **Etapa 5** - Visa analisar o risco climático, com o detalhamento de suas informações para munir os tomadores de decisão de dados atualizados;
- **Etapa 6** - É uma etapa de fechamento, onde serão elencadas as medidas de adaptação necessárias, considerando-se os diferentes impactos e as ameaças, ou seja, as respostas a serem dadas diante dos cenários elaborados pelo consultor externo contratado pela GIZ.

O fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias.



Fonte: Elaboração própria (2021).

O **PRODUTO 5 (Análise dos riscos climáticos)**, resultante da Etapa 5, apresentado neste relatório, visa analisar o risco climático para a infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) brasileira, considerando aspectos operacionais e estruturais. A presente etapa buscou responder às seguintes perguntas norteadoras:

Perguntas norteadoras da Etapa 5

5.1. "Qual é o nível de risco climático (ameaça x exposição x sensibilidade x capacidade adaptativa) da infraestrutura de transporte terrestre federal brasileira?";

5.2. "Quais são as regiões e áreas com maior nível de risco climático para cada tipo de modal?";

5.3. "Quais são as regiões onde os riscos tendem a aumentar ou diminuir no futuro?".

Para avaliar o risco de impacto climático na **infraestrutura ferroviária** brasileira foram priorizados três impactos da mudança do clima na infraestrutura:

- Impactos devido a deslizamentos;
- Impactos devido a erosão; e
- Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Os **deslizamentos de terra**, um dos impactos biofísicos mais relevantes nas ferrovias, podem ser acentuados devido a fatores ecológicos (vegetação suprimida em áreas de regulação hídrica e estabilização de taludes) e fatores de engenharia (impermeabilização do solo e a drenagem inadequada, que direcionam a água para locais suscetíveis a movimentos de massa e cortes em taludes por infraestrutura linear). Esses fatores são, em muitos casos, fruto da redução de atividades de fiscalização, manutenção e planejamento. Os deslizamentos podem causar uma série de danos em elementos da infraestrutura ferroviária; entre eles, podemos citar dano no sistema de drenagem ou até o colapso da plataforma (SCHUSTER & HIGHLAND, 2001; PILECKA *et al.*, 2022).

Já na **erosão**, os impactos tendem a ser agravados por sensibilidades na superfície vegetal degradada e em áreas com erosão não tratada. Além disso, destaca-se que a falta de capacidades adaptativas como práticas de proteção de talude inexistentes ou ineficazes, frequência de manutenção das ferrovias reduzida e falta de controle do uso e ocupação do solo são fatores agravantes para intensificação dos impactos, como o aumento das enxurradas, colmatação do lastro, desguarnecimento do lastro (BLACKWOOD *et al.*, 2022) e até mesmo colapso da plataforma ferroviária (PALIN, 2021).

Em relação aos potenciais impactos das altas temperaturas e de ondas de calor nas ferrovias (**expansão térmica**), podem ser mencionados: (i) Flambagem do trilho (empenamento), gerando defeitos de geometria e comprometendo o uso da via, sendo mais suscetível no trilho soldado contínuo do que no trilho de junta (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; NEMRY e DEMIREL, 2012; DAWSON et al., 2016; HEINZ-PETER, 2017; WORLD BANK, 2017); (ii) Alterações na catenária (rede de alimentação elétrica aérea) devido a variação na cota do terreno em torno das fundações dos postes de fixação (WORLD BANK, 2017; HEINZ-PETER, 2017); e (iii) Superaquecimento de equipamentos elétricos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Para avaliação da **infraestrutura rodoviária**, por sua vez, foram priorizados cinco impactos da mudança do clima na infraestrutura:

- Impactos devido a alagamentos e inundações;

- Impactos devido a deslizamento;
- Impactos devido a erosão;
- Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas; e
- Impactos devido a queimadas.

Alagamentos e inundações são desencadeados quando o volume precipitado de chuvas é elevado em um pequeno intervalo de tempo e/ou ocorre um longo período de precipitação. Uma série de fatores pode contribuir para esses impactos como, por exemplo, a drenagem subdimensionada e entupida devido à falta de planejamento e manutenção, a impermeabilidade do solo e a vegetação degradada, que reduzem o potencial de infiltração de água no solo. Os elementos de infraestrutura rodoviária expostos a alagamentos e inundações (plataforma, pontes, viaduto, drenagem e outros) podem sofrer diminuição da vida útil devido a danos prematuros de materiais e estrutura (MNDAWE *et al*., 2015; RATTANACHOT *et al*., 2015), porque o método construtivo e o material usado em sua construção não estão adequados, ou por falta de manutenção, de diagnósticos e de conhecimento aprofundado, além da ausência de normas e processos que orientem as construções para melhor suportar a ocorrência de eventos climáticos extremos .

Os **deslizamentos** podem ocorrer quando há alto volume de precipitação em pouco tempo ou dias consecutivos de chuva. Além desses eventos climáticos, fatores ecológicos - como a vegetação suprimida em lugares onde poderia contribuir para a regulação hídrica e a estabilização de taludes - , bem como fatores de engenharia - como a impermeabilização do solo e drenagem inadequada, são fatores que aumentam o risco de deslizamentos. Em muitos casos, essa situação é fruto da redução de atividades de fiscalização, manutenção e planejamento. Os deslizamentos podem causar uma série de danos em elementos da infraestrutura rodoviária, como a ruptura de taludes e de estruturas de contenção, e até mesmo colapso de corpo estradal (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009; NEMRY e DEMIREL, 2012; RATTANACHOT *et al*., 2015).

Os danos e prejuízos na infraestrutura rodoviária devido a **erosão** são principalmente desencadeados por chuvas extremas, tanto de altos volumes pluviométricos, quanto de dias consecutivos de chuva. A erosão é um processo natural que está sendo agravado por sensibilidades ambientais, como a vegetação degradada ou inadequada e a topografia favorável aos processos erosivos. Essas sensibilidades têm como agentes causais, em muitos casos, os desafios de gestão, planejamento e manejo. Os vários elementos da infraestrutura rodoviária expostos às diferentes formas de erosão e seus impactos intermediários, tal como o assoreamento, podem sofrer danos significativos ou até o colapso da estrutura (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; NEMRY e DEMIREL, 2012; DAWSON *et al*., 2016; WORLD BANK, 2017).

Incêndios/queimadas ocorrem em virtude de ameaças climáticas como altas temperaturas máximas e médias, dias consecutivos sem precipitação e ondas de calor. Esses impactos biofísicos podem ser intensificados por meio de sensibilidades, como vegetação degradada, uso indevido do solo, infraestrutura rodoviária frágil, qualidade e tipo dos materiais empregados na execução das obras. Além disso, a inexistência ou a inadequação dos planos de monitoramento de incêndios/queimadas, a reduzida fiscalização do uso e ocupação do solo e a não recuperação de cobertura vegetal de áreas degradadas demonstram ausência de capacidades adaptativas, que contribuem para o aumento da vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária. Esse impacto biofísico pode acarretar uma série de danos e prejuízos, como problemas de instabilidade na infraestrutura e danos em dispositivos de

operação (sinalização vertical e horizontal), painéis de mensagem variável - PMV e câmeras de monitoramento (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009).

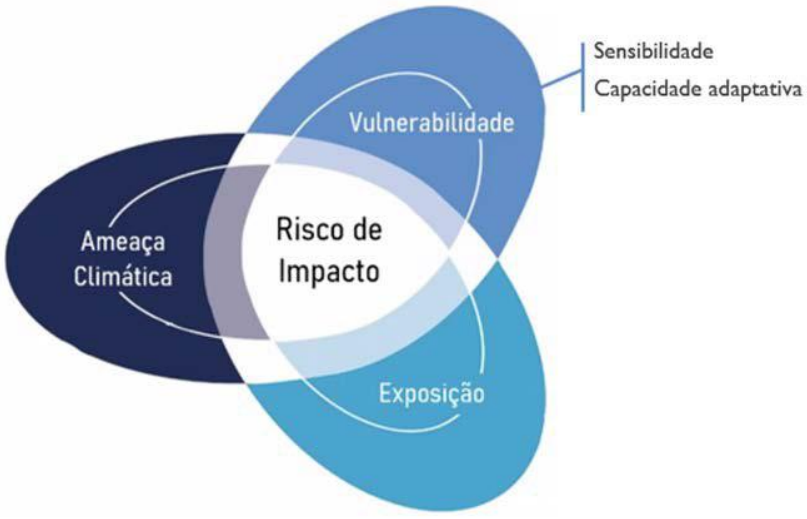
Por fim, tem-se os **impactos diretos devidos às altas temperaturas,** que são intensificados por sensibilidades como infraestrutura rodoviária frágil, qualidade e tipo dos materiais empregados na construção, e por deficiências nas capacidades adaptativas, como falta de diagnóstico e monitoramento. Isso pode acarretar danos e prejuízos à infraestrutura rodoviária como expansão térmica em juntas de dilatação de pontes e superfícies pavimentadas, principalmente de concreto de cimento Portland (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009) e danos à integridade do pavimento em virtude de deflexões elevadas, fissuras transversais, redução da taxa de deformação do pavimento asfáltico e deformação permanente (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; DAWSON, 2014; DAWSON *et al*., 2016; SONG *et al*., 2018).

Diante do que foi exposto, há necessidade de que sejam realizados estudos sobre a Análise de Risco Climático para cada um dos impactos biofísicos ou impacto direto na infraestrutura de transporte rodoviário. Para cada um dos impactos intermediários foram elaborados Índices de Risco Climático (IRC) para três cenários: período base (1981-2000), cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) e cenário de emissões altas (SSP5-8.5) e dois horizontes temporais (curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065)). O detalhamento metodológico é apresentado a seguir.

2. Abordagem Metodológica

A base metodológica utilizada na Etapa 5 - Análise dos Riscos Climáticos foi fundamentada no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) e corroborada pela metodologia proposta por GIZ, EURAC & UNU-EHS (2018) e pelo AR6 (IPCC, 2022). Tal abordagem considera o risco climático como função da ameaça climática, exposição da infraestrutura e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa) (ver Figura 2).

Figura 2 - Fatores que contribuem para o Risco Climático.



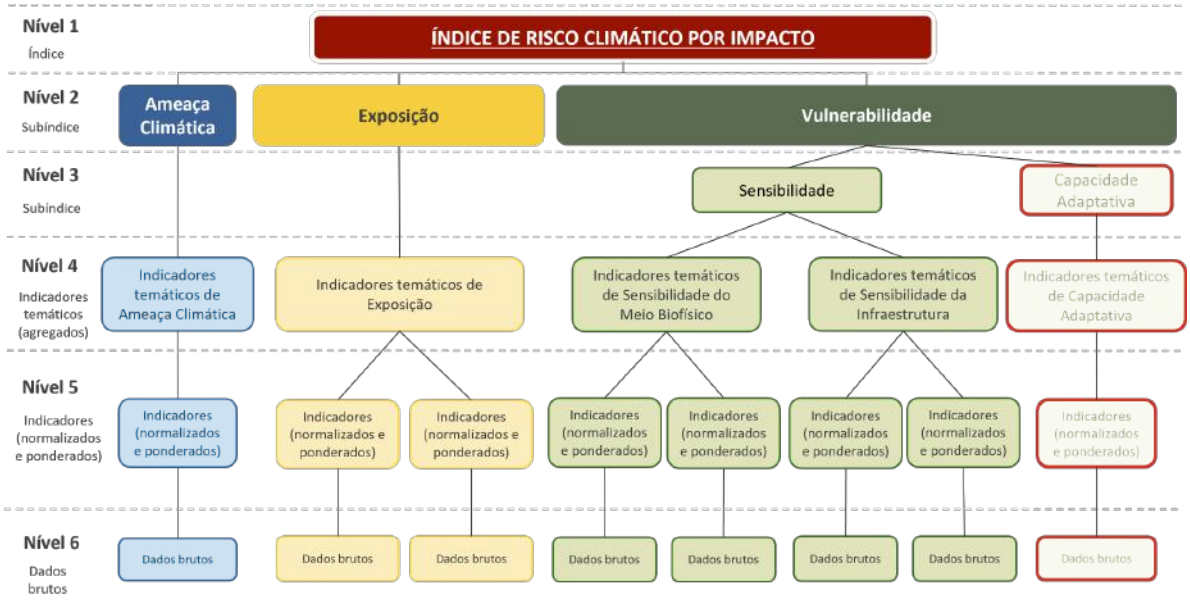
Fonte: Adaptado de IPCC (2014).

Após a identificação das ameaças climáticas e seus indicadores climáticos (Produto 3) e da análise de vulnerabilidade e de exposição e seus indicadores (Produto 4), este produto apresenta a metodologia

e os resultados da agregação para composição do Índice de Risco Climático (IRC). Desse modo, a abordagem metodológica do presente produto consiste principalmente na descrição da forma de normalização, ponderação e agregação dos indicadores e subíndices dos níveis, até chegar ao IRC.

A identificação e a seleção de indicadores nos Produtos 3 e 4 incluiu a verificação quanto à especificação técnica e determina quais indicadores melhor descrevem a ameaça climática, a exposição e a vulnerabilidade, seguindo a lógica hierárquica dos vários níveis, até chegar ao IRC. Ou seja, para o cálculo do IRC deve-se percorrer todos os níveis da estrutura hierárquica relacional utilizada para a construção de indicadores e índices, em ordem decrescente (do 6 ao 1), representada na Figura 3 a seguir. Cabe destacar que no presente relatório as análises se limitaram aos níveis 1, 2 e 3, uma vez que os demais níveis já foram analisados em produtos anteriores.

Figura 3. Hierarquia dos indicadores e subíndices.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Figura 3, nota-se que:

- no Nível 6 (dados brutos), são apresentadas as origens de cada dado utilizado para compor o risco climático final;
- no Nível 5, são expostos os indicadores, normalizados e ponderados, para cada um dos componentes do risco;
- no Nível 4, tem-se os indicadores temáticos separados em indicadores de ameaça, de exposição, de sensibilidade do meio biofísico e de sensibilidade da infraestrutura;
- no Nível 3, os indicadores temáticos de sensibilidade são agregados em um subíndice de sensibilidade; cabe destacar que os Níveis 4 e 3 são iguais devido à ausência de indicadores para representar a capacidade adaptativa;
- o Nível 2 é composto pelos subíndices de vulnerabilidade, exposição e ameaça climática; e
- no Nível 1, tem-se, por fim, o Risco Climático do Impacto analisado.

Todos os processos metodológicos descritos a seguir foram realizados para ambos os modos analisados, ferroviário e rodoviário, para os impactos intermediários priorizados. Para cada impacto de cada modo foram desenvolvidos os Índices de Risco Climático para:

- **Período base:** considera os dados/informações históricas sobre o clima no período 1981-2000 para o cálculo da ameaça climática.
- **Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5):** meio caminho ("*Middle of the road*"). Cenário de emissões no qual o mundo segue um caminho com tendências sociais, econômicas e tecnológicas que não se desviam marcadamente dos padrões históricos (MEINSHAUSEN *et al.*, 2020).
- **Cenário de emissões altas (SSP5-8.5):** marca o extremo superior dos SSP como cenário de altas emissões devido ao desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis no mundo ao longo do século 21 (MEINSHAUSEN *et al.*, 2020).

Dentro de cada cenário de emissão foram considerados dois horizontes temporais:

- **Horizonte de curto prazo:** período entre 2026-2045;
- **Horizonte de médio prazo**: período entre 2046-2065.

Desse modo, para cada impacto intermediário são calculados 5 (cinco) índices de risco climático.

Para exposição e vulnerabilidade, foram utilizados dados do MInfra e do PNL 2035. Assim, a exposição e a vulnerabilidade são mantidas em todos os cenários e horizontes subsequentes.

A seguir são apresentados os métodos de normalização, de ponderação e de agregação, desde o nível 6 para as ameaças climáticas, e a partir do nível 5 para os indicadores temáticos.

2.1. Normalização dos indicadores

Para possibilitar a agregação, os indicadores temáticos do nível 5 foram normalizados a partir de uma função matemática, a fim de tornar os indicadores comparáveis. Foi seguido o mesmo método de normalização utilizado no sistema AdaptaBrasil-MCTI[1], com a utilização da seguinte expressão matemática:

$$I_{ji} = \frac{I_{ai} - I_{jp}}{I_{jm} - I_{jp}}$$

Onde:

- I_{ji} é o valor normalizado do indicador *j* no *i*-ésimo pixel;
- I_{ai} é o valor do indicador no *i*-ésimo pixel;
- I_{jp} representa o valor do indicador *j* no pixel com menor valor referente aos dados observados;
- I_{jm} é o valor do indicador *j* no pixel com maior valor referente aos dados observados.

O resultado dessa normalização é sempre um valor que varia entre 0 e 1, com graus decimais.

2.2. Ponderação dos indicadores

Para obtenção dos pesos dos indicadores climáticos, foi utilizado o método aplicado por Wilks (2014), Barreto *et al*. (2016) e Barreto *et al*. (2019), em que é possível visualizar os detalhes metodológicos.

[1] Disponível em: https://adaptabrasil.mcti.gov.br/

O principal método aplicado é a técnica multivariada Análise de Máxima Covariância (ACM), a qual consiste em identificar e destacar as relações mais significativas no conjunto de dados utilizado. A entrada dessa análise são os resultados da *Singular Value Decomposition* (SVD), que é o método de decomposição matricial aplicado ao conjunto de dados, o qual toma como entrada a matriz de covariância dos dados originais.

O método ACM permite identificar os padrões espaço-temporais mais significativos de uma variável em relação ao conjunto de variáveis, tendo como resultante a associação máxima interna ao conjunto. Diante desse padrão espaço-temporal relacional é possível quantificar a capacidade em reproduzir, individualmente, as variáveis originais, e um dos métodos comumente utilizados é a correlação de Pearson. O valor encontrado é então utilizado como ponderador na equação dos Índices de Ameaça Climática. Esse mesmo método foi utilizado no sistema AdaptaBrasil-MCTI, no caso do setor estratégico da segurança alimentar para os impactos das chuvas intensas.

Para a ponderação dos indicadores de exposição e de sensibilidade foram realizadas 02 (duas) oficinas com especialistas, 01 (uma) para o modo rodoviário e 01 (uma) para o ferroviário, com o objetivo de apresentar os indicadores propostos, validar e atribuir pesos. A etapa de definição dos indicadores de vulnerabilidade e de exposição foi baseada em dados disponíveis na bibliografia e nos resultados da consulta a especialistas. Destaca-se que essa etapa contou com a participação de especialistas indicados pelas instituições-chaves, os quais opinaram sobre a definição de pesos aplicáveis às variáveis dos indicadores de exposição e sensibilidade da infraestrutura de transportes rodoviários e ferroviários.

Foi adotado o método Delphi, que é uma estratégia cada vez mais reconhecida para a construção, o aprimoramento e a ponderação de indicadores. Esse método tem a capacidade de alcançar o consenso, além de ajudar a capturar omissões e inconsistências que podem resultar em uma realidade equivocada. O método Delphi auxilia na construção de soluções e esclarecimentos de questões de projetos por meio de etapas, definidas em: escolher um facilitador, identificar seus especialistas, definir o problema, seguir com rodadas de perguntas e, por fim, a tomada de decisão (Azevedo, s.d.). A metodologia contou com a aplicação de um questionário estruturado (formulário *on-line*) junto a um grupo de especialistas, de forma a buscar a convergência das suas respostas.

Para alcançar esse consenso, a partir dos formulários enviados por *e-mail*, foi possível calcular o índice de Simpson dos indicadores. O índice de Simpson varia de 0 a 1, onde quanto mais próximo o valor de 1, maior é a diversidade na ponderação. A partir dos resultados dos primeiros índices calculados, os valores iguais ou acima de 0,7 foram incluídos em uma nova rodada de avaliação nas oficinas. Ao final, para os valores com maior diversidade na ponderação mesmo após a segunda rodada, optou-se por aplicar a média ponderada, calculada por meio do somatório das multiplicações entre valores e pesos, divididos pelo somatório dos pesos, possibilitando, assim, a obtenção de um valor médio ajustado.

Ao final das rodadas de perguntas com os especialistas foram validados os indicadores que melhor se adequam à realidade.

2.3. Agregação dos indicadores

Para a agregação dos indicadores ponderados do nível 5 ao nível 4 (indicadores temáticos), usou-se a média ponderada (Equação 1). Cabe ressaltar que a ponderação dos indicadores no nível 5 foi realizada na Etapa 4 deste estudo.

Equação 1

$$\text{Nível 4 (Indicador temático)} = \frac{(\text{Indicador 1} * \text{peso}) + (\text{Indicador 2} * \text{peso}) + (\text{Indicador 3} * \text{peso})}{3}$$

A agregação do nível 4 ao nível 3 se dá unicamente pela média simples dos dois indicadores temáticos de sensibilidade: sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico (Equação 2).

Equação 2

$$\text{Nível 3} = \frac{\text{Indicador temático 1} + \text{Indicador temático 2}}{2}$$

O Índice de Risco Climático (IRC) pode ser calculado através da média simples entre os componentes de risco climático (Nível 2 para o Nível 1), segundo a Equação 3:

Equação 3

$$\text{Risco} = \frac{\text{Ameaça} + \text{Exposição} + \text{Vulnerabilidade}}{3}$$

É importante ressaltar que a vulnerabilidade neste estudo foi unicamente composta pela sensibilidade, devido à falta de dados representativos para a capacidade adaptativa (ver Produto 4) e, por isso, não há o que agregar do nível 3 ao nível 2. A sensibilidade, por sua vez, foi dividida em sensibilidade biofísica e sensibilidade da infraestrutura (ver Nível 4, conforme apresentado na Figura 3). Não se aplicou nenhum tratamento de valor atípico (ou *outliers*). Para a composição da equação final do cálculo do risco climático, agregou-se o nível 2 ao nível 1, conforme descrito na Equação 3.

Os valores normalizados tanto do IRC quanto dos componentes foram classificados em cinco classes:

- <= 0,01] = Muito baixo;
-]0,01 - 0,25] = Baixo;
-]0,25 - 0,50] = Médio;
-]0,50 - 0,75] = Alto;
- > 0,75] = Muito alto.

Nessa classificação linear, os riscos alto e muito alto não significam necessariamente que o nível de criticidade é alto, pois esta é uma avaliação relativa, e não absoluta.

Nas próximas seções, serão apresentados os resultados obtidos para os impactos selecionados para o modo ferroviário.

3. Modo Ferroviário

O modo ferroviário de transporte é o responsável pela segunda maior movimentação de cargas no Brasil, atrás somente do transporte rodoviário (MInfra, 2021). A malha viária, categorizada por situação e por concessão, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Situação das ferrovias federais.

Situação da ferrovia[2]	KM
Desativada	4.096,14
Em obra	2.948,99
Em operação	30.006,99
Estudo	5.413,46
Planejada	12.769,57
Total Geral	**55.235,14**

Fonte: ANTT

Como mencionado anteriormente, para avaliar o risco climático na infraestrutura ferroviária foram considerados **três impactos** da mudança do clima na infraestrutura: (1) Impactos devido a deslizamentos; (2) Impactos devido a erosão; e (3) Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas. Para cada um dos impactos intermediários, foram elaborados Índices de Risco Climático considerando-se **três cenários**: (a) Período base (1981-2000); (b) cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5); e (c) cenário emissões altas (SSP5-8.5). Cada cenário, com exceção do período base, foi calculado para **dois horizontes temporais**: (i) curto prazo (2026-2045) e (ii) médio prazo (2046-2065).

Para compreender os mapas dos componentes do IRC (Nível 1) é necessário observar os mapas relacionados à ameaça climática, à exposição e à vulnerabilidade da rede ferroviária (Nível 2 da estrutura hierárquica), já que o risco é o resultado da combinação destes componentes. O componente de vulnerabilidade foi calculado apenas com informações sobre sensibilidade (Nível 3), uma vez que os dados disponíveis para capacidade adaptativa não puderam ser incorporados na análise (pois não atendiam aos critérios de abrangência e formato).

Faz-se necessário salientar que diferenças nos valores totais e parciais de extensão dos trechos ferroviários podem e devem ocorrer. Isso é devido ao processo topológico de conversão de polígono (área) para linha. Essa transformação pode acarretar pequenas diferenças (alguns metros por trecho), os quais, uma vez somados, resultam em extensões de quilômetros de diferença. Ainda assim, tais diferenças são irrelevantes quando contextualizadas em um cenário nacional.

A seguir são apresentados os principais resultados, por impacto intermediário, obtidos para a infraestrutura ferroviária nacional. Para cada mapa de Risco Climático são apresentados os mapas

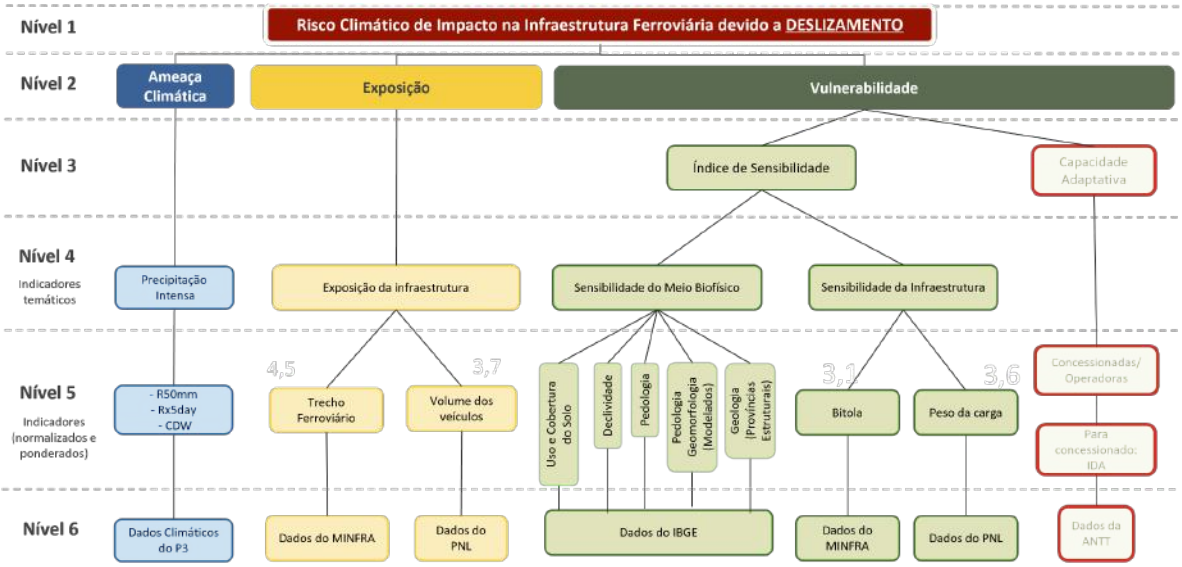
[2] No âmbito do estudo não foram consideradas as ferrovias desativadas.

dos seus componentes e, por fim, é realizada uma análise comparativa dos riscos climáticos por cenários e horizontes.

3.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

O IRC para a infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 4, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R50mm: número de dias com chuva igual ou maior a 50 mm;
- Rx5day: chuva máxima acumulada em 5 dias; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dado do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico:

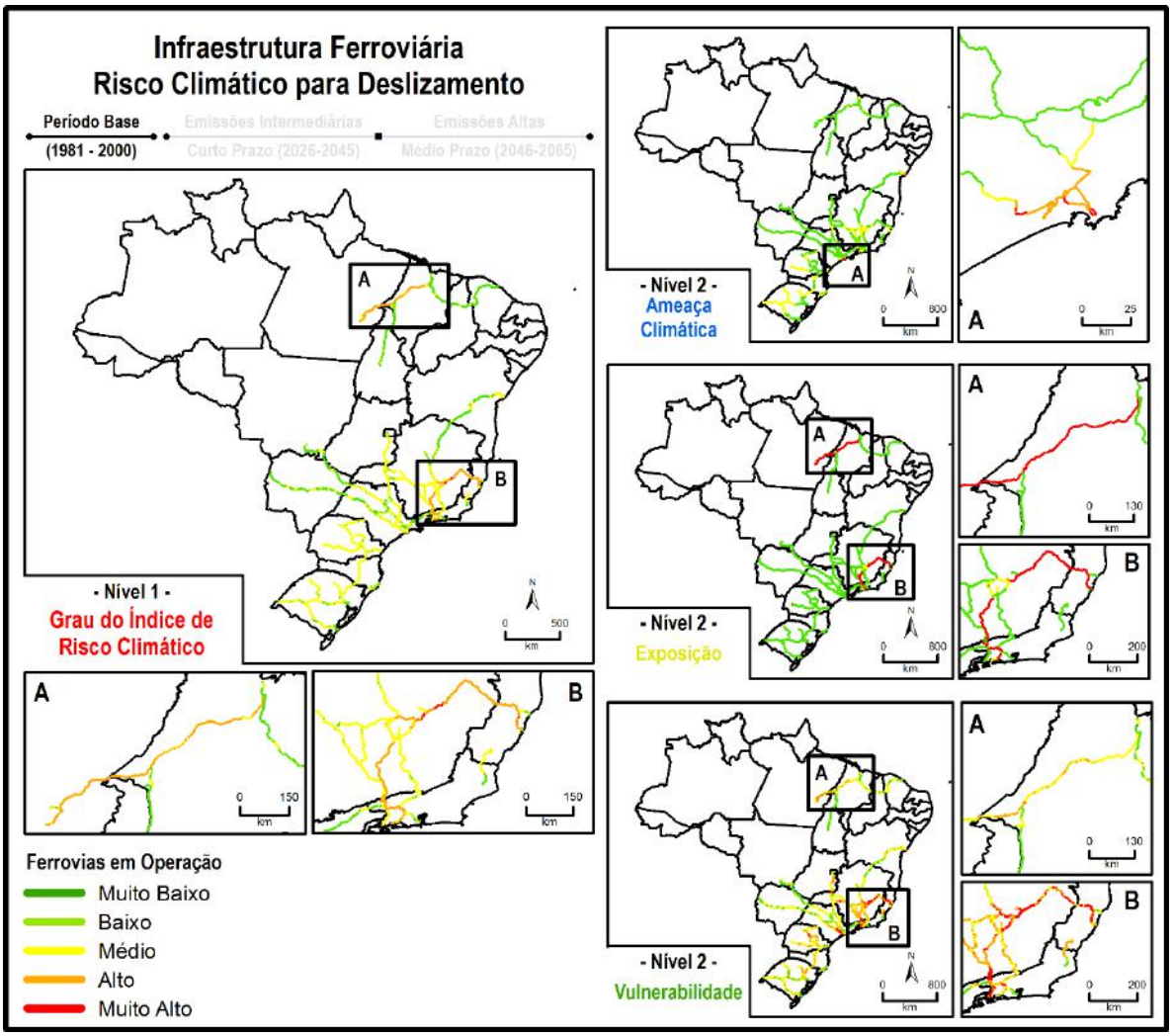
- Mapa de susceptibilidade a deslizamentos - composto por Uso e Cobertura do Solo, Declividade, Pedologia, Pedologia Geomorfologia e Geologia do IBGE; e
- Sensibilidade da infraestrutura, calculados a partir de dados de bitola (dados do MInfra) e peso da carga (dados do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido a deslizamentos.

3.1.1 Período base | Impacto devido a deslizamentos

A Figura 5 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o período base.

Figura 5 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Quanto ao Índice de Risco Climático, composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade, verifica-se que os trechos com graus alto e muito alto se encontram na Região Sudeste, com destaque para os estados de Minas Gerais (graus alto e muito alto), Rio de Janeiro (grau alto), São Paulo (graus alto e muito alto) e Espírito Santo (graus alto e muito alto), e no eixo Pará-Maranhão (grau alto) (Figura 5). Esses trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística);

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

As ferrovias da região sul apresentam risco climático médio ao deslizamento.

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de ferrovias no litoral de São Paulo se encontram com alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se trechos com ameaças médias no Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

No que diz respeito a **vulnerabilidade** a deslizamentos, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos de grau alto e muito alto se concentram nos trechos Minas Gerais/Espírito Santo (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.) e Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Rio de Janeiro x Minas Gerais, operada pela MRS Logística S.A), e aparecem de modo mais pontual na Ferrovia Carajás (operada pela Vale S.A.), e em partes da malha ferroviária do sul do Brasil. Isso se deve à susceptibilidade ao deslizamento em regiões com terreno mais acidentado, como ocorre no Sudeste brasileiro, e ao peso da carga transportada.

Os trechos com grau muito alto de **exposição** se encontram nas ferrovias com maior tráfego de composições, especialmente aquelas estradas de ferro associadas ao escoamento da produção mineral brasileira. Desse modo, as ferrovias mais expostas são:

- Minas Gerais ligação do quadrilátero ferrífero aos Portos de Santos (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística) e do Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Estrada de Ferro Carajás: Carajás (PA) até São Luís (MA);
- Estrada de Ferro Vitória a Minas: interior de Minas Gerais até o porto do Espírito Santo.

Os mapas de vulnerabilidade e de exposição se repetirão para todos os cenários, uma vez que a vulnerabilidade é determinada pela sensibilidade do meio físico e sensibilidade da infraestrutura, e a exposição relaciona-se principalmente com o volume de veículos que trafegam na ferrovia, os quais não sofrem alterações. Assim, não serão analisados e discutidos nas seções e subseções seguintes, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor.

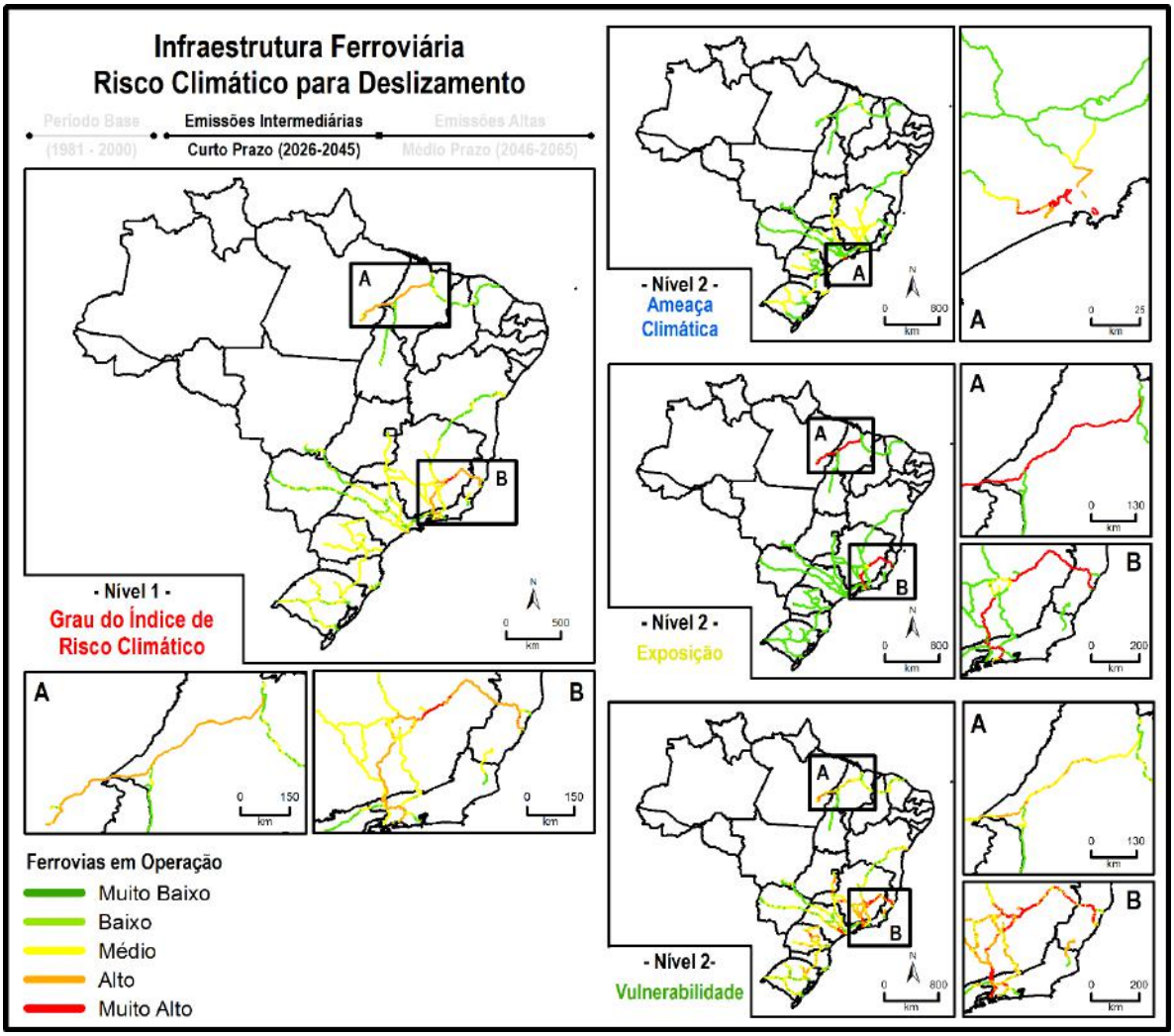
3.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de deslizamento, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

3.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 6 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 6 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo, com risco alto a muito alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco muito alto), conforme apresentado na Figura 6, devido ao volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e ao peso da carga e aos indicadores de suscetibilidade a deslizamentos, que compõem o componente vulnerabilidade.

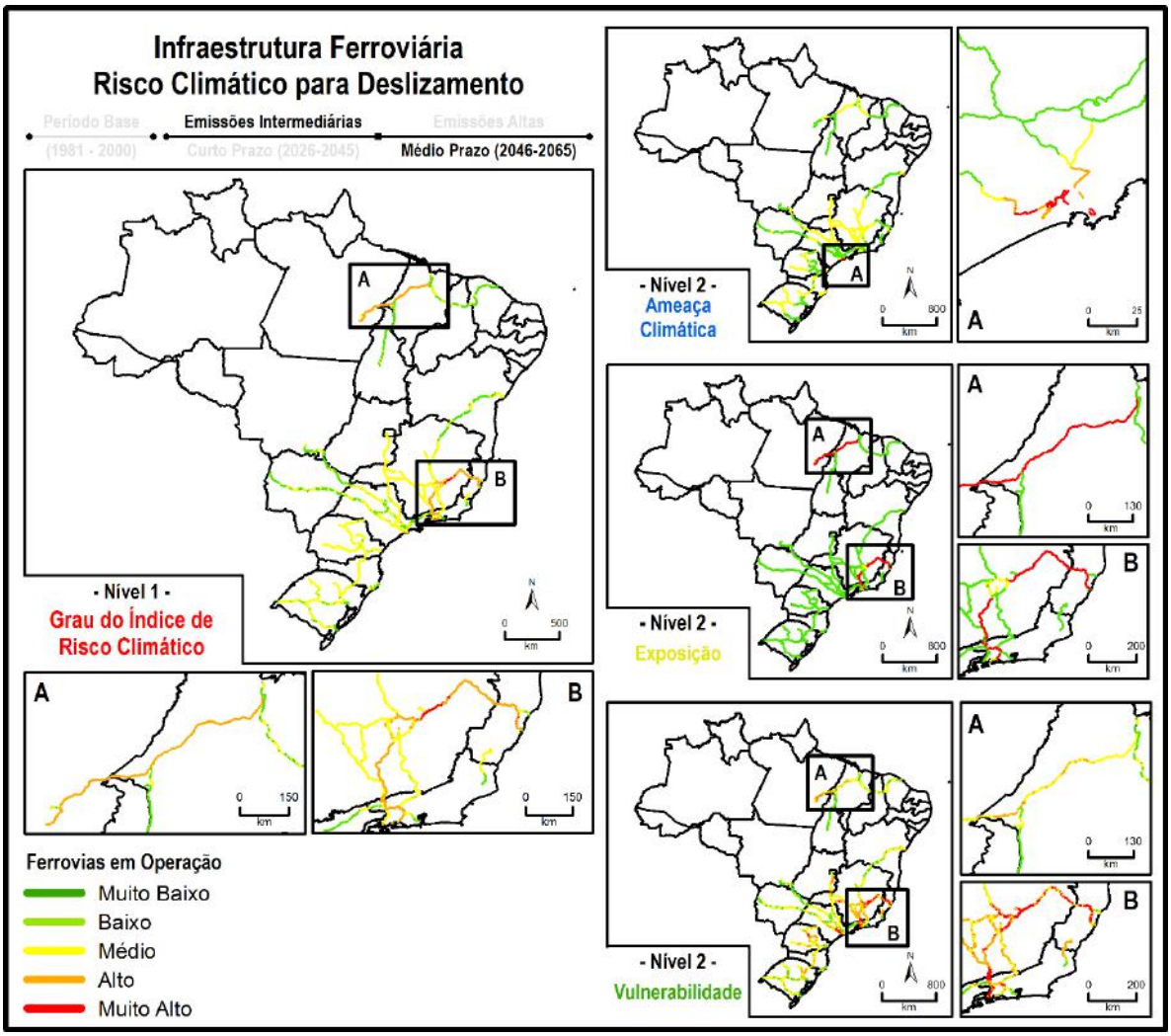
Os trechos com maior risco diante do cenário apresentado encontram-se nas seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

3.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045) são apresentados na Figura 7.

Figura 7 Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos estão concentrados na Região Sudeste e no Eixo Pará-Maranhão, conforme apresentado na Figura 7. Tais trechos correspondem às rodovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

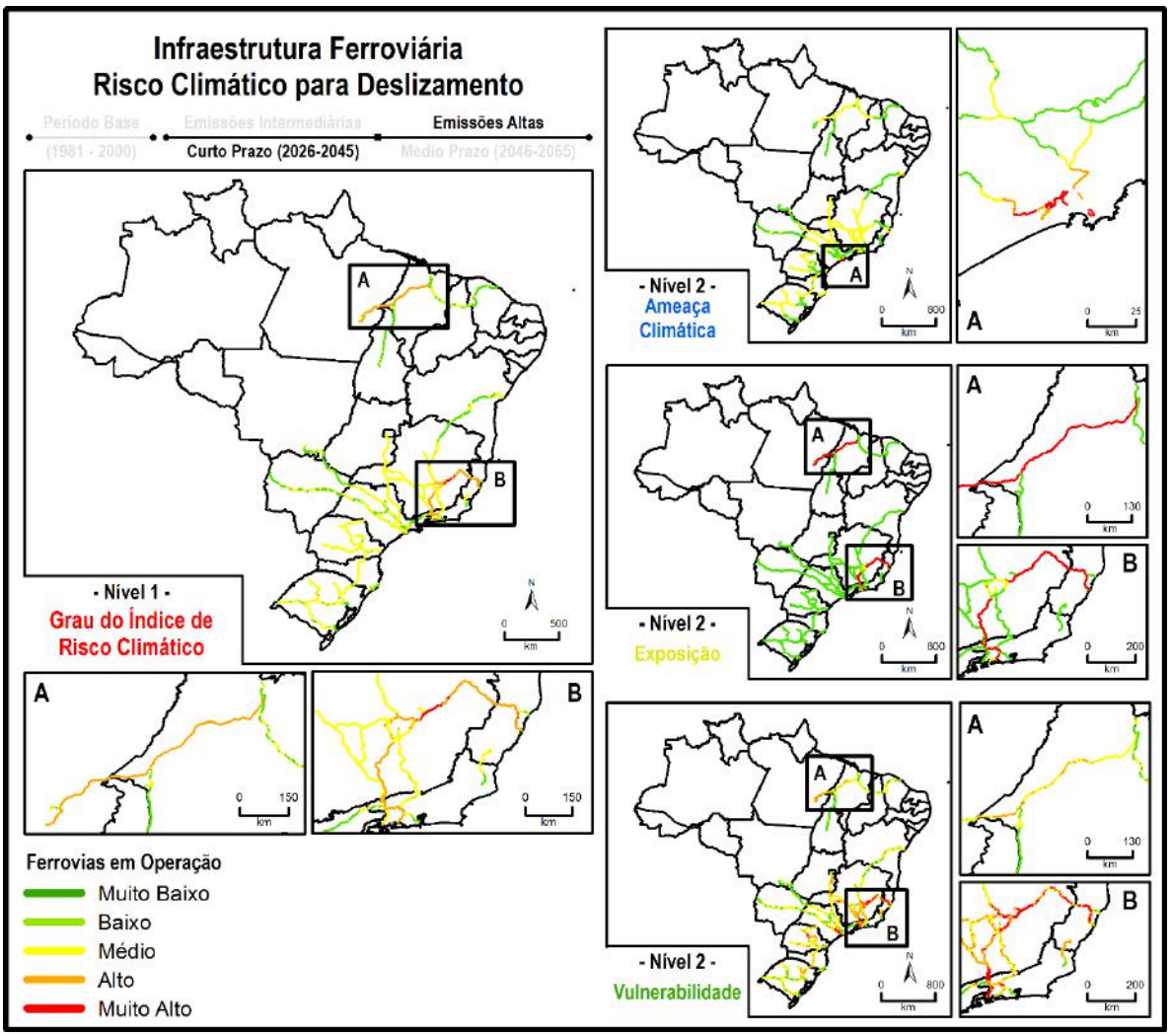
3.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de deslizamentos para o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

3.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 8 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 8 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

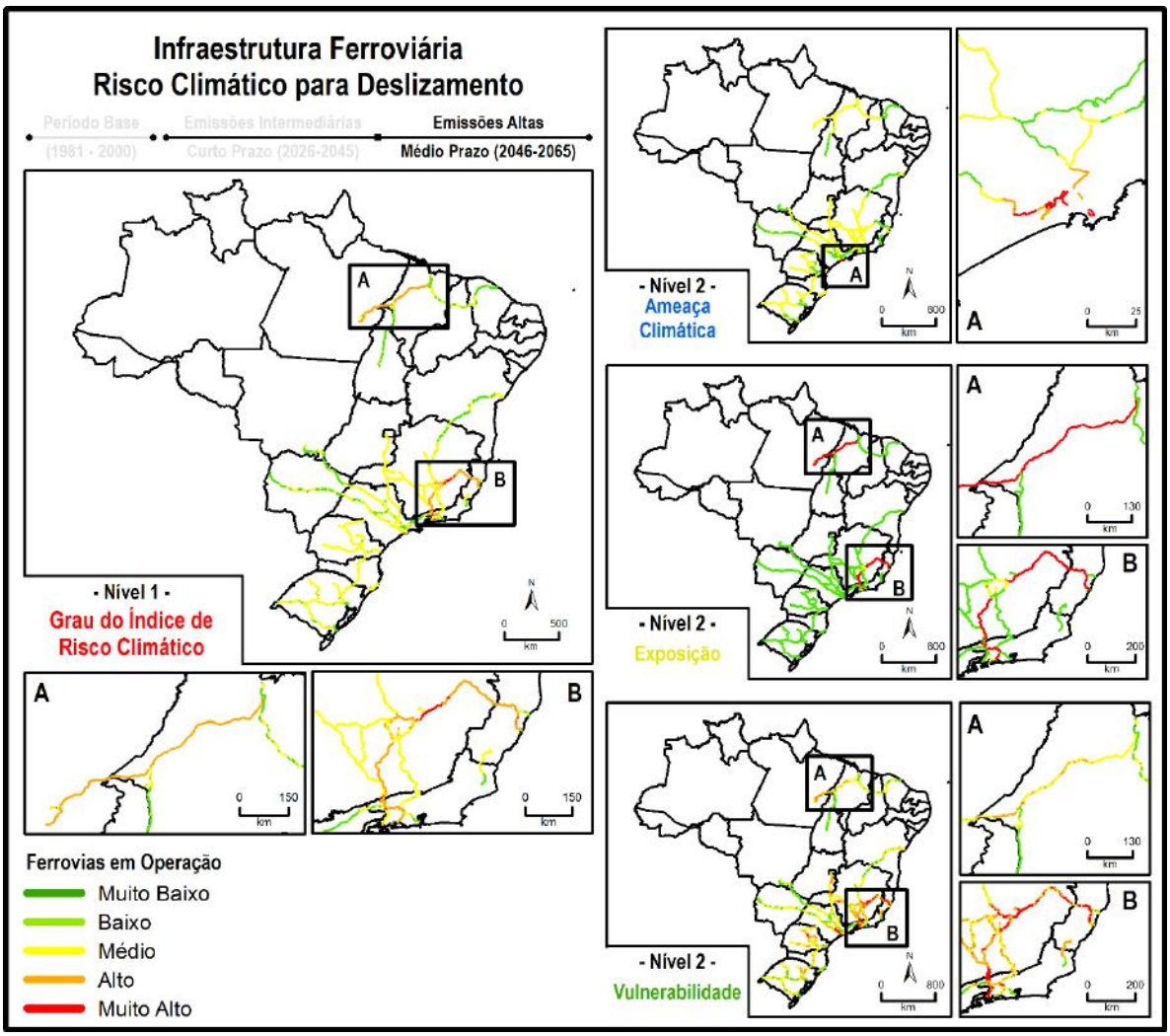
Pela análise da Figura 8, observa-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos também se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais/ Espírito Santo, Minas Gerais/ Rio de Janeiro e São Paulo) e no Eixo Pará-Maranhão, que são as que apresentam maiores volumes de veículos e peso de carga (componente de exposição). Tais trechos equivalem às ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

3.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 9 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 9 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os mapas apresentados na Figura 9 mostram que, assim como aconteceu para os diferentes cenários e horizontes temporais descritos anteriormente, os maiores índices (risco alto e muito alto) ficam concentrados na Região Sudeste e no Eixo Pará-Maranhão. Os trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);

- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

3.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a deslizamentos

Os trechos ferroviários que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo foram:

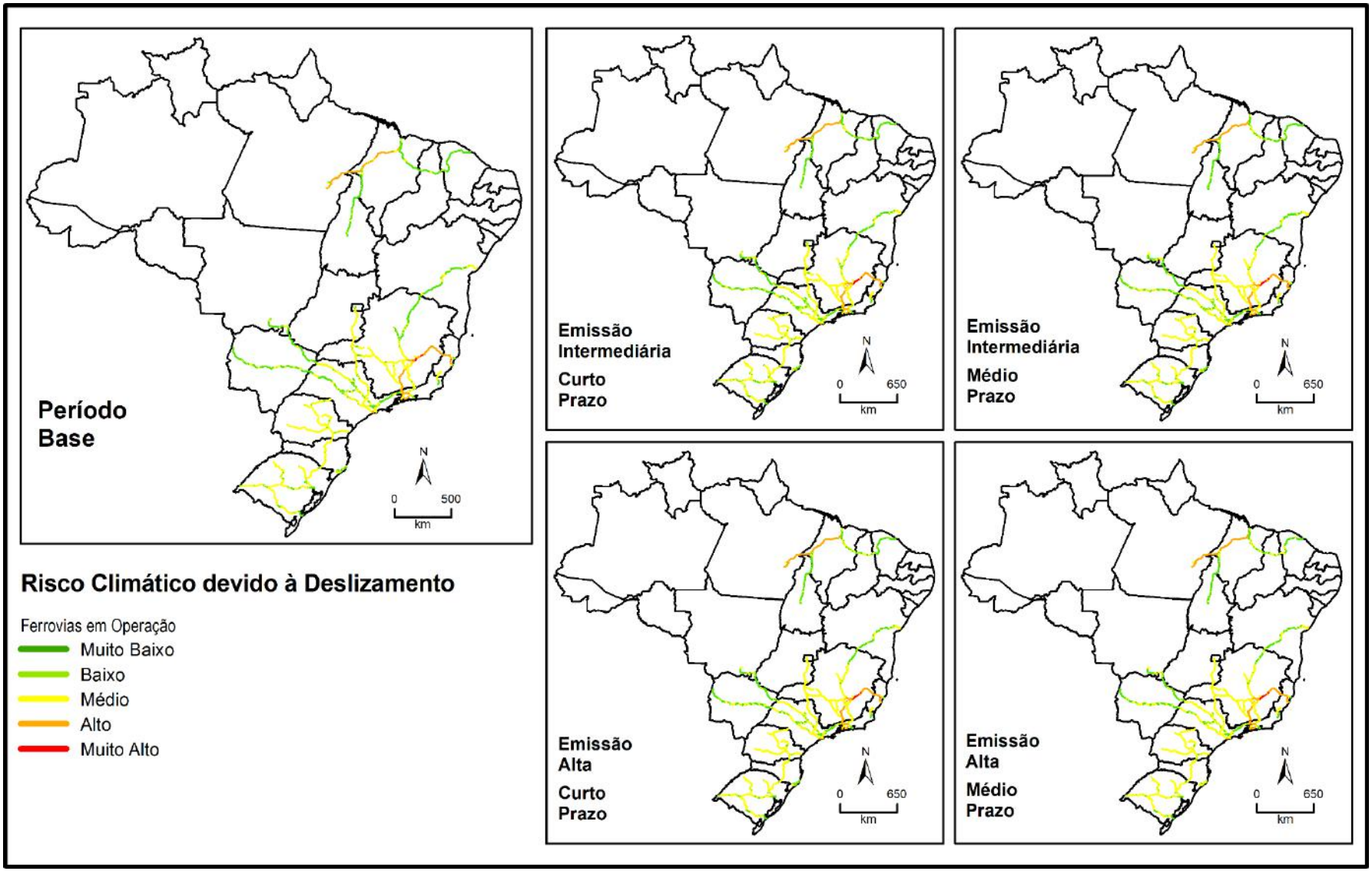
- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas X Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

Estas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e elevado peso de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura. Além disso, um destaque especial pode ser dado à sensibilidade do meio biofísico dessas regiões (suscetibilidade a deslizamentos).

A Região Sudeste - onde se localizam as Estradas de Ferro Minas X Rio, Vitória a Minas e do Litoral de São Paulo, por exemplo, é onde estão localizados os maiores graus de susceptibilidade a deslizamento, principalmente pela presença da Serra do Mar (altas declividades), assim como é onde podem ser encontrados graus medianos e altos para erodibilidade e uso e cobertura do solo profundamente antropizados, o que demonstra a falta da vegetação natural. A cobertura vegetal apresenta função importante de proteção do solo contra as diversas situações de desequilíbrio que ocorrem na natureza, causadas, principalmente, por enxurradas que acarretam erosão, lixiviação, entre outras alterações.

Como os componentes vulnerabilidade e exposição foram mantidos ao longo da análise, o fator de variação do risco climático ao deslizamento por cenário e horizonte temporal é a ameaça climática. Entretanto, notou-se que tanto o cenário de emissões intermediárias quanto o de emissões altas não apresentaram variações significativas decorrentes do componente da ameaça climática, conforme pode ser observado na Figura 10, que sintetiza o risco climático devido ao impacto do deslizamento sobre a infraestrutura federal de transporte ferroviária brasileira.

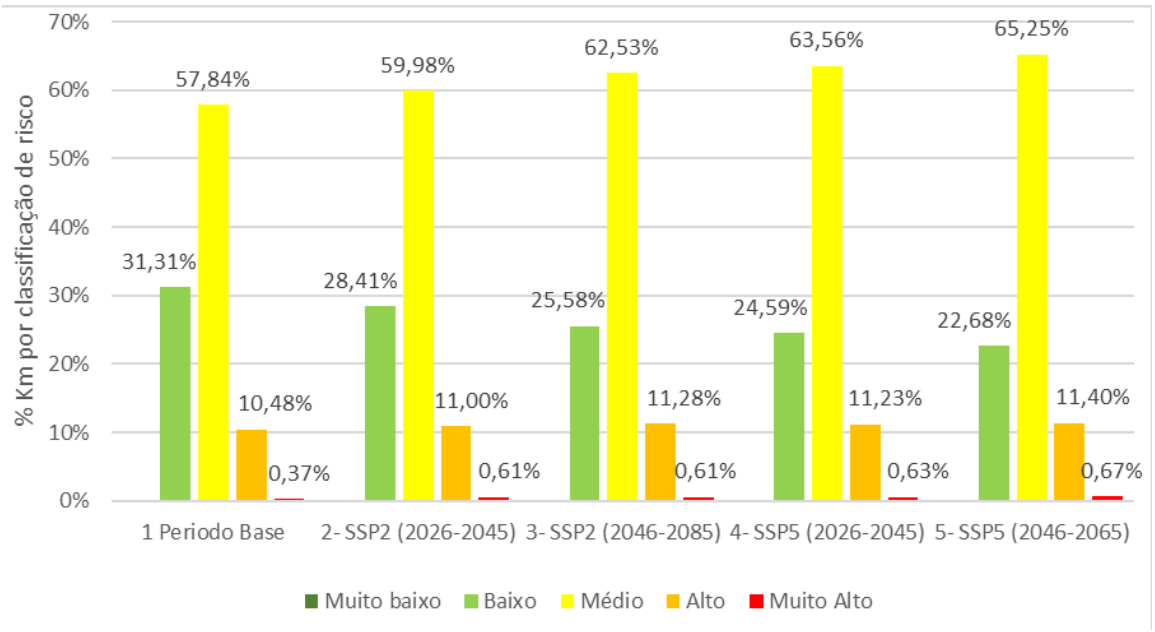
Figura 10 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de deslizamentos.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentado, na Figura 11, a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 11 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 11, para o **período base**, 31,31% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de deslizamento, 57,84% sob risco médio e 10,85% sob risco alto ou muito alto. Trechos com graus alto e muito alto de ameaça representam menos de 1% do total das ferrovias e se encontram no litoral de São Paulo, na chegada ao porto de Santos.

Ainda de acordo com a Figura 11, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045)**, o IRC devido ao impacto de deslizamentos é baixo em 28,41% das ferrovias, médio em 59,98% e alto ou muito alto em 11,61%. Considerando o mesmo cenário, mais um **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se 25,58% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto deslizamentos, 62,53% encontram-se sob médio risco, e 11,89% sob alto ou muito alto risco. Nesse cenário, a maior diferença em relação ao período base é o aumento das áreas de nível médio de risco em 4,69% (de 57,84% para 62,53%) e das áreas de alto e muito alto risco em 1,04% (de 10,85% a 11,89%), enquanto, por sua vez, as áreas de baixo risco sofrem redução de 5,73% (31,31% para 25,58%).

Em um **cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 24,59% das ferrovias encontrar-se-ão sob risco climático baixo devido ao impacto por deslizamentos, 63,56% sob risco médio, e 11,86% sob risco alto ou muito alto. Portanto, conforme aumenta-se o cenário de emissões, considerando-se o mesmo horizonte temporal (curto prazo), verifica-se uma redução percentual de 3,82% da quilometragem de ferrovias sob baixo risco (de 28,41% para 24,59%), enquanto as áreas sob médio e alto/ muito alto risco aumentam, respectivamente, 3,58% (de 59,98% para 63,56%) e 0,25% (de 11,61% para 11,86%). Considerando-se o **cenário de emissões altas com**

horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065), 22,68% da quilometragem de ferrovias se encontrará sob risco climático baixo, 65,25% sob risco climático médio, e 12,07% sob risco climático alto ou muito alto de impacto devido a deslizamentos, conforme também exposto na Figura 11.

De forma geral, observa-se um padrão de redução das extensões de ferrovias sob baixo risco climático ao impacto deslizamento e um aumento de tais extensões sob risco médio ou alto/muito alto, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal. Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática.

A Tabela 2 apresenta o percentual dos trechos por grau de ameaça climática para impactos devido ao deslizamento para cada um dos cenários analisados.

Tabela 2 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Deslizamento) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,04%	74,84%	24,13%	0,89%	0,09%
SSP2 (2026-2045)	0,04%	57,51%	41,77%	0,39%	0,29%
SSP2 (2046-2065)	0,00%	46,56%	52,73%	0,43%	0,29%
SSP5 (2026-2045)	0,00%	39,23%	59,94%	0,54%	0,29%
SSP5 (2046-2065)	0,00%	28,55%	70,65%	0,52%	0,29%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o componente “ameaça climática”, único que varia entre os cenários de emissões, a quilometragem classificada como baixo risco caiu de 74,84% (período base) para 57,51% (SSP2 – 2026-2045). Mantendo-se o horizonte temporal, mas alterando o cenário para SSP5, verifica-se que esse valor cai para 39,23%.

Também se observa um aumento na categoria de médio risco de 24,13% (período base) para 41,77% (SSP2 – 2026-2045) ou para 59,94% (SSP5 – 2026-2045), e as classes de risco alta e muito alta se mantiveram em menos de 1%.

A Tabela 3 apresenta a distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento em cada um dos cenários. A partir desta tabela é possível notar uma tendência ao aumento dos trechos com graus de risco muito alto, alto e médio, e uma consequente diminuição dos trechos com baixo nível, tendência essa já mencionada anteriormente.

Tabela 3 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento, para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	5.589,53	10.327,06	1.871,71	66,44
SSP2 (2026-2045)	0	5.062,38	10.687,70	1.959,62	108,27
SSP2 (2046-2065)	0	4.558,17	11.141,15	2.010,39	108,27
SSP5 (2026-2045)	0	4.380,91	11.324,96	2.000,40	111,71
SSP5 (2046-2065)	0	4.040,57	11.626,18	2.031,98	119,24

Fonte: Elaboração própria (2022).

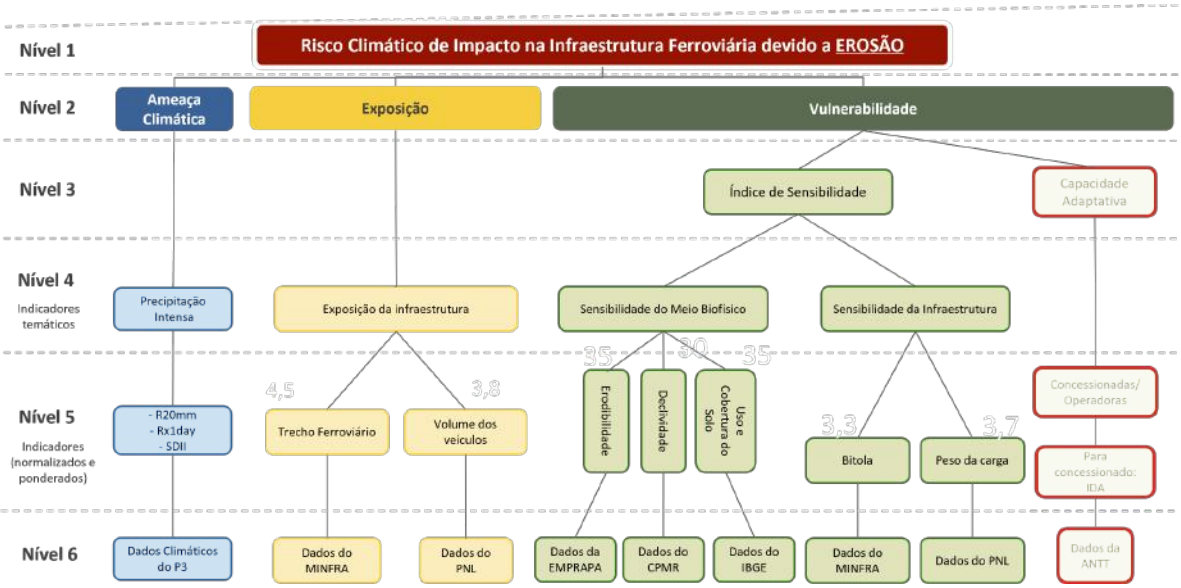
Do período base para o cenário pessimista de médio prazo (SSP5 2046-2065), os trechos com grau muito alto de risco climático aumentam 79%, enquanto os trechos de baixo risco tem uma redução de 28%; já as extensões de médio e alto grau de risco aumentam 13% e 9%, respectivamente. No período base cerca de 58% das ferrovias analisadas têm médio grau de risco climático devido a deslizamento, enquanto no SSP5 (2046-2065) 65% da malha encontra-se nesse nível.

Apesar do agravamento do grau de risco observado, as áreas de alto e muito alto risco continuam representando entre 11% e 12% da malha ferroviária em todos os cenários, havendo pouca variação. Cerca de 2000 km de ferrovias no Brasil se encontram com alto e muito alto grau de risco climático a impactos devido ao deslizamento.

3.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão

O IRC para a infraestrutura ferroviária devido a erosão foi calculado a partir dos dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 12, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou maior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia;
- SDII: índice de intensidade de precipitação simples.

Já para compor o subíndice de exposição, como em todos os cenários, foram considerados os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dados do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura. Os indicadores para sensibilidade do meio biofísico utilizados foram:

- Erodibilidade (dados da EMBRAPA);
- Declividade (dados do CPRM); e
- Uso e Cobertura do Solo (dados do IBGE).

Por sua vez, os indicadores temáticos para sensibilidade da infraestrutura utilizados foram:

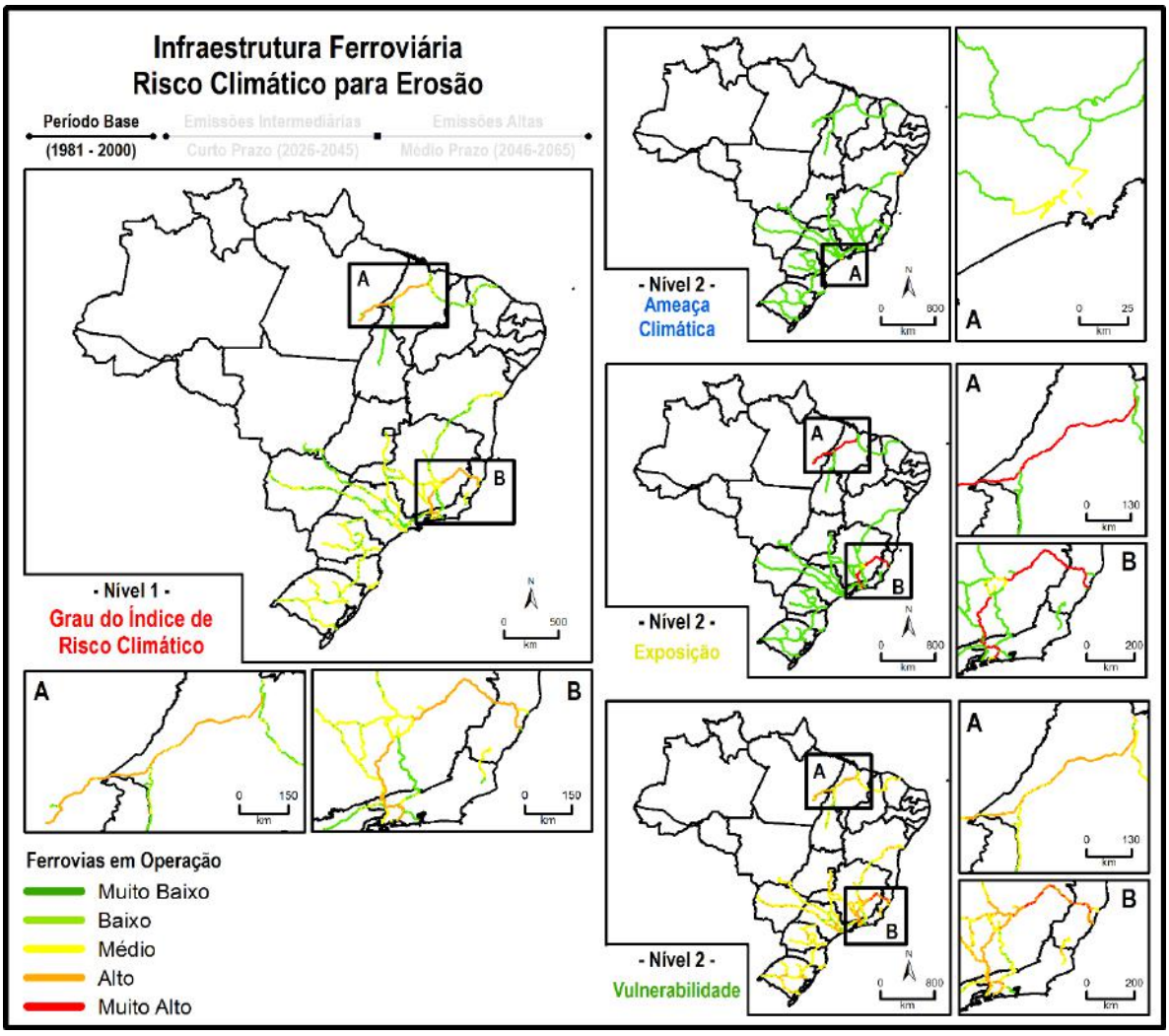
- Bitola (dados do MInfra); e
- Peso da carga (dados do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários de análise: período base (1981-2000); emissões intermediárias (SSP2-4.5) de curto (2026-2045) e médio prazo (2046-2065); e emissões altas (SSP5-8.5) para os mesmos horizontes temporais de curto e médio prazo.

3.2.1 Período base | Erosão

A Figura 13 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o período base.

Figura 13 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se na Figura 13 que os trechos de ferrovias sinalizados com médio e alto grau de IRC a erosão são:

- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Rio de Janeiro/Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

Por sua vez, as ferrovias da Região Sul apresentam risco climático médio a erosão, bem como, parte das ferrovias da região Centro-Oeste e norte do estado da Bahia.

O subíndice do componente de risco "ameaça climática de erosão" para o período base foi

considerado baixo em quase a totalidade do país (98,23%). No que diz respeito à vulnerabilidade à erosão, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos de grau alto e muito alto se concentram nas ferrovias Rio de Janeiro/Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio), Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas) e Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás). Isso se deve à sensibilidade da infraestrutura, mais especificamente ao peso da carga e pela sensibilidade do meio biofísico. Em parte do Estado do Maranhão, a sensibilidade do meio biofísico apresenta níveis altos de erodibilidade e uso e cobertura do solo, o que pode ser verificado exatamente no trecho onde está localizada a Estrada de Ferro Carajás, o qual está intensamente antropizado.

Os trechos com grau muito alto de **exposição** são aqueles das ferrovias que apresentam maior tráfego de composições, especialmente as estradas de ferro associadas ao escoamento da produção mineral brasileira. Portanto, as ferrovias mais expostas são:

- MRS Logística: Minas Gerais, Portos de Santos e Rio de Janeiro;
- Vale S.A. Estrada do Carajás: Carajás (PA) até São Luís (MA); e
- Vale S.A. Estrada de Ferro Vitória a Minas: interior de Minas Gerais até o porto do Espírito Santo.

Assim como ocorreu com a análise do risco climático para o impacto de deslizamentos, os mapas de vulnerabilidade e de exposição ao risco climático de erosão se repetirão para todos os cenários. Portanto, não serão analisados e discutidos nas seções e subseções seguintes, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor.

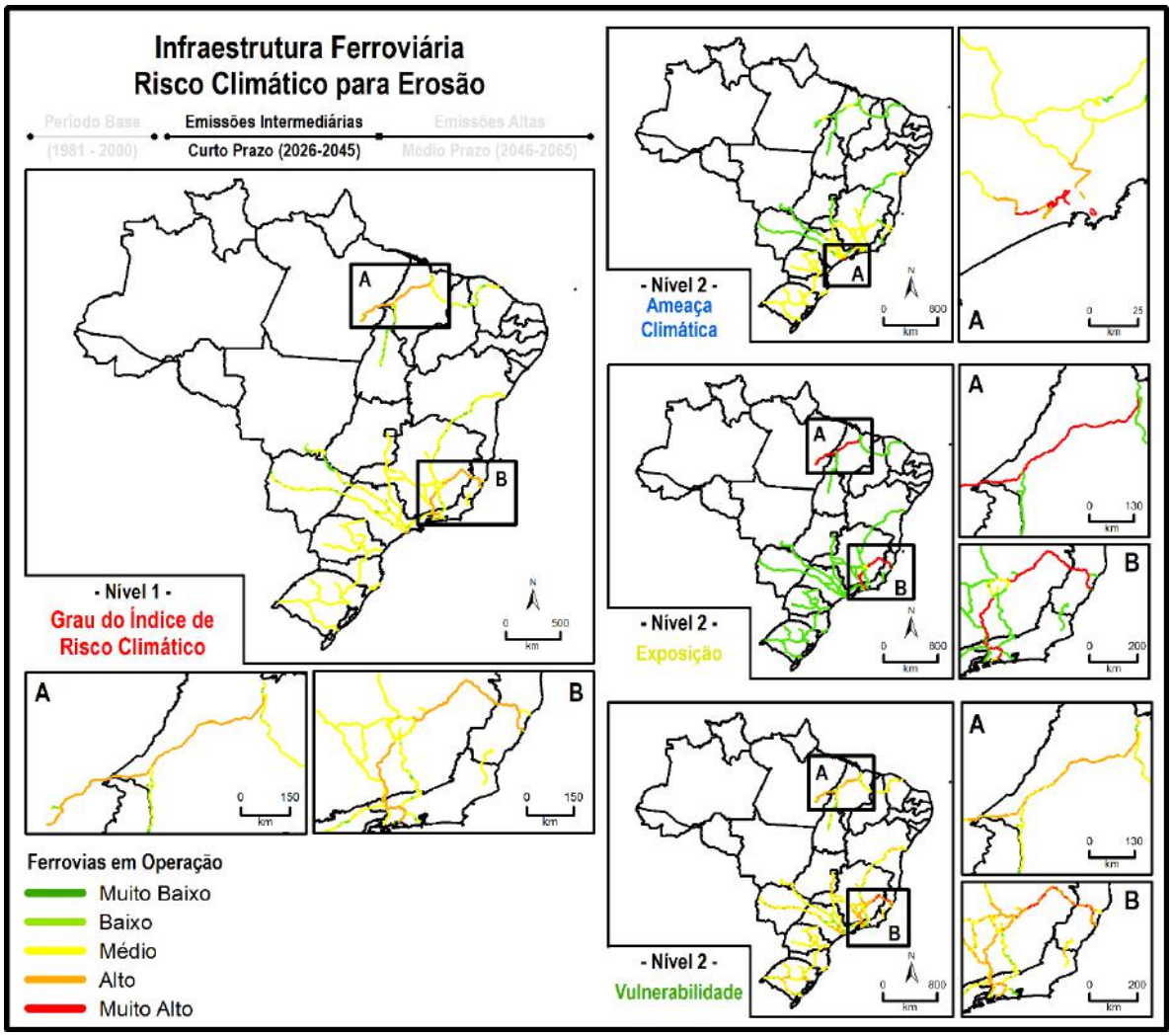
3.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto da erosão, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto e médio prazo.

3.2.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 14 apresenta os mapas resultantes das análises com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 14 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo, que apresentam risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), devido ao volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e ao peso da carga e aos indicadores de sensibilidade do meio biofísico à erosão, que compõem o componente vulnerabilidade.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.);
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

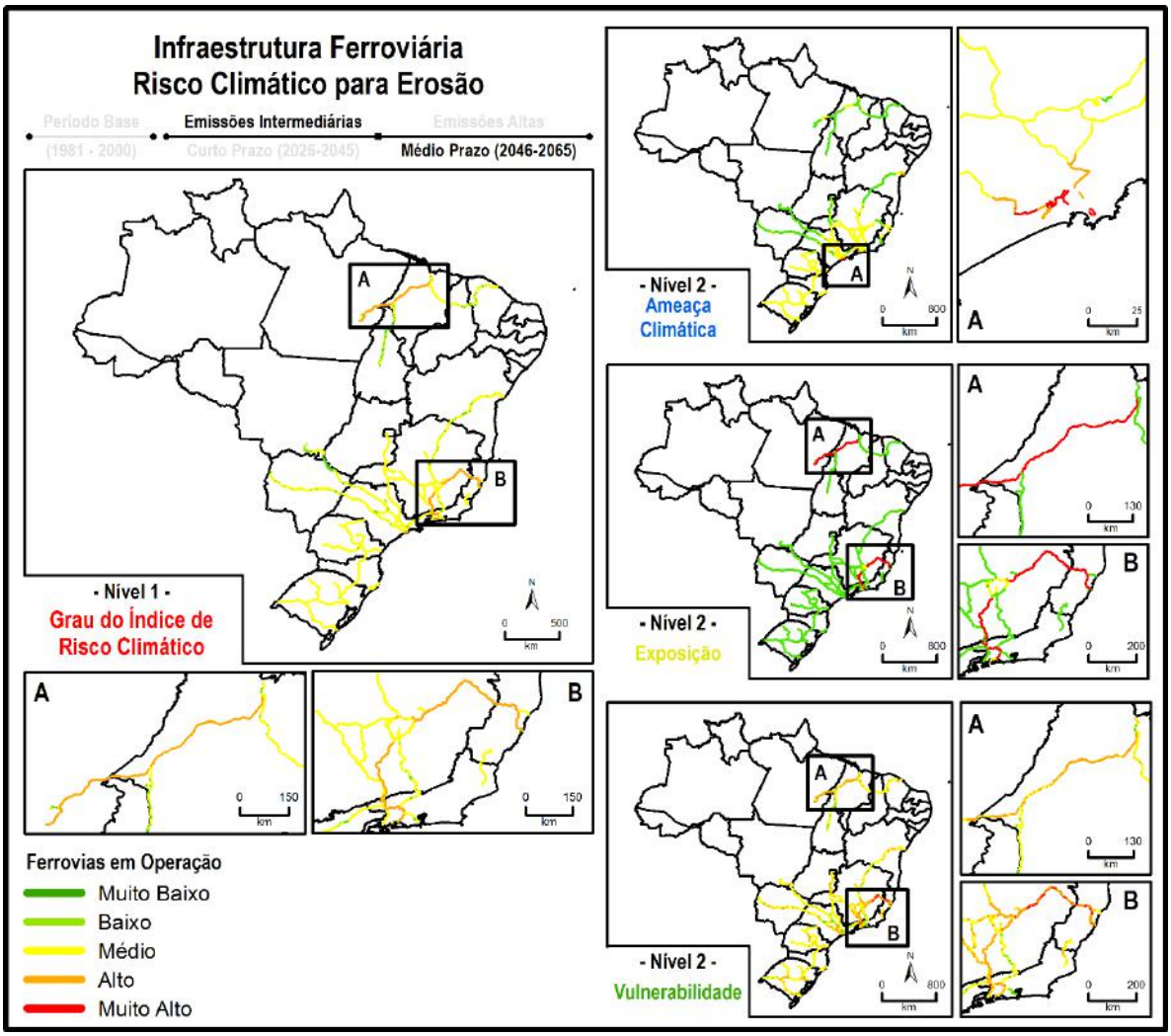
Nesse cenário, ocorre um aumento do risco na maior parte das ferrovias, que passam de baixo (período base) para médio risco. Apenas um trecho da Ferrovia Norte Sul em Tocantins e alguns trechos de ferrovias localizados em diversos estados da região Centro-Oeste e na Bahia permanecem com baixo risco climático de impacto na infraestrutura devido à erosão.

Para o componente do risco ameaça climática, mudanças importantes ocorreram nas regiões Sul e Sudeste se comparado ao período base: graus medianos e alto de ameaça à erosão podem ser verificados na Estrada de Ferro do Litoral (SP); nas regiões Norte e Nordeste, pequenos trechos da Estrada de Ferro Carajás apresentam graus medianos, e, especialmente no litoral da Bahia, pode ser observado graus medianos e altos na Estrada de Ferro Belo Horizonte x Salvador. Contudo, nas demais regiões brasileiras as mudanças foram pouco perceptíveis.

3.2.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 15.

Figura 15 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), conforme apresentado na Figura 15.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Considerando-se este cenário de emissões intermediárias em um horizonte temporal de médio prazo em relação ao período base, a maior parte das ferrovias passa de baixo para médio risco. Foram mantidos em baixo risco apenas trechos nos estados do Tocantins e da Bahia, e na região Centro Oeste.

O resultado da ameaça climática à erosão não sofreu alteração significante se comparada ao resultado do horizonte de curto prazo em um cenário de emissões intermediárias, com quase a totalidade da malha apresentando risco baixo e médio.

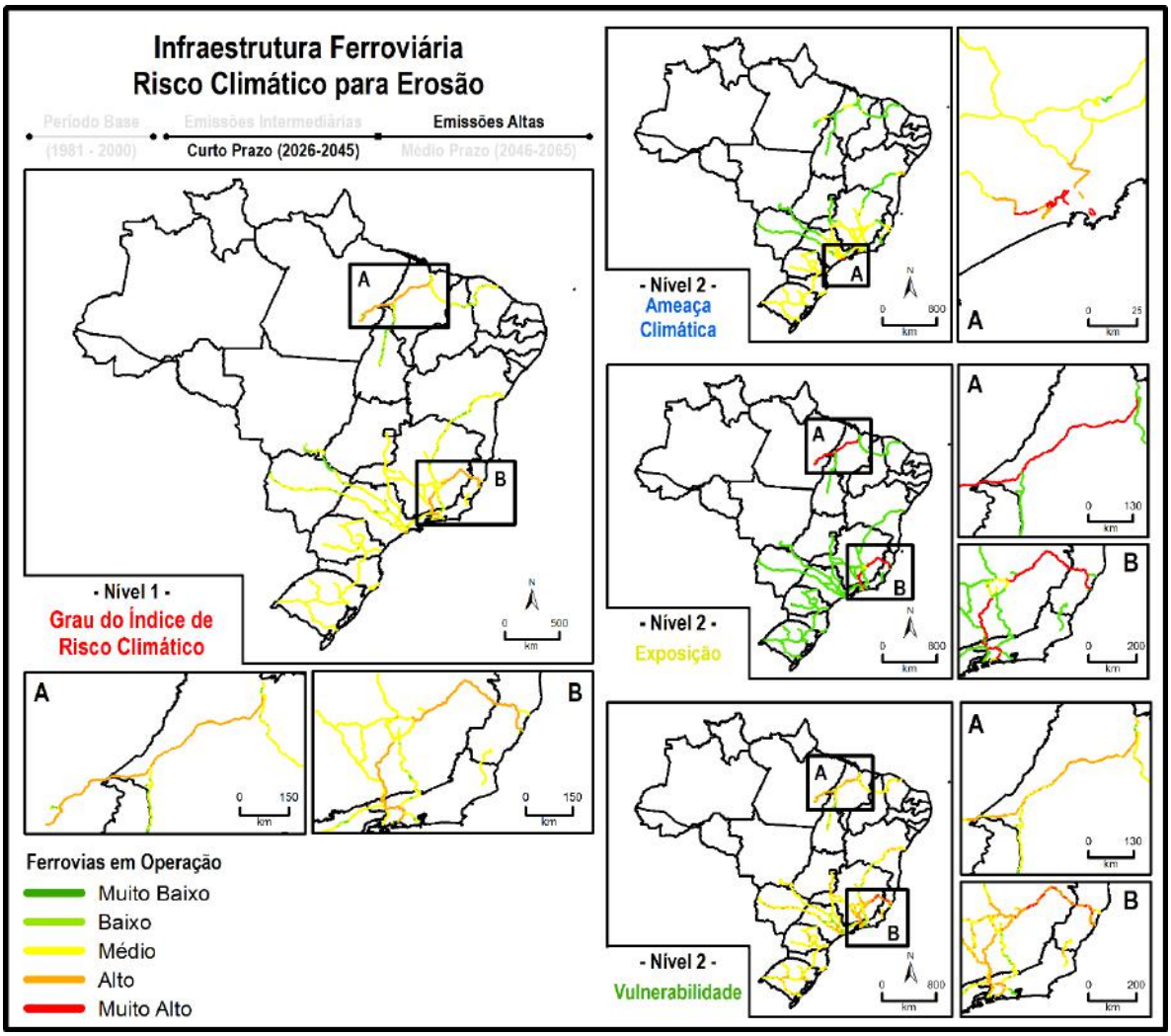
3.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de erosão na infraestrutura ferroviária considerando-se um cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

3.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 16 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).

Figura 16. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), conforme apresentado na Figura 16.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Para o cenário de emissões altas em um horizonte temporal de curto prazo em relação ao período base, a maioria das ferrovias passa de baixo risco para médio risco; apenas trechos de ferrovia nos estados de Tocantins e da Bahia e poucos trechos de ferrovias na região Centro-Oeste se mantiveram com risco baixo.

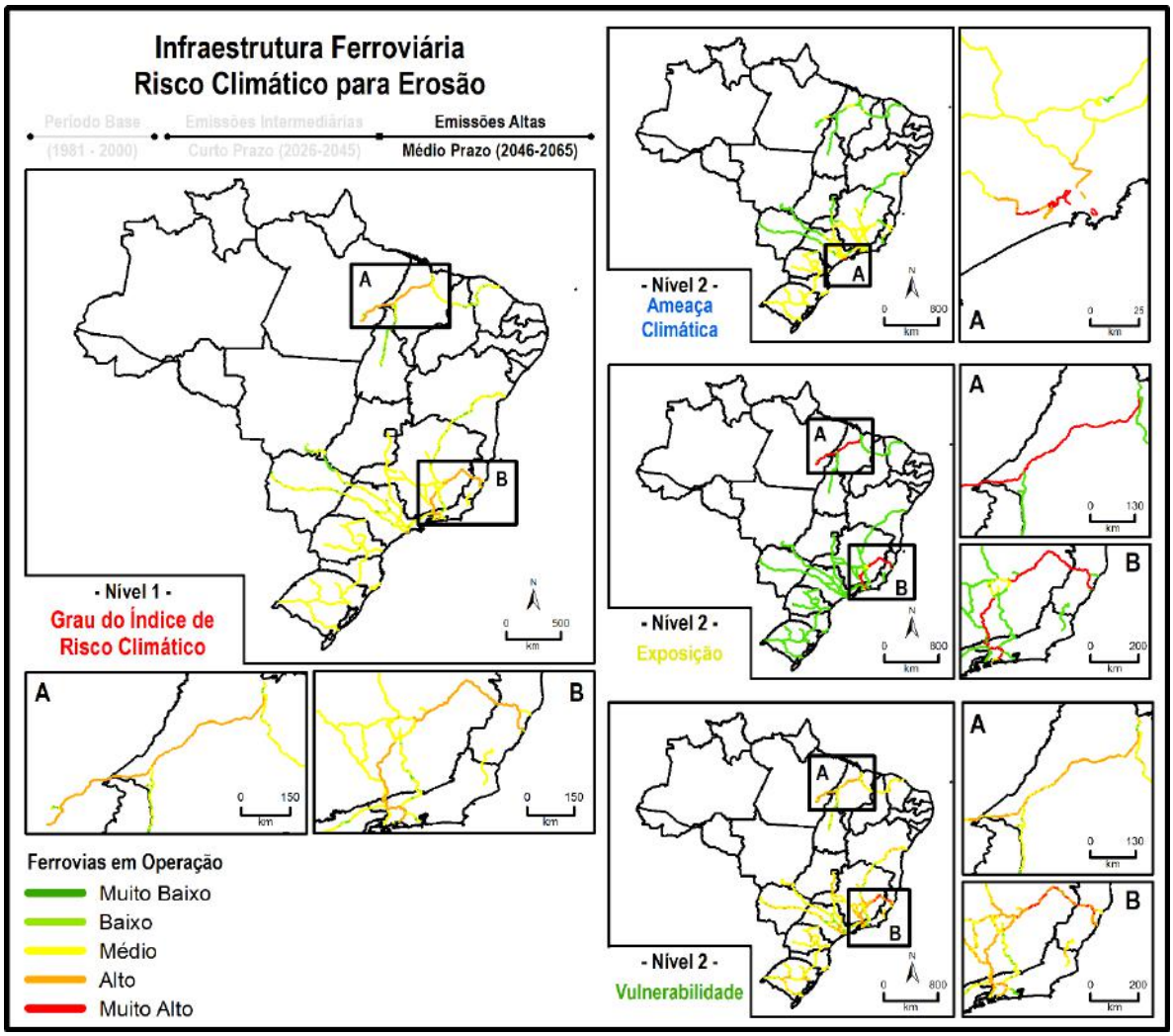
A ameaça climática resultante da erosão ficou próxima ao resultado encontrado considerando-se o cenário de emissões anteriormente apresentado (cenário de emissões intermediárias em um

horizonte temporal de médio prazo). Com isso, quase toda a malha apresenta baixo e médio risco, e a variação de risco entre os cenários foi considerada pouco significativa.

3.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 17 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, de exposição e de vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).

Figura 17 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos, conforme apresentado na Figura 17, continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), tal qual apresentado para o período base e nos cenários e horizontes temporais anteriores.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Para o cenário de emissões altas em um horizonte temporal de médio prazo (2046-2065), a maior parte das ferrovias passa de baixo risco (segundo o período base) para médio risco, mantendo com risco baixo apenas em trecho do Estado do Tocantins e trechos selecionados na região Centro-Oeste e no Estado da Bahia.

O índice da ameaça climática devido à erosão obteve resultado próximo ao encontrado para o cenário de emissões intermediárias, bem como para o horizonte temporal de curto prazo nesse cenário de emissões (alta). Portanto, quase a totalidade da malha ferroviária brasileira apresenta baixo e médio risco climático em sua infraestrutura devido ao impacto da erosão, e a variação de risco entre os cenários foi pequena.

3.2.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto de erosão

Os trechos ferroviários que apresentaram alto grau de risco climático devido ao impacto de erosão em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo foram:

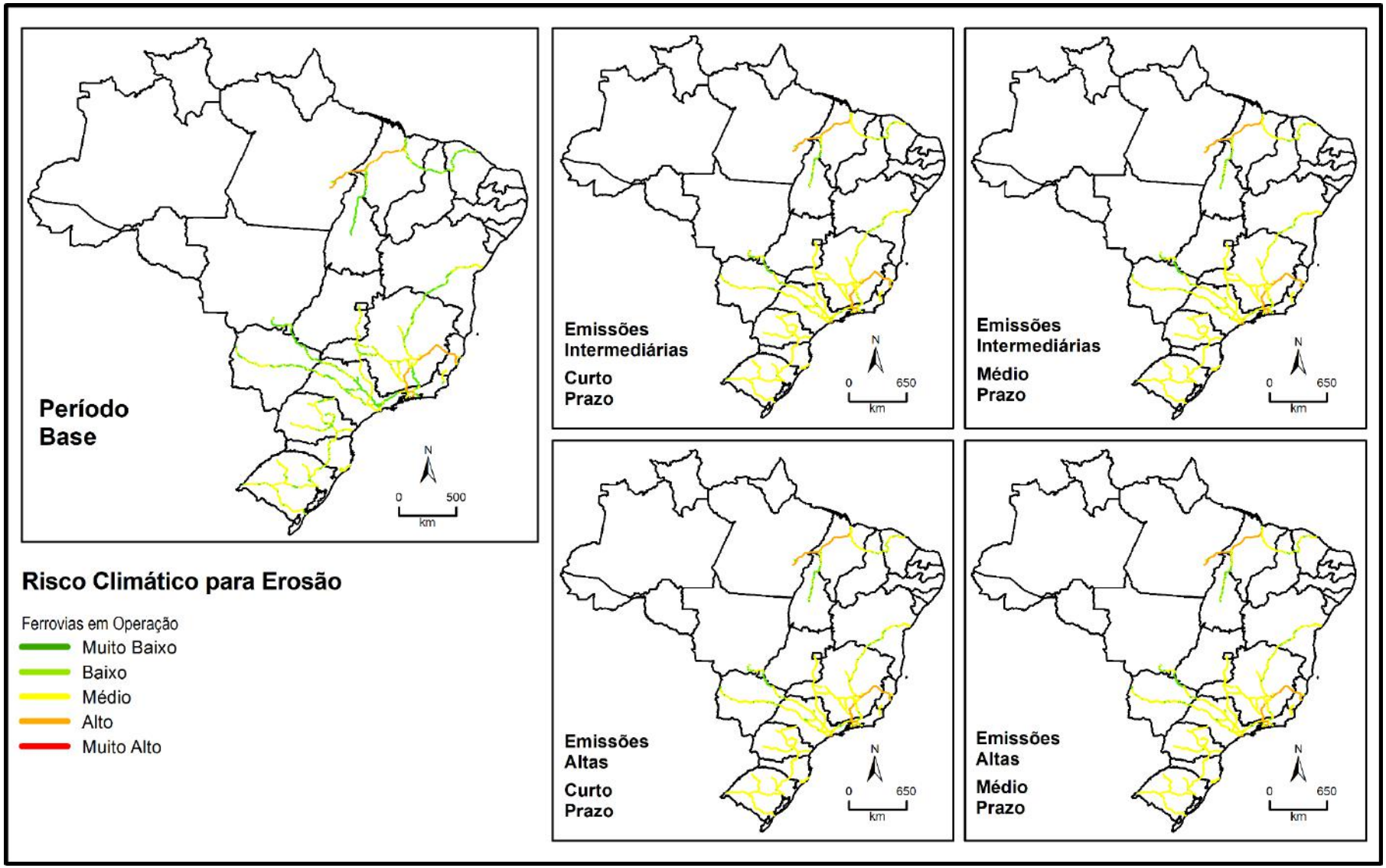
- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas X Rio, operada pela MRS Logística);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

Estas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e elevado peso de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura. Além disso, um destaque especial pode ser dado à sensibilidade do meio biofísico dessas regiões conforme já elucidado na Seção 3.1.4.

De modo geral, a infraestrutura da malha ferroviária federal brasileira apresenta médio risco climático devido ao impacto da erosão, já que não existem extensas quilometragens de ferrovias com vulnerabilidade ou ameaça altas ou muito altas.

Entretanto, tanto para o cenário de emissões intermediárias quanto para o de emissões altas, independentemente do horizonte temporal considerado, não houve grandes variações do risco climático. A Figura 18 apresenta a síntese dos mapas apresentados para o risco climático na infraestrutura ferroviária federal brasileira devido ao impacto da erosão.

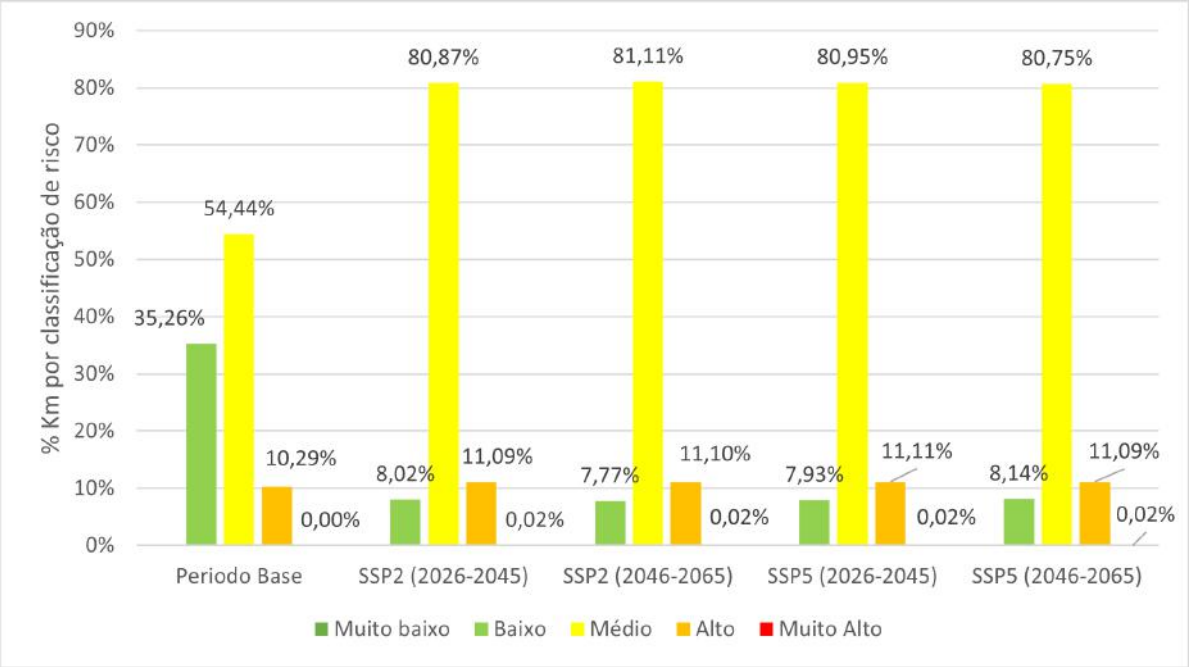
Figura 18 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentada a Figura 19, com a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão.

Figura 19 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 19, notam-se poucas variações entre os graus de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) entre os cenários e projeções, porém notável diferença entre o período base e demais cenários. Em todos os cenários e horizontes temporais considerados, 11% da malha ferroviária se encontra em áreas de alto risco. Além disso, entre o período base e os cenários futuros, há um aumento de 27% na distribuição da quilometragem das ferrovias com risco climático médio. Entretanto, esse aumento não se torna uma tendência ao longo dos diferentes horizontes temporais ou cenários de emissões, já que, independentemente do cenário avaliado, 81% das ferrovias se mantêm com risco climático médio devido ao impacto da erosão. Para o período base, 35% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão, 54% sob risco médio e 10% sob risco alto.

Ainda de acordo com a Figura 19, para os cenários e horizontes subsequentes, o IRC devido ao impacto de erosão é baixo em 8% das ferrovias, médio em 81% e alto 11%. Essa constância no valor do índice de risco climático entre os diferentes cenários decorre do componente ameaça, apresentado na Tabela 4, a qual apresenta o percentual da quilometragem das ferrovias de acordo com o grau de ameaça climática para impactos devido à erosão para o período base e em cada um dos cenários analisados.

Tabela 4 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Erosão) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,04%	98,23%	1,38%	0,34%	0,00%
SSP2 (2026-2045)	0,00%	38,38%	60,07%	1,27%	0,29%
SSP2 (2046-2065)	0,00%	38,01%	60,43%	1,27%	0,29%
SSP5 (2026-2045)	0,00%	38,55%	59,85%	1,31%	0,29%
SSP5 (2046-2065)	0,00%	38,64%	59,79%	1,28%	0,29%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 4, para o componente "ameaça climática", observa-se que a maior diferença se dá entre o período base e todos os demais cenários. Nas projeções, aproximadamente 60% da malha ferroviária apresenta níveis médios de ameaça climática, enquanto, no período base, praticamente todo o território apresenta baixa ameaça climática devido ao impacto à erosão. Isso pode ser explicado pela diferença existente no cálculo da ameaça climática que, no período base, se dá por meio de dados do histórico de clima observados, enquanto para os cenários futuros utiliza projeções.

A Tabela 5 apresenta a distribuição da quilometragem das ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão para cada um dos cenários analisados. Observando-se a tabela é possível notar que há pouca variação com relação à quilometragem suscetível a impactos devido à erosão entre os cenários futuros e horizontes temporais.

Tabela 5 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	6.284,69	9.703,31	1.834,26	-
SSP2 (2026-2045)	0	1.429,95	14.418,26	1.976,83	3,35
SSP2 (2046-2065)	0	1.385,70	14.460,04	1.979,29	3,35
SSP5 (2026-2045)	0	1.413,37	14.431,79	1.979,87	3,35
SSP5 (2046-2065)	0	1.451,97	14.395,87	1.977,20	3,35

Fonte: Elaboração própria (2022).

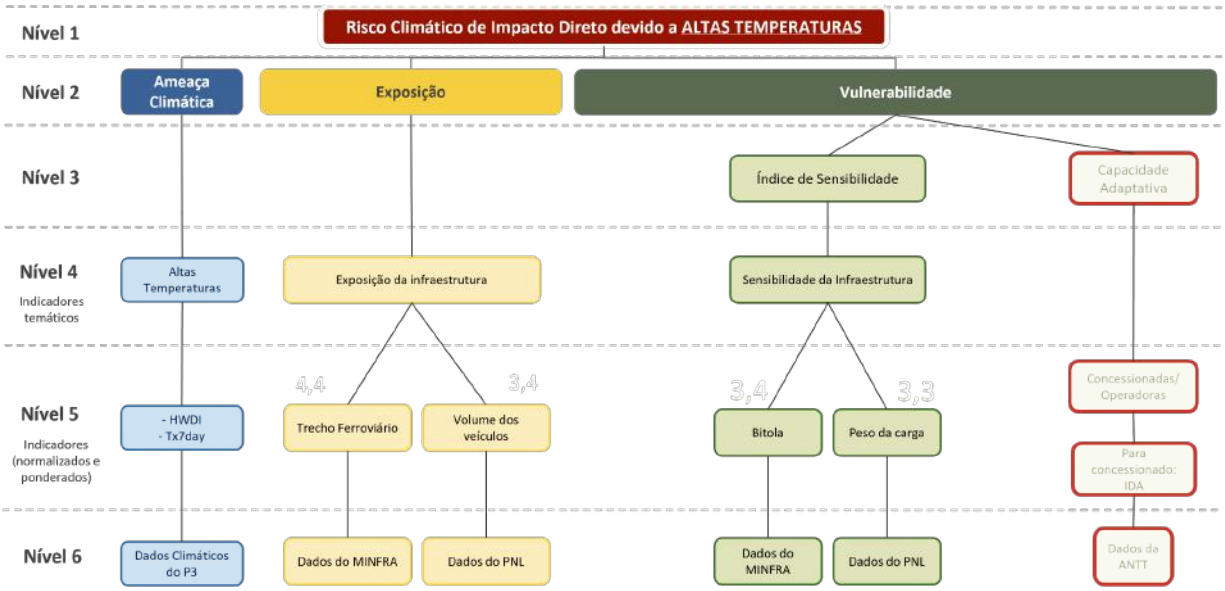
Apesar da pequena variação entre as quilometragens distribuídas em cada categoria de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto), vale a pena ressaltar, como dito anteriormente, a diferença

entre a quilometragem com risco baixo de impacto devido à erosão entre o período base (6.284,69 Km, equivalente a 35% da malha ferroviária) e os demais cenários - uma redução de cerca de 77% - e o surgimento de trechos de ferrovias com risco muito alto de impacto devido à erosão em todas as projeções realizadas.

3.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

O IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas para a infraestrutura ferroviária foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e dos subíndices sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático na infraestrutura ferroviária devido ao impacto direto de altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme expresso na Figura 20, para compor o subíndice de ameaça climática (ou indicador temático de altas temperaturas), foram considerados os dados de:

- HWDI: duração de ondas de calor (em dias); e
- Tx7day: média de temperatura dos 7 (sete) dias consecutivos mais quentes do ano.

Para o subíndice de exposição, como em todos os cenários, foram considerados os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dados do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, como nos demais impactos considerados, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

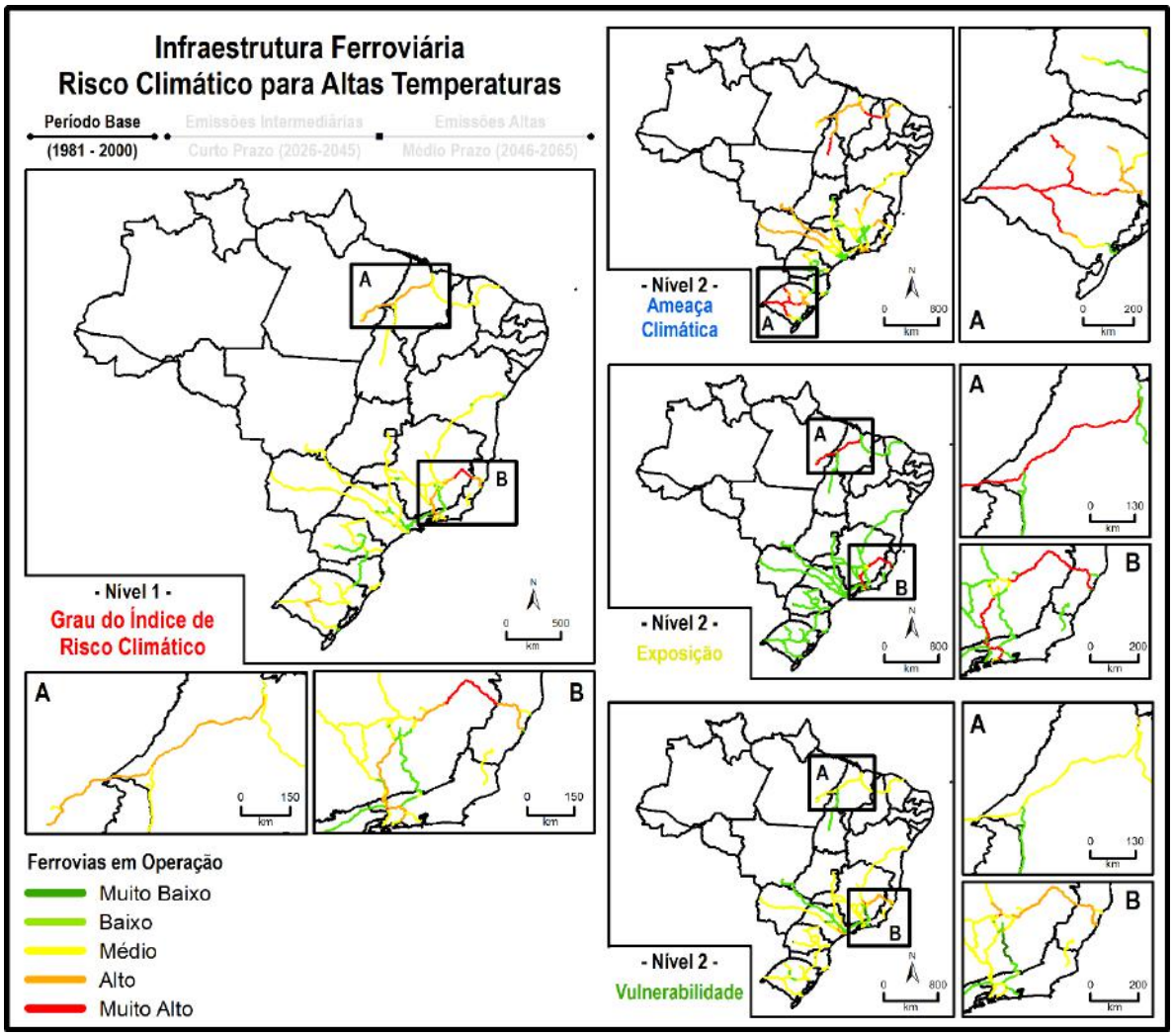
Além disso, como se trata de um impacto direto na infraestrutura ferroviária, não há sensibilidade do meio biofísico; portanto, o subíndice de vulnerabilidade para o impacto direto devido às altas temperaturas foi composto apenas pela sensibilidade da infraestrutura (dados de bitola, provenientes do MInfra, e peso da carga, do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários de análise: período base (1981 - 2000); emissões intermediárias (SSP2-4.5), para horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065); e emissões altas (SSP5-8.5), para os mesmos horizontes temporais.

3.3.1. Período base | Altas temperaturas

A Figura 21 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o mapa de IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas (Nível 1), para o período base.

Figura 21. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 21, os maiores IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária federal brasileira foram observados na Região Sudeste, com destaque para os estados de Minas Gerais e do Espírito Santo (onde se verificam graus alto e muito alto de impacto), bem como, Rio de Janeiro (com grau alto). Também se destacam, no Norte/ Nordeste, o eixo Pará-Maranhão (grau alto), e no Sul, um trecho no Rio Grande do Sul, entre Cacequi e Dilermando de Aguiar (grau alto).

Tais trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A); e
- Rio Grande do Sul entre Cacequi e Dilermando de Aguiar (Estrada de Ferro Porto Alegre-Uruguaiana).

Os riscos climáticos calculados para essas ferrovias advêm principalmente da exposição, devido ao volume de veículos que trafegam nesses trechos, e da vulnerabilidade, relacionada especificamente ao peso da carga transportada (sensibilidade de infraestrutura). Para o cálculo da vulnerabilidade, diferente dos impactos intermediários (ou indiretos) apresentados anteriormente, como se trata de um impacto direto na infraestrutura, não foram considerados indicadores de sensibilidade do meio biofísico. Os trechos com maiores graus (alto e muito alto) de sensibilidade da infraestrutura se localizam no trecho Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas).

Por fim, com relação à ameaça climática, destacam-se as ferrovias localizadas no estado do Rio Grande do Sul, no trecho entre Uruguaiana e Santa Maria (Estrada de Ferro Porto Alegre-Uruguaiana), que apresentam alto grau de ameaça climática calculado para o período de base.

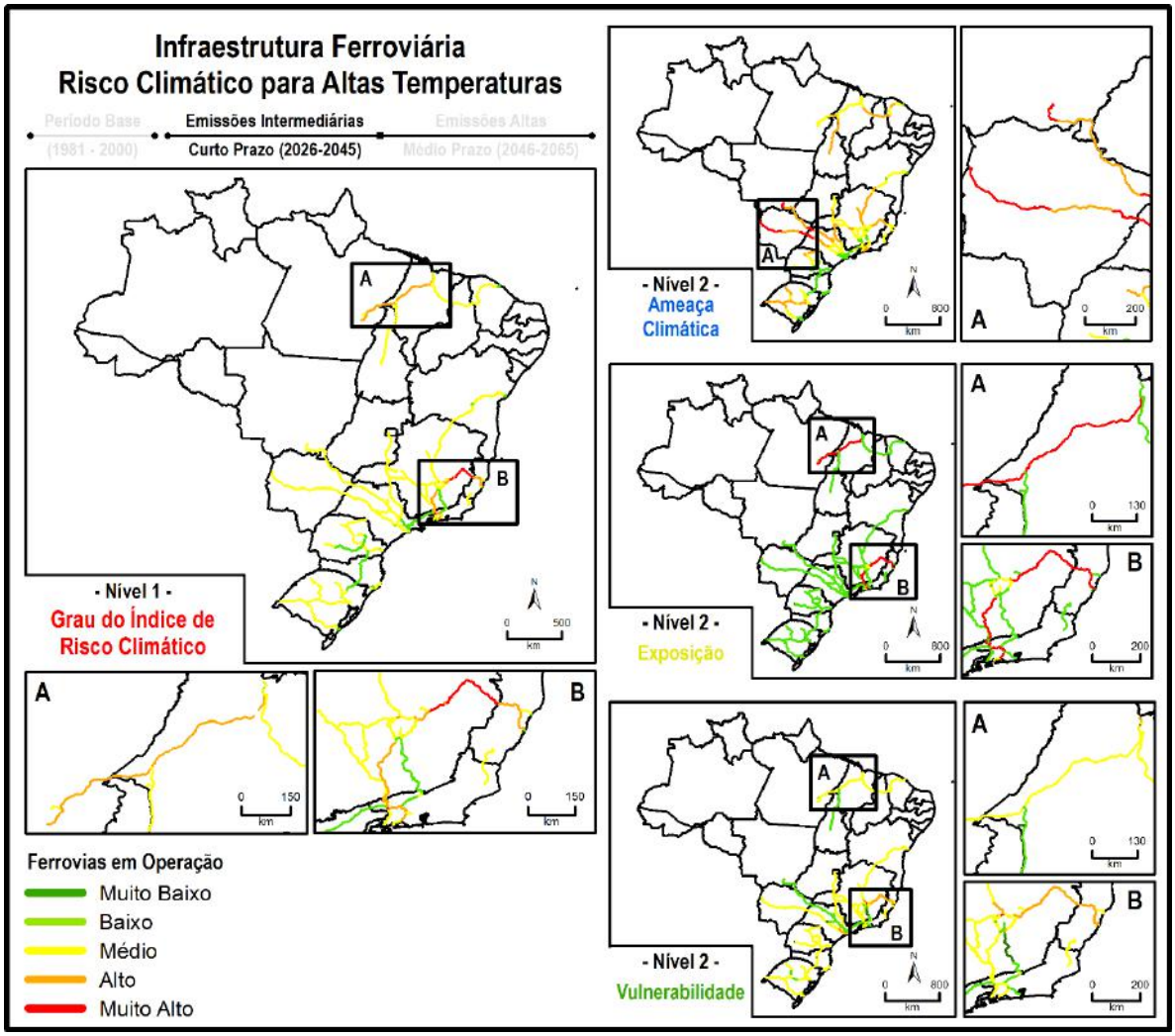
3.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura ferroviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias nos horizontes temporais de curto (2026 - 2045) e médio (2046 - 2065) prazos.

3.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 22 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026 - 2045).

Figura 22 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com maiores graus de IRC se concentram na região Sudeste, nos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, e na Região Norte/Nordeste, no Eixo Pará-Maranhão, conforme apresentado na Figura 22. Conforme apresentado na Seção 3.3.1 para o período base, aqui o elevado IRC também decorre do volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e do peso da carga, que compõe o componente de vulnerabilidade.

Os trechos com maior risco climático encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

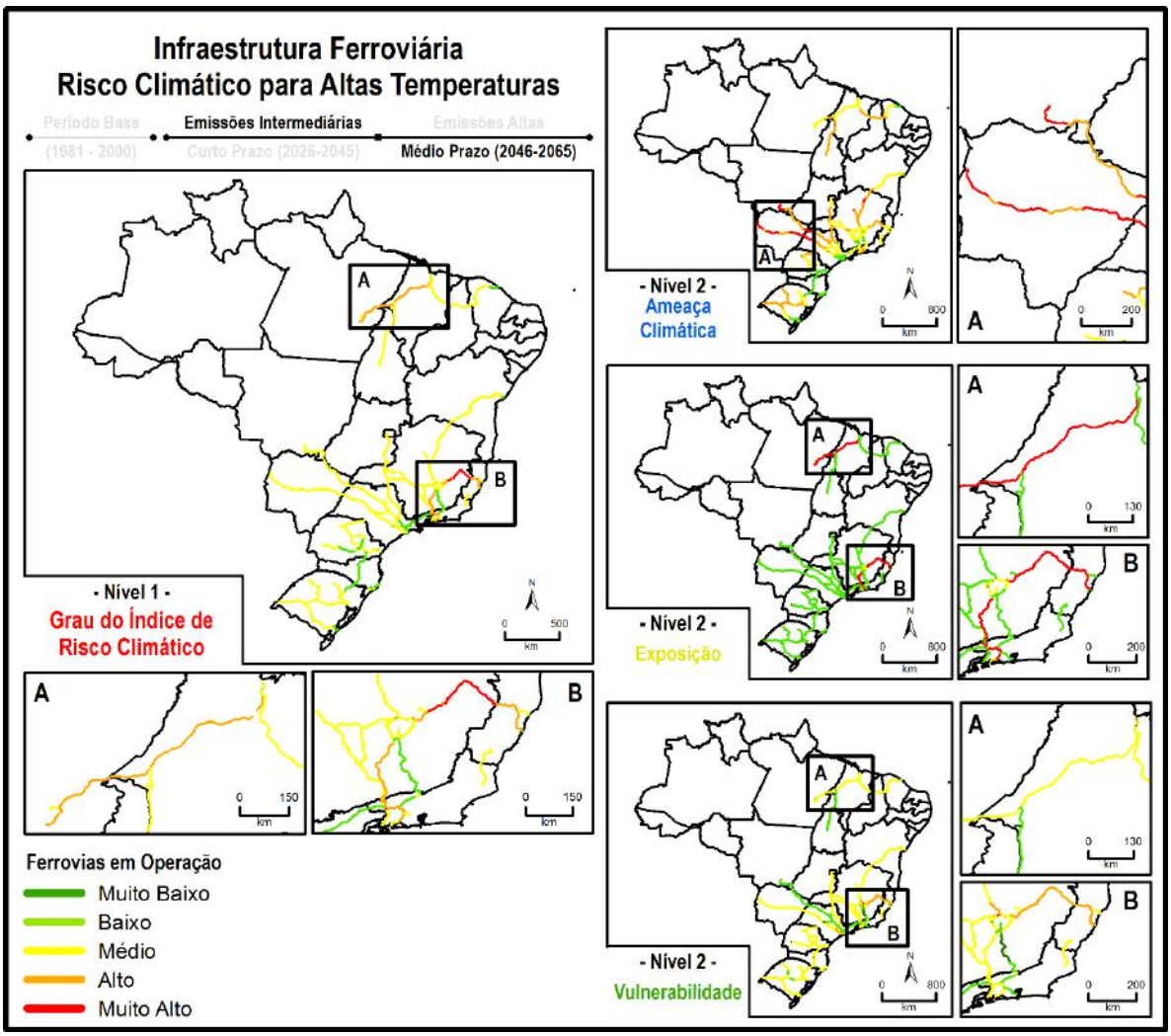
Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no componente de ameaça climática, em que a malha do Estado do Rio Grande do Sul - especificamente no trecho de Santa Maria a Uruguaiana (RMS EF 153, EF 290, EF 497 ou Estrada de Ferro Porto Alegre - Uruguaiana) - passa de grau muito alto para alto, e partes dos estados da Região Centro-Oeste (MS e MT), em que

os Estados do Mato Grosso (EF 364 RMN ou Ferrovia Norte do Brasil) e Mato Grosso do Sul (Estrada de Ferro 265 - RMO ou Estrada de Ferro Noroeste do Brasil) que passaram de grau alto para grau muito alto. Alguns trechos de ferrovias no Maranhão e em Minas Gerais se mantém com alto grau de ameaça climática.

3.3.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065) são apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se a manutenção das principais ferrovias sob risco de impacto direto devido a altas temperaturas, se comparado ao cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). A principal diferença está no aumento da ameaça climática nas ferrovias da

região Centro-Oeste, com destaque para a Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, tendência essa já observada entre o período base e o cenário SSP2 2026-2045.

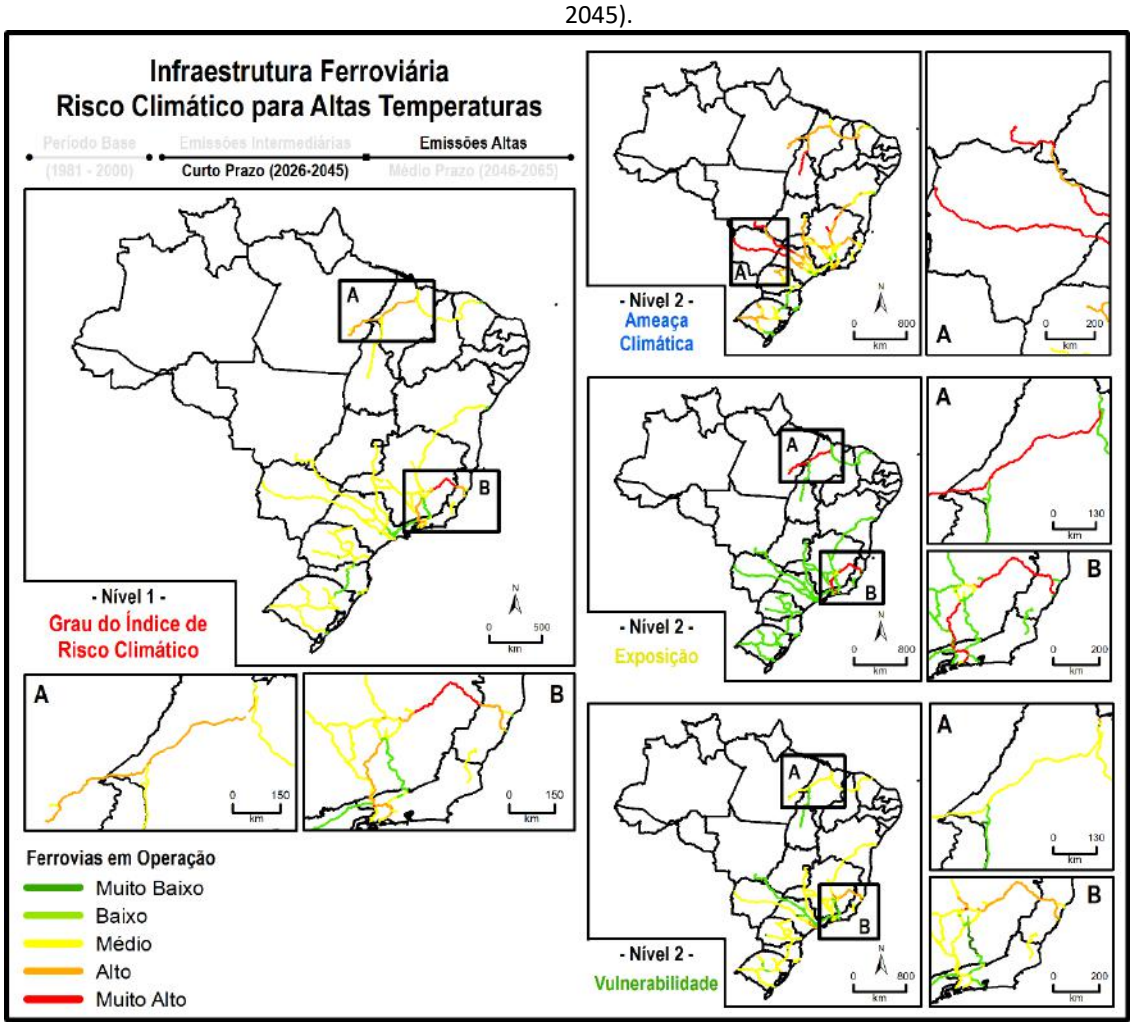
3.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nessa subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura ferroviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

3.3.3.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 24 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).

Figura 24 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando a Figura 24, nota-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas se concentram na região Sudeste (especificamente entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e Minas Gerais e Rio de Janeiro), e na Região Norte/Nordeste, no Eixo Pará-Maranhão, onde trafegam os maiores volumes de veículos e de peso de carga (componente exposição). Tais trechos equivalem às ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

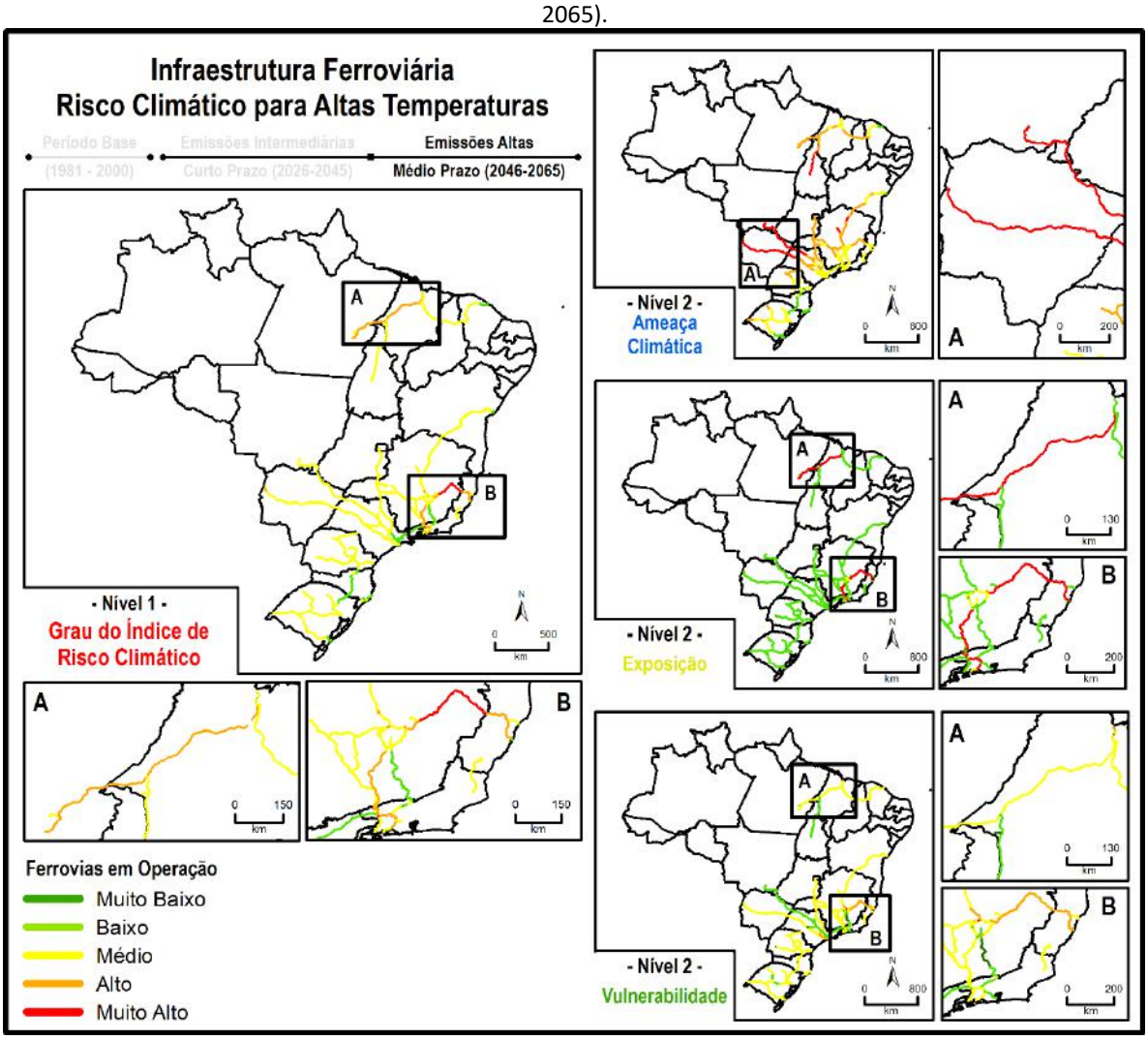
Para esse cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo, na região Centro-Oeste, praticamente toda a extensão da Ferrovia Norte do Brasil, localizada no estado do Mato Grosso (EF 364 Rumo Malha Norte - RMN), e da Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, localizada no estado do Mato Grosso do Sul (EF 265 – Rumo Malha Oeste - RMO), aparecem com grau muito alto de ameaça climática devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Além disso, notam-se outros trechos em que o subíndice de ameaça climática foi elevado: entre os estados de Minas Gerais - Bahia (FCA - Estrada de Ferro 116) e em toda a malha ferroviária dos estados do Pará e do Maranhão, que apresentam, nesse cenário (SSP5 2026-2045), alto grau de ameaça climática.

3.3.3.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 25 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).

Figura 25. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Verifica-se, pela Figura 25, pouca variação das áreas de alto risco climático de impacto direto na infraestrutura ferroviária devido às altas temperaturas para este horizonte de médio prazo (em comparação com o horizonte temporal de curto prazo, considerando-se o mesmo cenário de emissões - ver Subseção 3.3.3.1). No entanto, observa-se uma expansão das áreas de alto e muito alto grau de ameaça climática, que se amplia e passa a atingir áreas de ferrovias localizadas na Região Noroeste do Estado de São Paulo, especificamente na Estrada de Ferro Noroeste do Brasil (operada pela Rumo Logística).

Assim como observado para o horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045), praticamente toda a extensão da Ferrovia Norte do Brasil, no estado do Mato Grosso (EF 364 RMN), e da Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, no Mato Grosso do Sul (EF 265 - RMO), aparecem com grau alto de ameaça climática nesse cenário (SSP5 2046-2065). Além disso, notam-se trechos que também apresentam alto grau de ameaça climática entre Minas Gerais e Bahia (FCA - Estrada de Ferro 116) e em toda a malha ferroviária localizada nos estados do Pará e do Maranhão.

3.3.4 Análise do Risco Climático devido ao Impacto Direto de Altas temperaturas

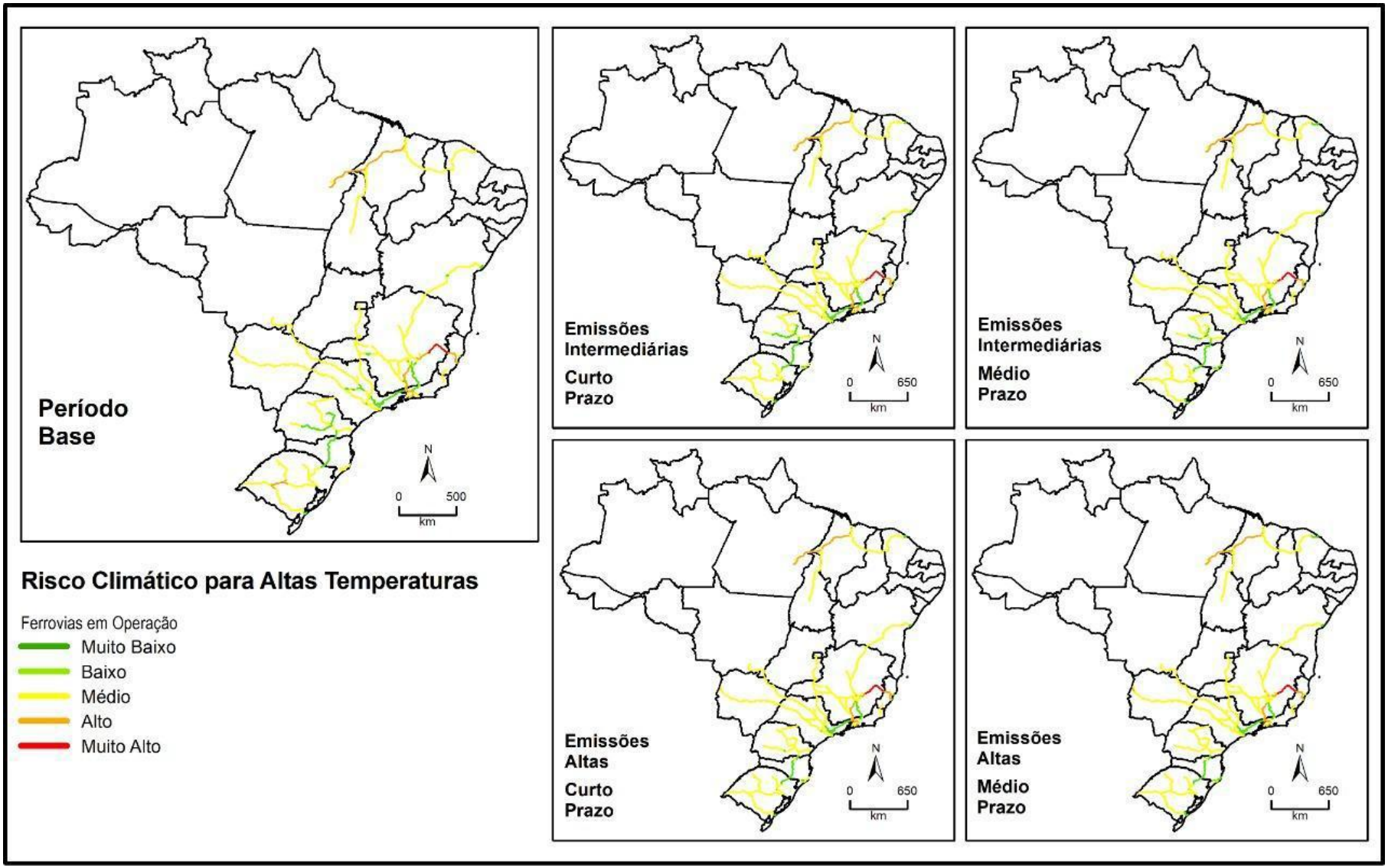
Os trechos ferroviários que apresentaram os maiores IRC devido às altas temperaturas, em todos os cenários e horizontes temporais considerados no presente projeto, foram:

- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Rio de Janeiro/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio de Janeiro, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

Essas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e transportam elevados pesos de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura, a qual, por sua vez, compõe o indicador de vulnerabilidade.

Nesse contexto, é importante destacar as variações verificadas nos mapas de ameaça climática, que representaram uma tendência de aumento no grau desse componente do risco climático, em especial na Região Centro-Oeste brasileira, e em alguns estados localizados nas Regiões Sudeste e Nordeste;: no nordeste do estado de São Paulo (na Estrada de Ferro Noroeste do Brasil), bem como, em partes dos estados de Minas Gerais e da Bahia (na Estrada de Ferro Bahia-Minas FCA 116), como pode ser observado na Figura 26.

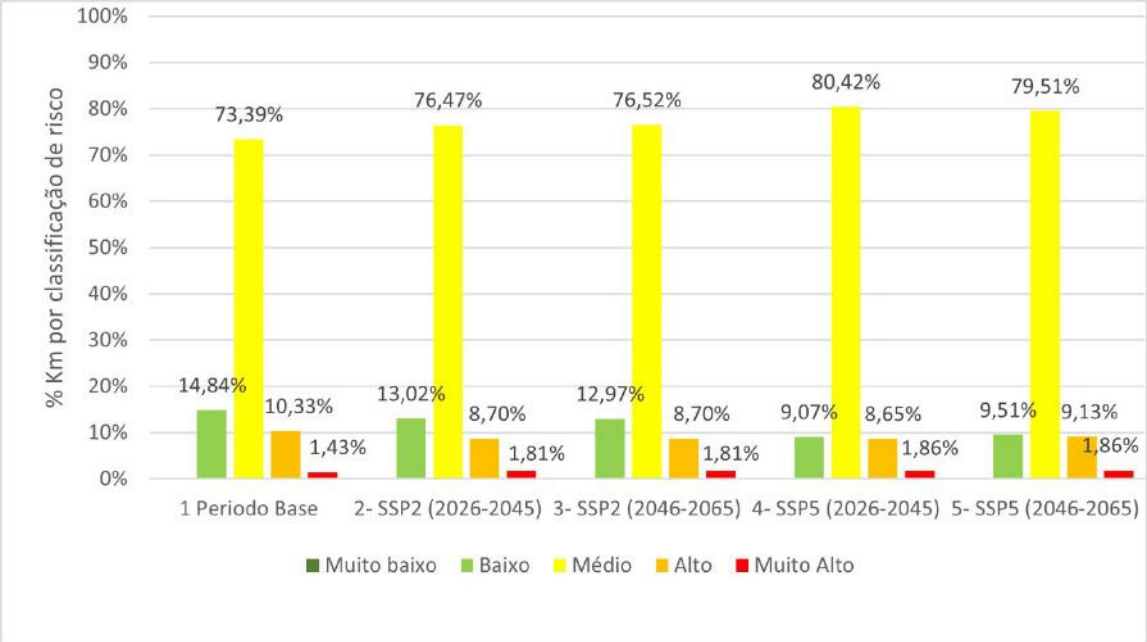
Figura 26 - Síntese: Mapa de Risco Climático de impacto a infraestrutura devido a altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os diferentes cenários e horizontes, temporais, apresenta-se a Figura 27, com a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Figura 27 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 27, notam-se poucas variações entre os graus de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) conforme se modificam os cenários de emissões e os horizontes temporais. Há uma predominância de trechos de ferrovias com médio grau de risco climático. Destacam-se ainda as reduções nos trechos de ferrovias sob grau baixo de risco climático à medida que se aumenta o cenário de emissões e/ou modifica-se o horizonte temporal (havendo uma ampliação apenas diante do cenário de emissões altas considerando-se um horizonte temporal de médio prazo), e os crescimentos para as áreas sob risco médio e muito alto. Os trechos com alto grau de risco climático, apresentam um decréscimo em relação ao período base, embora entre os cenários de emissões intermediárias (SSP2) e alta (SSP5) no horizonte de médio prazo observa-se um comportamento contrário.

Para o **período base**, observa-se uma predominância de trechos de ferrovias sob risco climático médio de impacto direto em sua infraestrutura, correspondendo a 73,39% do total. Os trechos sob baixo risco climático correspondem a 14,84% das ferrovias, e aqueles sob risco alto ou muito alto somam 11,76%.

Ainda perante a Figura 27, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045)**, o IRC de impacto direto devido a altas temperaturas continua sendo predominantemente médio nas ferrovias brasileiras, correspondendo a 76,47% do total. Nota-se um pequeno decréscimo dos trechos com graus baixo (13,02%) e alto (8,7%), em relação ao período base. Contudo, há um pequeno aumento dos trechos com grau muito alto, o qual se mantém abaixo de 2%.

Mantendo-se o cenário de emissões e modificando-se o **horizonte temporal** para **médio prazo (SSP2 2046-2065)**, mudanças sutis podem ser verificadas: os trechos sob médio risco aumentaram de 76,47% para 76,52%, com consequente redução dos trechos sob baixo risco de 13,02% para 12,97%. Os demais trechos mantiveram-se constantes.

No **cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)**, de acordo com a Figura 27, os trechos ferroviários com risco médio representam 80,42%, enquanto os trechos com baixo risco somam 9,07% - uma variação de cerca de 4% em relação ao período base e aproximadamente 3% para o cenário intermediário. As categorias do gráfico apresentado na Figura 27 representativas dos demais graus de risco climático apresentaram pequenas variações em relação aos cenários de emissões intermediárias. Esse mesmo padrão foi observado para o **horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065)**.

De forma geral, cerca de 10% da malha ferroviária federal brasileira apresentou graus alto e muito alto de risco climático de impacto direto devido a altas temperaturas. Observou-se um aumento nos trechos com risco climático médio de 73% da malha no período base, para 79% no cenário pessimista considerando-se o horizonte de médio prazo. Essa variação decorre principalmente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 6 apresenta o percentual dos trechos, por grau de ameaça climática, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 6 - Quilometragem (em %) de ferrovias, por graus de ameaças climáticas, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Altas temperaturas) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,07%	20,52%	38,39%	32,33%	8,68%
SSP2 (2026-2045)	0,13%	16,34%	42,27%	35,58%	5,67%
SSP2 (2046-2065)	0,13%	15,54%	40,82%	35,78%	7,73%
SSP5 (2026-2045)	0,13%	8,42%	37,71%	39,55%	14,19%
SSP5 (2046-2065)	0,13%	5,81%	41,50%	37,02%	15,53%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 6, para o componente “ameaça climática”, os trechos com grau de risco baixo caíram de 20,52% (período base) para 5,81% (no cenário de altas emissões e médio horizonte temporal - SSP5 2046-2065). Também se observa aumento dos trechos de ferrovias nas categorias de risco climático: médio (38,39% no período base para 41,5%); alto (de 32,33% para 37,02%); e muito alto (de 8,68% para 15,53%, um aumento de quase 100%).

A Tabela 7 apresenta a distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Tabela 7 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	2.658,57	13.143,38	1.850,40	256,81
SSP2 (2026-2045)	0	2.322,28	13.644,89	1.551,73	323,40
SSP2 (2046-2065)	0	2.313,79	13.653,38	1.551,73	323,40
SSP5 (2026-2045)	0	1.617,61	14.349,56	1.543,50	331,63
SSP5 (2046-2065)	0	1.696,00	14.185,68	1.628,98	331,63

Fonte: Elaboração própria (2022).

A partir da observação da Tabela 7, é possível notar uma tendência de aumento dos trechos ferroviários com graus de risco climático médio, alto e muito alto, e uma consequente diminuição dos trechos com baixo risco. Caminhando-se do período base em direção ao cenário pessimista (emissões altas) em um horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065), os trechos com grau muito alto de risco climático aumentam cerca de 30%, passando de 256,81 km para 331,63 km. Por outro lado, as áreas com baixo risco climático reduzem de 2.658,57 km para 1.696,00 km (redução de aproximadamente 36%).

4. Conclusão - Modo Ferroviário

Na malha ferroviária federal brasileira, os trechos de alto e muito alto risco representam 10% a 12% da malha para os três impactos (deslizamento, erosão e altas temperaturas) e em todos os cenários analisados (período base e as quatro projeções realizadas). Desse modo, cerca de 2.000 km de ferrovias no Brasil se encontram com alto e muito alto grau de risco. Cabe aqui reforçar que risco alto e muito alto não significam necessariamente que o nível de criticidade é alto pois esta é uma avaliação relativa e não absoluta. Os trechos de alto e muito alto risco que se repetem em todos os cenários e projeções são:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio de Janeiro, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas Gerais, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Isso se deve ao fato de os componentes **exposição** e **vulnerabilidade** (mais especificamente o subíndice de **sensibilidade da infraestrutura**) ser o mesmo em todos os impactos e cenários.

No que tange ao **risco climático de impactos na infraestrutura ferroviária devido ao deslizamento**, os trechos com graus de risco alto e muito alto estão concentrados no Sul/Sudeste brasileiro (Serra do Mar e Serra Geral). Essas áreas se mantiveram com alto grau de risco ao longo da análise, sendo a evolução de trechos de grau baixo de risco para médio a principal tendência observada entre os cenários e os horizontes temporais. Diferente dos outros impactos, foi observada uma concentração

dos trechos de risco alto e médio, e percentual considerável de áreas com baixo grau de risco, variando de cerca de 30% no período base para 20% no cenário pessimista de médio prazo (SSP5 2046-2065). Essa tendência acompanha o componente de **ameaça climática,** que tem menos de 1% de áreas de alto risco, tanto no período base, quanto nas projeções, mas com uma inversão entre baixo e médio risco climático para o período base, com 74,8% de ferrovias com baixa ameaça e 24,1% com altas, enquanto no cenário pessimista e médio prazo esses valores chegam a 28,5% e 70,65%, respectivamente.

Já para a análise do **risco climático de impactos na infraestrutura ferroviária devido à erosão,** observa-se uma distribuição mais homogênea do IRC pelo país, com quase toda a malha apresentando grau médio de risco (54% no período base e 81% nas projeções). Desse modo, é importante compreender a erosão como uma ameaça que deve ser tratada de forma sistêmica no planejamento e na operação ferroviária. As áreas de alto risco se concentram nas ferrovias com maior volume e peso de carga transportados, totalizando 10% da malha com risco alto; contudo, não apresenta trechos com risco muito alto. Nessa análise, foram verificadas alterações marginais entre as projeções, com variações substanciais entre essas e o período base, havendo trechos com baixo risco variando de 35% para apenas 8% nas projeções. Essa diferença é ainda mais acentuada no componente **ameaça climática**, que, no período base, apresenta 98% da malha com baixo grau de ameaça e, nas projeções, apenas 28%. Para esse componente do risco climático, menos de 1% das áreas tem alto ou muito alto grau de ameaça climática.

A análise de **risco climático de impacto direto na infraestrutura ferroviária devido a altas temperaturas** resultou em cerca de 73% da malha com risco médio ou alto no período base, que se eleva para cerca de 80% no cenário de altas emissões (SSP5). Diferente do risco de impacto devido ao deslizamento, aqui os trechos com baixo risco a altas temperaturas se concentram no litoral e nas Estradas de Ferro Vitória x Minas Gerais e Carajás.

Outra diferença importante observada no impacto devido a altas temperaturas foi a variação na ameaça climática ao longo dos cenários e a participação dos trechos com alto e muito alto risco desde o período base até o SSP5 (2046-2065). No período base, esses trechos representam, respectivamente, 32% e 8% da malha ferroviária; já no cenário pessimista de médio prazo, estes percentuais chegam a 37% e 15% respectivamente. Esse avanço acontece especialmente nas ferrovias do Centro-Oeste e do Oeste Paulista, onde observa-se, ao longo da evolução dos mapas, o incremento da ameaça climática do centro do Brasil em direção ao litoral.

Ainda na análise de altas temperaturas, as áreas com risco climático médio são dispersas, e as áreas de alto e muito alto risco se distribuem nas regiões mais interioranas, apresentando um gradiente que decresce no sentido do litoral (do Centro-Oeste para o litoral). A partir da análise foi possível notar um aumento nos trechos com alto grau de **ameaça climática** de 8% para 15% entre o período base e o cenário de altas emissões de médio prazo (SSP5 2046-2065). Mesmo sendo um percentual relativamente baixo, esse resultado traz à luz novos trechos ferroviários que estão sob alto grau de ameaça climática a altas temperaturas.

Em relação à **exposição da infraestrutura**, cujo principal indicador é o peso da carga, observa-se que apenas quatro estradas de ferro foram consideradas com exposição muito alta da infraestrutura, são elas:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas Gerais x Rio, operada pela MRS Logística);

- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de ferro do litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Tais ferrovias são responsáveis pelo escoamento de minérios para os portos exportadores e apresentam alto tráfego de composições. Desse modo, trata-se de áreas de importância estratégica para a economia brasileira.

O componente **vulnerabilidade** é composto por dois subíndices, a sensibilidade biofísica e a sensibilidade da infraestrutura. O subíndice de **sensibilidade biofísica** foi calculado a partir de bases específicas para os impactos devido ao deslizamento e à erosão, exceto para altas temperaturas, que, por se tratar de um impacto direto na infraestrutura, não considerou esse subíndice em seus cálculos. Já a **sensibilidade da infraestrutura** se mantém a mesma para todos os cenários. Logo, tem-se em parte uma sobreposição de tais áreas, mas também algumas áreas/*hotspots* específicos. Assim, observam-se áreas comuns de alta vulnerabilidade:

- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale SA); e
- Trecho final da Ferrovia Minas Gerais - Santos.

Apesar desta confluência observada para o impacto intermediário de erosão, a Estrada de Ferro Vitória a Minas passa para muito alto risco climático, e a Estrada de Ferro Carajás entra no rol das áreas de alta vulnerabilidade. Já para o deslizamento, as áreas de alto e muito alto risco são distribuídas nas regiões Sul e Sudeste, em especial em áreas de relevo acidentado, acompanhando a Serra Geral no Sul do Brasil e a Serra do Mar. Outro ponto relevante na análise é que, para o impacto devido à erosão, não existem pontos de baixa vulnerabilidade, mostrando que essa é uma questão que está além das regionalidades; já o deslizamento, apresenta áreas de muito alto e baixo risco.

No levantamento e mapeamento de vulnerabilidades e riscos climáticos é importante validar os resultados (de SHREBININ *et al.*, 2019). No entanto, não foi possível realizar a validação no âmbito do projeto AdaptaVias devido à falta de dados de registros de impactos nas rodovias e ferrovias. Futuramente uma validação dos resultados pode ser realizada comparando os IRC do período base com os registros de impacto das concessionárias, DNIT e outros.

Diante do apresentado, sugere-se que estudos futuros sobre o risco climático das ferrovias brasileiras sejam desenvolvidos, com análises específicas de risco climático sobre as ferrovias que ainda encontram-se em fase de planejamento (ou seja, não construídas) e que a análise de risco climático se dê de forma mais específica para determinados *hotspots*, que seriam aquelas áreas de ferrovias que nesse estudo foram identificadas, já no período base, com risco alto ou muito alto, ou cujo risco aumente considerando-se os diferentes cenários e horizontes temporais. Ao focar em ferrovias específicas, futuros estudos podem incluir bases mais robustas sobre a infraestrutura existente, permitindo uma análise mais aprofundada dos riscos.

5. Modo Rodoviário

O modo de transporte rodoviário é o responsável pela maior movimentação de cargas no Brasil (MInfra, 2021). Para avaliar o risco climático da infraestrutura rodoviária foram considerados os **cinco impactos** da mudança do clima mencionados anteriormente. Para cada um dos impactos intermediários, foram elaborados Índices de Risco Climático considerando-se **três cenários**: (a) período base (1981-2000); (b) cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5); e (c) cenário emissões altas (SSP5-8.5). Cada cenário, com exceção do período base, foi calculado para **dois horizontes temporais**: (i) curto prazo (2026-2045) e (ii) médio prazo (2046-2065).

Para compreender os mapas dos IRC (Nível 1), é necessário observar os mapas relacionados à ameaça climática, à exposição e à vulnerabilidade da rede rodoviária federal (Nível 2 da estrutura hierárquica), já que o risco é o resultado da combinação destes componentes. O componente de vulnerabilidade foi calculado apenas com informações sobre sensibilidade (Nível 3), uma vez que os dados disponíveis para capacidade adaptativa não puderam ser incorporados na análise - não atendiam aos critérios de abrangência e formato.

A exposição é principalmente a presença de elementos (infraestrutura, sistemas etc.) em lugares que podem ser adversamente afetados por impactos da mudança do clima. Além da localização geográfica, a exposição também pode considerar a importância dos elementos expostos. No caso da infraestrutura rodoviária, os indicadores utilizados para exposição foram: o volume médio diário anual (VMDA) e o trecho rodoviário. A heterogeneidade do VMDA na malha analisada e alta concentração de veículos em trechos específicos ficou representada nos mapas de exposição. A metodologia adotada priorizou utilizar o máximo de dados existentes, cabendo em estudos futuros adicionar novos indicadores para compor a exposição de forma que o resultado representa ainda melhor a exposição na malha rodoviária brasileira.

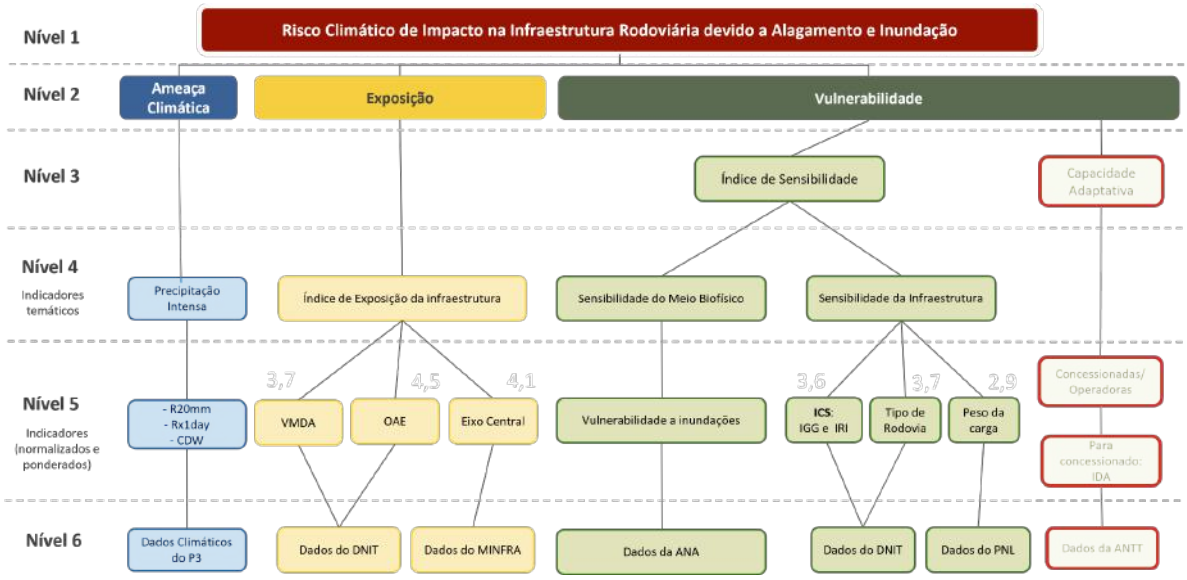
Outra observação relevante é em relação às diferenças entre os segmentos apresentados nos mapas de índice de risco climático, ameaças climáticas, exposição e vulnerabilidade. A ameaça consegue compreender áreas em que não foi possível obter os dados de vulnerabilidade e exposição, e por conseguinte, gerar os resultados de índice de risco climático. Desse modo, ficou decidido manter a ameaça mais ampla para não perder essa perspectiva nacional. Faz-se necessário salientar que diferenças nos valores totais e parciais de extensão dos trechos rodoviários podem e devem ocorrer. Isso é devido ao processo topológico de conversão de polígono (área) para linha. Essa transformação pode acarretar pequenas diferenças (alguns metros por trecho), os quais, uma vez somados, resultam em extensões de quilômetros de diferença. Ainda assim, tais diferenças são irrelevantes quando contextualizadas em um cenário nacional.

A seguir são apresentados os principais resultados, por impacto intermediário, obtidos para a infraestrutura rodoviária nacional. Para cada mapa de risco climático, são apresentados os mapas dos seus componentes. Por fim, é feita uma análise comparativa dos riscos climáticos por cenários e horizontes.

5.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de alagamento/inundação

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de alagamento/inundação foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e dos subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 28.

Figura 28 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 28, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou superior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico:

- Mapa de vulnerabilidade a inundações da Agência Nacional de Águas (ANA); e
- Sensibilidade da infraestrutura, calculada a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL).

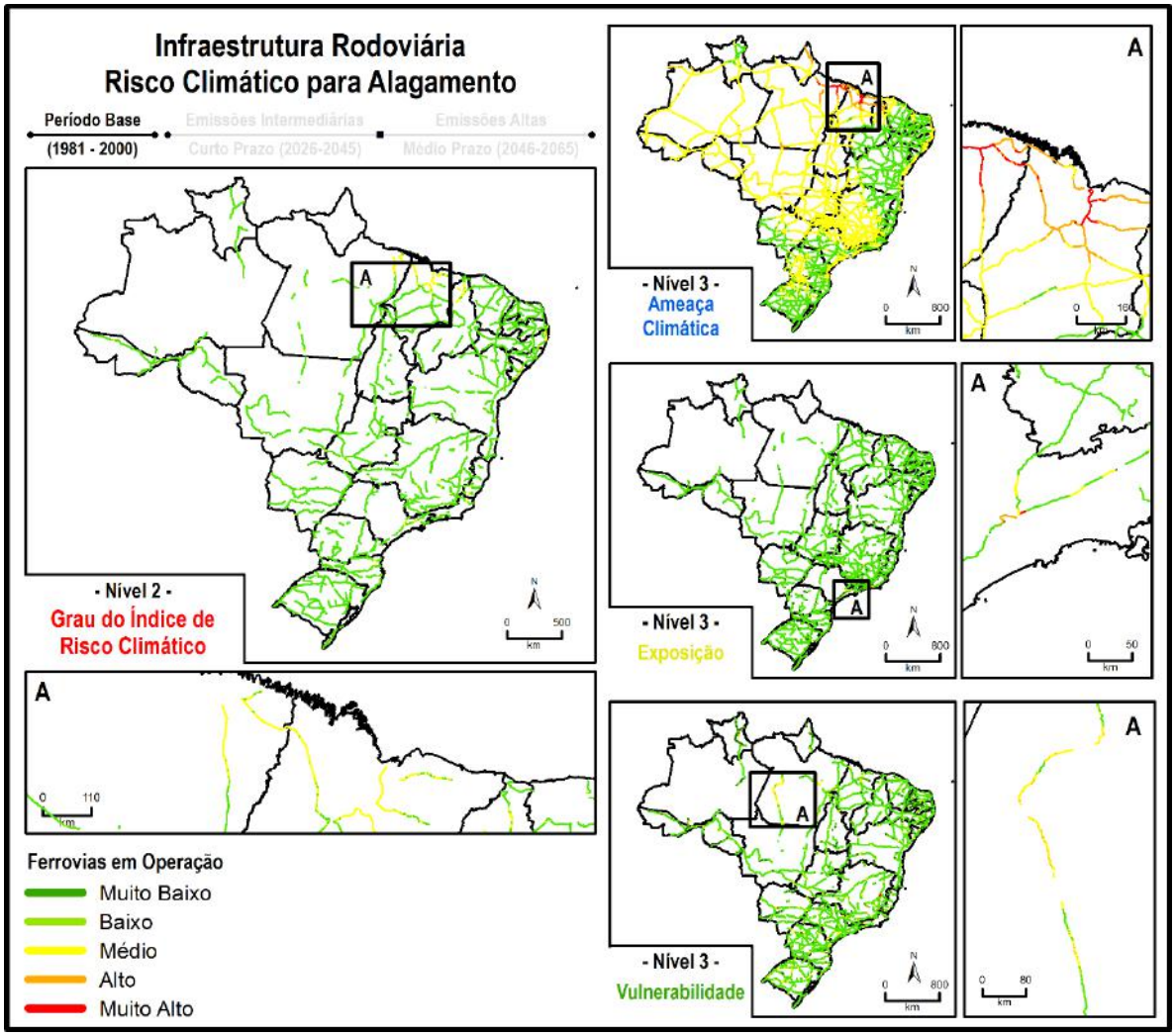
A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final (5.1.4) consolidando a análise de risco devido ao impacto de alagamento/inundação.

5.1.1 Período base | Impacto devido a alagamento/inundação

Quanto ao **Índice de Risco Climático** de impacto devido a alagamento/inundação (Nível 1), para o período base, composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade, verifica-se que os trechos com maior grau de risco climático são trechos de rodovias no Pará e Maranhão, além de alguns trechos de rodovias nos Estados do Nordeste, em especial perto do litoral (BR-101). As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau alto ou muito alto de risco climático de impacto devido a alagamentos/inundação (Figura 29).

A Figura 29 apresenta também os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2).

Figura 29 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias nos Estados do Pará e Maranhão se encontram com grau alto e muito alto de **ameaça climática**. Além destes, destacam-se muitos trechos com ameaças médias em quase toda a região

Norte e Centro-Oeste, bem como, em Minas Gerais, além de trechos no litoral do Nordeste, no interior da região Sul e em São Paulo.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a alagamento e inundação, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, a única rodovia com grau de ameaça climática médio e alto é a BR-163, que obteve baixo valor do ICS atestado nestes trechos rodoviários. Todas as demais rodovias têm grau baixo ou muito baixo.

A única rodovia com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** é a Rodovia Presidente Dutra (BR-116), em função do elevado volume de veículos que transitam por ela diariamente. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

Os mapas de vulnerabilidade e de exposição, para cada impacto analisado, se manterão os mesmos observados para o período base, repetindo-se em todos os cenários (emissões intermediárias e altas) e horizontes temporais considerados (curto prazo e médio prazo), já que a vulnerabilidade é determinada pela sensibilidade do meio físico e a sensibilidade da infraestrutura, e a exposição relaciona-se principalmente com VMDA de veículos que trafegam na rodovia. Neste estudo, não foram feitas modelagem acerca das possíveis variações de infraestrutura e/ou fluxo de veículos. Assim, não serão analisados e discutidos nas análises dos cenários/ horizontes temporais, sendo apresentados apenas para os períodos-base, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor, sendo que em anexo são apresentados os mapas completos.

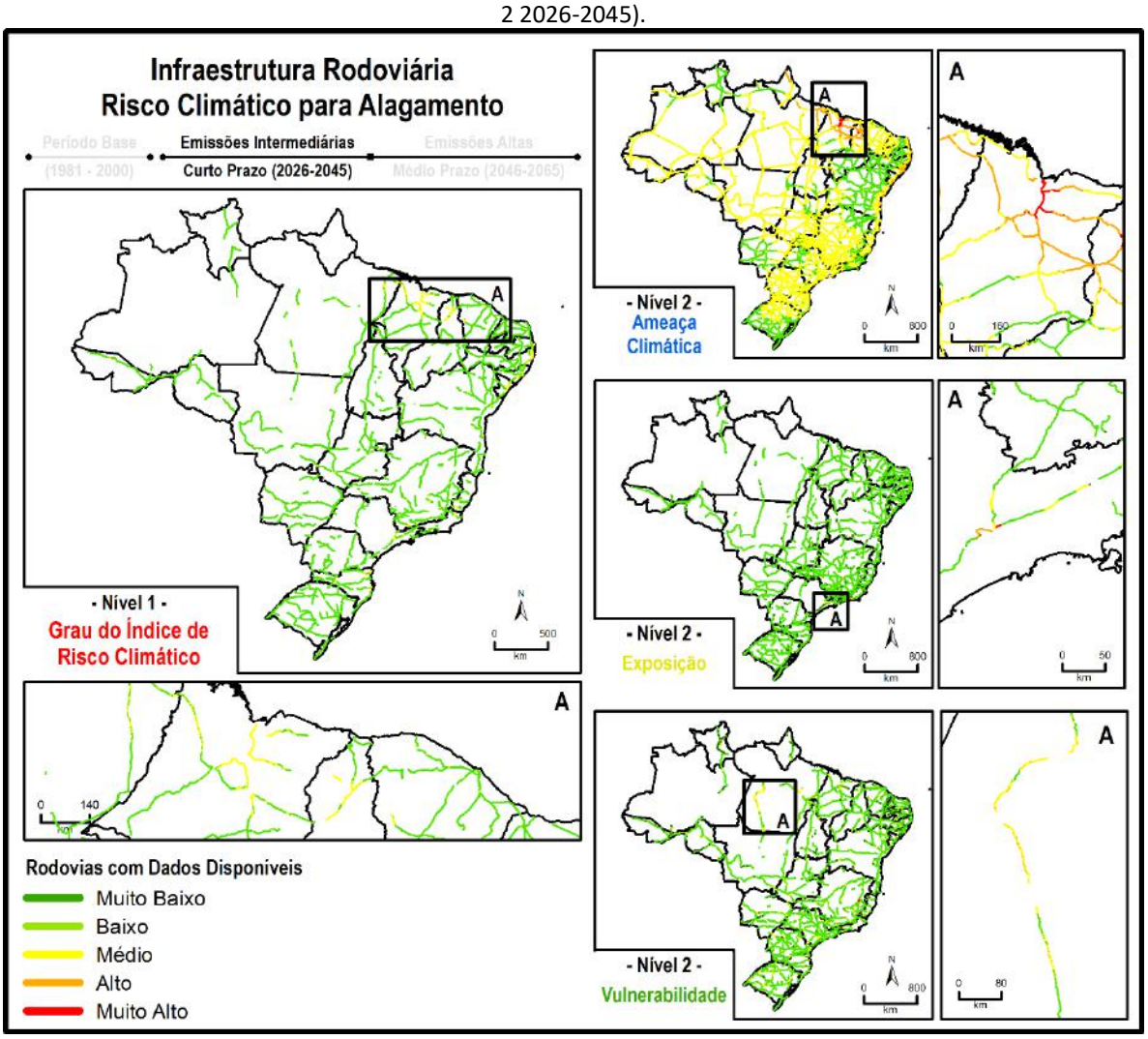
5.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de alagamento e inundação, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

5.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 30 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 30- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



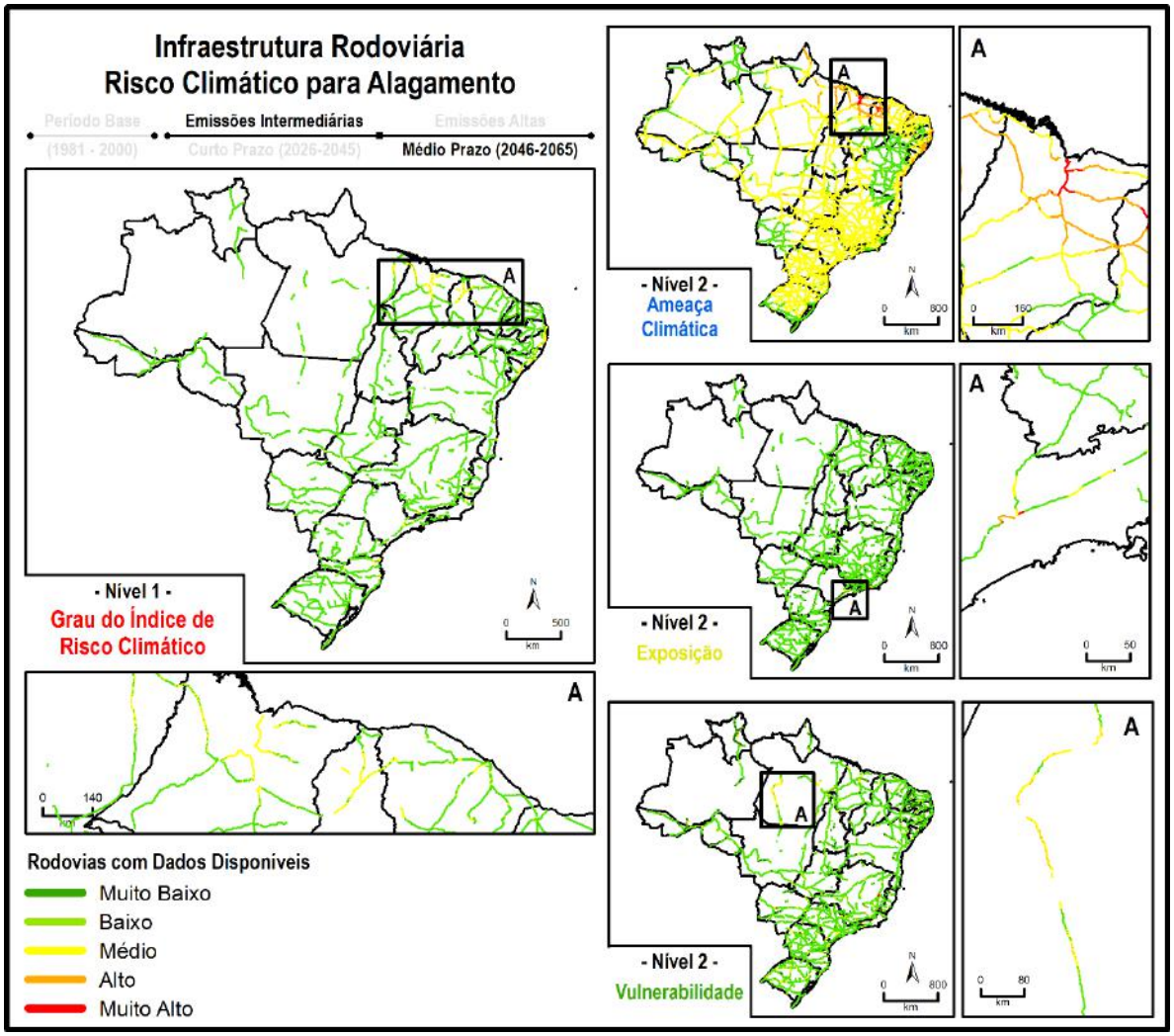
Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se praticamente o mesmo resultado do período base: todas as rodovias têm grau de IRC muito baixo ou baixo, com exceção de alguns trechos no Pará e no Maranhão, além de partes de rodovias no litoral do Nordeste, as quais têm grau de risco climático médio. A única diferença em relação ao período base são alguns trechos de rodovias no Piauí e nas regiões Sul e Sudeste, que passaram para o grau médio de risco climático. Cabe ainda ressaltar que quando se realiza uma análise em relação à ameaça climática nota-se que houve um aumento de regiões que passam de grau baixo, no período base, para médio, no SSP2-4.5 de curto prazo, com destaque para os estados de São Paulo e Paraná.

5.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 31.

Figura 31- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O mapa mostra praticamente o mesmo resultado do horizonte temporal de curto prazo: alguns trechos no Pará, Maranhão e Piauí, além de trechos pontuais nas regiões Sul e Sudeste, têm grau de risco climático médio, enquanto as demais rodovias têm risco baixo e muito baixo de sofrer impactos devido a alagamentos e inundações no futuro, considerando-se o cenário de emissões intermediário. Destaca-se ainda que, em relação às ameaças climáticas, identifica-se um maior acréscimo de áreas com grau médio no SSP2-4.5 de médio prazo em relação ao SSP2-4.5 de curto prazo, com destaque para as rodovias dos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul.

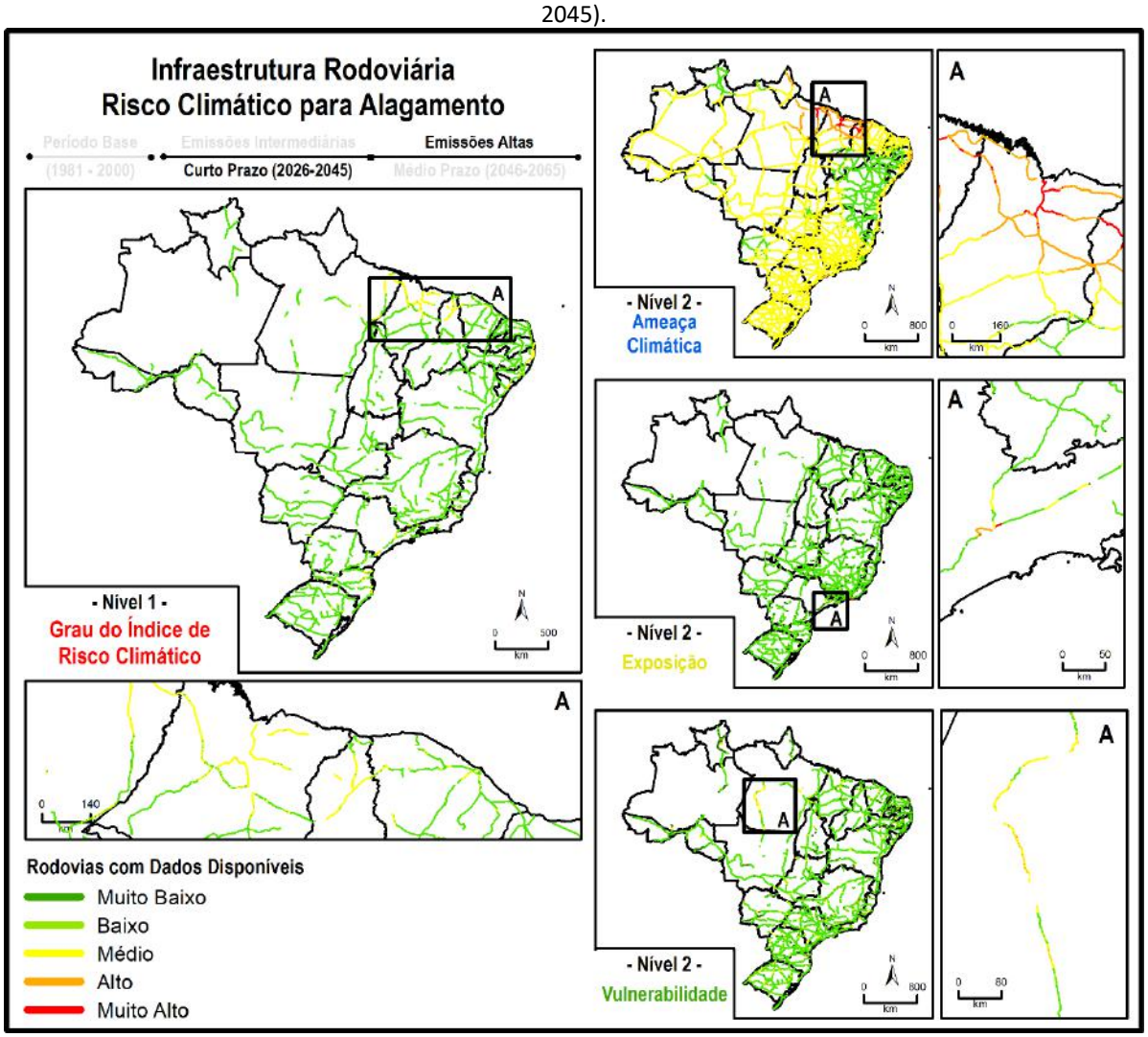
5.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

São apresentados a seguir os resultados do IRC devido ao impacto de alagamento e inundação para o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 32 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 32- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



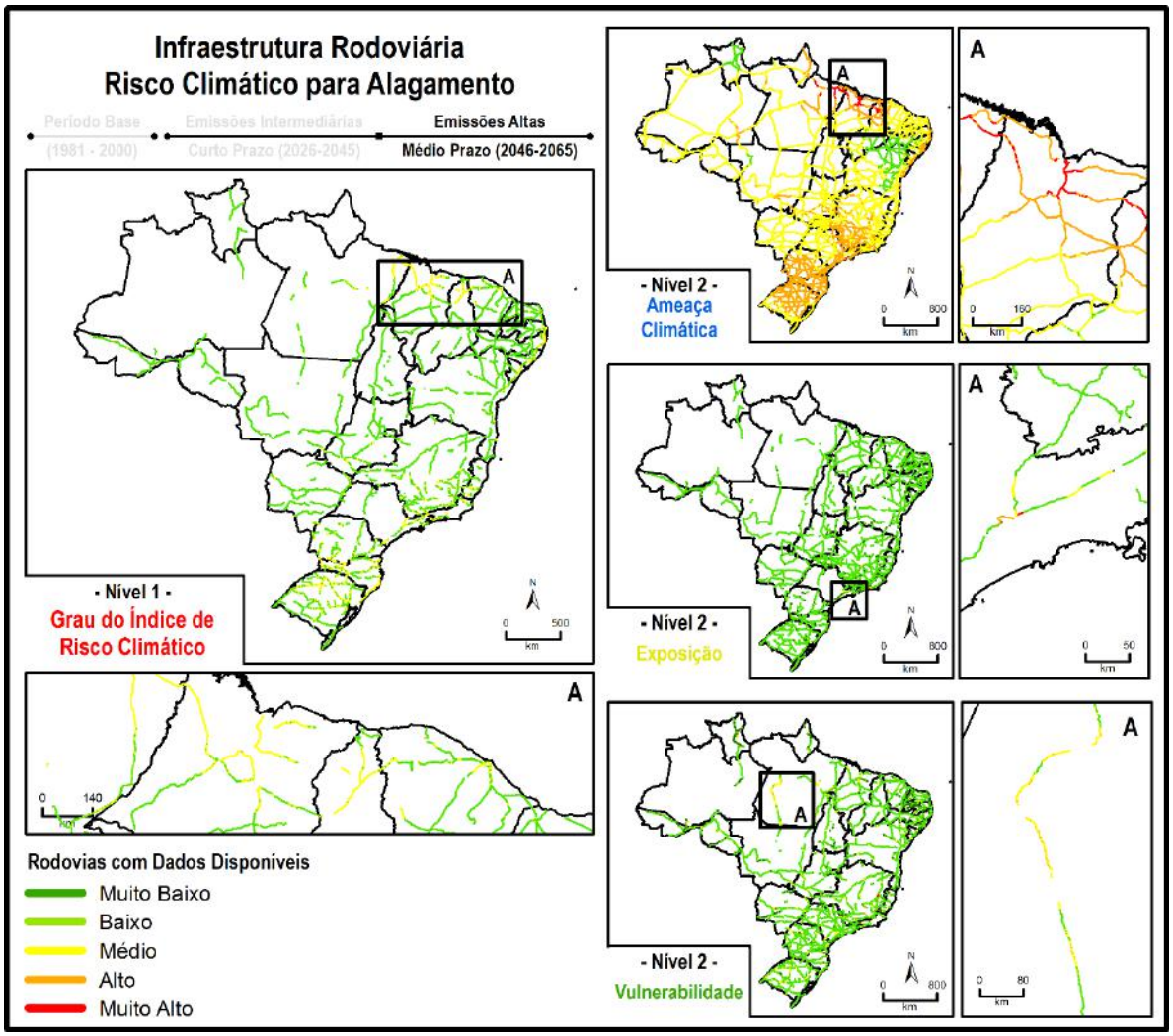
Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se resultados semelhantes aos obtidos para o cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de médio prazo: alguns trechos no Pará, Maranhão e Piauí, além de trechos pontuais nas regiões Sul e Sudeste, têm grau de risco climático médio, e as demais rodovias têm risco baixo e muito baixo de sofrer impactos devido a alagamentos e inundações no futuro, considerando-se o cenário de emissões altas e curto prazo. Isso advém do aumento de trechos rodoviários com grau médio neste cenário em relação ao período base com destaque para os estados das regiões Sul, Centro-Oeste e Sudeste.

5.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 33 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 33- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Além dos trechos com grau médio de risco climático observado no horizonte temporal de curto prazo, nota-se a tendência de aumento do grau de risco para o nível médio em várias rodovias nas regiões Sul e Sudeste do país. Em relação ao SSP5 de curto prazo, nota-se que o mapa de ameaça climática do SSP5 de médio prazo apresenta uma grande quantidade de trechos com grau alto de risco de impacto, com destaque para os estados da Região Sul e Sudeste e o litoral do Nordeste.

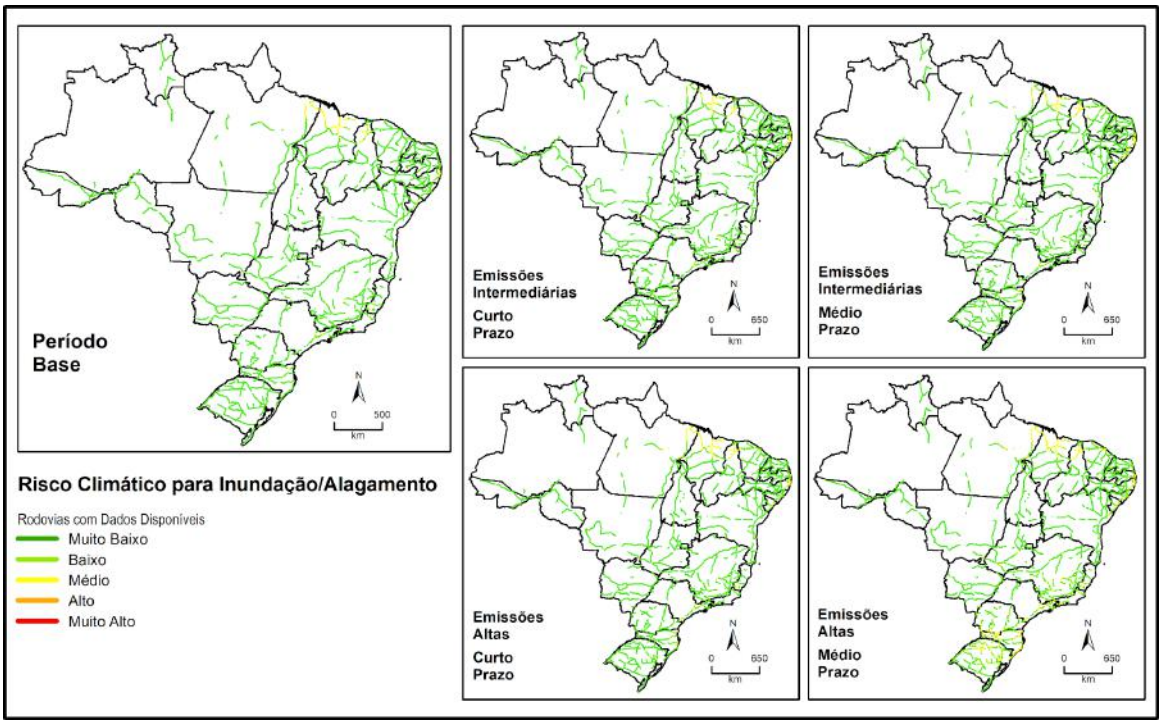
5.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a alagamento/inundação

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de alagamento e inundação em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo estão nas partes litorâneas dos estados Maranhão, Piauí, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Nos cenários de emissões altas, ainda aparecem rodovias em estados do Sul e Sudeste, como Rio de Janeiro, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, mas, no entanto, em nenhum cenário, atingiram o grau alto do risco climático.

Estas rodovias se destacam porque apresentam os maiores graus de ameaça climática, e a exposição e vulnerabilidade não variam muito entre as rodovias. Como os componentes vulnerabilidade e exposição foram mantidos ao longo da análise, o fator de variação do risco climático de impacto devido a alagamentos/inundação por cenário e horizonte temporal é a ameaça climática.

Conforme pode ser observado na Figura 34, que sintetiza o risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação sobre a infraestrutura federal de transporte rodoviário brasileira, o cenário de emissões intermediárias não apresenta variações significativas entre os horizontes temporais decorrentes do componente da ameaça climática. Porém, no cenário de emissões altas, nota-se um aumento do número de rodovias com grau de risco climático médio, em especial nas regiões Sul e Sudeste.

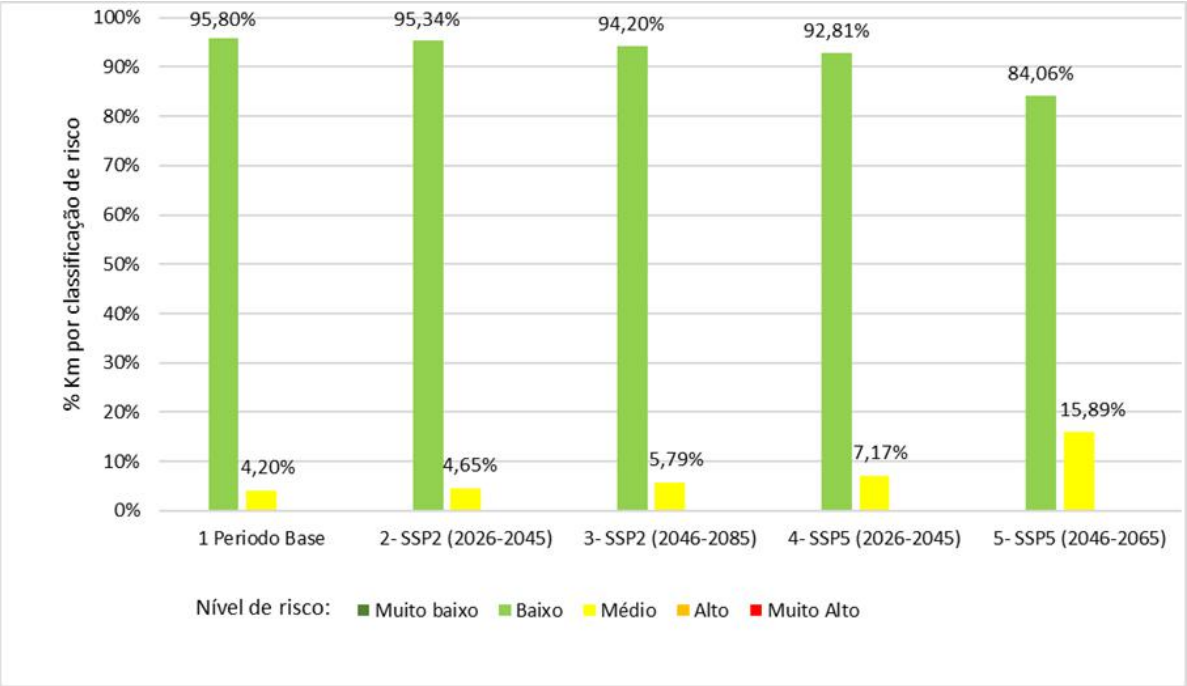
Figura 34 - Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e os horizontes temporais, é apresentado, na Figura 35, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 35 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

No cenário de emissões altas (SSP5), 84,06% da infraestrutura rodoviária brasileira analisada se mantêm em grau baixo; contudo, observa-se uma tendência de aumento dos trechos com grau médio, em especial no cenário de emissões altas no horizonte temporal de médio prazo.

A Tabela 8 apresenta o percentual dos trechos rodoviários, por grau de **ameaça climática,** para impactos devido a alagamento/ inundação em cada um dos cenários analisados e o período base.

Tabela 8 - Quilometragem (em %) de rodovias, por graus de ameaças climáticas, para cada um dos cenários analisados para alagamento/inundação.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,01%	40,57%	55,92%	2,84%	0,65%
SSP-2 (2026-2045)	0,03%	29,48%	66,25%	3,97%	0,28%
SSP-2 (2046-2065)	0,02%	21,46%	73,35%	4,78%	0,39%
SSP-5 (2026-2045)	0,00%	17,83%	76,46%	4,83%	0,87%
SSP-5 (2046-2065)	0,01%	7,60%	61,75%	29,50%	1,14%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Tabela 8, verifica-se que, no **período base**, predominam trechos com ameaça climática baixa (40,57%) e média (55,92%), sendo os trechos sob muito baixa ameaça praticamente

imperceptíveis (0,01%), e os trechos rodoviários com ameaça alta e muito alta, somados, equivalentes a 3,49%. Ao se modificar o cenário - **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) -, no horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)**, ocorre um ligeiro aumento de trechos sob alta ou muito alta ameaça para alagamento/inundação - de 4,25%, bem como, um aumento de 10,33% em comparação ao período base de áreas sob ameaça média, atingindo o valor de 66,25%, e um aumento discreto de trechos sob ameaça muito baixa (0,03%), sendo este último pouco representativo no panorama nacional. Há, por sua vez, uma redução de 11,09% de trechos sob ameaça climática baixa para alagamento/ inundação.

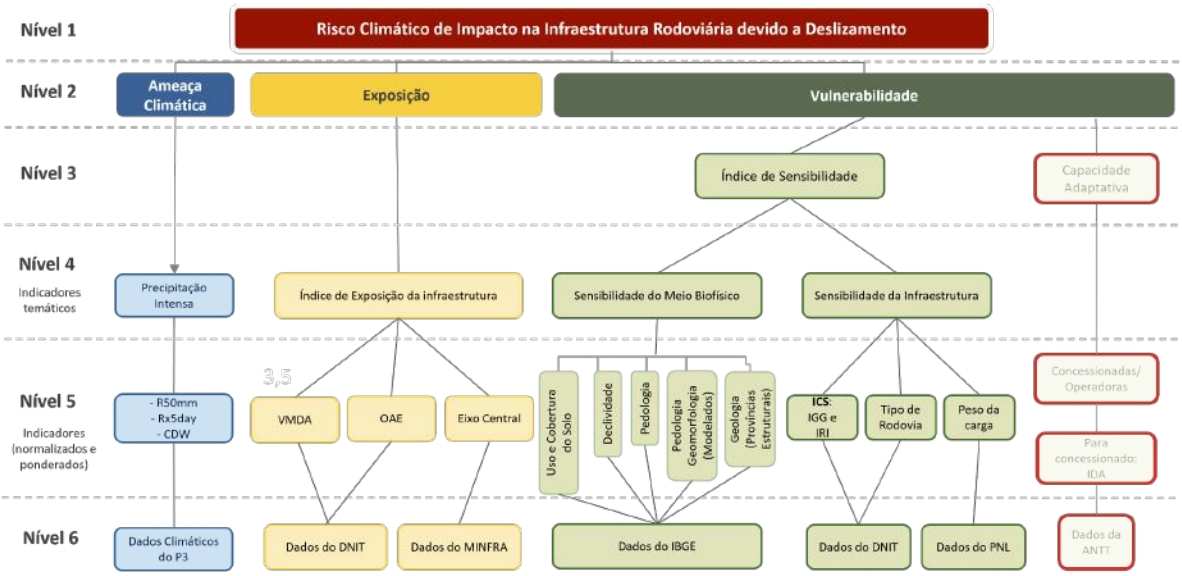
No cenário de emissões intermediárias (SSP-2), a **longo prazo (2046-2065)**, os trechos sob ameaça climática muito baixa permanecem praticamente desprezíveis (0,02%), e se observa, tal como no horizonte temporal de curto prazo, redução de trechos sob ameaça climática baixa (atingindo 21,46%), com um aumento dos trechos sob ameaça climática média (73,35%), alta (4,78%) e muito alta (0,39%).

No **cenário de emissões altas (SSP-5), a curto prazo (2046-2065),** não são encontrados trechos sob ameaça climática muito baixa, e permanece o padrão verificado no cenário SSP-2 (2016-2065): redução de trechos de rodovias sob baixa ameaça a alagamentos/ inundações (atingindo 17,83%) e aumento de trechos sob ameaça média (76,46%, maior percentual atingido para esse grau de ameaça) ou alta/muito alta (que, somadas, correspondem a 5,7% da infraestrutura rodoviária federal). A longo prazo, tornam a surgir, ainda sem relevância, trechos sob ameaça muito baixa (0,01%), permanecendo o padrão de redução de trechos sob ameaça baixa (atingindo 7,60%). Mas, diferentemente do que ocorre nos cenários anteriormente analisados, verifica-se neste cenário e horizonte temporal médio (2046-2065) uma redução de trechos sob ameaça média (61,75%), com um aumento acentuado do percentual de trechos rodoviários sob alto grau de ameaça, que atinge 29,50%, e muito alta, de 1,14%, sendo esse o cenário e período temporal onde a ameaça climática devido ao impacto de alagamentos/ inundações será mais crítico.

5.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de deslizamento foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 36.

Figura 36 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 36, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R50mm: número de dias com chuva igual ou maior a 50 mm;
- Rx5day: chuva máxima acumulada em 5 (cinco) dias; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

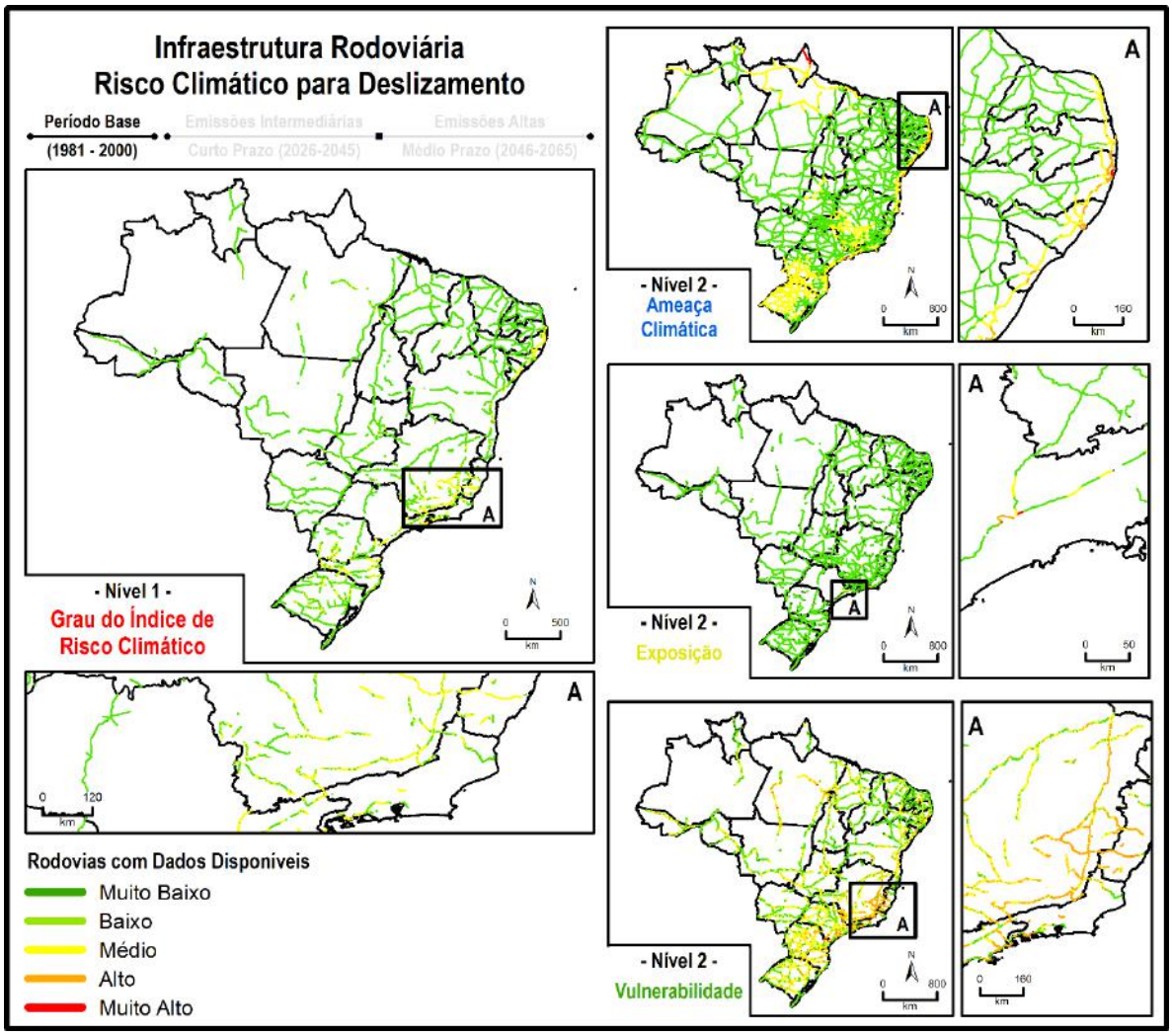
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador temático calculado a partir de mapa de uso e cobertura do solo, mapa de declividade, mapa de pedologia, mapa de pedologia e geomorfologia modelados, e mapa de geologia – estruturas geológicas (dados do IBGE).
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador temático calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de deslizamento.

5.2.1 Período base | Impacto devido ao deslizamento

A Figura 37 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido ao deslizamento (Nível 1), para o período base.

Figura 37 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático** - composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade - para deslizamento é muito influenciado pelo relevo acidentado, sendo os trechos rodoviários com grau médio de risco climático os localizados no Sudeste, especialmente na Serra do Mar, na Serra Geral (em Santa Catarina), no litoral de Pernambuco e Alagoas. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau alto ou muito alto de risco climático de impacto devido a deslizamento (Figura 37).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias no Estados do Amapá e litoral do Nordeste se encontram com alto e muito alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos com ameaças médias em quase todo o

norte do Pará e sul de Minas Gerais, assim como a região da Serra do Mar, além de trechos no litoral do Nordeste e São Paulo e na região Sul, principalmente no interior.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** ao deslizamento, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos rodoviários com grau médio e alto concentram-se na região Sudeste e Sul. Todas as demais rodovias têm grau médio ou baixo, com pequenos trechos com grau alto ou muito alto, principalmente no norte do estado do Paraná e do Pará.

As únicas rodovias que apresentam trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** são a BR-116 e a BR-381, localizadas em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

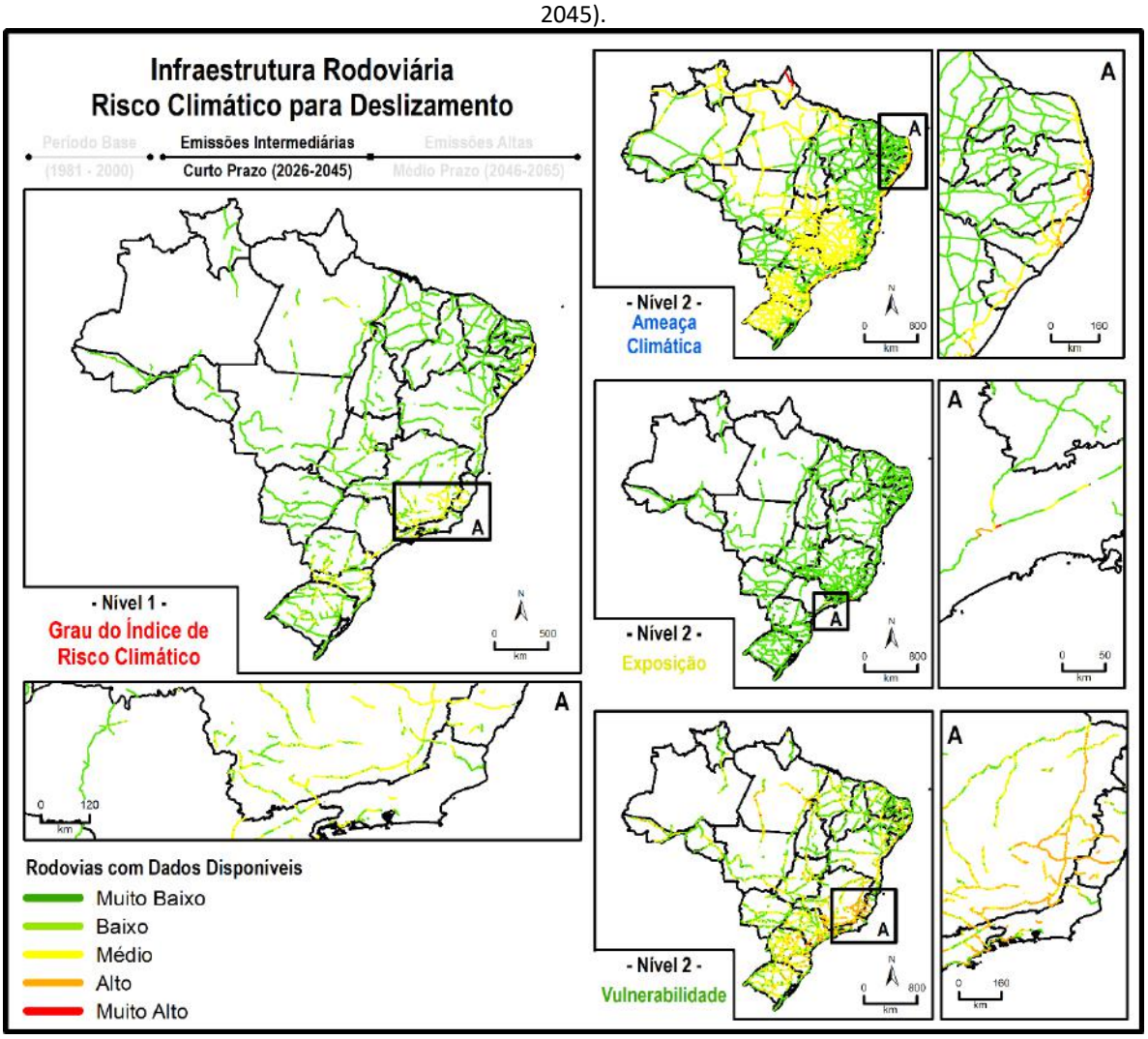
5.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de deslizamento, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

5.2.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 38 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 38 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



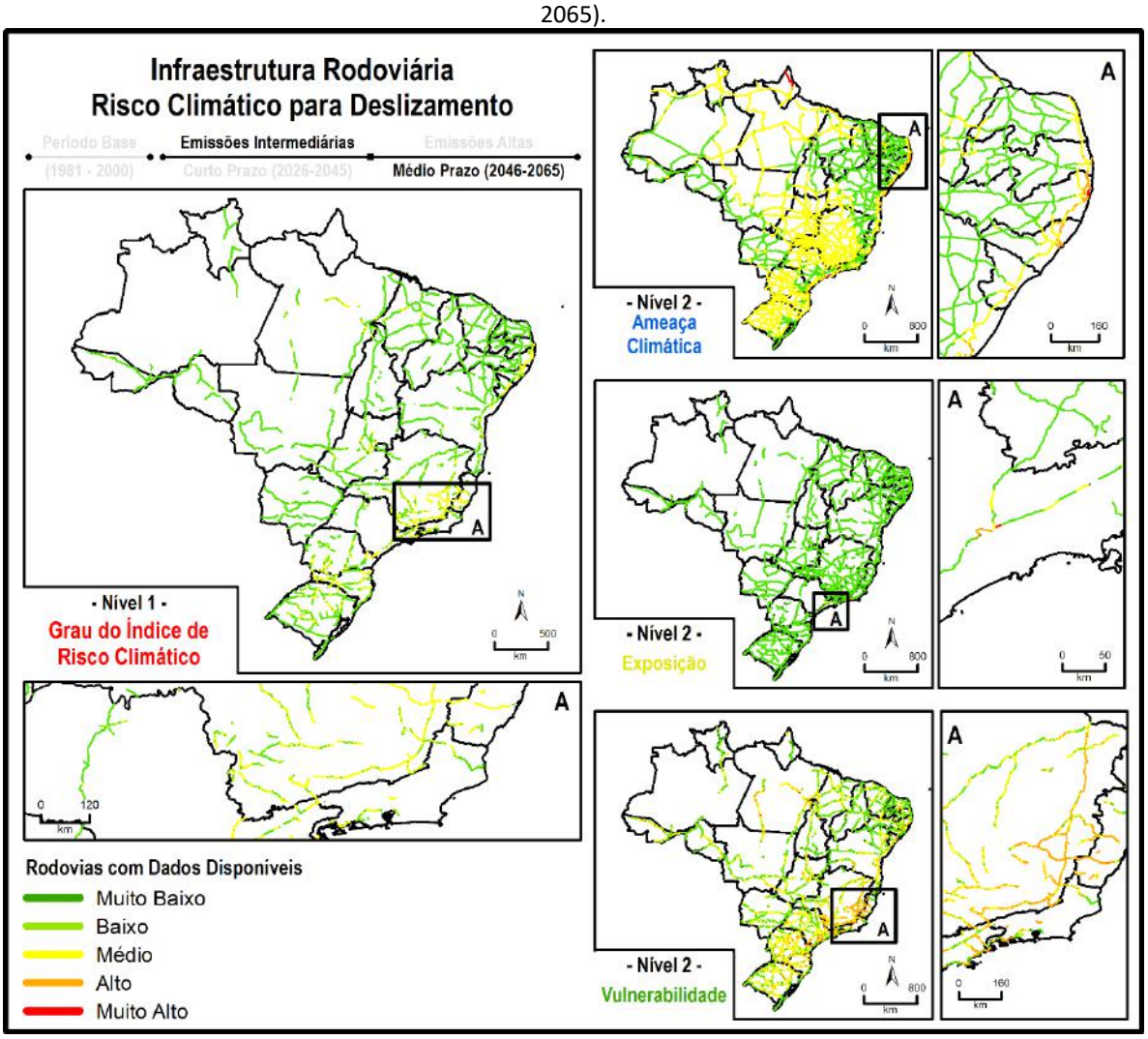
Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos de rodovias com IRC que se destacam na Figura 38 estão concentrados na Região Sudeste e em algumas rodovias na região Sul que apresentam risco médio, principalmente pelo relevo acidentado da região devido a presença da Serra do Mar e Serra Geral, respectivamente. Essas serras são cadeias de montanhas com pontos que estão acima de 1.500 metros de altitude. O litoral do Nordeste também chama a atenção, com a concentração de risco médio no litoral, mais especificamente na BR-101. Quanto ao mapa de ameaça climática, identifica-se que há um aumento de trechos com grau médio, em relação ao período base, com destaque para as rodovias dos estados da Região Sul, Sudeste e Centro- Oeste.

5.2.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1) em trechos rodoviários, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os maiores graus de risco climático devido ao impacto do deslizamento estão concentrados na Região Sudeste, Sul e no litoral do nordeste, principalmente na BR-101, com o IRC predominantemente médio, e alguns trechos de IRC alto nessas regiões. Percebem-se poucas mudanças do período curto para médio prazo, conforme apresentado na Figura 39. Isso advém do fato de que os mapas de ameaça climática dos períodos de curto e médio prazos do SSP2 são praticamente iguais, não havendo grande variação nos graus dos trechos das rodovias.

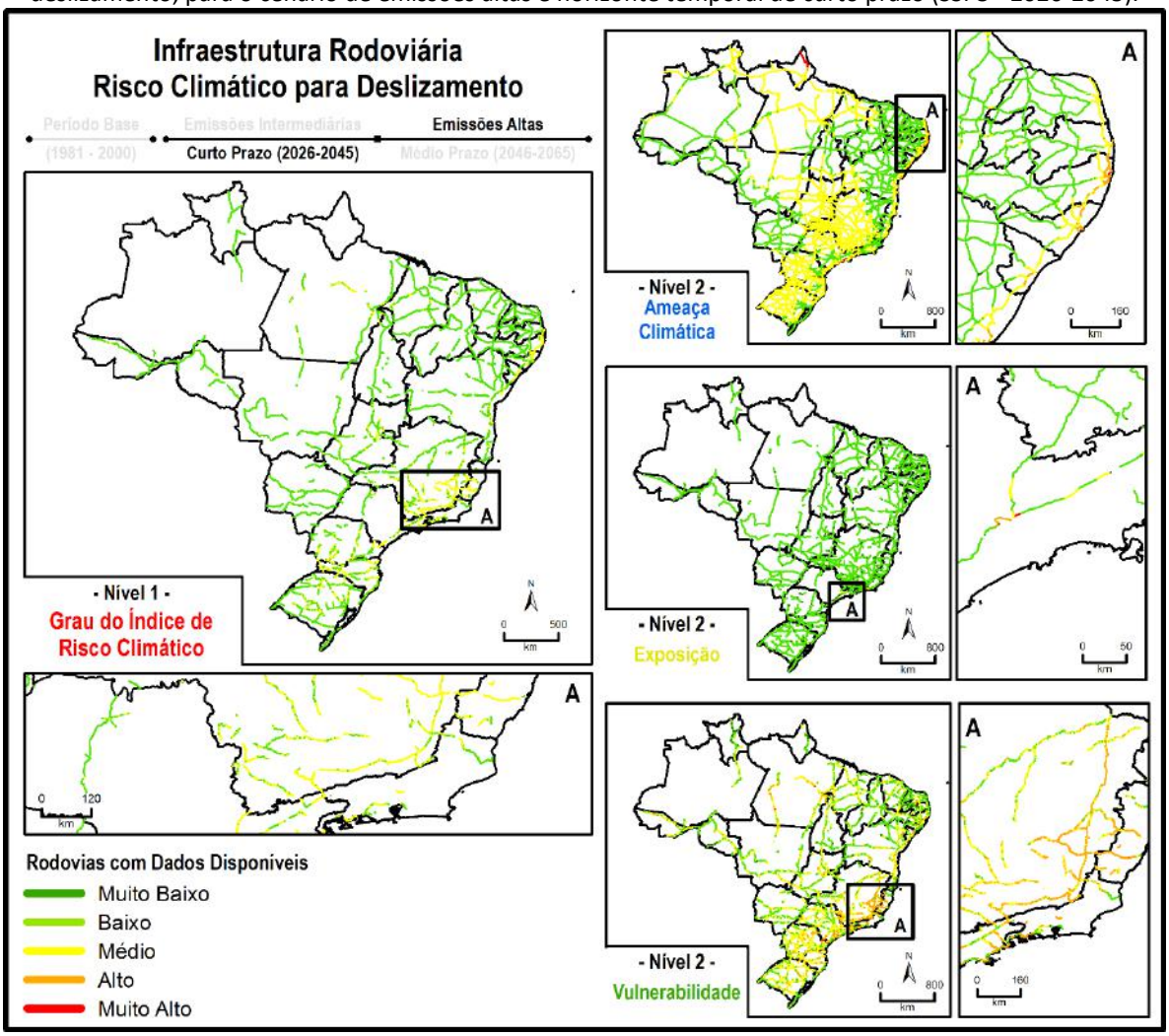
5.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de deslizamento para a infraestrutura rodoviária brasileira, considerando o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 40 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 40 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

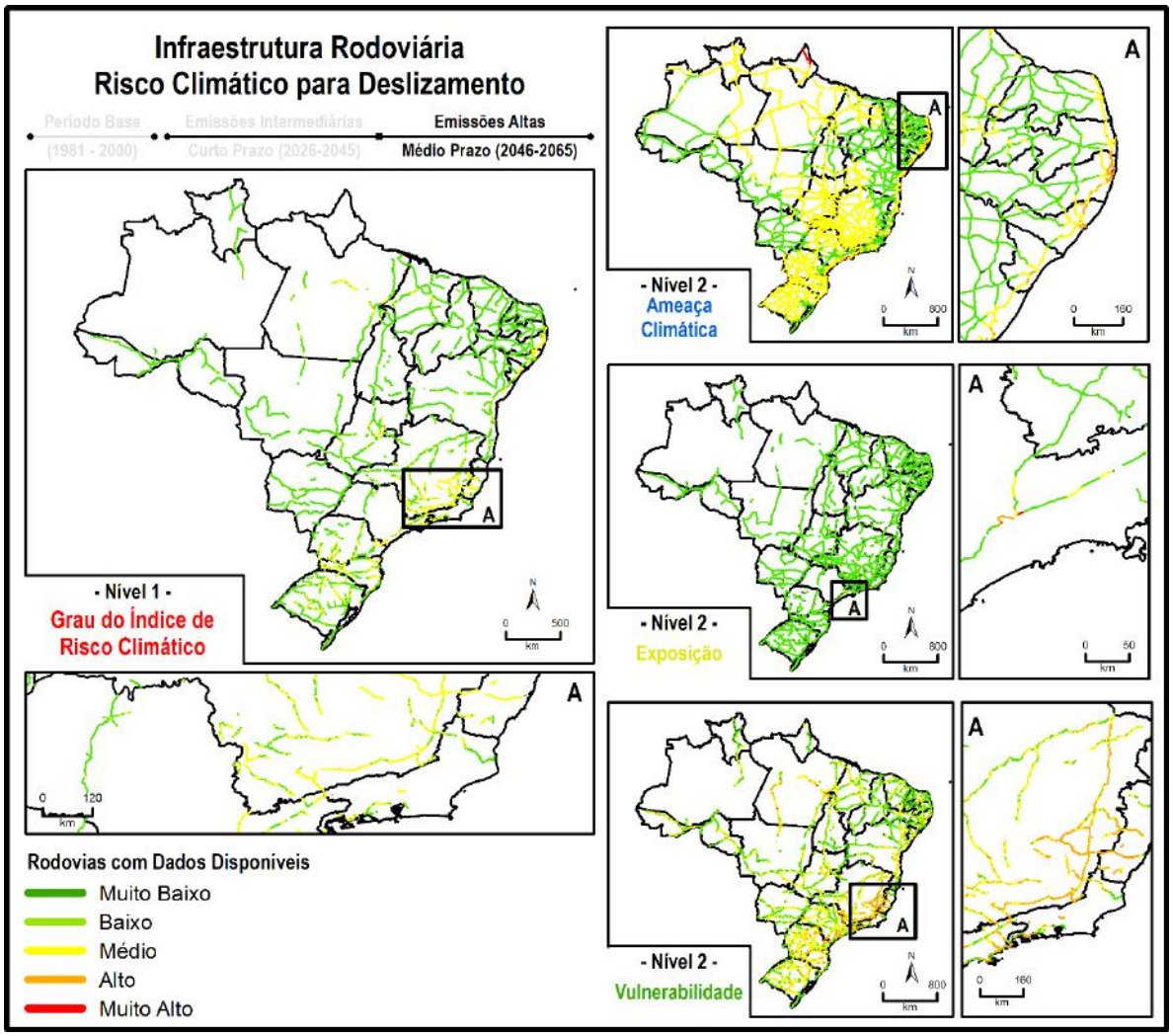
Pela análise da Figura 40, observa-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamento no cenário de emissões altas ao curto prazo também se concentram nas regiões Sudeste, Sul e litoral do Nordeste, principalmente na BR-101. As mudanças entre os cenários anteriores são pouco perceptíveis; contudo, há uma tendência de permanência da ameaça climática de grau médio nas regiões Sul, Sudeste e litoral do Nordeste, além da BR-230, no Pará.

5.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 41 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o

cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5-2046-2065) na infraestrutura de transporte rodoviária brasileira.

Figura 41- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 41, considerando-se o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo, observa-se que alterações do grau de risco climático devido ao impacto de deslizamento não são visíveis entre os horizontes temporais. As regiões Sudeste, Sul e o litoral do Nordeste, principalmente na BR-101, concentram o IRC médio, que equivale ao maior IRC encontrado. Além disso, há uma tendência de permanência da ameaça climática de grau médio nas regiões Sul, Sudeste e litoral do Nordeste, além do Pará.

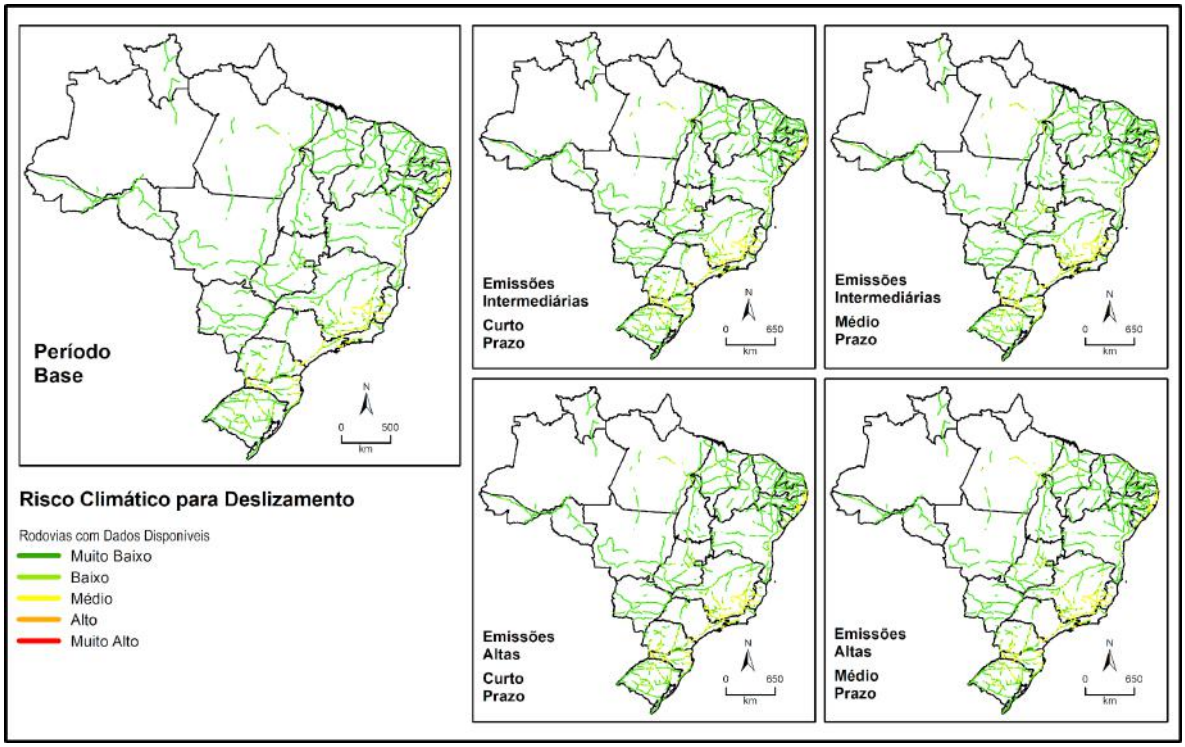
5.2.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamento, em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo, estão nas regiões Sul, Sudeste, litoral do Nordeste, e, no Norte, apenas a BR-230, no Pará.

As regiões Sudeste e Sul se destacam pelos altos graus de sensibilidade do meio biofísico (susceptibilidade a deslizamento), principalmente pela presença da Serra do Mar e Serra Geral (as quais apresentam altas declividades), assim como é nesses locais em que podem ser encontrados graus medianos e altos para erodibilidade e para uso e cobertura do solo profundamente antropizados, o que demonstra a falta da vegetação natural.

Notou-se que tanto o cenário de emissões intermediárias quanto o de emissões altas apresentaram variações pouco visíveis nos mapas decorrentes do componente da ameaça climática, porém é importante ressaltar que há uma propensão de permanência da ameaça climática de grau médio e uma mudança de grau baixo para médio na BR-230 no Pará, conforme pode ser observado na Figura 42, que sintetiza o risco climático devido ao impacto do deslizamento sobre a infraestrutura federal de transporte rodoviário brasileira.

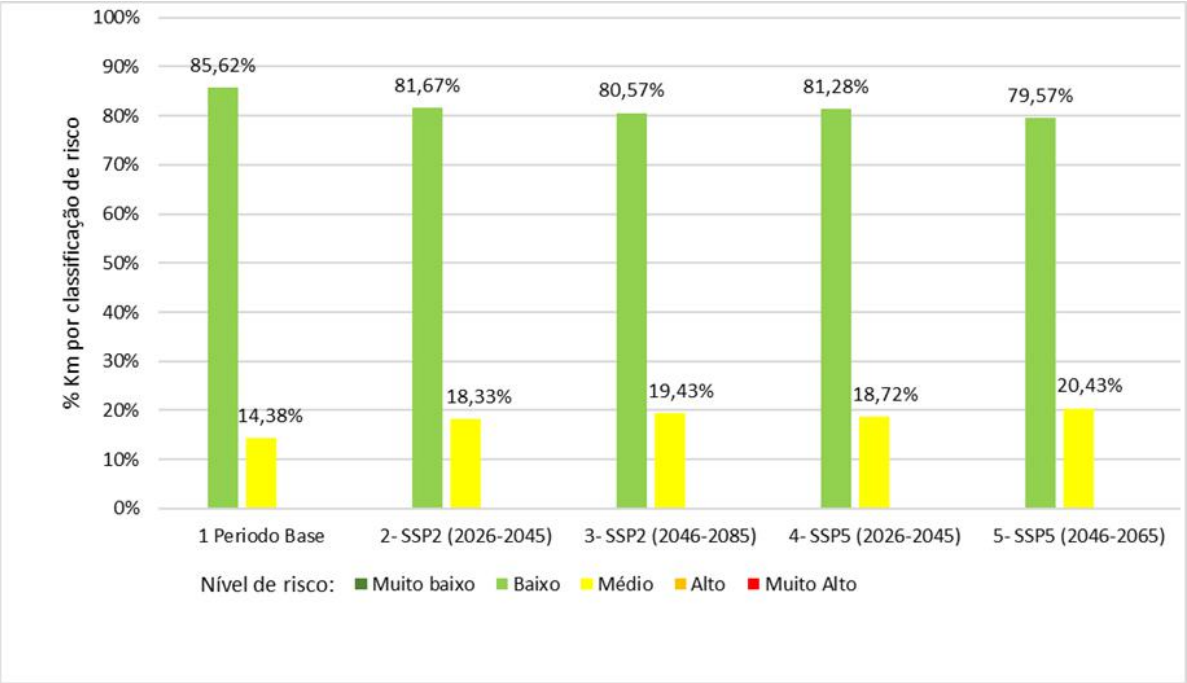
Figura 42- Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de deslizamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentada, na Figura 43, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 43 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 43, para o **período base**, 85,62% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de deslizamento e 14,38% sob risco médio. Os trechos com graus alto, muito alto e muito baixo de ameaça não aparecem nessa visualização devido a escala das barras.

Ainda de acordo com a Figura 43, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045)**, o IRC devido ao impacto de deslizamento é baixo em 81,67% das rodovias, médio em 18,33%. Considerando o mesmo cenário, mas com **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se que 80,57% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto do deslizamento e 19,43% encontram-se sob médio risco. Nesse cenário, a maior diferença em relação ao período base é o aumento da quilometragem de nível médio de risco em 5,05% (de 14,38% para 19,43%) e, por sua vez, as quilometragens de baixo risco sofrem redução de 3,95% (85,62% para 81,67%).

Em um **cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 81,28% das rodovias encontram-se sob risco climático baixo devido ao impacto por deslizamento e 18,72% sob risco médio. Conforme aumenta-se o cenário de emissões, em um mesmo horizonte temporal (curto prazo), ocorre uma redução de 0,39% da quilometragem de rodovias sob baixo risco, enquanto as áreas sob médio risco aumentam na mesma proporção. Considerando-se o **cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065)**, 79,57% da quilometragem de rodovias se encontrará sob risco climático baixo e 20,43% sob risco climático médio de impacto devido ao deslizamento.

De forma geral, observa-se na Figura 43 um padrão de pequena redução das extensões de rodovias sob baixo risco climático ao impacto de deslizamento, e um aumento de tais extensões sob risco médio, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal. Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 9 apresenta o percentual dos

trechos de quilometragem de rodovias por grau de ameaça climática para impactos devido ao deslizamento em cada um dos cenários analisados.

Tabela 9 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas em cada um dos cenários analisados para deslizamento.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,02%	75,36%	23,45%	0,82%	0,35%
SSP2 (2026-2045)	0,02%	48,55%	50,12%	0,95%	0,36%
SSP2 (2046-2065)	0,02%	40,35%	58,35%	0,91%	0,37%
SSP5 (2026-2045)	0,02%	45,08%	53,70%	0,85%	0,35%
SSP5 (2046-2065)	0,02%	39,20%	59,52%	0,91%	0,35%

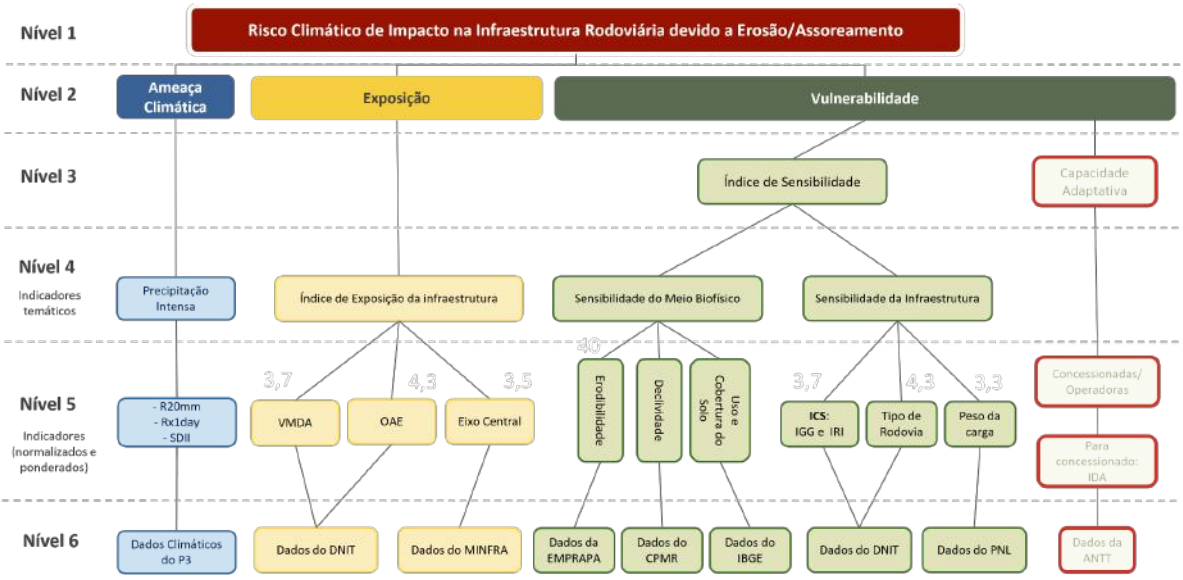
Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o componente de ameaça climática, único que varia entre os cenários de emissões, a quilometragem classificada como baixo risco caiu de 75,36% (período base) para 48,55% (SSP2 – 2026-2045). Mantendo-se o horizonte temporal, mas alterando-se o cenário para SSP5, verifica-se que esse valor cai para 45,08%. Essa redução se dá porque os trechos passam para o grau médio de ameaça climática. Observa-se um aumento no grau médio de ameaça climática de 23,45% (período base) para 50,12% (SSP2 – 2026-2045) e para 53,70 (SSP5 – 2026-2045), e as classes de risco alto e muito alto se mantiveram em menos de 1%.

5.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de erosão/assoreamento foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 44.

Figura 44 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a erosão/assoreamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 44, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou maior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia; e
- SDII - índice de intensidade de precipitação simples: indica intensidade de extremos de chuva.

O subíndice de exposição considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

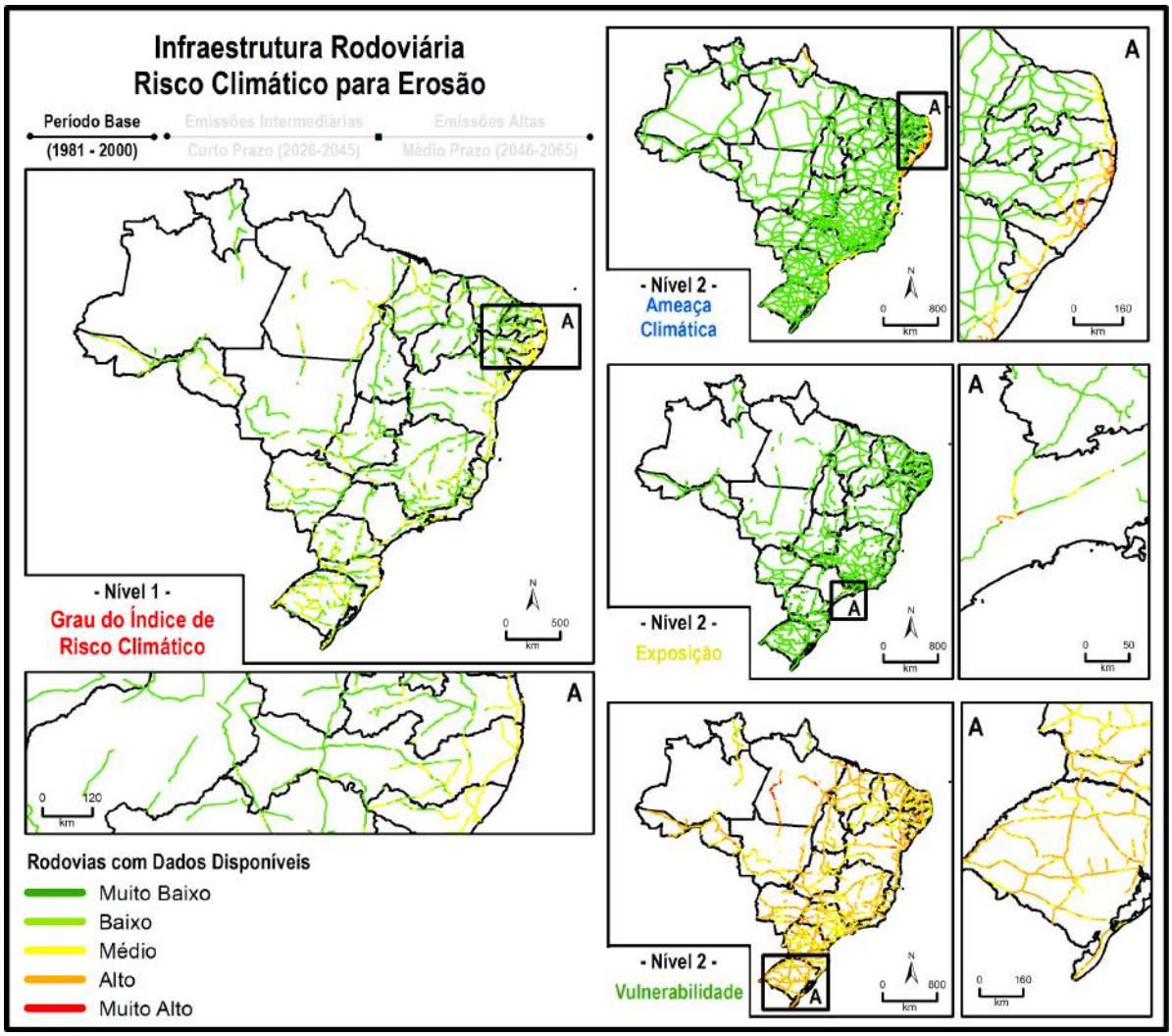
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador calculado a partir do mapa de erodibilidade da EMBRAPA, mapa de declividade do CPRM e mapa de uso e cobertura do solo do IBGE; e
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de erosão/assoreamento.

5.3.1 Período base | Erosão

A Figura 45 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à erosão (Nível 1), para o período base.

Figura 45 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De acordo com a Figura 45, o IRC é maior em trechos de rodovias no Pará, em rodovias localizadas em estados do Sul e em trechos rodoviários dos Estados do Nordeste, em especial no litoral (BR-101). As demais rodovias têm grau de risco climático baixo; não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido à erosão alto ou muito alto.

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias nos Estados de Amapá e no litoral de estados da região Nordeste encontram-se com alto e muito alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos com ameaças médias no litoral de São Paulo, Paraná e Santa Catarina.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** à erosão, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, quase todas as rodovias apresentam grau de ameaça climática médio e alto. A BR-163, no Pará, chama a atenção por acomodar muitos trechos com grau alto e muito alto de vulnerabilidade à erosão. Além disso, o estado do Rio Grande do Sul concentra trechos de rodovias com grau alto.

As únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** estão na BR-116 e BR-381 em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

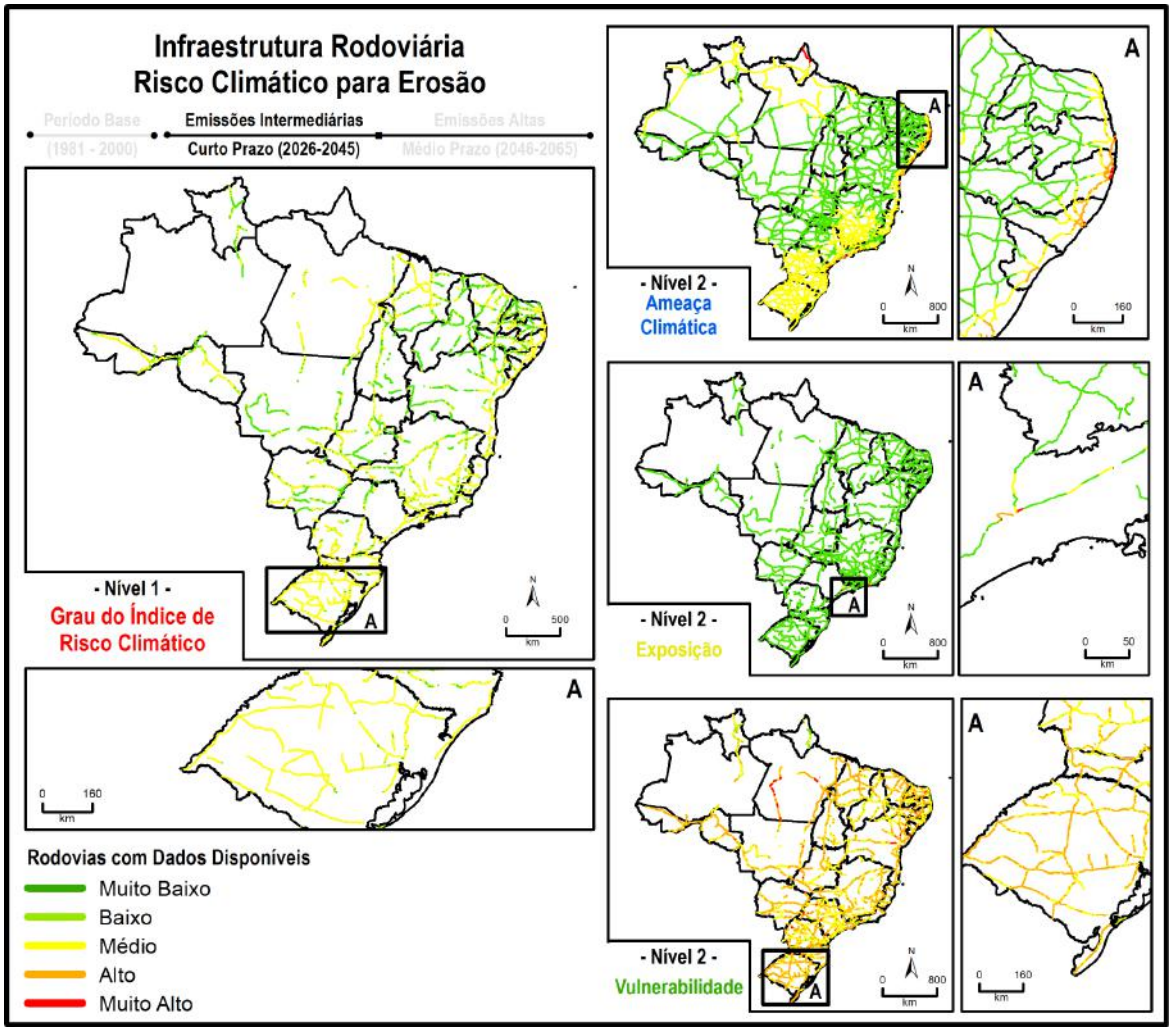
5.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto da erosão na infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto e médio prazo.

5.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 46 apresenta os mapas resultantes das análises, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 46. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Além disso, pode ser observado o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro, quando comparado com o período-base. Existem também outros trechos de concentrações do IRC médio que podem ser encontrados no litoral da Região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

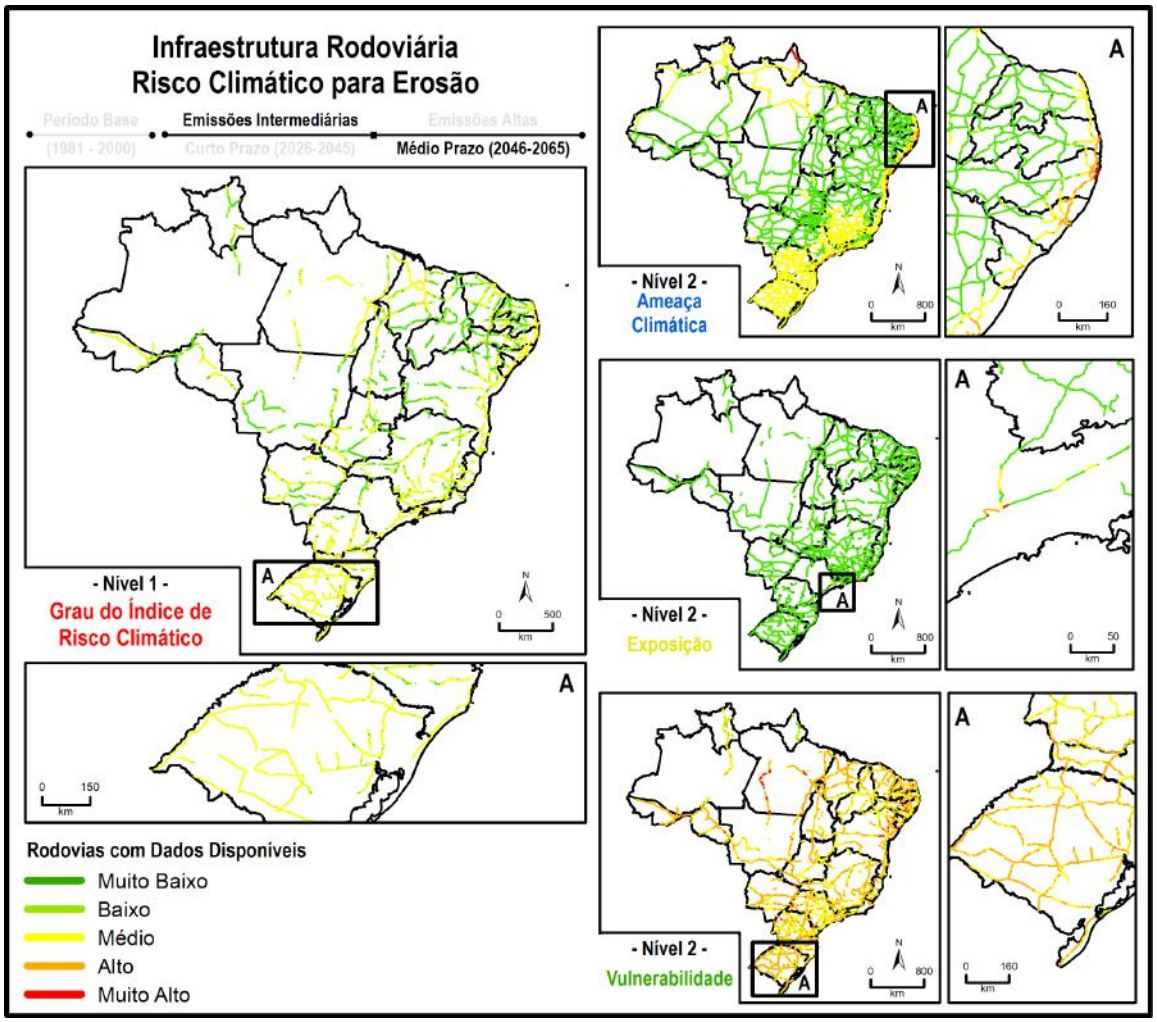
Considerando especificamente o Nível 2, nota-se que embora os mapas de exposição e vulnerabilidade sejam os mesmos para todos os cenários, para ameaça climática, os estados que compõem a Região Sul (principalmente) e Sudeste do Brasil passam de grau baixo, no cenário base, para grau médio, no cenário intermediário de curto prazo.

5.3.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão (Nível 1) para o

cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 47.

Figura 47- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Observa-se ainda o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro quando comparado com o período base; contudo, quando comparado ao período de curto prazo, as mudanças não são perceptíveis. Existem também outros trechos de concentrações do IRC médio que podem ser encontrados no litoral da região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Nos mapas de Nível 2, nota-se que as mudanças são imperceptíveis quando comparado ao cenário de emissões intermediárias de curto prazo; contudo, quando comparado ao período base, existe um aumento de risco de baixo para médio de ameaça climática nos estados do Sul e Sudeste brasileiro.

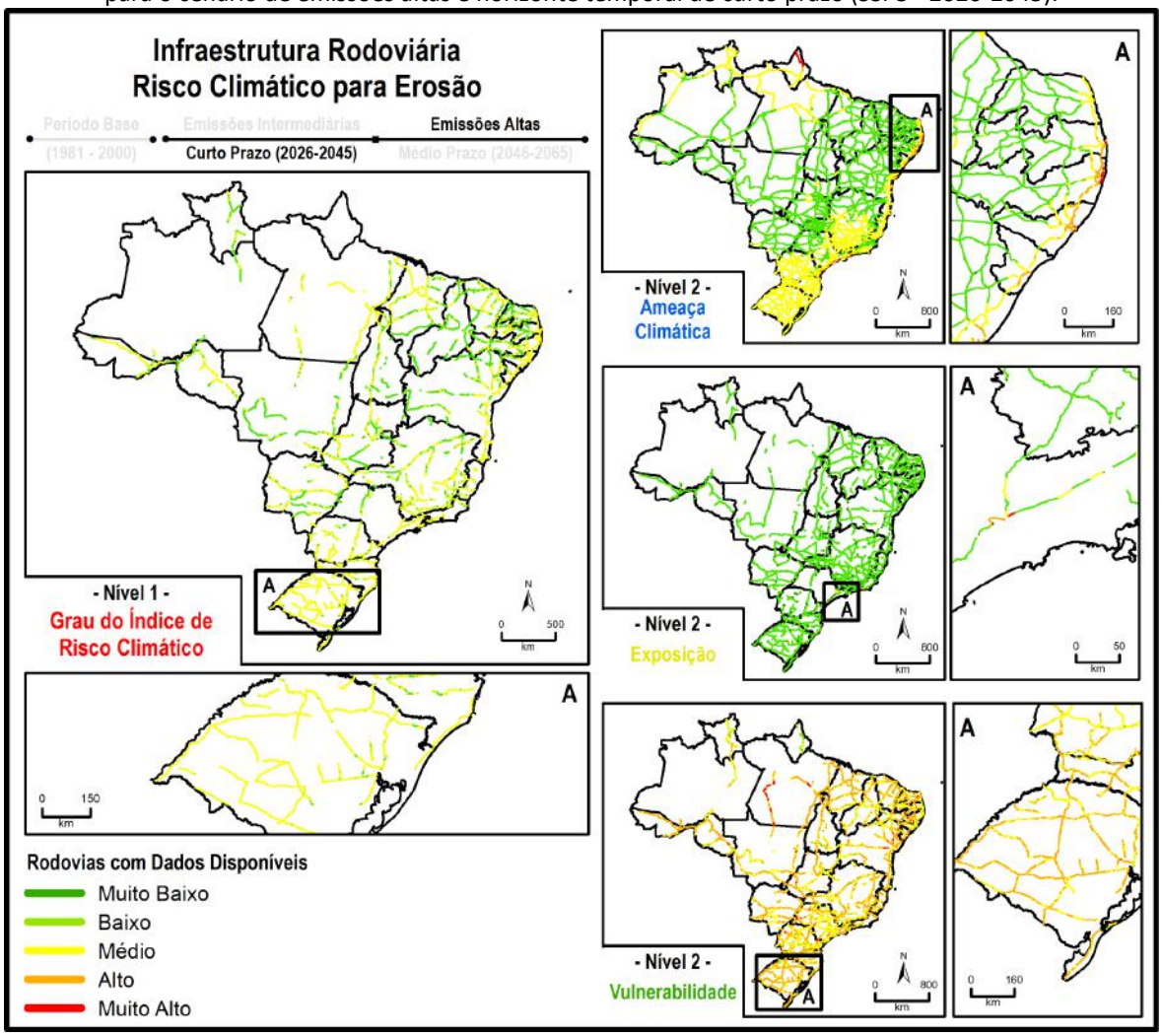
5.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de erosão na infraestrutura rodoviária considerando-se um cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.3.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 48 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 48 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

De acordo com a Figura 48, os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Assim como ocorre no IRC de emissões intermediárias, as mudanças não são perceptíveis nos mapas. A concentração dos trechos de IRC

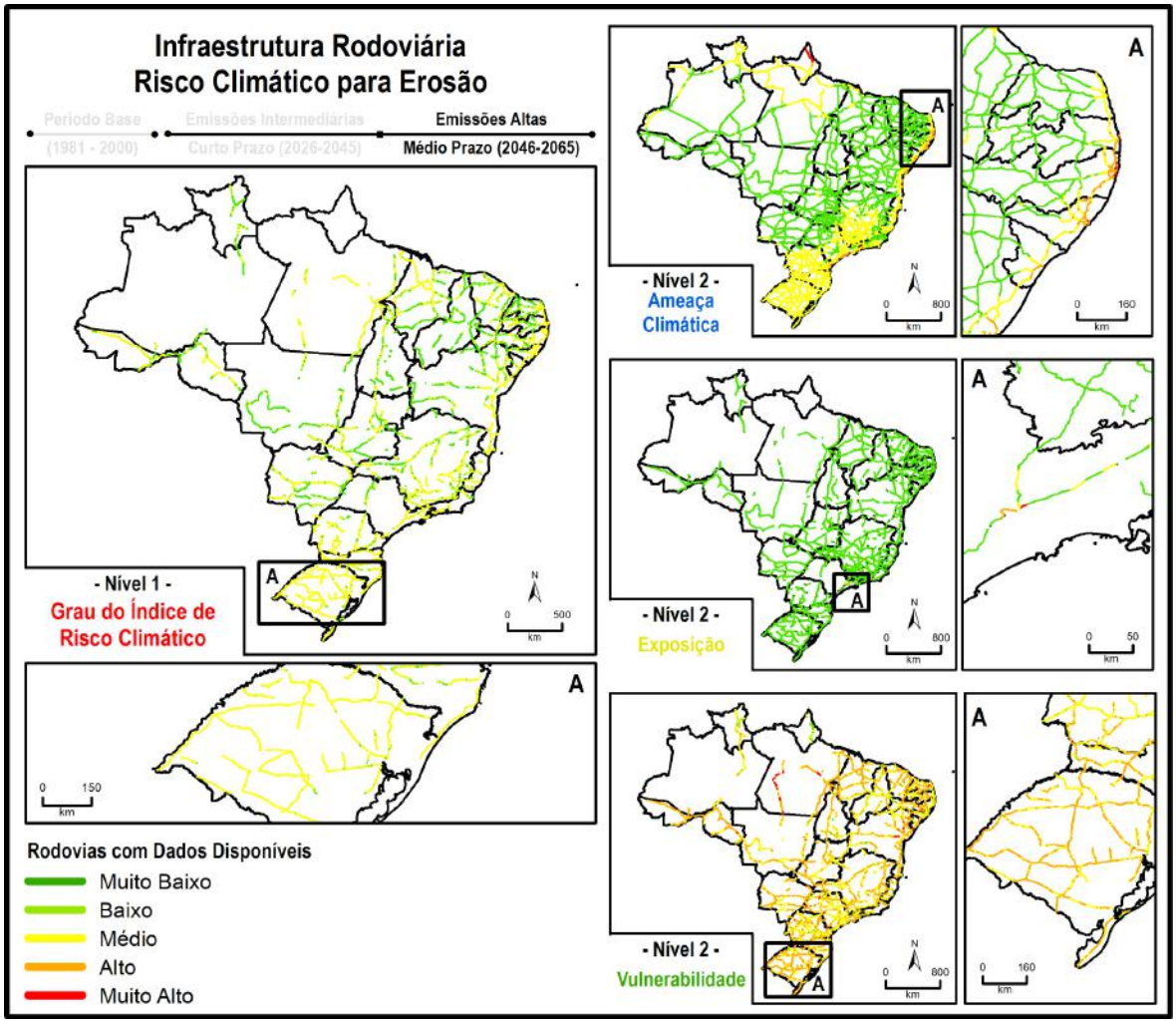
médio pode ser encontrada também no litoral das Regiões Nordeste e Sudeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Cabe ainda destacar que mudanças nos mapas do Nível 2 (ameaça climática, exposição e vulnerabilidade) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo são imperceptíveis quando comparadas com o Nível 2 das emissões intermediárias de curto prazo.

5.3.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 49 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, de exposição e de vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) na infraestrutura rodoviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065).

Figura 49 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Assim como no IRC de emissões intermediárias e emissões altas de curto prazo,

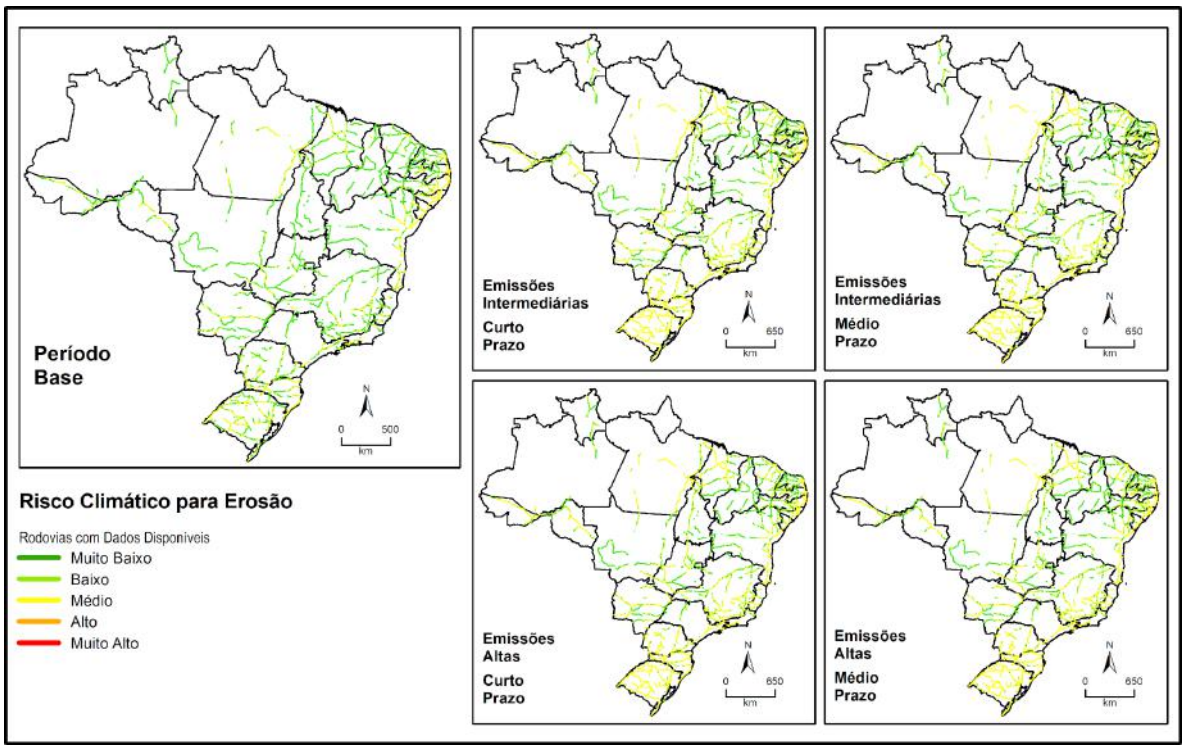
as mudanças não são perceptíveis. A concentração dos trechos de IRC médio pode ser encontrada também no litoral das Regiões Nordeste e Sudeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Destaca-se ainda que, mais uma vez, as mudanças nos mapas do Nível 2 (ameaça climática, exposição e vulnerabilidade) são imperceptíveis quando comparadas com o nível 2 das emissões intermediárias de curto e médio prazos e emissões altas de curto prazo.

5.3.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a erosão

A Figura 50 sintetiza os mapas de risco climático da infraestrutura rodoviária federal brasileira devido ao impacto direto da erosão. Nela, nota-se que as maiores variações de nível de risco climático encontram-se quando o cenário base é comparado aos demais cenários. Entretanto, quando se compara os horizontes temporais para os cenários de emissões intermediárias e altas, essas variações são praticamente imperceptíveis nos mapas.

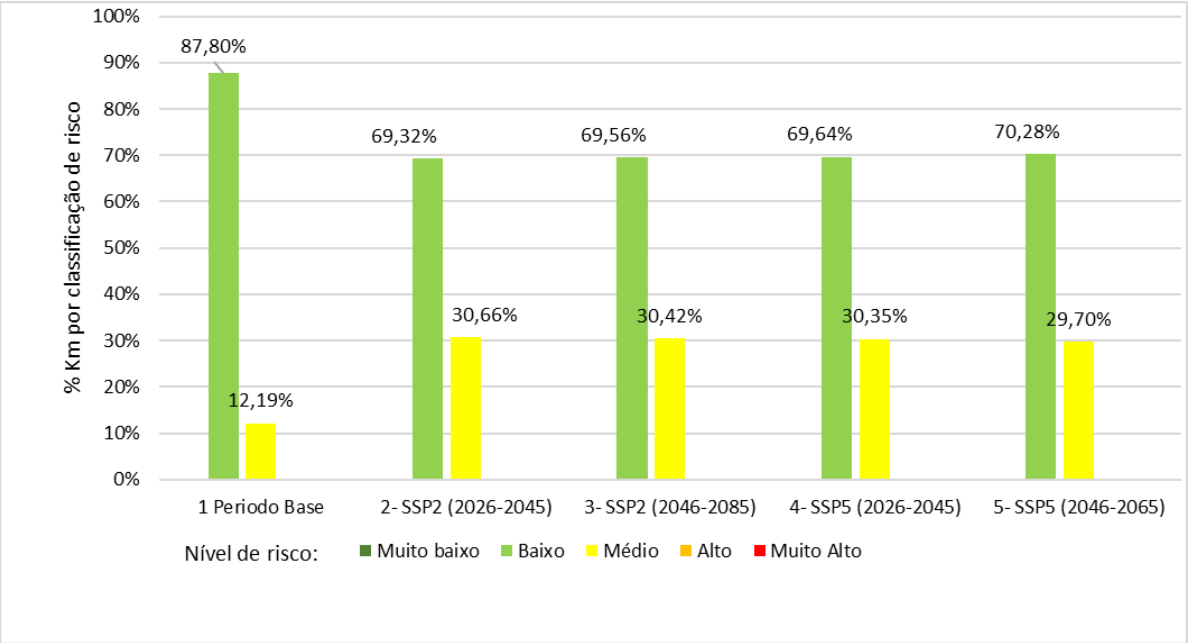
Figura 50 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e os horizontes temporais, é apresentada, na Figura 51, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão.

Figura 51. Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o **período base**, conforme exposto na Figura 51, 87,80% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão e 12,19% sob risco médio. Ainda de acordo com a Figura 51, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo** (SSP2 - 2026-2045), o IRC devido ao impacto de erosão é baixo em 69,32% das rodovias, médio em 30,66%. Isso mostra que quando comparado ao período base, aumentou-se o percentual de trechos com grau médio de risco e diminuiu-se o percentual de trechos com grau baixo.

Considerando ainda o cenário intermediário, mas com **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se que 69,56% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão e 30,42% encontram-se sob médio risco. Com isso, mostra-se que pouca variação é apresentada entre os horizontes temporais para o cenário de emissões intermediárias.

Em um **cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 69,64% das rodovias encontram-se sob risco climático baixo devido ao impacto de erosão e 30,35% sob risco médio. Já, considerando-se o **cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065)**, 70,28% da quilometragem de rodovias se encontrará sob risco climático baixo e 29,70% sob risco climático médio de impacto devido ao deslizamento.

De modo a realizar uma análise mais precisa dos resultados, a Tabela 10 apresenta o percentual dos trechos rodoviários, por grau de ameaça climática, para impactos devido à erosão em cada um dos cenários analisados e o período base.

Tabela 10 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para erosão.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,00%	94,71%	3,84%	1,31%	0,14%
SSP2 (2026-2045)	0,01%	60,31%	37,92%	1,35%	0,42%
SSP2 (2046-2065)	0,01%	60,92%	37,38%	1,28%	0,41%
SSP5 (2026-2045)	0,01%	60,92%	37,38%	1,28%	0,41%
SSP5 (2046-2065)	0,01%	62,48%	35,80%	1,32%	0,40%

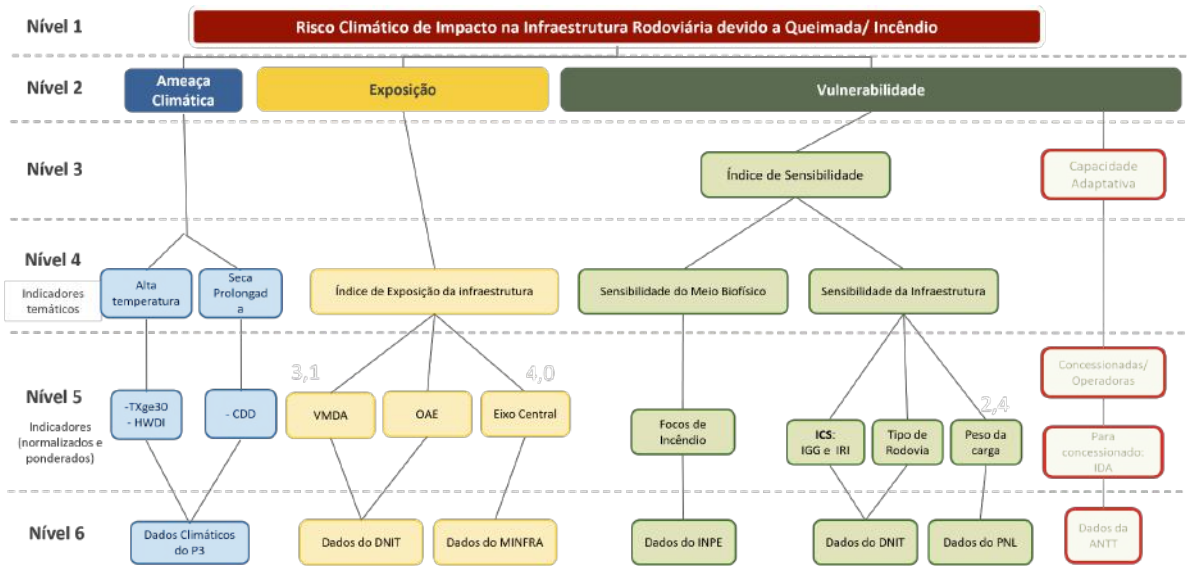
Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Tabela 10, nota-se que há um expressivo aumento dos trechos rodoviários sob grau de ameaça médio e consequente redução dos trechos sob grau de ameaça baixo em todos os cenários considerados, em comparação ao período base, mas não há alterações significativas entre os cenários.

5.4. Índice de Risco Climático devido ao impacto de queimada/ incêndio

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de queimada/incêndio foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 52.

Figura 52 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada/ incêndio.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 52, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de altas temperaturas e seca prolongada), foram considerados os dados de:

- TXge30: número de dias com temperatura máxima acima de 30°C, que indica a frequência de temperaturas altas;
- HWDI - *Heat Wave Duration Index* (Índice de duração de ondas de calor):período máximo em cada ano de pelo menos 5 dias consecutivos onde a temperatura máxima é de pelo menos 5 graus C mais quente do que a climatologia diária do período base (indica a persistência de temperaturas altas); e
- CDD: número máximo de dias secos consecutivos, que indica persistência de seca.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

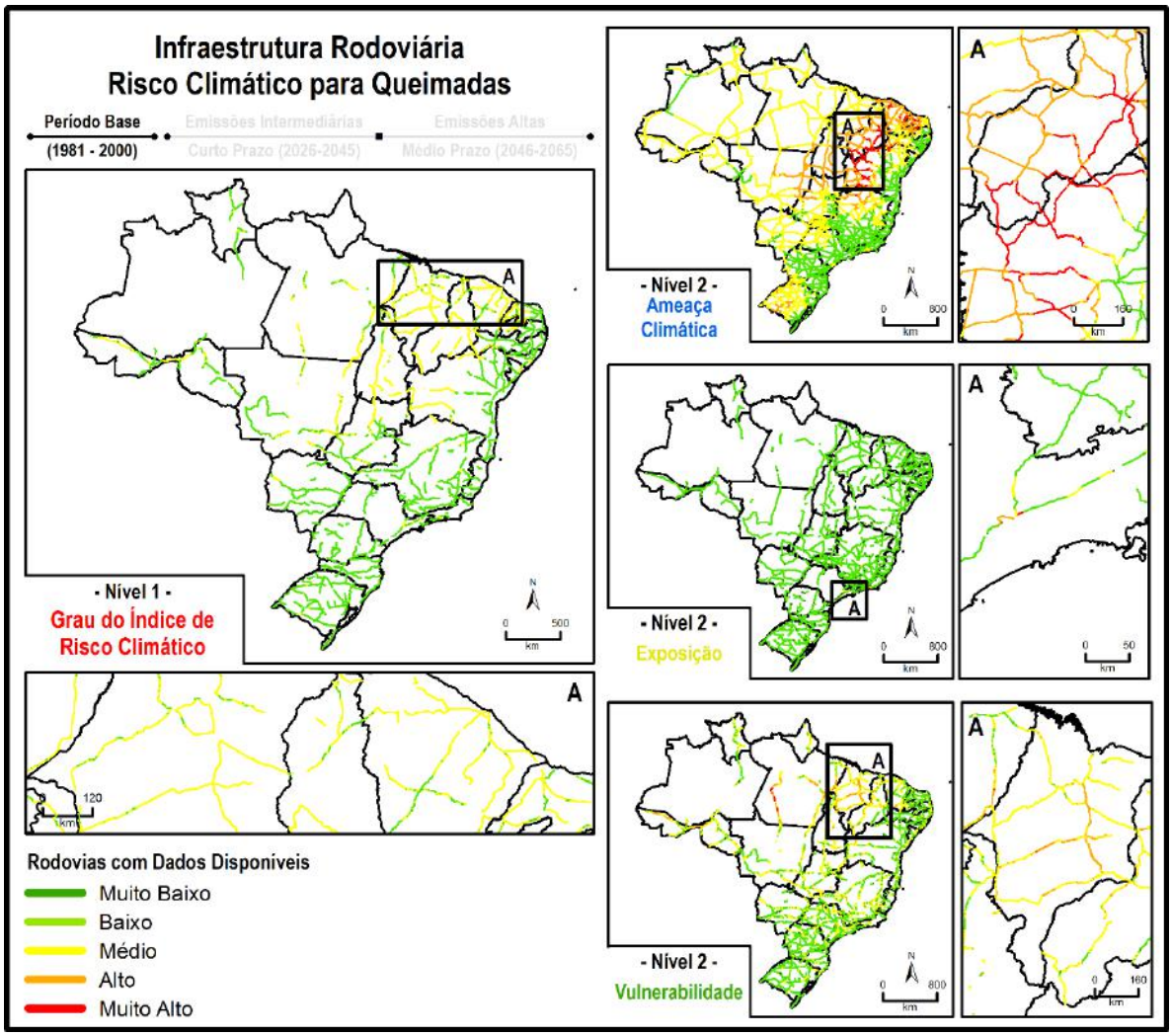
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador calculado a partir do mapa de incêndio do INPE; e
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de queimada/incêndio.

5.4.1 Período base | Queimada

A Figura 53 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido a queimada/incêndio (Nível 1), para o período base.

Figura 53 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à queimada, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático** - composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade - devido ao impacto de queimadas/incêndios na infraestrutura rodoviária federal brasileira indica que existem trechos com risco climático médio (o maior grau encontrado) no Maranhão, Piauí, Ceará, Tocantins e o interior do Rio Grande do Norte e Paraíba, além de alguns trechos em rodovias no interior da Bahia e em estados da região Centro-Oeste. O estado do Acre chama a atenção com a BR-364, com grau médio. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a queimadas alto ou muito alto (Figura 53).

Apenas trechos de rodovias nos Estados de Maranhão, Piauí e interior da Bahia apresentam-se com grau muito alto de **ameaça climática**. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas e médias no estado do Rio Grande do Sul, na região Centro-Oeste, norte de Minas Gerais e no interior da região Nordeste, além de praticamente toda região Norte com grau médio.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a queimadas/incêndios, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, as rodovias com grau de ameaça climática muito alto

e/ou alto concentram-se nos estados do Maranhão, Piauí e Pará. O estado do Acre e outros estados inseridos na região Centro-Oeste destacam-se por apresentarem trechos rodoviários com grau de ameaça climática altos e médios. Todas as demais rodovias têm grau baixo e médio.

As únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** estão na BR-116 e BR-381 em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

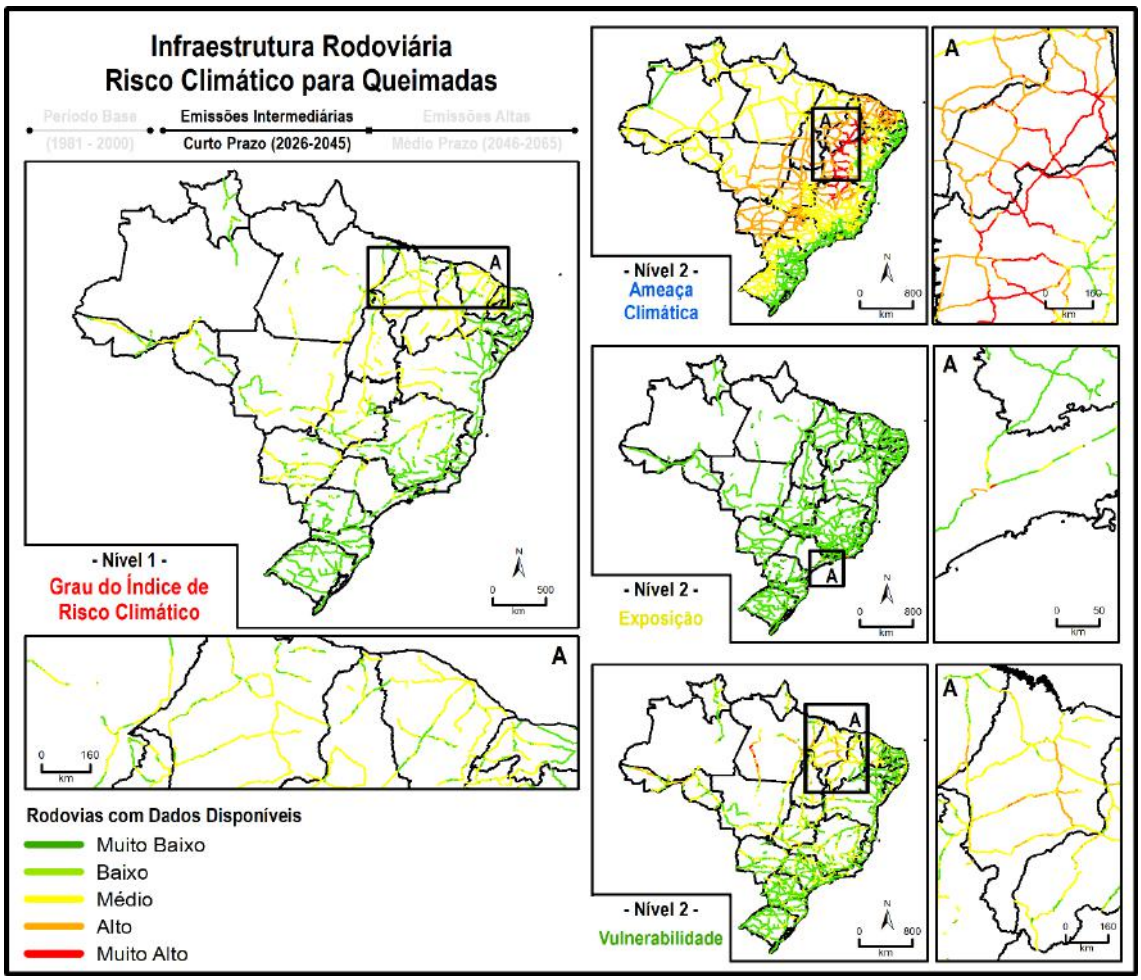
5.4.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção são apresentados os resultados do IRC de impacto devido a queimadas/incêndios sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

5.4.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 54 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo.

Figura 54 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com maiores graus de IRC se concentram no interior da região Nordeste (estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte), em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás) e interior do Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 54, que apresentam risco climático médio de impacto devido a queimadas/ incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 54).

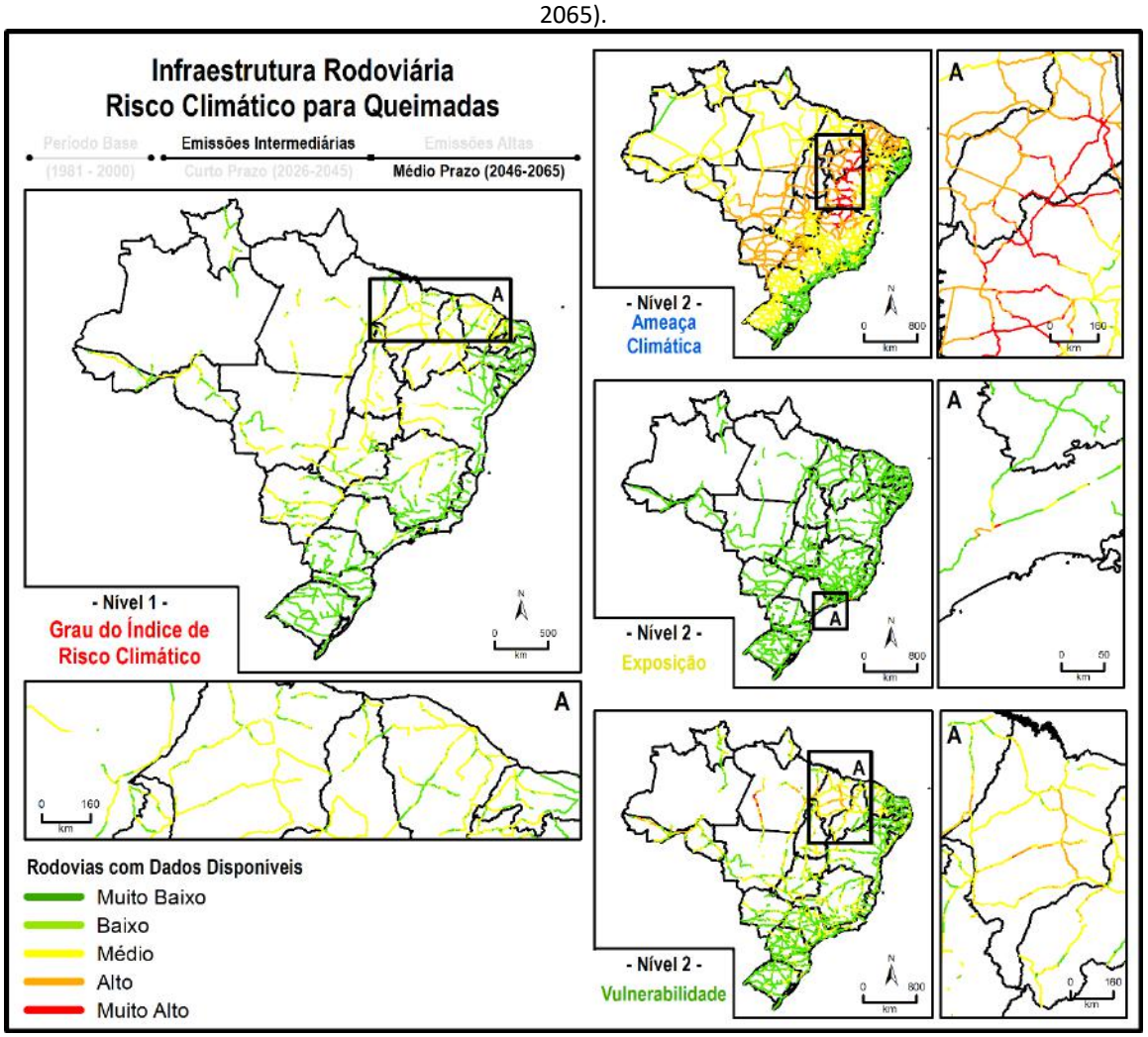
Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no aumento de trechos rodoviários sob risco climático médio, especialmente no estado do Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais.

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta e alta, continuam se concentrando no Nordeste, principalmente nas rodovias que atravessam o interior da Bahia em direção ao estado do Piauí, e na região Centro-Oeste. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste, e médias em todo o interior das regiões Sul, Sudeste e Norte.

5.4.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 55 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo.

Figura 55 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático (IRC)** para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo, tal como ocorre no horizonte temporal de curto prazo, se concentram na região Nordeste (estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, e interior da Bahia), em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás) e interior do Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 55, que apresentam risco climático médio de impacto devido à queimadas/ incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 55).

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta continuam se concentrando no Nordeste, tal como apresentado para o período base e cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo, principalmente nas rodovias que atravessam o interior da Bahia em direção ao estado do Piauí e de Minas Gerais. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste e Centro-Oeste, e médias em toda a região Norte, bem como, interior das regiões Sul e Sudeste do país. As rodovias localizadas no litoral do País (do Rio Grande do Sul ao Rio Grande do Norte) encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 55).

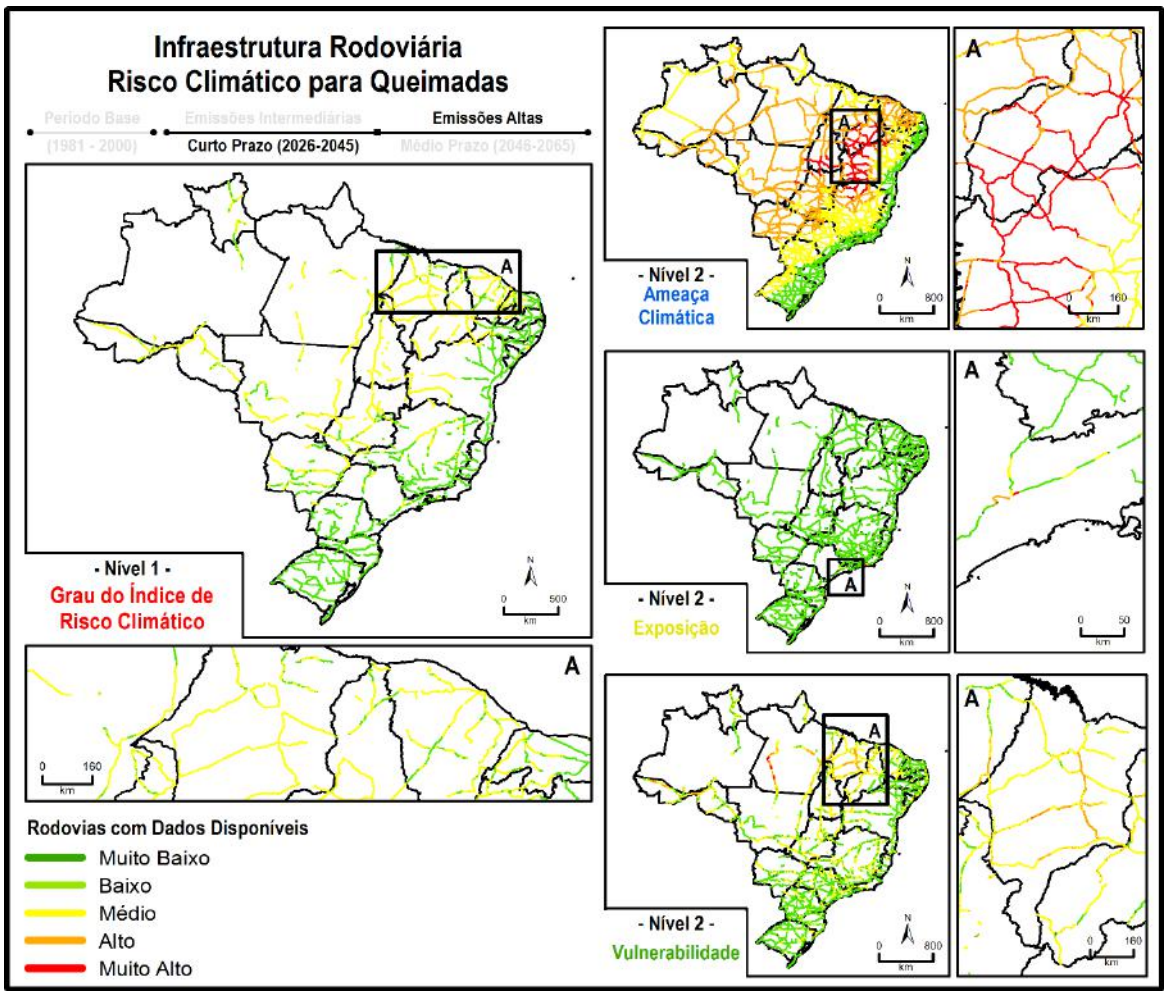
5.4.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto devido a queimadas/incêndios sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

5.4.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 56 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo.

Figura 56 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

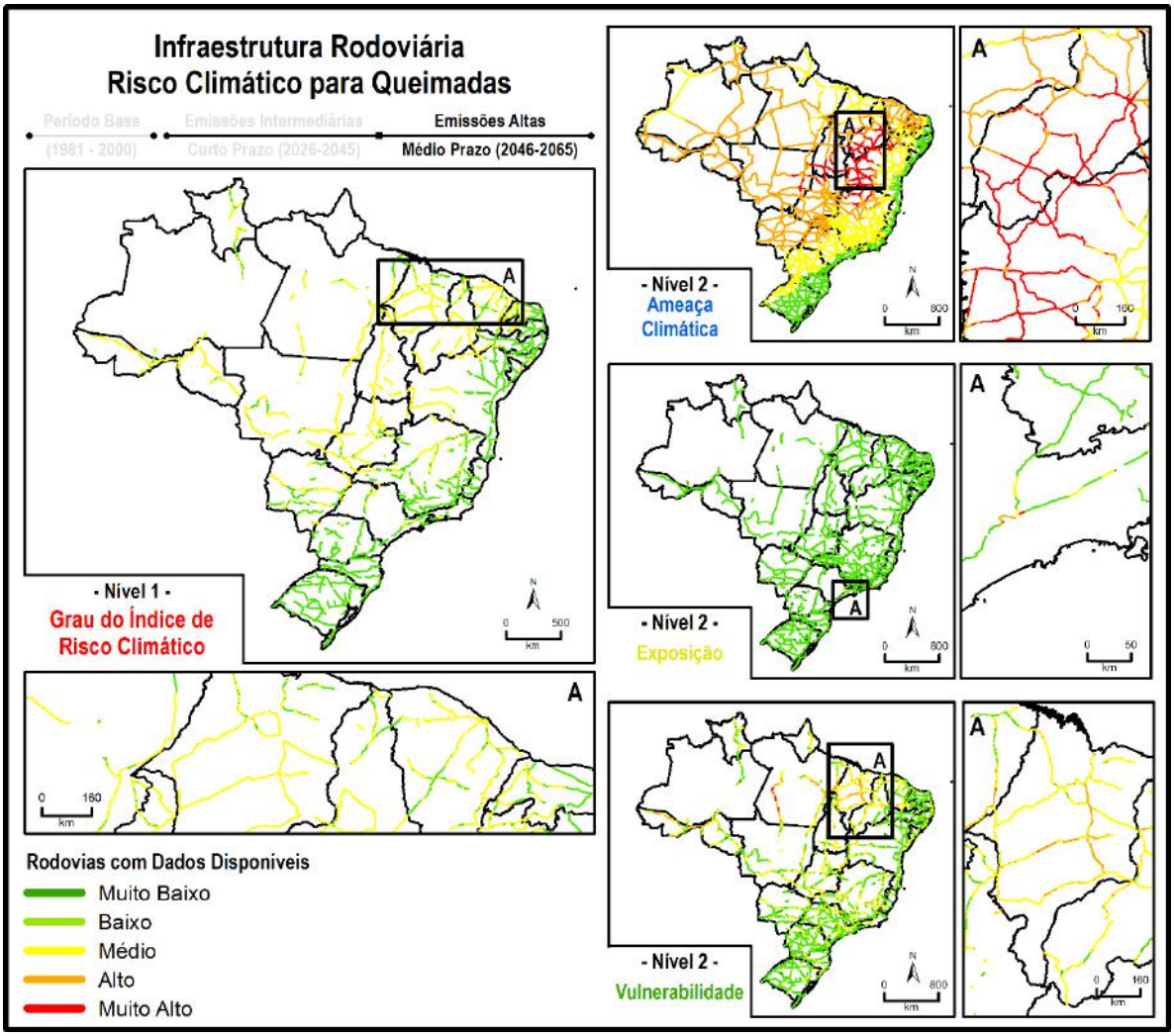
O **Índice de Risco Climático (IRC)** para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo, tal como ocorre no cenário de emissões intermediárias para ambos os horizontes temporais analisados, se concentra na região Nordeste, em parte da região Centro-Oeste e Norte e interior do Sudeste (Figura 56), que apresentam risco climático médio de impacto devido à queimada/ao incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 56).

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta continuam se concentrando no Nordeste, especialmente no interior da Bahia e Piauí, bem como, ao norte do Estado de Minas Gerais. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste, Norte e em todo o Centro-Oeste, e médias no interior das regiões Sul, Sudeste, parte da região Nordeste e extremo norte do Brasil (estados do Amazonas, Acre, Amapá e Roraima). As rodovias localizadas no litoral do país (do Rio Grande do Sul ao Rio Grande do Norte) encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 56).

5.4.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 57 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo.

Figura 57 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 5-2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O Índice de Risco Climático (IRC) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo não sofre mudanças sensíveis se comparado ao observado nos cenários anteriores (Figura 57),

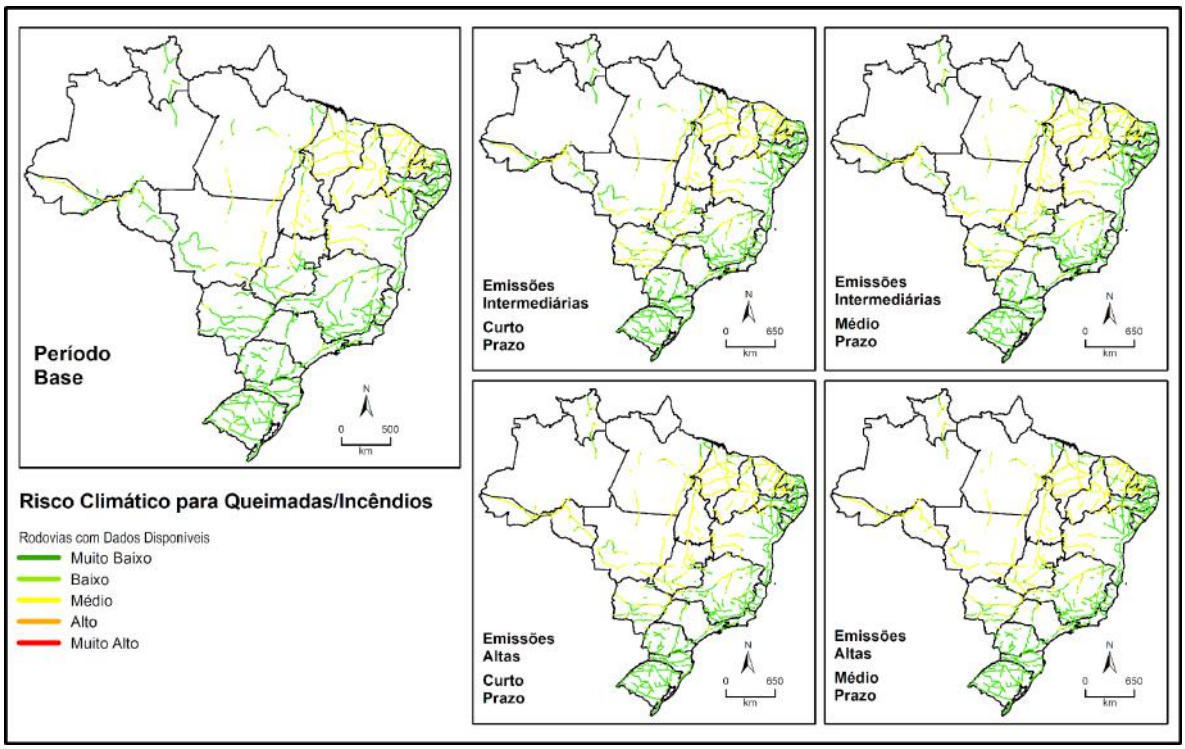
predominando trechos rodoviários com risco climático médio de impacto devido a queimadas/ incêndio por todo o interior do país, nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, e as demais rodovias localizadas no litoral brasileiro e na região Sul apresentando grau de risco climático baixo (Figura 57).

A **ameaça climática** permanece muito alta no Nordeste (interior da Bahia e Piauí), bem como, ao norte do Estado de Minas Gerais. Além desses, predominam trechos com ameaças altas por todo o país, e médias no interior das regiões Sul, Sudeste, parte da região Nordeste e extremo Norte do Brasil. As rodovias localizadas no litoral do país encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 57).

5.4.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a queimada

A Figura 58 apresenta a síntese dos mapas do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio para o período base e os cenários de emissões intermediárias e altas, em ambos os horizontes temporais.

Figura 58 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de queimada.

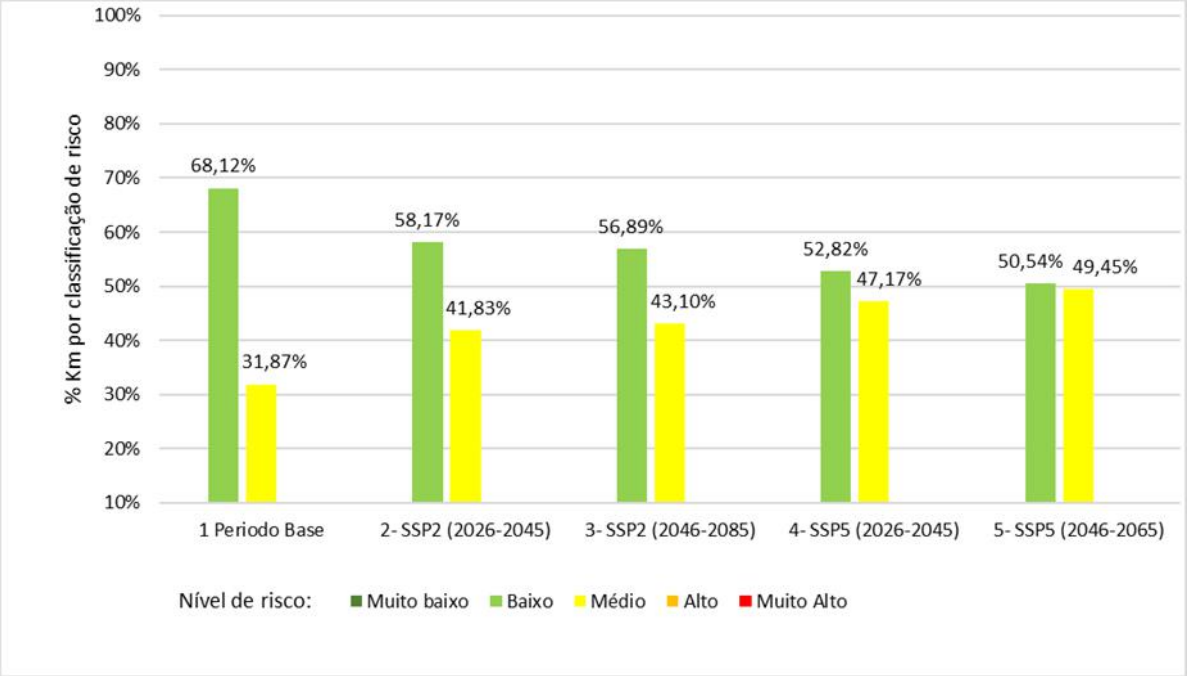


Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 58, observa-se que o **risco climático** devido ao impacto de queimada/incêndio para o período base é predominantemente baixo para todo o território brasileiro, com algumas áreas com risco médio no interior do Nordeste brasileiro e parte do Centro-Oeste e Norte. Conforme modifica-se o cenário para emissões intermediárias, os trechos de rodovias sob baixo risco diminuem, se considerado o horizonte temporal de curto prazo, reduzindo progressivamente para o horizonte temporal de médio prazo, e para o cenário de emissões altas, de curto e longo prazos. Enquanto isso, ocorre um aumento dos trechos de rodovias sob médio risco, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil.

De modo a facilitar a visualização do crescimento de trechos rodoviários com risco médio na infraestrutura de transportes federal, e as diferenças entre os diferentes cenários e horizontes temporais, apresenta-se a Figura 59, com a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a queimadas/incêndios.

Figura 59 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 59, percebe-se que, no **período base**, 68,13% das rodovias federais encontram-se sob baixo risco devido ao impacto de queimadas/incêndios, e 31,87% encontram-se sob médio risco. Em um **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) e horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)**, verifica-se uma redução de 9,95% dos trechos sob baixo risco, passando a 58,17%, e um crescimento equivalente de trechos sob médio risco, passando a 41,83%. Modificando-se o horizonte temporal para **médio prazo (2046-2065)**, observa-se a redução de trechos sob baixo risco, bem como, o aumento de trechos sob médio risco, sendo aproximadamente 1,28% para ambos os graus de risco. Por fim, em um **cenário de emissões altas (SSP-5)**, ocorre novamente um aumento do grau de risco de trechos de rodovias federais: 52,82% de trechos sob baixo risco no horizonte temporal de **curto prazo (2026-2045)**, e 50,54%, no de **médio prazo (2046-2065)**; e 47,17% de trechos sob médio risco em curto prazo, e 49,45%, em médio prazo. Portanto, no pior cenário (emissões altas e horizonte temporal de médio prazo), quase metade das rodovias federais brasileiras encontrar-se-ão sob médio risco devido ao impacto de queimada/incêndio.

Essa variação decorre unicamente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A **ameaça climática** é muito alta, especialmente nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Pará, com trechos de ameaça alta e média em todo o interior dos demais estados do Norte, Nordeste e Centro-Oeste e parte norte de Minas Gerais, e baixa ao longo de rodovias localizadas no litoral brasileiro (Figura 58). Por sua vez, a **exposição** não sofre alterações ao longo dos cenários, permanecendo a mesma, com as únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto sendo a BR-116 e BR-

381, ambas em São Paulo, e as demais rodovias com exposição baixa ou muito baixa. A ameaça média contribui especialmente na região Sul para os valores dos IRCs mais altos. O mesmo ocorre com a **vulnerabilidade**, que em todos os cenários, bem como, no período base, permanece com diversos trechos de rodovias no país apresentando vulnerabilidade baixa e média, com exceção de trechos no Pará, que possuem vulnerabilidade alta ou muito alta.

A Tabela 11 apresenta o percentual dos trechos, por grau de ameaça climática, para impactos devido a queimadas/incêndios em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 11 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para queimada/ incêndios.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,16%	34,42%	46,20%	15,89%	3,33%
SSP2 (2026-2045)	0,03%	20,59%	48,20%	26,89%	4,29%
SSP2 (2046-2065)	0,03%	17,41%	50,58%	28,27%	3,71%
SSP5 (2026-2045)	0,03%	19,76%	37,21%	36,50%	6,50%
SSP5 (2046-2065)	0,03%	17,40%	34,24%	41,12%	7,21%

Fonte: Elaboração própria (2022).

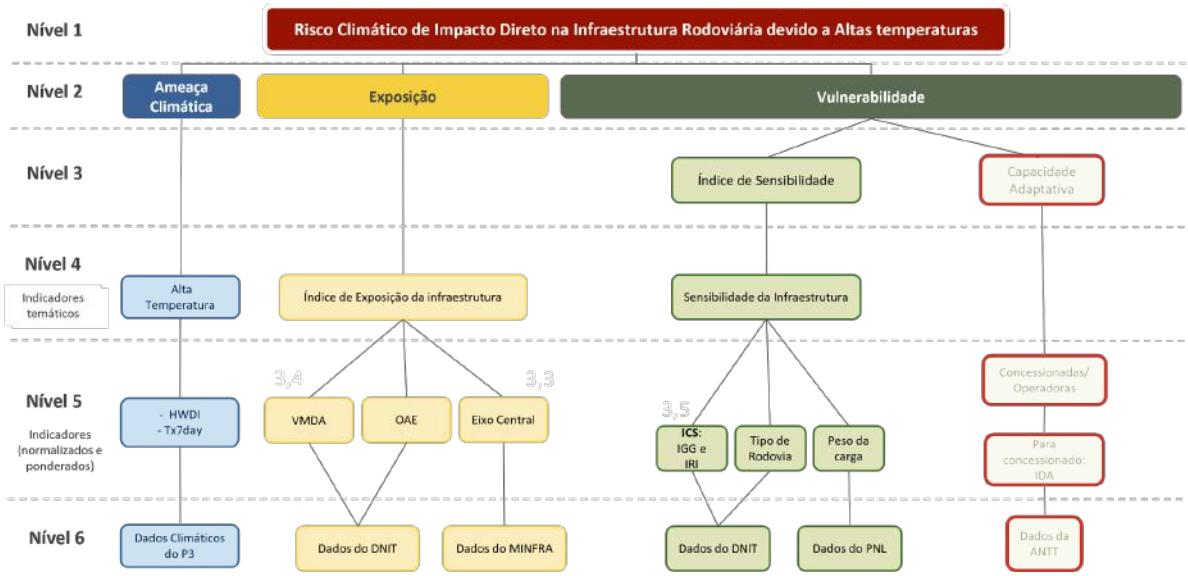
Conforme se observa na Tabela 11, no **período base**, predominam no país trechos sob baixo e médio grau de ameaça climática (34,42% e 46,21%, respectivamente). Os trechos sob muito baixa ameaça são poucos (0,16%), e aqueles sob risco alto ou muito alto, somados, equivalem a 19,22%. Com a mudança dos cenários analisados e horizontes temporais considerados, verifica-se um aumento progressivo de trechos sob risco muito alto e alto - 31,18% para emissões intermediárias e curto prazo, 32,56% para o mesmo cenário de emissões, mas o período de médio prazo, 43% para cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo, e 48,33% para o mesmo cenário de emissões a médio prazo. Portanto, verifica-se que, entre ⅓ e quase ½ da infraestrutura rodoviária federal brasileira está sob ameaça climática alta ou muito alta de impactos devido a queimadas/ incêndios.

Os trechos sob risco médio aumentam do período-base ao SSP-2 (2026-2045) - de 46,21% a 48,20% (curto prazo) e 50,58% (médio prazo) (Tabela 11) -, diminuindo no cenário SSP-5 - 37,20% (curto prazo) e 34,24% (médio prazo). Isso se deve à mudança do grau de ameaça de trechos que, antes categorizados como média, passaram a alta ou muito alta. Por sua vez, os trechos sob ameaça muito baixa e baixa sofrem redução, considerando os diferentes cenários e horizontes temporais.

5.5. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de altas temperaturas foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 60.

Figura 60 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 60, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de altas temperaturas), foram considerados os dados de:

- HWDI (*Heat Wave Duration Index*) - índice de duração de ondas de calor: período máximo em cada ano de, pelo menos, 5 dias consecutivos onde a temperatura máxima é de pelo menos 5 graus C mais quente do que a climatologia diária do período base (indica a persistência de temperaturas altas); e
- Tx7day - média dos 7 (sete) dias consecutivos mais quentes do ano: indica a persistência de temperaturas altas.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

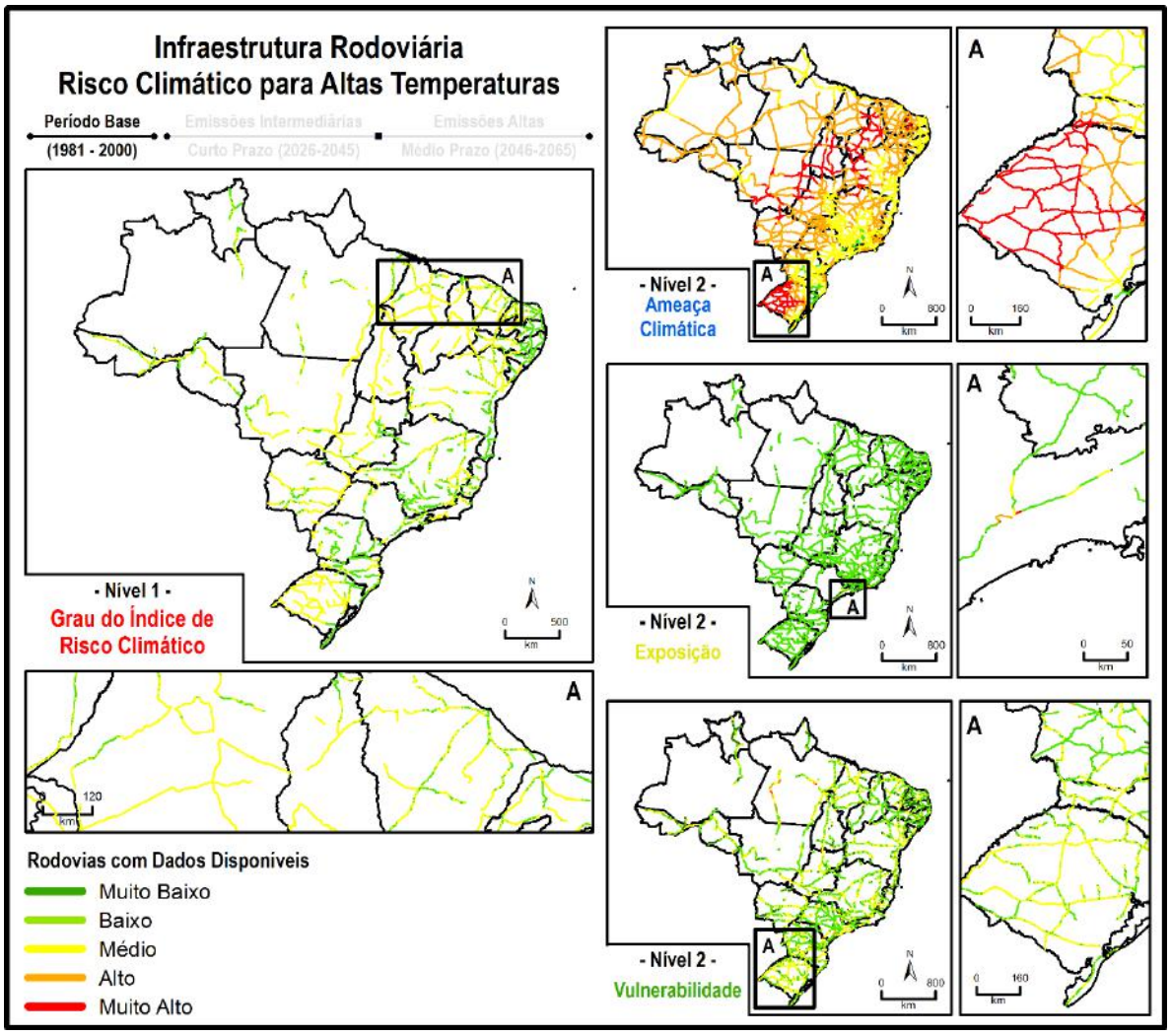
Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade da infraestrutura, calculados a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de altas temperaturas.

5.5.1 Período base | Impacto direto de altas temperaturas

A Figura 61 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido às altas temperaturas (Nível 1), para o período base.

Figura 61 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O maior IRC, grau médio de risco climático médio, foi verificado em trechos de rodovias nos estados do Maranhão, Piauí e Ceará, além de quase todos os trechos de rodovias nos Estados do Rio Grande do Sul e Tocantins. Cabe destacar ainda rodovias que têm grau de risco climático baixo como, por exemplo, as pertencentes aos estados do Paraná e Santa Catarina no Sul e do litoral do Nordeste brasileiro. Além disso, ressalta-se que não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a altas temperaturas com grau alto ou muito alto (Figura 61).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verificam-se trechos de rodovias localizadas nos Estados do Piauí, Tocantins, no interior da Bahia, no Mato Grosso e principalmente no Rio Grande do Sul com grau muito alto de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos de rodovias com grau alto em quase toda a região Norte, Centro-Oeste, interior da região

Nordeste, e nos estados de Minas Gerais e São Paulo. Os estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo, Santa Catarina, bem como, trechos localizados nos litorais do estado de São Paulo e da região Nordeste encontram-se com grau médio e alto.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a altas temperaturas, composta apenas pela sensibilidade da infraestrutura já que não existe sensibilidade do meio biofísico para esse impacto, destacam-se os Estados do Rio Grande do Sul, com grau de ameaça climática médio em muitos trechos, e do Pará, com trechos rodoviários com grau alto e muito alto. Todas as demais rodovias têm grau médio e baixo de ameaça climática devido a altas temperaturas, com alguns pontos apresentando grau muito baixo.

As únicas rodovias que apresentam trechos de rodovias com grau médio, alto e muito alto de **exposição** localizam-se na BR-116 e BR-381, em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

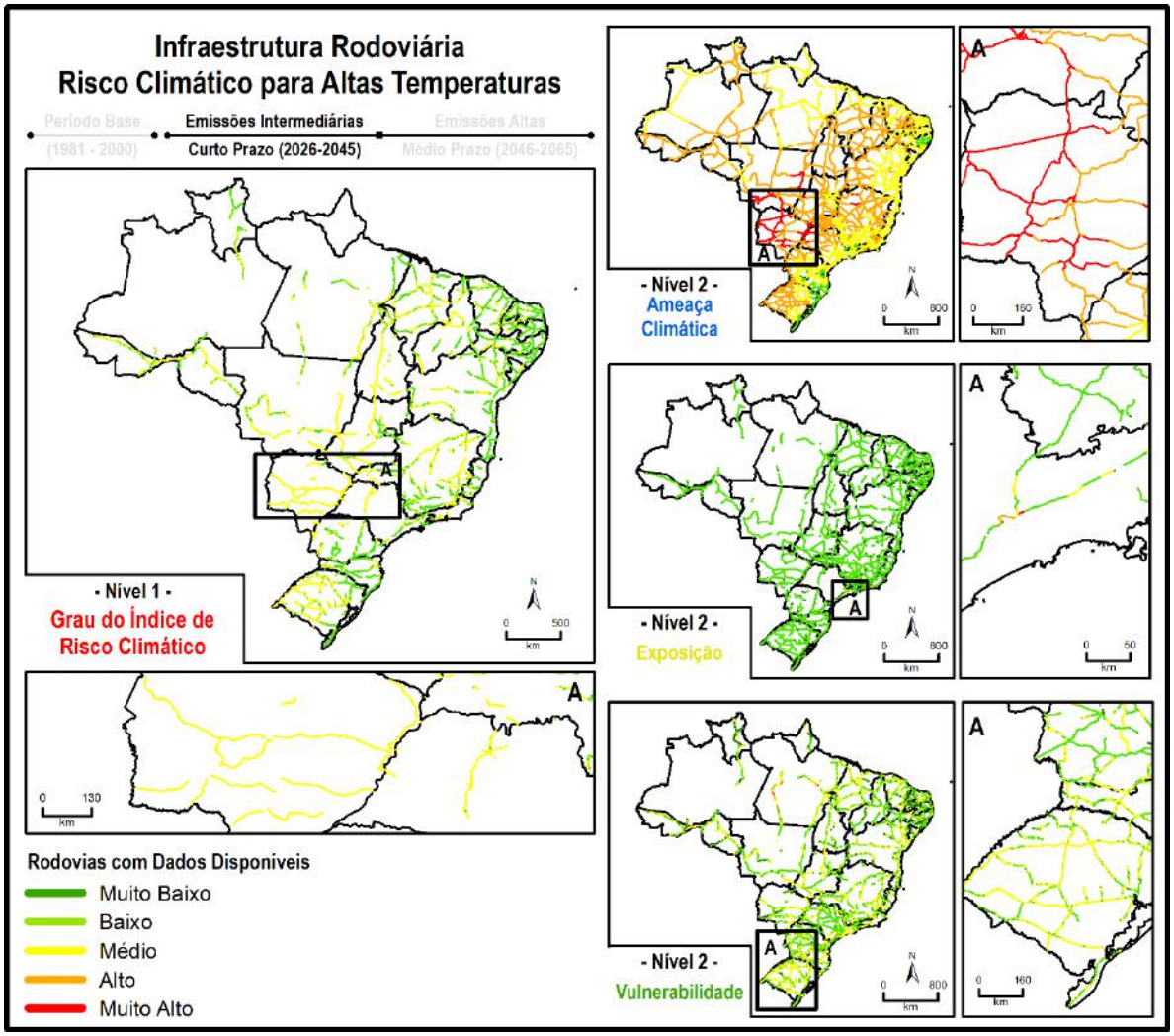
5.5.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias nos horizontes temporais de curto (2026 - 2045) e médio (2046 - 2065) prazos.

5.5.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 62 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026 - 2045).

Figura 62 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

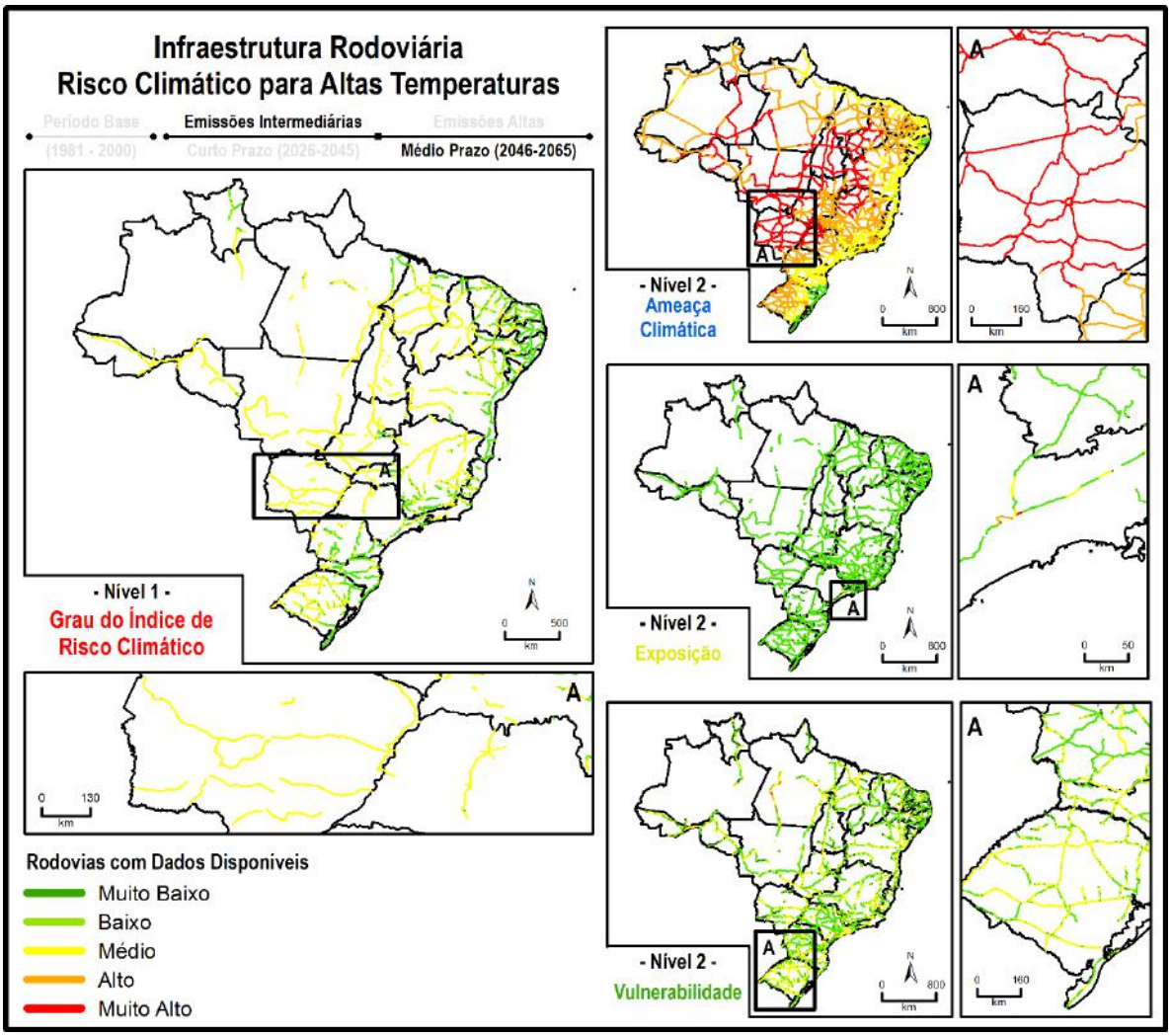
Os trechos com maiores graus de IRC se concentram em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul e Goiás) e Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 62, que apresentam risco climático médio devido ao impacto direto de altas temperaturas. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo e muito baixo (Figura 62).

Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no componente de **ameaça climática**, em que os trechos sob ameaça muito alta e alta, antes concentrados na região Sul do país - especificamente no Estado do Rio Grande do Sul, onde passam ao grau de ameaça alto e médio no interior desse estado, indo ao grau baixo no litoral -, passam se concentrar nos estados da Região Centro-Oeste (MS e MT), apesar de estarem presentes em rodovias distribuídas por todo o interior do país. Excetuam-se parte da região Norte, onde se verificam trechos de rodovias com grau de ameaça climática médio devido a altas temperaturas, e por todo o litoral brasileiro, onde há trechos sob risco médio e baixo.

5.5.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 63.

Figura 63 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se a manutenção das rodovias sob risco de impacto direto devido a altas temperaturas, se comparado ao cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045). A principal diferença está no aumento da ameaça climática nas rodovias da região Centro-Oeste e no interior do Nordeste brasileiro, bem como, no norte do Estado de Minas Gerais.

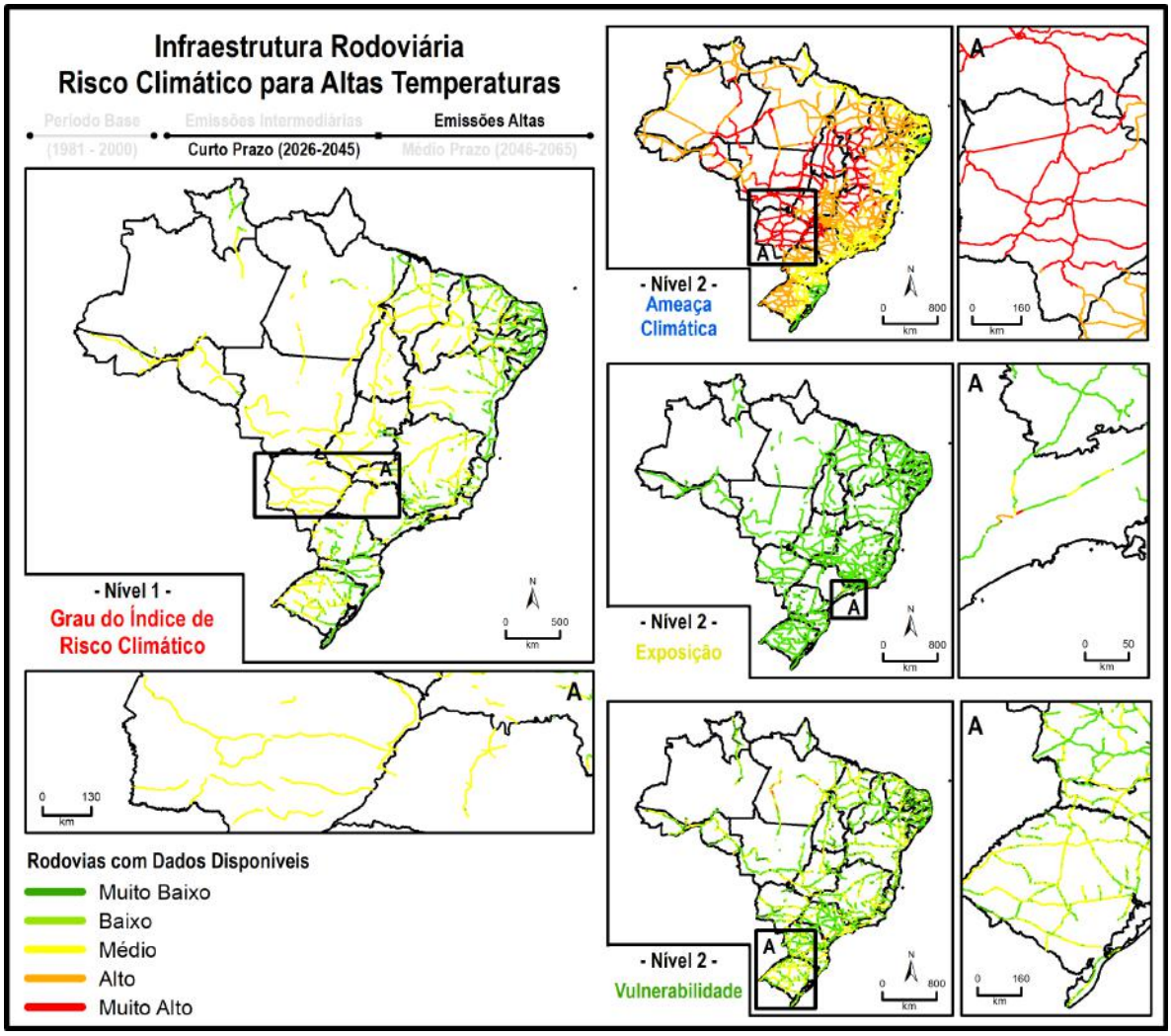
5.5.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio prazos (2046-2065).

5.5.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 64 apresenta os mapas resultantes para a infraestrutura rodoviária, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 64 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando a Figura 64, nota-se as rodovias localizadas ao longo do litoral brasileiro, bem como, nos estados de Santa Catarina e Paraná apresentam nível baixo de risco de impacto devido às altas temperaturas. Já os maiores graus de risco climático médio devido ao impacto direto de altas temperaturas estão na região Centro-Oeste, Norte, interior da região Nordeste e Sudeste, e no Sul concentrados no estado do Rio Grande do Sul.

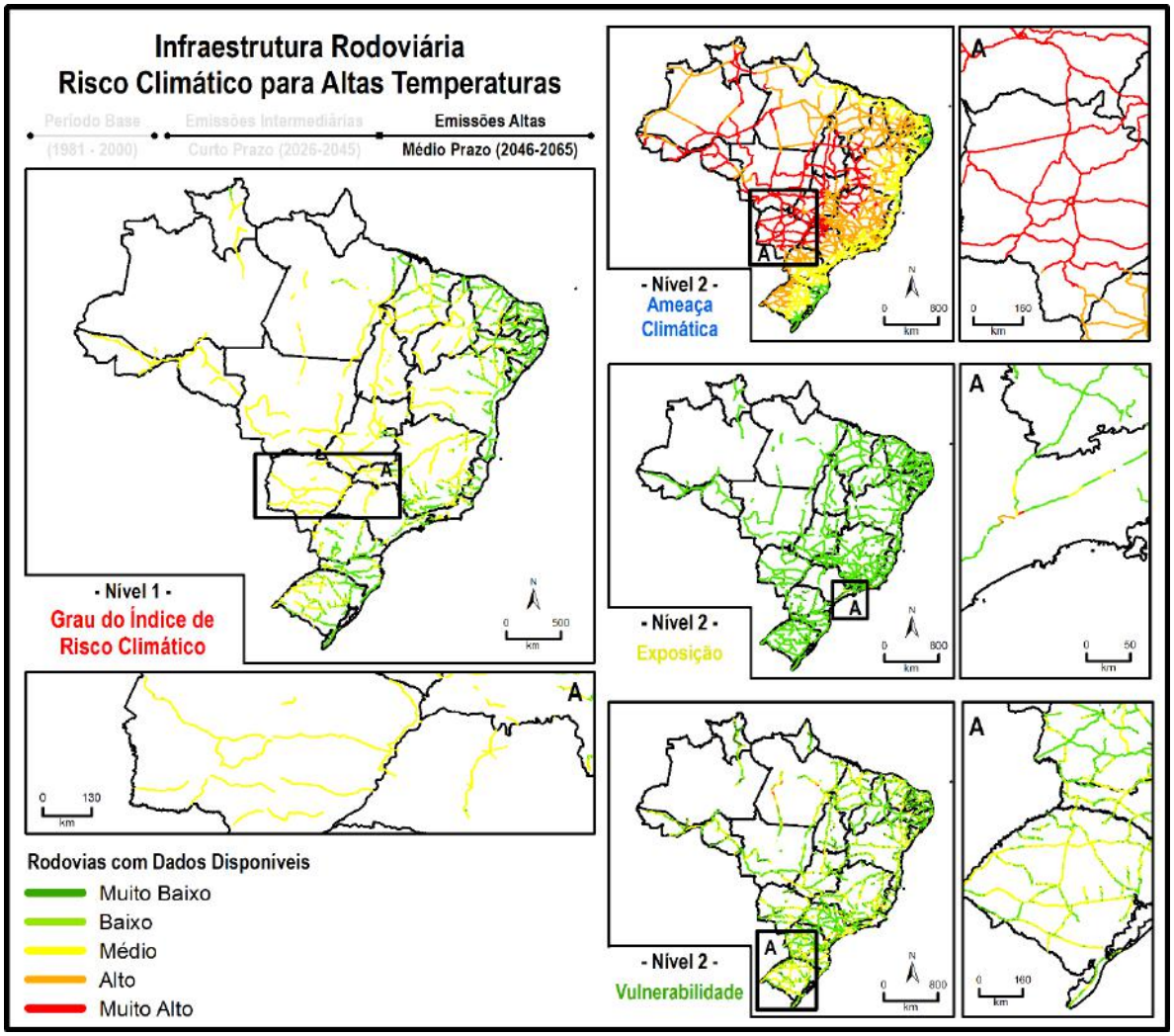
Se comparado ao período base (Figura 61) e ao cenário de emissões intermediárias, mantendo-se o horizonte temporal (curto prazo) (Figura 62), verifica-se uma diminuição dos trechos de rodovias sob baixo risco e um aumento de trechos de rodovias sob médio risco; já se compararmos ao cenário de emissões baixas e horizonte temporal de longo prazo (Figura 63), verifica-se uma redução de trechos rodoviários sob risco médio devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Verifica-se para o Nível 2 o aumento de trechos no Norte, Centro-Oeste e interior do Nordeste do Brasil sob ameaça climática muito alta e alta, com destaque ao estado do Mato Grosso do Sul, onde todas as rodovias analisadas encontram-se sob muito alto grau de ameaça climática; além disso, aumentam também os trechos com ameaça média e baixa (distribuídas ao longo do litoral brasileiro, perpassando as regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Norte), com redução de trechos rodoviários com ameaça climática devido ao impacto direto de altas temperaturas muito baixa.

5.5.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 65 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 65 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

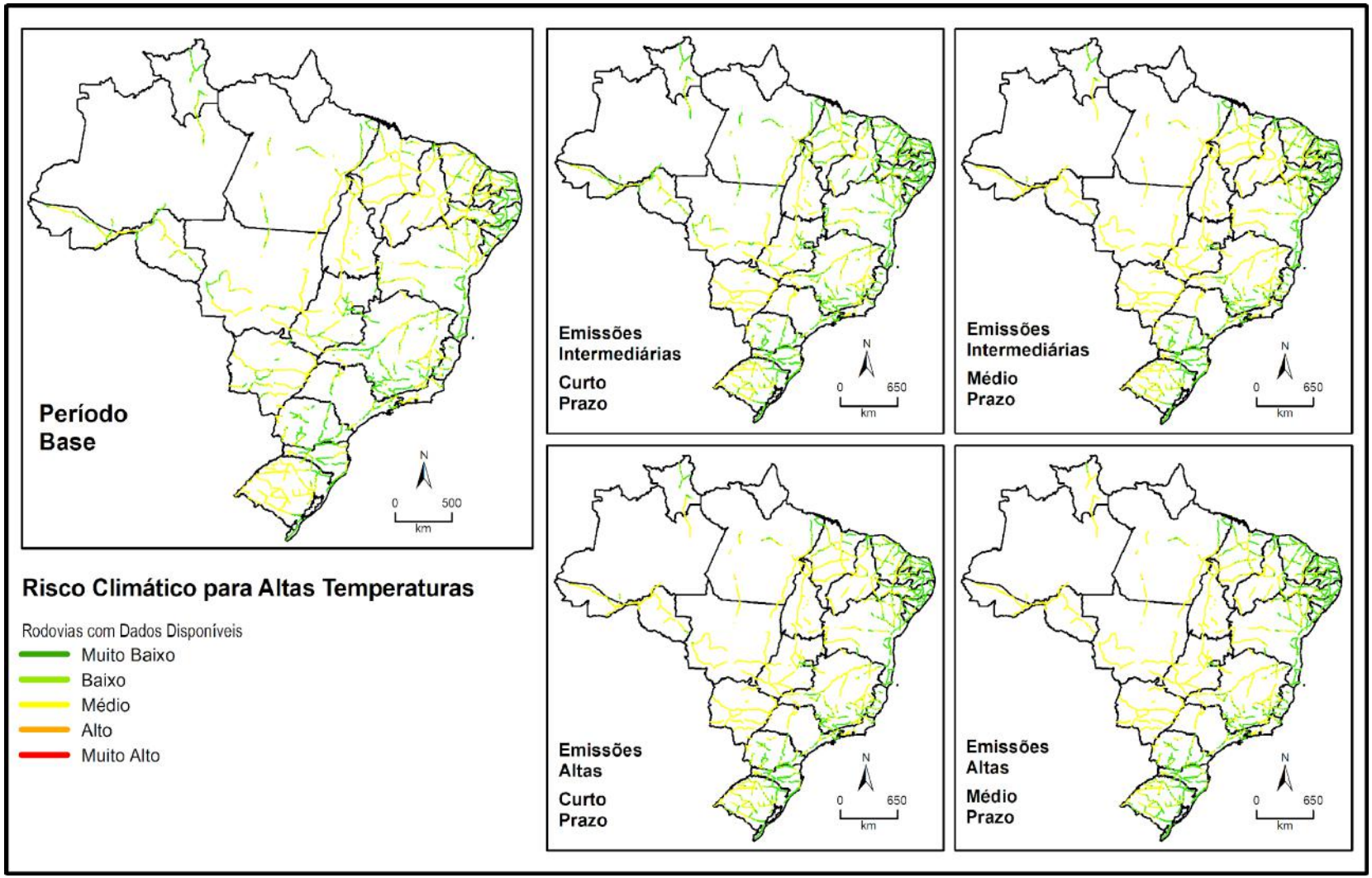
Observa-se uma redução dos trechos sob risco climático médio e um aumento de trechos sob baixo risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas; contudo, elas continuam seguindo o mesmo padrão de distribuição territorial verificado nos cenários e horizontes temporais anteriores (trechos sob médio risco distribuídos no interior do país, enquanto os sob baixo risco localizam-se mais ao litoral).

A ameaça climática, como componente do risco climático, no cenário de altas emissões e horizonte temporal de médio prazo, tem um aumento nas rodovias sob muito alto risco, médio e baixo devido ao impacto direto de altas temperaturas, enquanto ocorre uma redução dos trechos sob risco alto e muito baixo.

5.5.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

A Figura 66 abaixo sintetiza os mapas de risco climático da infraestrutura rodoviária federal brasileira devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Figura 66 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas.



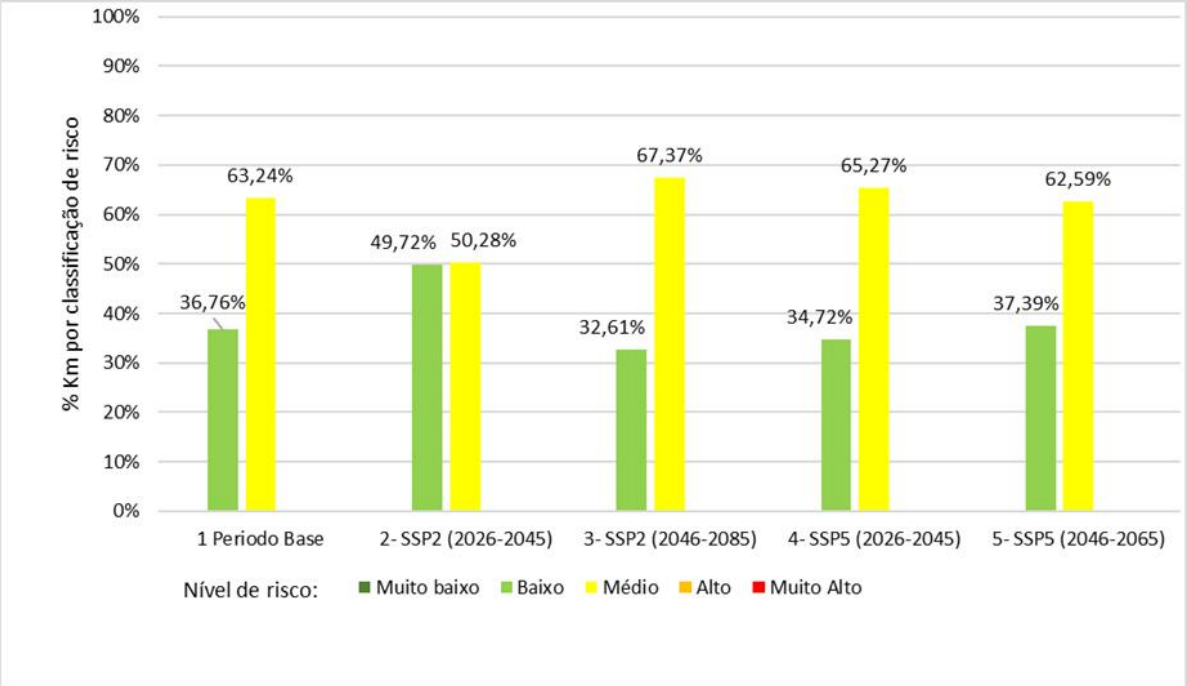
Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos rodoviários que apresentam os maiores IRCs devido ao impacto direto das altas temperaturas localizam-se no interior do país, distribuídos entre todas as regiões do Brasil, enquanto as rodovias localizadas no litoral do país, para todos os cenários e horizontes temporais considerados, encontram-se sob baixo risco de impacto. Destaque para o estado do Rio Grande do Sul, que tem suas rodovias sob risco médio para todos os cenários considerados.

Esse resultado se dá principalmente pela componente de ameaça climática com as temperaturas mais altas no interior do país e pela vulnerabilidade média que contribui especialmente na região Sul para os valores dos IRCs mais altos.

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os diferentes cenários e horizontes, temporais, apresenta-se a Figura 67, com a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Figura 67 - Distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido às altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 67, nota-se que as rodovias brasileiras se encontram sobre baixo e médio risco climático, com poucas variações entre o período base e os diferentes cenários e horizontes temporais, com exceção à variação acentuada entre o período base e o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo. Há uma predominância de trechos de rodovias com médio grau de risco climático.

Para o **período base**, 36,76% das rodovias encontram-se sob baixo risco, e 63,24% sob médio risco. Ao mudar para o **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) e horizonte temporal de curto prazo** (2026-2045), ocorre um aumento de trechos de rodovias sob baixo risco (49,72%) e uma redução dos trechos sob médio risco (50,28%). Mantendo-se o cenário de emissões e modificando-se o **horizonte temporal para médio prazo** (2046-2065), verifica-se um aumento dos trechos sob médio

risco (67,37%) e uma redução de trechos sob baixo risco (32,61%), sendo este o cenário onde se verificam os maiores percentuais de trechos rodoviários sob médio risco de impacto direto devido a altas temperaturas.

Para o **cenário de emissões altas (SSP-5)**, ocorre um decréscimo percentual dos trechos de rodovias sob médio risco (65,27% para o horizonte temporal de curto prazo e 62,59% para o horizonte temporal de médio prazo), e, por conseguinte, um crescimento dos trechos sob baixo risco (34,72% e 37,39%, respectivamente). Essa variação decorre principalmente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 12 apresenta o percentual dos trechos, por grau de **ameaça climática**, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 12 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para impactos diretos devido às altas temperaturas.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,01%	1,53%	32,70%	52,37%	13,39%
SSP2 (2026-2045)	0,01%	3,41%	40,11%	51,65%	4,82%
SSP2 (2046-2065)	0,01%	2,46%	26,23%	45,17%	26,13%
SSP5 (2026-2045)	0,01%	2,57%	27,65%	46,29%	23,48%
SSP5 (2046-2065)	0,01%	3,80%	28,37%	40,21%	27,61%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 12, observa-se o aumento da ameaça climática para o cenário SSP-2 2026-2045 em relação ao período base em todos os graus analisados, com exceção do muito baixo, que não sofre alterações entre os cenários. Contudo, o percentual de trechos rodoviários sob ameaça climática baixa, média e alta diminuem no cenário SSP-2 2046-2065, ao passo que os trechos sob grau muito alta aumentam, atingindo 26,13%.

Nos cenários de emissões altas, ocorre um aumento progressivo dos trechos rodoviários sob ameaça baixa e média, com uma ligeira queda (SSP-5 2026-2045) e um novo crescimento (SSP-5 - 2046-2065) de trechos rodoviários sob ameaça alta e muito alta. Essas reduções se dão devido ao aumento no grau de ameaça alto e muito alto no SSP-2 no médio prazo e no SSP-5 nos dois horizontes temporais, ou seja, maior as emissões de Gases de Efeito Estufa e mais distante o horizonte temporal, maior a ameaça climática que chega a 27,61% no SSP5 no médio prazo.

6. Conclusão - Modo Rodoviário

Quanto ao **alagamento/inundação**, no período base, todas as rodovias têm grau de IRC muito baixo ou baixo, com exceção de alguns trechos no Pará e no Maranhão, além de partes de rodovias no litoral do Nordeste, as quais têm grau de risco climático médio. Variações quase imperceptíveis são encontradas nos cenários de emissões intermediárias nos horizontes de curto e médio prazos. Já nos cenários de emissões altas, ainda aparecem rodovias em Estados do Sul e Sudeste brasileiros como Rio de Janeiro,

São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No pior cenário (SSP-5 - 2046-2065), 84,06% se mantêm em grau baixo; contudo, se observa uma tendência de aumento dos trechos com grau médio, em função dos aumentos dos graus de ameaça climática.

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de **deslizamento**, em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo, estão localizadas nas Regiões Sul e Sudeste (Serra do Mar e Serra Geral), no Litoral do Nordeste e, sendo que na Região Norte, apenas a BR-230 (Altamira-Marabá), no Pará apresenta-se nesta situação. Cabe destacar que o IRC é fortemente afetado pela susceptibilidade ao deslizamento (relevo mais acidentado, entre outros fatores) no Sudeste e Sul (Serra do Mar e Serra Geral) e litoral dos estados de Pernambuco e Alagoas. De forma geral, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal, observa-se um padrão de pequena redução das extensões de rodovias sob baixo risco climático ao impacto de deslizamento e um aumento de tais extensões sob risco médio, . Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de **ameaça climática**. Isso se deve ao aumento das áreas de médio grau de ameaça entre o período base e o cenário de altas emissões (SSP-5) para o horizonte de médio prazo (2046-2065) para praticamente toda a Região Sul e para os estados de Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás e litoral, que corresponde a BR-101.

Quanto ao impacto relacionado à **erosão**, que tem forte relação com o uso do solo, os trechos com IRC mais significativos se concentram nas rodovias no Pará, em rodovias localizadas em Estados do Sul e em trechos rodoviários dos Estados do Nordeste, em especial no litoral (BR-101), que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo; não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a erosão alto ou muito alto. Além disso, pode ser observado o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro, em função do aumento do grau de risco de impacto da **ameaça climática**, quando se compara os cenários de intermediárias e altas emissões com o período base. Nesses cenários, outros trechos de IRC médio que podem ser observados no litoral da Região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

O IRC devido ao impacto de **queimada/incêndio** para o período base é baixo para 68,12% do território brasileiro, com 31,87% das áreas com risco médio no interior do Nordeste brasileiro (Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte e sertão da Bahia) e parte do Norte (Tocantins e Pará). Conforme modifica-se o cenário para emissões intermediárias, os trechos de rodovias sob baixo risco diminuem, se considerado o horizonte temporal de curto prazo, reduzindo progressivamente para o horizonte temporal de médio prazo, e para o cenário de emissões altas, de curto e longo prazos. Assim, os trechos sob risco médio aumentam na mesma proporção.

Esse aumento de trechos rodoviários de grau médio ocorre, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, em que os impactos das **ameaças climáticas** crescem com horizonte temporal e cenários de emissões. Isso faz com que ocorra um equilíbrio entre trechos de baixo e médio graus no SSP-5 (2046-2065) com 50,54% dos trechos com baixo grau de risco e 49,45% com médio grau.

Em relação aos **impactos diretos devido às altas temperaturas**, nota-se que, diferente do que ocorre com os demais impactos analisados, já no período base há um predomínio de trechos com grau médio (63,24%). Isso ocorre porque aproximadamente 60% dos trechos apresentam grau alto ou muito alto de ameaça no período base e nos cenários analisados. Os trechos rodoviários que apresentam os maiores IRCs devido ao impacto direto das altas temperaturas localizam-se no interior do país, distribuídos em todas as Regiões do País, enquanto as rodovias localizadas no litoral do país,

para todos os cenários e horizontes temporais considerados, encontram-se sob baixo risco de impacto. No Sul do país, destaca-se o estado do Rio Grande do Sul, que tem suas rodovias sob médio risco para todos os cenários considerados.

Esse resultado se dá principalmente pela componente de **ameaça climática** com as temperaturas mais altas no interior do País e pela vulnerabilidade média que contribui especialmente na Região Sul para os valores dos IRCs mais altos. Cabe destacar ainda que, considerando o cenário de emissões intermediárias (SSP-2), os trechos com grau médio de risco caem para 50,28% em curto prazo (2026-2045) e sobem para 67,37% em médio prazo (2046-2065) em comparação ao período base. Já para o cenário de altas emissões (SSP-5), os trechos com médio risco representam 65,25% em curto prazo (2026-2045) e 62,59% em médio prazo (2046-2065).

Tudo que foi exposto indica que quando se analisa os impactos da mudança climática na infraestrutura rodoviária, os graus de risco de impacto não se repetem nas regiões e que, no geral, são baixos ou médios. Isso se deve fundamentalmente ao fato de que a **exposição** (Nível 2) apresenta grau baixo em todo o país, exceto em alguns pequenos trechos onde o VMDA de veículos é muito elevado, sendo que este é o indicador que mais interfere nos graus de risco de impacto da exposição.

Outro componente que precisa ser destacado é a vulnerabilidade, composta por dois subíndices, a sensibilidade biofísica e a sensibilidade da infraestrutura. O subíndice de **sensibilidade biofísica** foi calculado a partir de bases específicas para os impactos devido ao alagamento, deslizamento, erosão e queimada/incêndio, exceto para altas temperaturas, que, por se tratar de um impacto direto na infraestrutura, não considerou esse subíndice em seus cálculos. Já a **sensibilidade da infraestrutura** se mantém a mesma para todos os impactos e cenários porque não se conseguiu dados para diferenciar a sensibilidade da infraestrutura entre os vários impactos analisados e porque não foram feitas modelagens para o desenvolvimento futuro da infraestrutura.

Além disso, em termos de **ameaça climática**, o que se destacam são os impactos diretos devido às altas temperaturas, que no pior cenário (SSP-5 – 2046-2065) chega a 27% de trechos com grau muito alto e 40% de grau alto em relação a ameaça climática. Outro ponto de atenção são as queimadas, onde os trechos de alto risco chegam a 41% e de muito alto risco a 7%, conforme pode ser visualizado no mapa de ameaças.

Por fim, recomenda-se que novos estudos sobre o risco climático das rodovias brasileiras sejam desenvolvidos. Por exemplo, pode-se realizar ajustes nos mapas das componentes de risco, principalmente, por meio do tratamento de *outliers* da exposição (fortemente impactada pelo VMDA) e da vulnerabilidade (impactada pelo peso da carga dos veículos que trafegam nas rodovias). Além disso, podem ser realizadas análises específicas de risco climático sobre os trechos rodoviários que ainda se encontram em fase de planejamento (ou seja, não construídas).

Outra oportunidade de estudo futuro consiste na realização de análises mais específicas para determinados *hotspots*, que seriam aquelas áreas de rodovias ou até rodovias específicos que nesse estudo foram identificadas com maiores graus de risco de impacto, já no período base, ou cujo risco aumente considerando-se os diferentes cenários e horizontes temporais. Ao focar em rodovias específicas, futuros estudos podem incluir bases mais robustas sobre a infraestrutura existente, permitindo uma análise mais aprofundada dos riscos. Inclusive possibilitando a inclusão de indicadores de capacidade adaptativa, em falta nesse projeto, em virtude da necessidade de representação de todo o território brasileiro que apresenta dimensões continentais. A identificação

e inclusão de novos indicadores para rodovias específicas pode demandar um aprimoramento e adaptação das cadeias de impacto e da identificação dos fatores de risco climático porque em função dos contextos regionais ou locais podem surgir novos elementos diferenciados que contribuem para o risco climático.

7. Referências Bibliográficas

AZEVEDO, Joel Solon Farias. Técnica Delphi um Guia Passo a Passo. Disponível em: <http://www.joelazevedo.com.br/?p=1900>. Acesso em: 21/ 01/2022.

BARRETO, Naurinete JC et al. Multivariate intraseasonal rainfall index applied to South America. **Meteorological Applications**, v. 26, n. 4, p. 521-527, 2019.

BARRETO, Naurinete JC et al. Maximum covariance analysis to identify intraseasonal oscillations over tropical Brazil**. Climate Dynamics**, v. 49, n. 5, p. 1583-1596, 2017.

BLACKWOOD, L., RENAUD, F. G., GILLESPIE, S.: **Nature-based solutions as climate change adaptation measures for rail infrastructure**. Nature-Based Solutions, p. 100013, 2022.

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. **UK Climate Change Risk Assessment Evidence Report: Chapter 4, Infrastructure**. Report prepared for the Adaptation Sub-Committee of the Committee on Climate Change, London, 2016.

DAWSON, A. Anticipating and Responding to Pavement Performance as Climate Changes. **Green Energy and Technology**, 127–157. 2014.

EVANS, C.; TSOLAKIS, D.; NAUDE, C. **Framework to address the climate change impacts on road infrastructure assets and operations**. ARRB Group: Melbourne, 2009. Disponível em: https://www.australasiantransportresearchforum.org.au/sites/default/files/2009_Evans_Tsolakis_Naude.pdf Acesso em: 05 maio 2021.

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

HEINZ-PETER, B. Risks and consequences of wards on railway infrastructure. **Journal of Polish Safety and Reliability Association**, v. 8(1), p. 1-11, 2017.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B. et al. (eds.)]. Cambridge & New York, 2014.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S.

PILECKA, E., *et al*: **Analysis of a Landslide on a Railway Track Using Laser Scanning and FEM Numerical Modelling. Applied Sciences**, v. 12, n. 15, p. 7574, 2022.

Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844, 2022.

MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z. R. J., LEWIS, J., GIDDEN, M. J., VOGEL, E., FREUND, M., BEYERLE, U., GESSNER, C., NAUELS, A., BAUER, N., CANADELL, J. G., DANIEL, J. S., JOHN, A., KRUMMEL, P. B., LUDERER, G., MEINSHAUSEN, N., MONTZKA, S. A., RAYNER, P. J., REIMANN, S., SMITH, S. J., van den

BERG, M., VELDERS, G. J. M., VOLLMER, M. K., & WANG, R. H. J.: **The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500**, Geosci. Model Dev., 13, 3571–3605, 2020. MInfra. **PNL - Plano Nacional de Logística. 2021**. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf

MInfra. **PNL - Plano Nacional de Logística. 2021**. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf

MInfra - Ministério da Infraestrutura. Rodovias Federais - Informações Gerais - Sistema Federal de Viação (atualização: abril. 2021). Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/rodovias-federais/rodovias-federais-informacoes-gerais-sistema-federal-de-viacao. Acesso em: maio. 2021.

MNDAWE, M. B.; NDAMBUKI, J. M.; KUPOLATI, W. K.; BADEJO, A. A.; DUNBAR, R. 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, 2015.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation: Special Report 290. Washington, D.C.: **Transportation Research Board**, 2008.

NEMRY, F.; DEMIREL, H. **Impacts of climate change on transport: a focus on road and rail transport infrastructure**s. Luxembourg: Publications Office, 2012.

PALIN, E. J. *et al.*: **Implications of climate change for railway infrastructure**. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 12, n. 5, p. e728, 2021.

RATTANACHOT, W.; WANG, Y.; CHONG, D.; SUWANSAWAS, S. Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. **Transport Policy**, 41, 159–166, 2015.

SCHUSTER, R. L., HIGHLAND, L.: **Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the western hemisphere**. Denver (CO): US Department of the Interior, US Geological Survey, 2001.

de SHERBININ, A., BUKVIC, A., ROHAT, G., *et al.* **Climate vulnerability mapping: A systematic review and future prospects**. WIREs Climate Change, 2019.

SONG, Y.; WRIGHT, G.; WU, P.; THATCHER, D.; MCHUGH, T.; LI, Q.; WANG, X. Segment-Based Spatial Analysis for Assessing Road Infrastructure Performance Using Monitoring Observations and Remote Sensing Data. **Remote Sensing**, 10(11), 1696, 2018.

WILKS, Daniel S. Comparison of probabilistic statistical forecast and trend adjustment methods for North American seasonal temperatures. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 4, p. 935-949, 2014.

WORLD BANK. **Climate and Disaster Risk Screening - Sector Screening Guidance note Transportation sector [s. l.]**, 2017. Disponível em: https://climatescreeningtools.worldbank.org/sites/default/files/guidance_note/TRANSPORTATION_Guidance_Note.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

8. Referências da Base de Dados Cartográficos

[1] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2021. Base de dados da malha rodoviária federal do Sistema Nacional de Viação (SNV). Formato *shapefile*. Base cedida para uso do presente estudo. Acesso em 2021.

[2] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2020. Base de dados dos Limites das Unidades Federativas do Brasil. Formato *shapefile*. Acesso em abril de 2021. Link de acesso: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html?edicao=30138&t=acesso-ao-produto

[3] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018. Obras de Arte Especiais. Acesso pelo Visualizador de Informações Geográficas (VGEO) em outubro de 2021. Link de acesso: http://servicos.dnit.gov.br/vgeo/

[4] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2020. Volumetria Média Diária Anual. Planilha com dados de 2020 e georreferenciada pelo código SNV de cada trecho rodoviário. Acesso em 2021.

[5] Ministério da Infraestrutura (MINFRA), 2021. Base de dados da malha ferroviária nacional. Formato s*hapefile*. Base cedida para uso do presente estudo. Acesso em 2021.

[6] Empresa de Planejamento e Logística (EPL), 2021. Plano Nacional de Logística 2035. Base de dados em formato *shapefile*. Utilização do cenário base para 2017. Acesso em outubro de 2021. Link de acesso: https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl

[7] Agência Nacional de Águas (ANA), 2014. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações. Base de dados em formato *shapefile*. Superintendência de Usos Múltiplos e Eventos Críticos (SUM). Acesso em Outubro de 2021.

[8] Embrapa Solos, 2020. Mapa de Erodibilidade dos Solos à Erosão Hídrica do Brasil. Base de dados em formato *shapefile*. Acesso em outubro de 2021.

[9] Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2010. Mapa de Declividade do Brasil. Base de dados em formato raster (tiff). Acesso em maio de 2021.

[10] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2018. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra. Base de dados em formato *shapefile*. Acesso em maio de 2021. Link de acesso: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=downloads

[11] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2019. Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil. Base de dados em formato *shapefile*. Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil. Acesso em maio de 2021.

[12] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018. Índice de Condição de Superfície. Acesso pelo Visualizador de Informações Geográficas (VGEO) em outubro de 2021. Link de acesso: http://servicos.dnit.gov.br/vgeo/

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 5 - Análise de Risco Climático

Dezembro de 2022

Consultoria: Associação GITEC/COPPE

Comitê gestor:

REVISÕES

DATA	AUTOR	VERSÃO
07/10/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	1.0
21/10/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	2.0
08/11/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	3.0
30/11/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	4.0
08/12/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	5.0 (FINAL)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias..... 11
Figura 2 - Fatores que contribuem para o Risco Climático. 14
Figura 3. Hierarquia dos indicadores e subíndices..... 15
Figura 4 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos..... 20
Figura 5 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o período base. 21
Figura 6 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 23
Figura 7 Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 24
Figura 8 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)..... 25
Figura 9 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065). ... 26
Figura 10 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de deslizamentos..... 28
Figura 11 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 29
Figura 12 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a erosão..... 32
Figura 13 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o período base. 33
Figura 14 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). 35
Figura 15 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065). 36
Figura 16. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)..... 38
Figura 17 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065)..... 39
Figura 18 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão..... 41
Figura 19 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados..... 42
Figura 20 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático na infraestrutura ferroviária devido ao impacto direto de altas temperaturas..... 44
Figura 21. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o período base. 45
Figura 22 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). 47
Figura 23 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065). 48

Figura 24 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045). 49
Figura 25. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065). 51
Figura 26 - Síntese: Mapa de Risco Climático de impacto a infraestrutura devido a altas temperaturas. 53
Figura 27 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados. 54
Figura 28 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação. 60
Figura 29 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o período base. 61
Figura 30- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 63
Figura 31- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 64
Figura 32- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045). 65
Figura 33- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). 66
Figura 34 - Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação. 67
Figura 35 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação para cada um dos cenários analisados. 68
Figura 36 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento. 70
Figura 37 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o período base. 71
Figura 38 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 73
Figura 39 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 74
Figura 40 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045). 75
Figura 41- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). .. 76
Figura 42- Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de deslizamento. 77
Figura 43 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 78
Figura 44 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a erosão/assoreamento. 80
Figura 45 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o período base. 81

Figura 46. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 83
Figura 47- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 84
Figura 48 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)..... 85
Figura 49 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). 86
Figura 50 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão. 87
Figura 51. Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para cada um dos cenários analisados..... 88
Figura 52 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada/ incêndio. 89
Figura 53 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à queimada, para o período base. 91
Figura 54 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 92
Figura 55 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 94
Figura 56 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)..... 95
Figura 57 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 5-2046-2065). 96
Figura 58 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de queimada. 97
Figura 59 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para cada um dos cenários analisados. 98
Figura 60 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas. 100
Figura 61 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o período base. 101
Figura 62 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 103
Figura 63 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 104
Figura 64 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 105
Figura 65 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 107
Figura 66 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas..... 108
Figura 67 - Distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido às altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados..... 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Situação das ferrovias federais..... 19
Tabela 2 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados..... 30
Tabela 3 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 31
Tabela 4 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados..... 43
Tabela 5 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados..... 43
Tabela 6 - Quilometragem (em %) de ferrovias, por graus de ameaças climáticas, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados..... 55
Tabela 7 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados. 56
Tabela 8 - Quilometragem (em %) de rodovias, por graus de ameaças climáticas, para cada um dos cenários analisados para alagamento/inundação. 68
Tabela 9 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas em cada um dos cenários analisados para deslizamento. 79
Tabela 10 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para erosão..... 89
Tabela 11 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para queimada/ incêndios..... 99
Tabela 12 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para impactos diretos devido às altas temperaturas. 110

LISTA DE SIGLAS

AbE	Adaptação baseada em Ecossistemas
ACM	Análise de Máxima Covariância
AR5	*IPCC Fifth Assessment Report* (em português, Quinto Relatório de Avaliação do IPCC)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BIRD	Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento
DER/DF	Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFPO	Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
FCA	Ferrovia Centro Atlântica S.A.
FI	Fator de Impacto
FWD	*Falling Weight Deflectometer*
FTC	Ferrovia Tereza Cristina
FTL	Ferrovia Transnordestina Logística
GIZ	*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*
IGG	Índice de Gravidade Global
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	*Internet of Things*
IRC	Índice de Risco Climático
IRI	*International Roughness Index*
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (em português, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MInfra	Ministério da Infraestrutura
MRS	MRS Logística S.A.
MRV	Mensuração, Reporte e Verificação
OAE	Obras de Arte Especiais
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNL	Plano Nacional de Logística

PROADAPTA	Projeto Apoio ao Brasil na Implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima
RMN	Rumo Malha Norte S.A.
RMO	Rumo Logística
RMP	Rumo Malha Paulista S.A.
RMS	Rumo Malha Sul S.A.
SAM	Sistema de Administração da Manutenção
SBN	Soluções Baseadas na Natureza
SGO	Sistema de Gestão de Obras de Artes Especiais
SSP	*Shared Socio-Economic Pathways*
TdR	Termo de Referência
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
VLI	VLI Multimodal S.A.
VMA	Velocidade Máxima Autorizada

Índice

1. Introdução 11
2. Abordagem Metodológica 14
2.1. Normalização dos indicadores 16
2.2. Ponderação dos indicadores 16
2.3. Agregação dos indicadores 18
3. Modo Ferroviário 19
3.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 20
3.1.1 Período base | Impacto devido a deslizamentos 21
3.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 22
3.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 22
3.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 24
3.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 25
3.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 25
3.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 26
3.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a deslizamentos 27
3.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão 31
3.2.1 Período base | Erosão 33
3.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 34
3.2.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 34
3.2.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 36
3.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 37
3.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 37
3.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 39
3.2.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto de erosão 40
3.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 44
3.3.1. Período base | Altas temperaturas 45
3.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 46
3.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 46
3.3.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 48
3.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 49
3.3.3.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 49
3.3.3.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 50
3.3.4 Análise do Risco Climático devido ao Impacto Direto de Altas temperaturas 52
4. Conclusão - Modo Ferroviário 56
5. Modo Rodoviário 59
5.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de alagamento/inundação 60

5.1.1 Período base | Impacto devido a alagamento/inundação 61
5.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 62
5.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 62
5.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 63
5.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 64
5.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 65
5.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 66
5.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a alagamento/inundação 67
5.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 69
5.2.1 Período base | Impacto devido ao deslizamento 71
5.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 72
5.2.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 72
5.2.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 73
5.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 74
5.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 75
5.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 75
5.2.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 76
5.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão 79
5.3.1 Período base | Erosão 81
5.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 82
5.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 82
5.3.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 83
5.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 85
5.3.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 85
5.3.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 86
5.3.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a erosão 87
5.4. Índice de Risco Climático devido ao impacto de queimada/ incêndio 89
5.4.1 Período base | Queimada 90
5.4.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 92
5.4.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 92
5.4.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 93
5.4.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 95
5.4.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 95
5.4.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 96
5.4.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a queimada 97
5.5. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 99
5.5.1 Período base | Impacto direto de altas temperaturas 101

5.5.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 102
5.5.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 102
5.5.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 104
5.5.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 105
5.5.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 105
5.5.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 106
5.5.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 107
6. Conclusão - Modo Rodoviário 110
7. Referências Bibliográficas 114
8. Referências da Base de Dados Cartográficos 116

Anexos:

- Anexo I. Mapas (A3)

1. Introdução

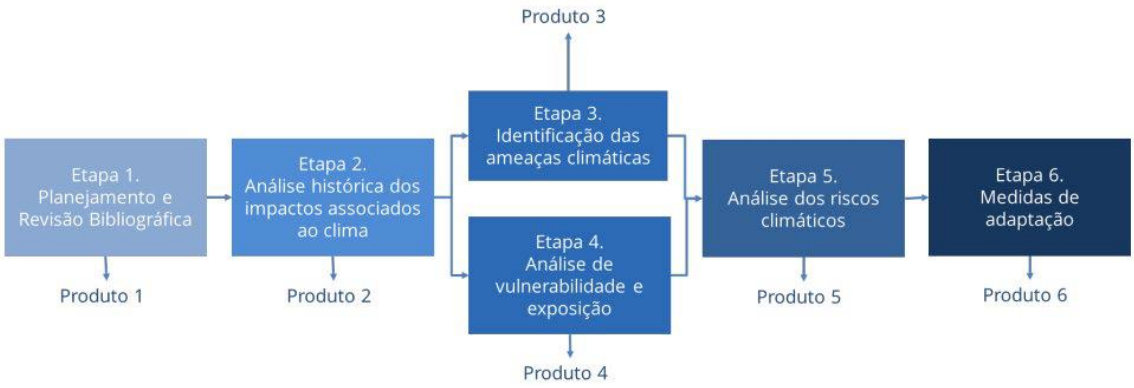
O presente relatório é parte do estudo "Levantamento de impactos e riscos climáticos sobre a infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) existente e projetada" (ou "Estudo AdaptaVias"), que tem como objetivo fornecer informações que sirvam como subsídio para o desenvolvimento de estratégias de adaptação à mudança do clima para o setor, no âmbito do Memorando de Entendimento celebrado entre o Ministério da Infraestrutura (MInfra) com a *Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH no Brasil, que conta com o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e é executado pela parceria formada entre a GITEC Brasil, GITEC-IGIP GmbH e o Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, no Projeto "Apoio ao Brasil na Implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima - PROADAPTA".

Esse estudo, conforme apresentado no Produto 1 (Parte 1 - Plano de Trabalho), está dividido em 6 (seis) etapas:

- **Etapa 1** - Consiste no levantamento de dados e estudos existentes e descreve a lógica empregada para o planejamento do estudo e a realização da revisão bibliográfica;
- **Etapa 2** - Busca identificar os impactos do clima na infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) brasileira, com base em análise de dados e séries históricas;
- **Etapa 3** - Visa identificar as ameaças climáticas aplicáveis à realidade da infraestrutura de transporte terrestre brasileira;
- **Etapa 4** - Consiste na identificação e na análise das vulnerabilidades existentes e do grau de exposição da infraestrutura de transporte terrestre brasileira;
- **Etapa 5** - Visa analisar o risco climático, com o detalhamento de suas informações para munir os tomadores de decisão de dados atualizados;
- **Etapa 6** - É uma etapa de fechamento, onde serão elencadas as medidas de adaptação necessárias, considerando-se os diferentes impactos e as ameaças, ou seja, as respostas a serem dadas diante dos cenários elaborados pelo consultor externo contratado pela GIZ.

O fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias.



Fonte: Elaboração própria (2021).

O **PRODUTO 5 (Análise dos riscos climáticos)**, resultante da Etapa 5, apresentado neste relatório, visa analisar o risco climático para a infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) brasileira, considerando aspectos operacionais e estruturais. A presente etapa buscou responder às seguintes perguntas norteadoras:

Perguntas norteadoras da Etapa 5

5.1. "Qual é o nível de risco climático (ameaça x exposição x sensibilidade x capacidade adaptativa) da infraestrutura de transporte terrestre federal brasileira?";

5.2. "Quais são as regiões e áreas com maior nível de risco climático para cada tipo de modal?";

5.3. "Quais são as regiões onde os riscos tendem a aumentar ou diminuir no futuro?".

Para avaliar o risco de impacto climático na **infraestrutura ferroviária** brasileira foram priorizados três impactos da mudança do clima na infraestrutura:

- Impactos devido a deslizamentos;
- Impactos devido a erosão; e
- Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Os **deslizamentos de terra**, um dos impactos biofísicos mais relevantes nas ferrovias, podem ser acentuados devido a fatores ecológicos (vegetação suprimida em áreas de regulação hídrica e estabilização de taludes) e fatores de engenharia (impermeabilização do solo e a drenagem inadequada, que direcionam a água para locais suscetíveis a movimentos de massa e cortes em taludes por infraestrutura linear). Esses fatores são, em muitos casos, fruto da redução de atividades de fiscalização, manutenção e planejamento. Os deslizamentos podem causar uma série de danos em elementos da infraestrutura ferroviária; entre eles, podemos citar dano no sistema de drenagem ou até o colapso da plataforma (SCHUSTER & HIGHLAND, 2001; PILECKA *et al.*, 2022).

Já na **erosão**, os impactos tendem a ser agravados por sensibilidades na superfície vegetal degradada e em áreas com erosão não tratada. Além disso, destaca-se que a falta de capacidades adaptativas como práticas de proteção de talude inexistentes ou ineficazes, frequência de manutenção das ferrovias reduzida e falta de controle do uso e ocupação do solo são fatores agravantes para intensificação dos impactos, como o aumento das enxurradas, colmatação do lastro, desguarnecimento do lastro (BLACKWOOD *et al.*, 2022) e até mesmo colapso da plataforma ferroviária (PALIN, 2021).

Em relação aos potenciais impactos das altas temperaturas e de ondas de calor nas ferrovias (**expansão térmica**), podem ser mencionados: (i) Flambagem do trilho (empenamento), gerando defeitos de geometria e comprometendo o uso da via, sendo mais suscetível no trilho soldado contínuo do que no trilho de junta (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; NEMRY e DEMIREL, 2012; DAWSON et al., 2016; HEINZ-PETER, 2017; WORLD BANK, 2017); (ii) Alterações na catenária (rede de alimentação elétrica aérea) devido a variação na cota do terreno em torno das fundações dos postes de fixação (WORLD BANK, 2017; HEINZ-PETER, 2017); e (iii) Superaquecimento de equipamentos elétricos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Para avaliação da **infraestrutura rodoviária**, por sua vez, foram priorizados cinco impactos da mudança do clima na infraestrutura:

- Impactos devido a alagamentos e inundações;

- Impactos devido a deslizamento;
- Impactos devido a erosão;
- Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas; e
- Impactos devido a queimadas.

Alagamentos e inundações são desencadeados quando o volume precipitado de chuvas é elevado em um pequeno intervalo de tempo e/ou ocorre um longo período de precipitação. Uma série de fatores pode contribuir para esses impactos como, por exemplo, a drenagem subdimensionada e entupida devido à falta de planejamento e manutenção, a impermeabilidade do solo e a vegetação degradada, que reduzem o potencial de infiltração de água no solo. Os elementos de infraestrutura rodoviária expostos a alagamentos e inundações (plataforma, pontes, viaduto, drenagem e outros) podem sofrer diminuição da vida útil devido a danos prematuros de materiais e estrutura (MNDAWE *et al*., 2015; RATTANACHOT *et al*., 2015), porque o método construtivo e o material usado em sua construção não estão adequados, ou por falta de manutenção, de diagnósticos e de conhecimento aprofundado, além da ausência de normas e processos que orientem as construções para melhor suportar a ocorrência de eventos climáticos extremos .

Os **deslizamentos** podem ocorrer quando há alto volume de precipitação em pouco tempo ou dias consecutivos de chuva. Além desses eventos climáticos, fatores ecológicos - como a vegetação suprimida em lugares onde poderia contribuir para a regulação hídrica e a estabilização de taludes - , bem como fatores de engenharia - como a impermeabilização do solo e drenagem inadequada, são fatores que aumentam o risco de deslizamentos. Em muitos casos, essa situação é fruto da redução de atividades de fiscalização, manutenção e planejamento. Os deslizamentos podem causar uma série de danos em elementos da infraestrutura rodoviária, como a ruptura de taludes e de estruturas de contenção, e até mesmo colapso de corpo estradal (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009; NEMRY e DEMIREL, 2012; RATTANACHOT *et al*., 2015).

Os danos e prejuízos na infraestrutura rodoviária devido a **erosão** são principalmente desencadeados por chuvas extremas, tanto de altos volumes pluviométricos, quanto de dias consecutivos de chuva. A erosão é um processo natural que está sendo agravado por sensibilidades ambientais, como a vegetação degradada ou inadequada e a topografia favorável aos processos erosivos. Essas sensibilidades têm como agentes causais, em muitos casos, os desafios de gestão, planejamento e manejo. Os vários elementos da infraestrutura rodoviária expostos às diferentes formas de erosão e seus impactos intermediários, tal como o assoreamento, podem sofrer danos significativos ou até o colapso da estrutura (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; NEMRY e DEMIREL, 2012; DAWSON *et al*., 2016; WORLD BANK, 2017).

Incêndios/queimadas ocorrem em virtude de ameaças climáticas como altas temperaturas máximas e médias, dias consecutivos sem precipitação e ondas de calor. Esses impactos biofísicos podem ser intensificados por meio de sensibilidades, como vegetação degradada, uso indevido do solo, infraestrutura rodoviária frágil, qualidade e tipo dos materiais empregados na execução das obras. Além disso, a inexistência ou a inadequação dos planos de monitoramento de incêndios/queimadas, a reduzida fiscalização do uso e ocupação do solo e a não recuperação de cobertura vegetal de áreas degradadas demonstram ausência de capacidades adaptativas, que contribuem para o aumento da vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária. Esse impacto biofísico pode acarretar uma série de danos e prejuízos, como problemas de instabilidade na infraestrutura e danos em dispositivos de

operação (sinalização vertical e horizontal), painéis de mensagem variável - PMV e câmeras de monitoramento (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009).

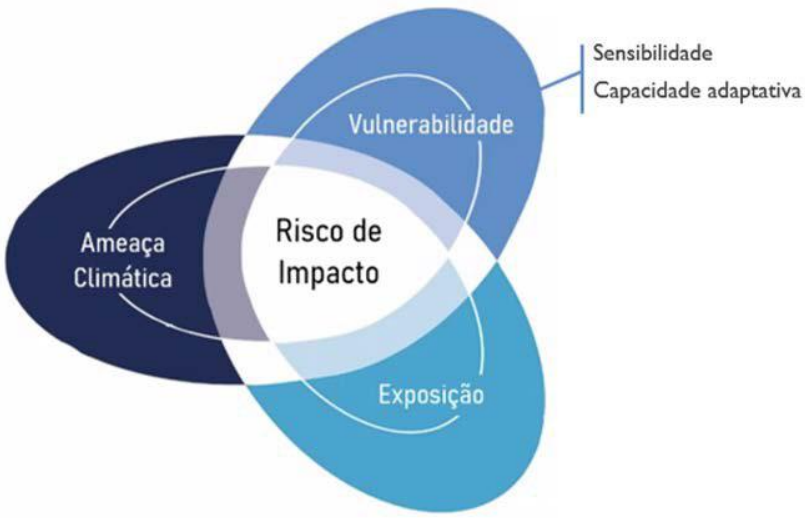
Por fim, tem-se os **impactos diretos devidos às altas temperaturas,** que são intensificados por sensibilidades como infraestrutura rodoviária frágil, qualidade e tipo dos materiais empregados na construção, e por deficiências nas capacidades adaptativas, como falta de diagnóstico e monitoramento. Isso pode acarretar danos e prejuízos à infraestrutura rodoviária como expansão térmica em juntas de dilatação de pontes e superfícies pavimentadas, principalmente de concreto de cimento Portland (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009) e danos à integridade do pavimento em virtude de deflexões elevadas, fissuras transversais, redução da taxa de deformação do pavimento asfáltico e deformação permanente (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; DAWSON, 2014; DAWSON *et al*., 2016; SONG *et al*., 2018).

Diante do que foi exposto, há necessidade de que sejam realizados estudos sobre a Análise de Risco Climático para cada um dos impactos biofísicos ou impacto direto na infraestrutura de transporte rodoviário. Para cada um dos impactos intermediários foram elaborados Índices de Risco Climático (IRC) para três cenários: período base (1981-2000), cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) e cenário de emissões altas (SSP5-8.5) e dois horizontes temporais (curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065)). O detalhamento metodológico é apresentado a seguir.

2. Abordagem Metodológica

A base metodológica utilizada na Etapa 5 - Análise dos Riscos Climáticos foi fundamentada no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) e corroborada pela metodologia proposta por GIZ, EURAC & UNU-EHS (2018) e pelo AR6 (IPCC, 2022). Tal abordagem considera o risco climático como função da ameaça climática, exposição da infraestrutura e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa) (ver Figura 2).

Figura 2 - Fatores que contribuem para o Risco Climático.



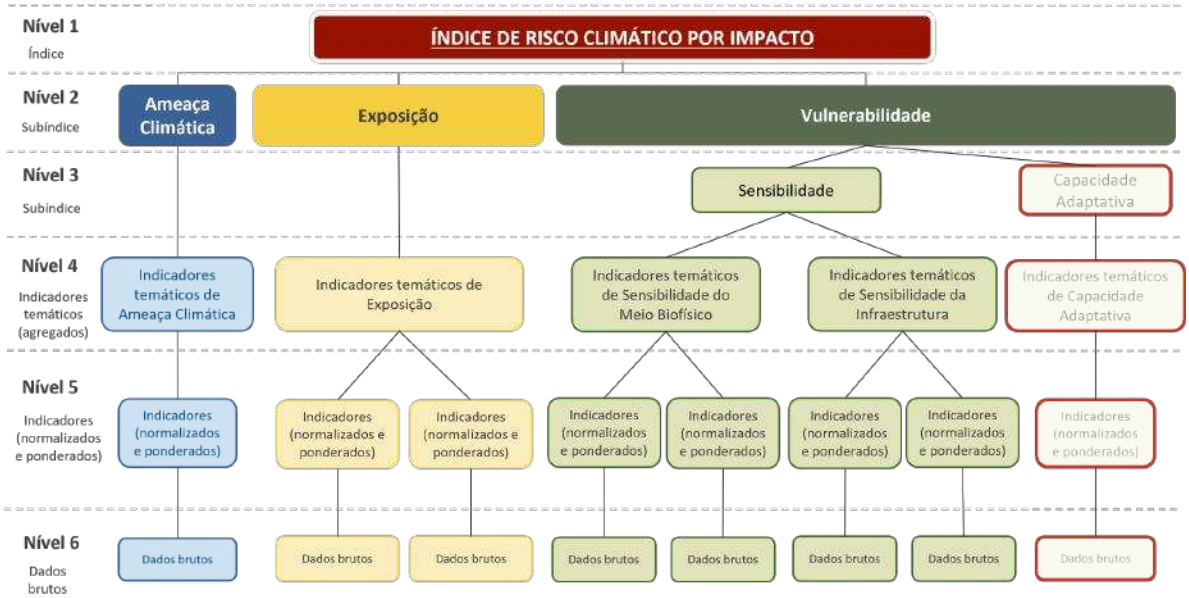
Fonte: Adaptado de IPCC (2014).

Após a identificação das ameaças climáticas e seus indicadores climáticos (Produto 3) e da análise de vulnerabilidade e de exposição e seus indicadores (Produto 4), este produto apresenta a metodologia

e os resultados da agregação para composição do Índice de Risco Climático (IRC). Desse modo, a abordagem metodológica do presente produto consiste principalmente na descrição da forma de normalização, ponderação e agregação dos indicadores e subíndices dos níveis, até chegar ao IRC.

A identificação e a seleção de indicadores nos Produtos 3 e 4 incluiu a verificação quanto à especificação técnica e determina quais indicadores melhor descrevem a ameaça climática, a exposição e a vulnerabilidade, seguindo a lógica hierárquica dos vários níveis, até chegar ao IRC. Ou seja, para o cálculo do IRC deve-se percorrer todos os níveis da estrutura hierárquica relacional utilizada para a construção de indicadores e índices, em ordem decrescente (do 6 ao 1), representada na Figura 3 a seguir. Cabe destacar que no presente relatório as análises se limitaram aos níveis 1, 2 e 3, uma vez que os demais níveis já foram analisados em produtos anteriores.

Figura 3. Hierarquia dos indicadores e subíndices.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Figura 3, nota-se que:

- no Nível 6 (dados brutos), são apresentadas as origens de cada dado utilizado para compor o risco climático final;
- no Nível 5, são expostos os indicadores, normalizados e ponderados, para cada um dos componentes do risco;
- no Nível 4, tem-se os indicadores temáticos separados em indicadores de ameaça, de exposição, de sensibilidade do meio biofísico e de sensibilidade da infraestrutura;
- no Nível 3, os indicadores temáticos de sensibilidade são agregados em um subíndice de sensibilidade; cabe destacar que os Níveis 4 e 3 são iguais devido à ausência de indicadores para representar a capacidade adaptativa;
- o Nível 2 é composto pelos subíndices de vulnerabilidade, exposição e ameaça climática; e
- no Nível 1, tem-se, por fim, o Risco Climático do Impacto analisado.

Todos os processos metodológicos descritos a seguir foram realizados para ambos os modos analisados, ferroviário e rodoviário, para os impactos intermediários priorizados. Para cada impacto de cada modo foram desenvolvidos os Índices de Risco Climático para:

- **Período base:** considera os dados/informações históricas sobre o clima no período 1981-2000 para o cálculo da ameaça climática.
- **Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5):** meio caminho ("*Middle of the road*"). Cenário de emissões no qual o mundo segue um caminho com tendências sociais, econômicas e tecnológicas que não se desviam marcadamente dos padrões históricos (MEINSHAUSEN *et al.*, 2020).
- **Cenário de emissões altas (SSP5-8.5):** marca o extremo superior dos SSP como cenário de altas emissões devido ao desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis no mundo ao longo do século 21 (MEINSHAUSEN *et al.*, 2020).

Dentro de cada cenário de emissão foram considerados dois horizontes temporais:

- **Horizonte de curto prazo:** período entre 2026-2045;
- **Horizonte de médio prazo**: período entre 2046-2065.

Desse modo, para cada impacto intermediário são calculados 5 (cinco) índices de risco climático.

Para exposição e vulnerabilidade, foram utilizados dados do MInfra e do PNL 2035. Assim, a exposição e a vulnerabilidade são mantidas em todos os cenários e horizontes subsequentes.

A seguir são apresentados os métodos de normalização, de ponderação e de agregação, desde o nível 6 para as ameaças climáticas, e a partir do nível 5 para os indicadores temáticos.

2.1. Normalização dos indicadores

Para possibilitar a agregação, os indicadores temáticos do nível 5 foram normalizados a partir de uma função matemática, a fim de tornar os indicadores comparáveis. Foi seguido o mesmo método de normalização utilizado no sistema AdaptaBrasil-MCTI[1], com a utilização da seguinte expressão matemática:

$$I_{ji} = \frac{I_{ai} - I_{jp}}{I_{jm} - I_{jp}}$$

Onde:

- I_{ji} é o valor normalizado do indicador *j* no *i*-ésimo pixel;
- I_{ai} é o valor do indicador no *i*-ésimo pixel;
- I_{jp} representa o valor do indicador *j* no pixel com menor valor referente aos dados observados;
- I_{jm} é o valor do indicador *j* no pixel com maior valor referente aos dados observados.

O resultado dessa normalização é sempre um valor que varia entre 0 e 1, com graus decimais.

2.2. Ponderação dos indicadores

Para obtenção dos pesos dos indicadores climáticos, foi utilizado o método aplicado por Wilks (2014), Barreto *et al*. (2016) e Barreto *et al*. (2019), em que é possível visualizar os detalhes metodológicos.

[1] Disponível em: https://adaptabrasil.mcti.gov.br/

O principal método aplicado é a técnica multivariada Análise de Máxima Covariância (ACM), a qual consiste em identificar e destacar as relações mais significativas no conjunto de dados utilizado. A entrada dessa análise são os resultados da *Singular Value Decomposition* (SVD), que é o método de decomposição matricial aplicado ao conjunto de dados, o qual toma como entrada a matriz de covariância dos dados originais.

O método ACM permite identificar os padrões espaço-temporais mais significativos de uma variável em relação ao conjunto de variáveis, tendo como resultante a associação máxima interna ao conjunto. Diante desse padrão espaço-temporal relacional é possível quantificar a capacidade em reproduzir, individualmente, as variáveis originais, e um dos métodos comumente utilizados é a correlação de Pearson. O valor encontrado é então utilizado como ponderador na equação dos Índices de Ameaça Climática. Esse mesmo método foi utilizado no sistema AdaptaBrasil-MCTI, no caso do setor estratégico da segurança alimentar para os impactos das chuvas intensas.

Para a ponderação dos indicadores de exposição e de sensibilidade foram realizadas 02 (duas) oficinas com especialistas, 01 (uma) para o modo rodoviário e 01 (uma) para o ferroviário, com o objetivo de apresentar os indicadores propostos, validar e atribuir pesos. A etapa de definição dos indicadores de vulnerabilidade e de exposição foi baseada em dados disponíveis na bibliografia e nos resultados da consulta a especialistas. Destaca-se que essa etapa contou com a participação de especialistas indicados pelas instituições-chaves, os quais opinaram sobre a definição de pesos aplicáveis às variáveis dos indicadores de exposição e sensibilidade da infraestrutura de transportes rodoviários e ferroviários.

Foi adotado o método Delphi, que é uma estratégia cada vez mais reconhecida para a construção, o aprimoramento e a ponderação de indicadores. Esse método tem a capacidade de alcançar o consenso, além de ajudar a capturar omissões e inconsistências que podem resultar em uma realidade equivocada. O método Delphi auxilia na construção de soluções e esclarecimentos de questões de projetos por meio de etapas, definidas em: escolher um facilitador, identificar seus especialistas, definir o problema, seguir com rodadas de perguntas e, por fim, a tomada de decisão (Azevedo, s.d.). A metodologia contou com a aplicação de um questionário estruturado (formulário *on-line*) junto a um grupo de especialistas, de forma a buscar a convergência das suas respostas.

Para alcançar esse consenso, a partir dos formulários enviados por *e-mail*, foi possível calcular o índice de Simpson dos indicadores. O índice de Simpson varia de 0 a 1, onde quanto mais próximo o valor de 1, maior é a diversidade na ponderação. A partir dos resultados dos primeiros índices calculados, os valores iguais ou acima de 0,7 foram incluídos em uma nova rodada de avaliação nas oficinas. Ao final, para os valores com maior diversidade na ponderação mesmo após a segunda rodada, optou-se por aplicar a média ponderada, calculada por meio do somatório das multiplicações entre valores e pesos, divididos pelo somatório dos pesos, possibilitando, assim, a obtenção de um valor médio ajustado.

Ao final das rodadas de perguntas com os especialistas foram validados os indicadores que melhor se adequam à realidade.

2.3. Agregação dos indicadores

Para a agregação dos indicadores ponderados do nível 5 ao nível 4 (indicadores temáticos), usou-se a média ponderada (Equação 1). Cabe ressaltar que a ponderação dos indicadores no nível 5 foi realizada na Etapa 4 deste estudo.

Equação 1

$$\text{Nível 4 (Indicador temático)} = \frac{(\text{Indicador 1} * \text{peso}) + (\text{Indicador 2} * \text{peso}) + (\text{Indicador 3} * \text{peso})}{3}$$

A agregação do nível 4 ao nível 3 se dá unicamente pela média simples dos dois indicadores temáticos de sensibilidade: sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico (Equação 2).

Equação 2

$$\text{Nível 3} = \frac{\text{Indicador temático 1} + \text{Indicador temático 2}}{2}$$

O Índice de Risco Climático (IRC) pode ser calculado através da média simples entre os componentes de risco climático (Nível 2 para o Nível 1), segundo a Equação 3:

Equação 3

$$\text{Risco} = \frac{\text{Ameaça} + \text{Exposição} + \text{Vulnerabilidade}}{3}$$

É importante ressaltar que a vulnerabilidade neste estudo foi unicamente composta pela sensibilidade, devido à falta de dados representativos para a capacidade adaptativa (ver Produto 4) e, por isso, não há o que agregar do nível 3 ao nível 2. A sensibilidade, por sua vez, foi dividida em sensibilidade biofísica e sensibilidade da infraestrutura (ver Nível 4, conforme apresentado na Figura 3). Não se aplicou nenhum tratamento de valor atípico (ou *outliers*). Para a composição da equação final do cálculo do risco climático, agregou-se o nível 2 ao nível 1, conforme descrito na Equação 3.

Os valores normalizados tanto do IRC quanto dos componentes foram classificados em cinco classes:

- <= 0,01] = Muito baixo;
-]0,01 - 0,25] = Baixo;
-]0,25 - 0,50] = Médio;
-]0,50 - 0,75] = Alto;
- > 0,75] = Muito alto.

Nessa classificação linear, os riscos alto e muito alto não significam necessariamente que o nível de criticidade é alto, pois esta é uma avaliação relativa, e não absoluta.

Nas próximas seções, serão apresentados os resultados obtidos para os impactos selecionados para o modo ferroviário.

3. Modo Ferroviário

O modo ferroviário de transporte é o responsável pela segunda maior movimentação de cargas no Brasil, atrás somente do transporte rodoviário (MInfra, 2021). A malha viária, categorizada por situação e por concessão, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Situação das ferrovias federais.

Situação da ferrovia[2]	KM
Desativada	4.096,14
Em obra	2.948,99
Em operação	30.006,99
Estudo	5.413,46
Planejada	12.769,57
Total Geral	**55.235,14**

Fonte: ANTT

Como mencionado anteriormente, para avaliar o risco climático na infraestrutura ferroviária foram considerados **três impactos** da mudança do clima na infraestrutura: (1) Impactos devido a deslizamentos; (2) Impactos devido a erosão; e (3) Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas. Para cada um dos impactos intermediários, foram elaborados Índices de Risco Climático considerando-se **três cenários**: (a) Período base (1981-2000); (b) cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5); e (c) cenário emissões altas (SSP5-8.5). Cada cenário, com exceção do período base, foi calculado para **dois horizontes temporais**: (i) curto prazo (2026-2045) e (ii) médio prazo (2046-2065).

Para compreender os mapas dos componentes do IRC (Nível 1) é necessário observar os mapas relacionados à ameaça climática, à exposição e à vulnerabilidade da rede ferroviária (Nível 2 da estrutura hierárquica), já que o risco é o resultado da combinação destes componentes. O componente de vulnerabilidade foi calculado apenas com informações sobre sensibilidade (Nível 3), uma vez que os dados disponíveis para capacidade adaptativa não puderam ser incorporados na análise (pois não atendiam aos critérios de abrangência e formato).

Faz-se necessário salientar que diferenças nos valores totais e parciais de extensão dos trechos ferroviários podem e devem ocorrer. Isso é devido ao processo topológico de conversão de polígono (área) para linha. Essa transformação pode acarretar pequenas diferenças (alguns metros por trecho), os quais, uma vez somados, resultam em extensões de quilômetros de diferença. Ainda assim, tais diferenças são irrelevantes quando contextualizadas em um cenário nacional.

A seguir são apresentados os principais resultados, por impacto intermediário, obtidos para a infraestrutura ferroviária nacional. Para cada mapa de Risco Climático são apresentados os mapas

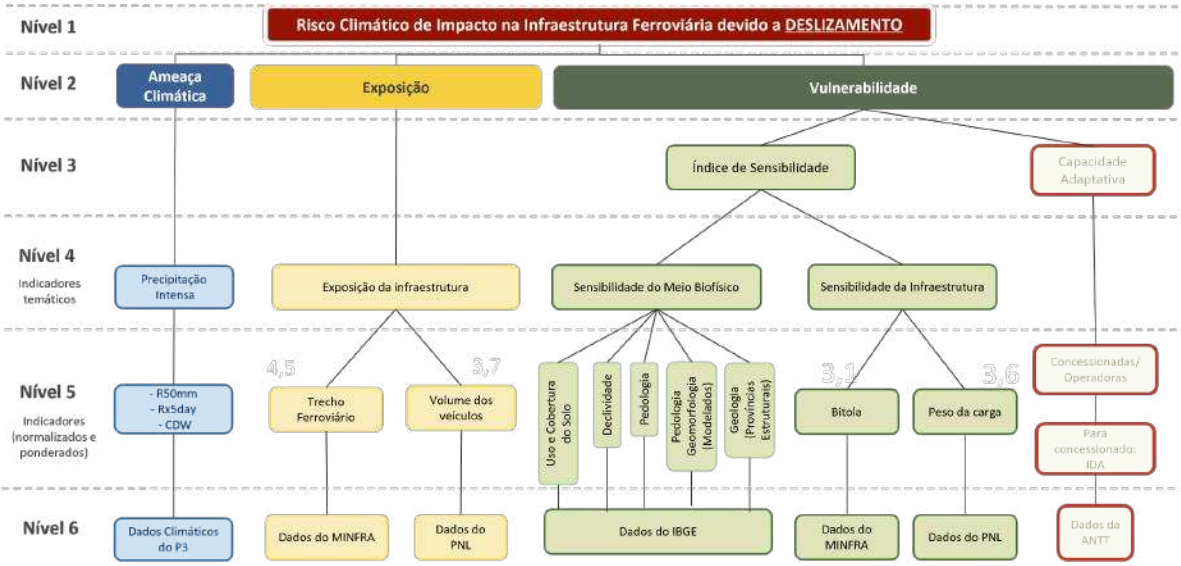
[2] No âmbito do estudo não foram consideradas as ferrovias desativadas.

dos seus componentes e, por fim, é realizada uma análise comparativa dos riscos climáticos por cenários e horizontes.

3.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

O IRC para a infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 4, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R50mm: número de dias com chuva igual ou maior a 50 mm;
- Rx5day: chuva máxima acumulada em 5 dias; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dado do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico:

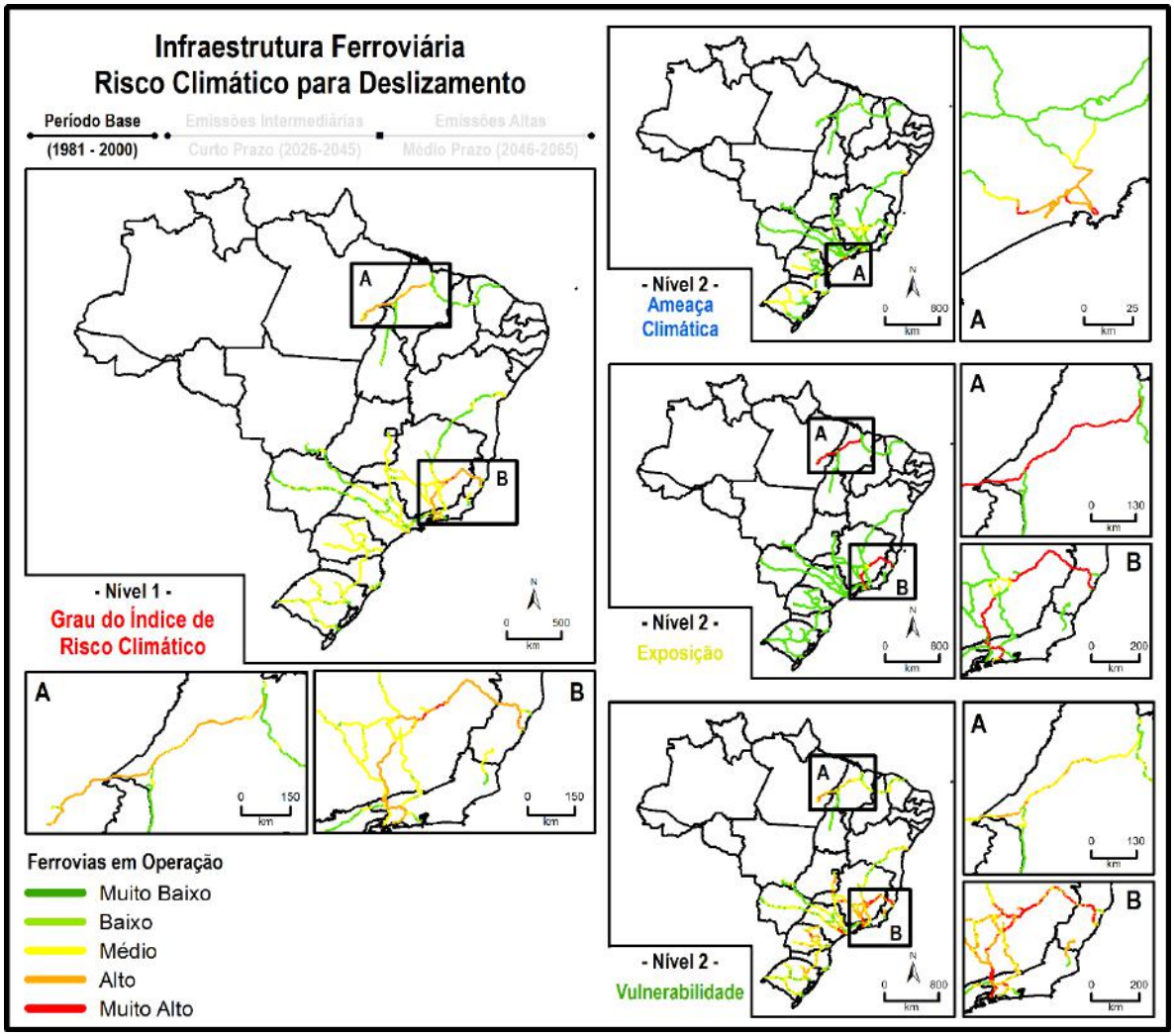
- Mapa de susceptibilidade a deslizamentos - composto por Uso e Cobertura do Solo, Declividade, Pedologia, Pedologia Geomorfologia e Geologia do IBGE; e
- Sensibilidade da infraestrutura, calculados a partir de dados de bitola (dados do MInfra) e peso da carga (dados do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido a deslizamentos.

3.1.1 Período base | Impacto devido a deslizamentos

A Figura 5 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o período base.

Figura 5 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Quanto ao Índice de Risco Climático, composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade, verifica-se que os trechos com graus alto e muito alto se encontram na Região Sudeste, com destaque para os estados de Minas Gerais (graus alto e muito alto), Rio de Janeiro (grau alto), São Paulo (graus alto e muito alto) e Espírito Santo (graus alto e muito alto), e no eixo Pará-Maranhão (grau alto) (Figura 5). Esses trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística);

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

As ferrovias da região sul apresentam risco climático médio ao deslizamento.

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de ferrovias no litoral de São Paulo se encontram com alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se trechos com ameaças médias no Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

No que diz respeito a **vulnerabilidade** a deslizamentos, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos de grau alto e muito alto se concentram nos trechos Minas Gerais/Espírito Santo (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.) e Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Rio de Janeiro x Minas Gerais, operada pela MRS Logística S.A), e aparecem de modo mais pontual na Ferrovia Carajás (operada pela Vale S.A.), e em partes da malha ferroviária do sul do Brasil. Isso se deve à susceptibilidade ao deslizamento em regiões com terreno mais acidentado, como ocorre no Sudeste brasileiro, e ao peso da carga transportada.

Os trechos com grau muito alto de **exposição** se encontram nas ferrovias com maior tráfego de composições, especialmente aquelas estradas de ferro associadas ao escoamento da produção mineral brasileira. Desse modo, as ferrovias mais expostas são:

- Minas Gerais ligação do quadrilátero ferrífero aos Portos de Santos (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística) e do Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Estrada de Ferro Carajás: Carajás (PA) até São Luís (MA);
- Estrada de Ferro Vitória a Minas: interior de Minas Gerais até o porto do Espírito Santo.

Os mapas de vulnerabilidade e de exposição se repetirão para todos os cenários, uma vez que a vulnerabilidade é determinada pela sensibilidade do meio físico e sensibilidade da infraestrutura, e a exposição relaciona-se principalmente com o volume de veículos que trafegam na ferrovia, os quais não sofrem alterações. Assim, não serão analisados e discutidos nas seções e subseções seguintes, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor.

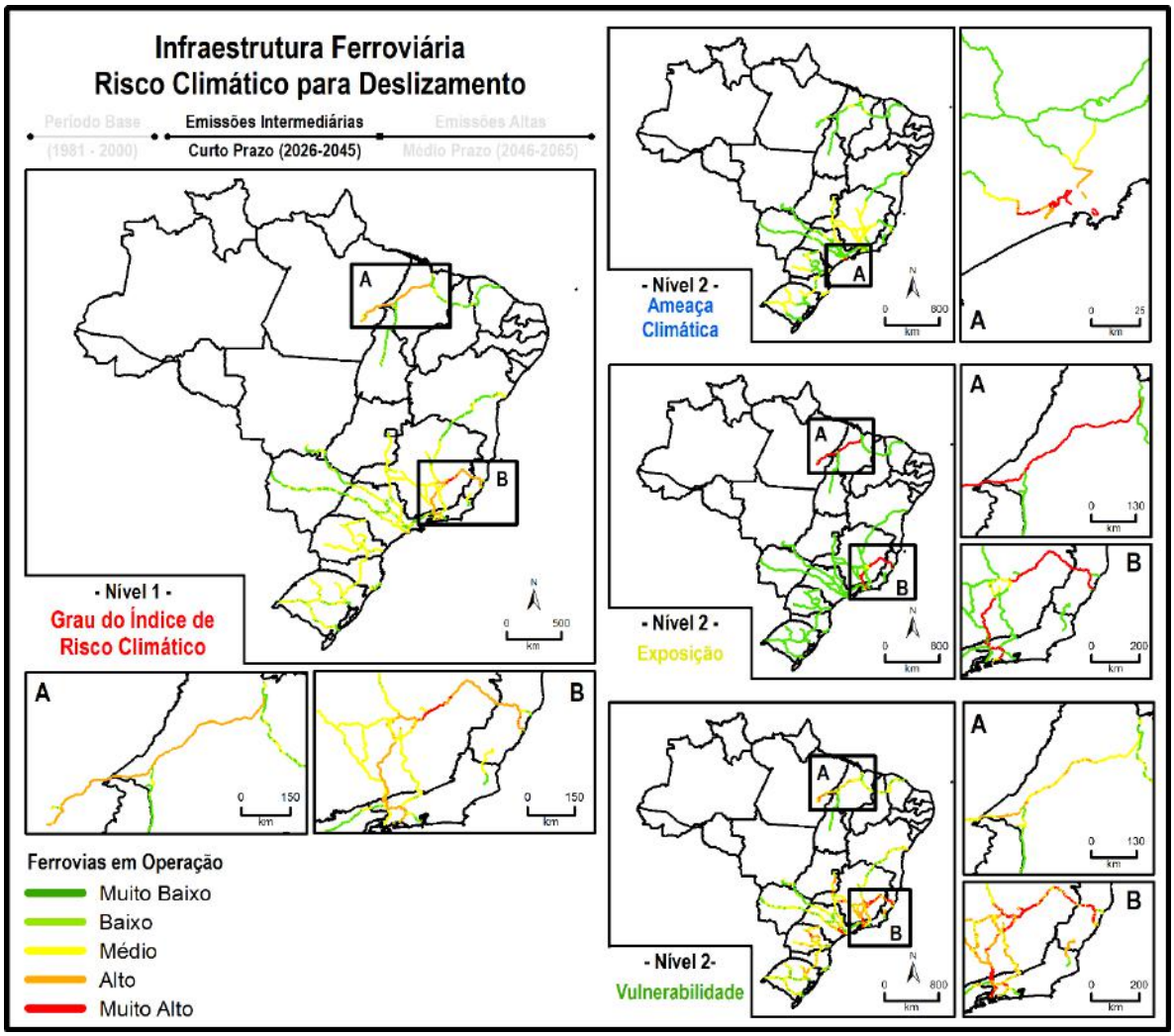
3.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de deslizamento, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

3.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 6 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 6 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo, com risco alto a muito alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco muito alto), conforme apresentado na Figura 6, devido ao volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e ao peso da carga e aos indicadores de suscetibilidade a deslizamentos, que compõem o componente vulnerabilidade.

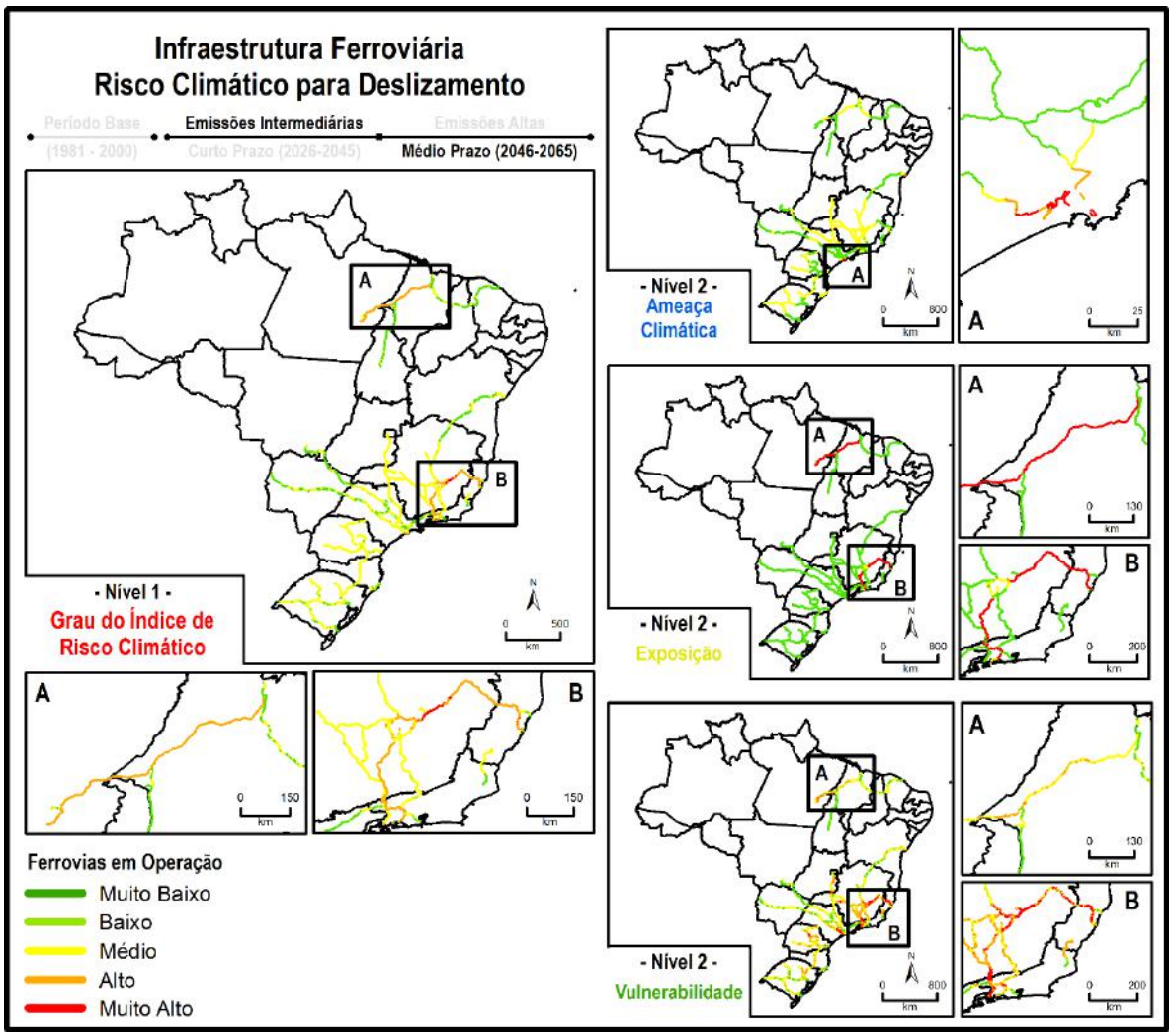
Os trechos com maior risco diante do cenário apresentado encontram-se nas seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

3.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045) são apresentados na Figura 7.

Figura 7 Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos estão concentrados na Região Sudeste e no Eixo Pará-Maranhão, conforme apresentado na Figura 7. Tais trechos correspondem às rodovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

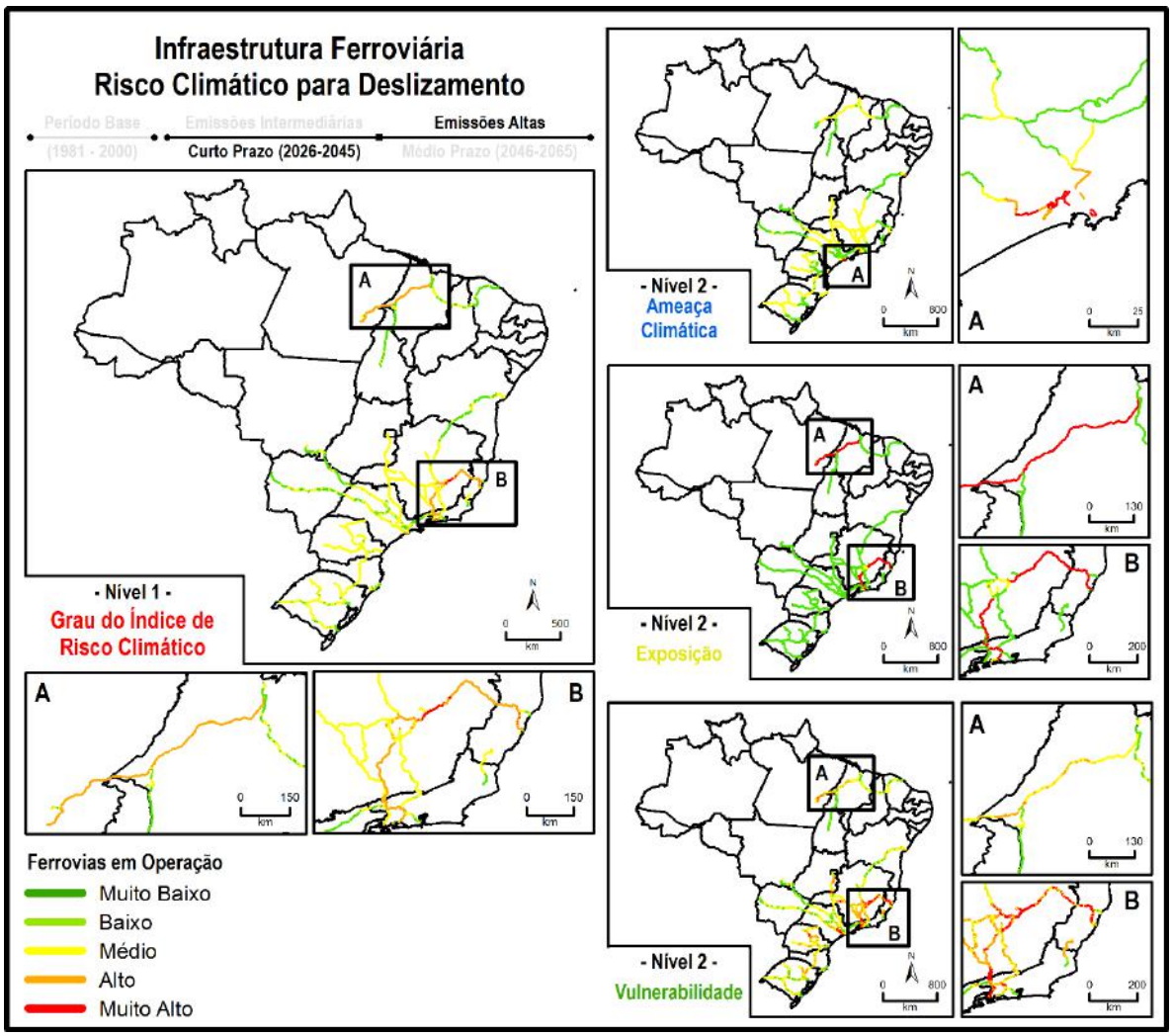
3.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de deslizamentos para o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

3.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 8 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 8 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

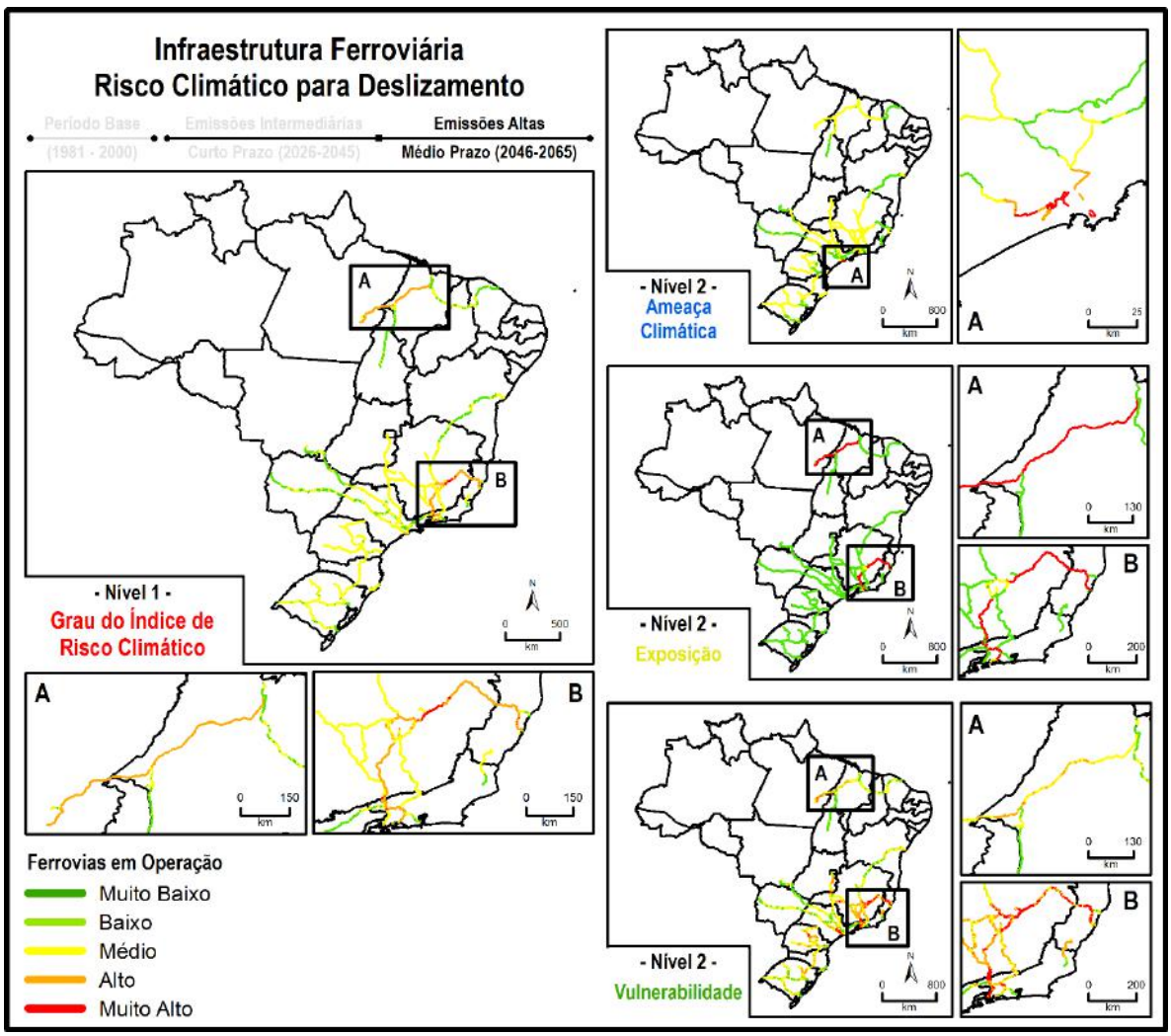
Pela análise da Figura 8, observa-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos também se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais/ Espírito Santo, Minas Gerais/ Rio de Janeiro e São Paulo) e no Eixo Pará-Maranhão, que são as que apresentam maiores volumes de veículos e peso de carga (componente de exposição). Tais trechos equivalem às ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

3.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 9 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 9 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os mapas apresentados na Figura 9 mostram que, assim como aconteceu para os diferentes cenários e horizontes temporais descritos anteriormente, os maiores índices (risco alto e muito alto) ficam concentrados na Região Sudeste e no Eixo Pará-Maranhão. Os trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);

- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

3.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a deslizamentos

Os trechos ferroviários que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo foram:

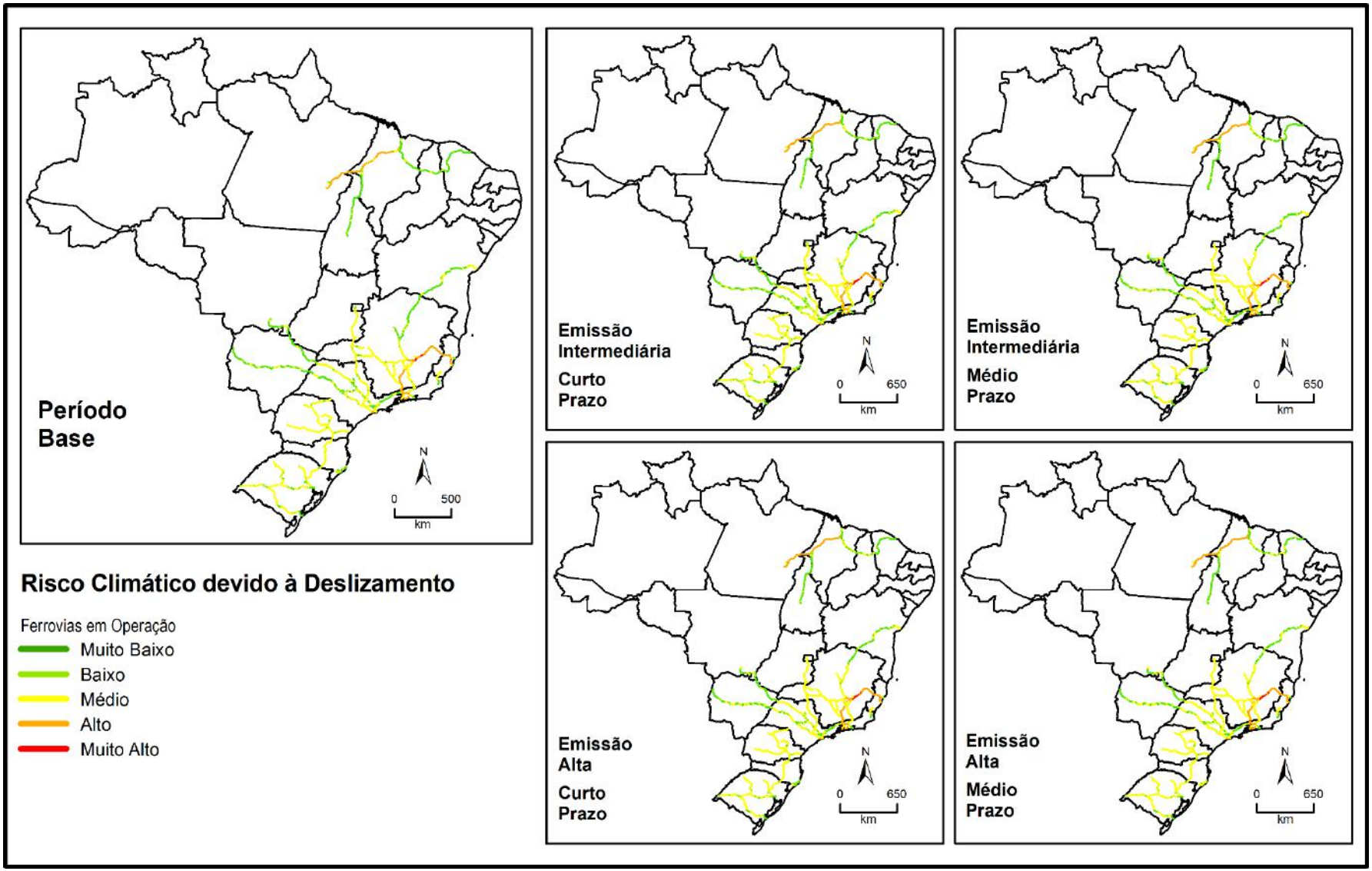
- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas X Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

Estas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e elevado peso de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura. Além disso, um destaque especial pode ser dado à sensibilidade do meio biofísico dessas regiões (suscetibilidade a deslizamentos).

A Região Sudeste - onde se localizam as Estradas de Ferro Minas X Rio, Vitória a Minas e do Litoral de São Paulo, por exemplo, é onde estão localizados os maiores graus de susceptibilidade a deslizamento, principalmente pela presença da Serra do Mar (altas declividades), assim como é onde podem ser encontrados graus medianos e altos para erodibilidade e uso e cobertura do solo profundamente antropizados, o que demonstra a falta da vegetação natural. A cobertura vegetal apresenta função importante de proteção do solo contra as diversas situações de desequilíbrio que ocorrem na natureza, causadas, principalmente, por enxurradas que acarretam erosão, lixiviação, entre outras alterações.

Como os componentes vulnerabilidade e exposição foram mantidos ao longo da análise, o fator de variação do risco climático ao deslizamento por cenário e horizonte temporal é a ameaça climática. Entretanto, notou-se que tanto o cenário de emissões intermediárias quanto o de emissões altas não apresentaram variações significativas decorrentes do componente da ameaça climática, conforme pode ser observado na Figura 10, que sintetiza o risco climático devido ao impacto do deslizamento sobre a infraestrutura federal de transporte ferroviária brasileira.

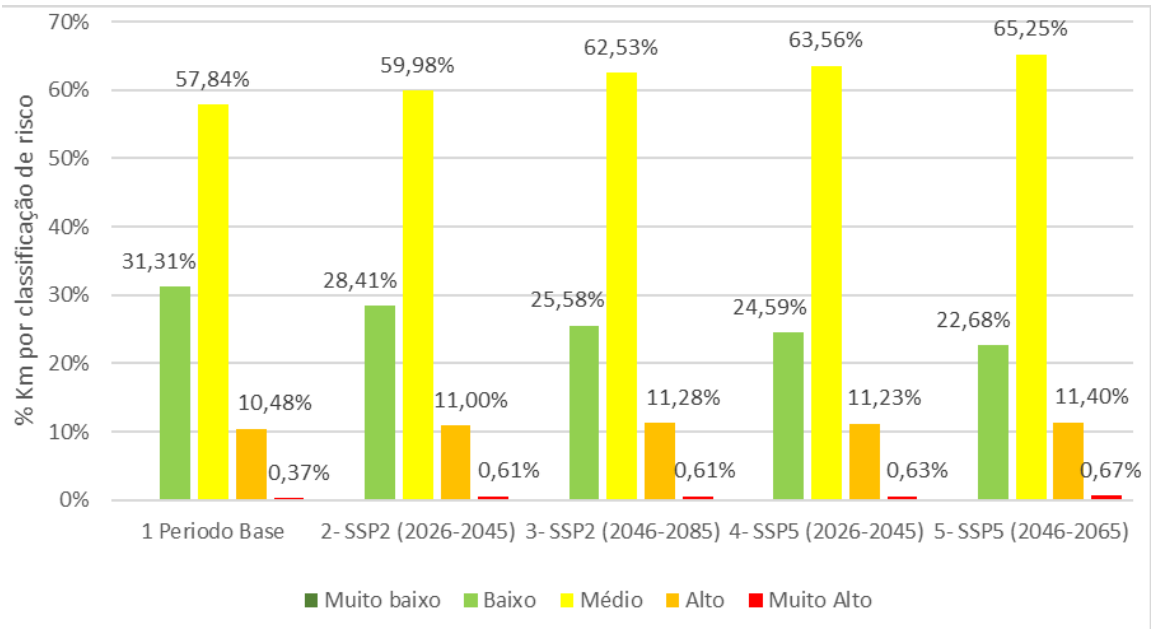
Figura 10 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de deslizamentos.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentado, na Figura 11, a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 11 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 11, para o **período base**, 31,31% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de deslizamento, 57,84% sob risco médio e 10,85% sob risco alto ou muito alto. Trechos com graus alto e muito alto de ameaça representam menos de 1% do total das ferrovias e se encontram no litoral de São Paulo, na chegada ao porto de Santos.

Ainda de acordo com a Figura 11, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045)**, o IRC devido ao impacto de deslizamentos é baixo em 28,41% das ferrovias, médio em 59,98% e alto ou muito alto em 11,61%. Considerando o mesmo cenário, mais um **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se 25,58% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto deslizamentos, 62,53% encontram-se sob médio risco, e 11,89% sob alto ou muito alto risco. Nesse cenário, a maior diferença em relação ao período base é o aumento das áreas de nível médio de risco em 4,69% (de 57,84% para 62,53%) e das áreas de alto e muito alto risco em 1,04% (de 10,85% a 11,89%), enquanto, por sua vez, as áreas de baixo risco sofrem redução de 5,73% (31,31% para 25,58%).

Em um **cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 24,59% das ferrovias encontrar-se-ão sob risco climático baixo devido ao impacto por deslizamentos, 63,56% sob risco médio, e 11,86% sob risco alto ou muito alto. Portanto, conforme aumenta-se o cenário de emissões, considerando-se o mesmo horizonte temporal (curto prazo), verifica-se uma redução percentual de 3,82% da quilometragem de ferrovias sob baixo risco (de 28,41% para 24,59%), enquanto as áreas sob médio e alto/ muito alto risco aumentam, respectivamente, 3,58% (de 59,98% para 63,56%) e 0,25% (de 11,61% para 11,86%). Considerando-se o **cenário de emissões altas com**

horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065), 22,68% da quilometragem de ferrovias se encontrará sob risco climático baixo, 65,25% sob risco climático médio, e 12,07% sob risco climático alto ou muito alto de impacto devido a deslizamentos, conforme também exposto na Figura 11.

De forma geral, observa-se um padrão de redução das extensões de ferrovias sob baixo risco climático ao impacto deslizamento e um aumento de tais extensões sob risco médio ou alto/muito alto, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal. Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática.

A Tabela 2 apresenta o percentual dos trechos por grau de ameaça climática para impactos devido ao deslizamento para cada um dos cenários analisados.

Tabela 2 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Deslizamento) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,04%	74,84%	24,13%	0,89%	0,09%
SSP2 (2026-2045)	0,04%	57,51%	41,77%	0,39%	0,29%
SSP2 (2046-2065)	0,00%	46,56%	52,73%	0,43%	0,29%
SSP5 (2026-2045)	0,00%	39,23%	59,94%	0,54%	0,29%
SSP5 (2046-2065)	0,00%	28,55%	70,65%	0,52%	0,29%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o componente “ameaça climática”, único que varia entre os cenários de emissões, a quilometragem classificada como baixo risco caiu de 74,84% (período base) para 57,51% (SSP2 – 2026-2045). Mantendo-se o horizonte temporal, mas alterando o cenário para SSP5, verifica-se que esse valor cai para 39,23%.

Também se observa um aumento na categoria de médio risco de 24,13% (período base) para 41,77% (SSP2 – 2026-2045) ou para 59,94% (SSP5 – 2026-2045), e as classes de risco alta e muito alta se mantiveram em menos de 1%.

A Tabela 3 apresenta a distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento em cada um dos cenários. A partir desta tabela é possível notar uma tendência ao aumento dos trechos com graus de risco muito alto, alto e médio, e uma consequente diminuição dos trechos com baixo nível, tendência essa já mencionada anteriormente.

Tabela 3 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento, para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	5.589,53	10.327,06	1.871,71	66,44
SSP2 (2026-2045)	0	5.062,38	10.687,70	1.959,62	108,27
SSP2 (2046-2065)	0	4.558,17	11.141,15	2.010,39	108,27
SSP5 (2026-2045)	0	4.380,91	11.324,96	2.000,40	111,71
SSP5 (2046-2065)	0	4.040,57	11.626,18	2.031,98	119,24

Fonte: Elaboração própria (2022).

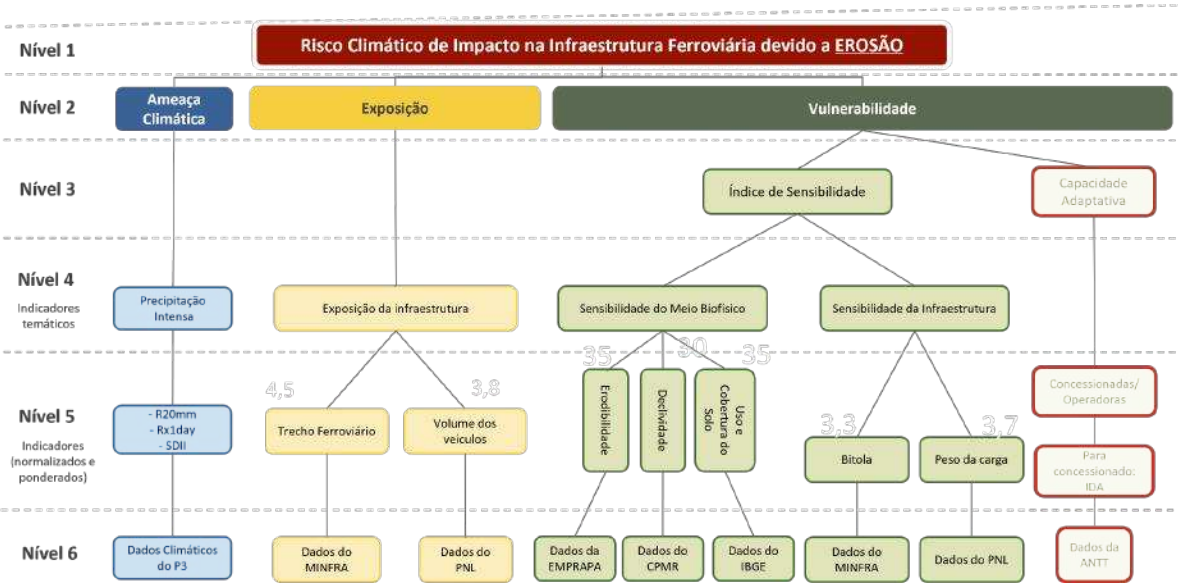
Do período base para o cenário pessimista de médio prazo (SSP5 2046-2065), os trechos com grau muito alto de risco climático aumentam 79%, enquanto os trechos de baixo risco tem uma redução de 28%; já as extensões de médio e alto grau de risco aumentam 13% e 9%, respectivamente. No período base cerca de 58% das ferrovias analisadas têm médio grau de risco climático devido a deslizamento, enquanto no SSP5 (2046-2065) 65% da malha encontra-se nesse nível.

Apesar do agravamento do grau de risco observado, as áreas de alto e muito alto risco continuam representando entre 11% e 12% da malha ferroviária em todos os cenários, havendo pouca variação. Cerca de 2000 km de ferrovias no Brasil se encontram com alto e muito alto grau de risco climático a impactos devido ao deslizamento.

3.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão

O IRC para a infraestrutura ferroviária devido a erosão foi calculado a partir dos dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 12, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou maior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia;
- SDII: índice de intensidade de precipitação simples.

Já para compor o subíndice de exposição, como em todos os cenários, foram considerados os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dados do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura. Os indicadores para sensibilidade do meio biofísico utilizados foram:

- Erodibilidade (dados da EMBRAPA);
- Declividade (dados do CPRM); e
- Uso e Cobertura do Solo (dados do IBGE).

Por sua vez, os indicadores temáticos para sensibilidade da infraestrutura utilizados foram:

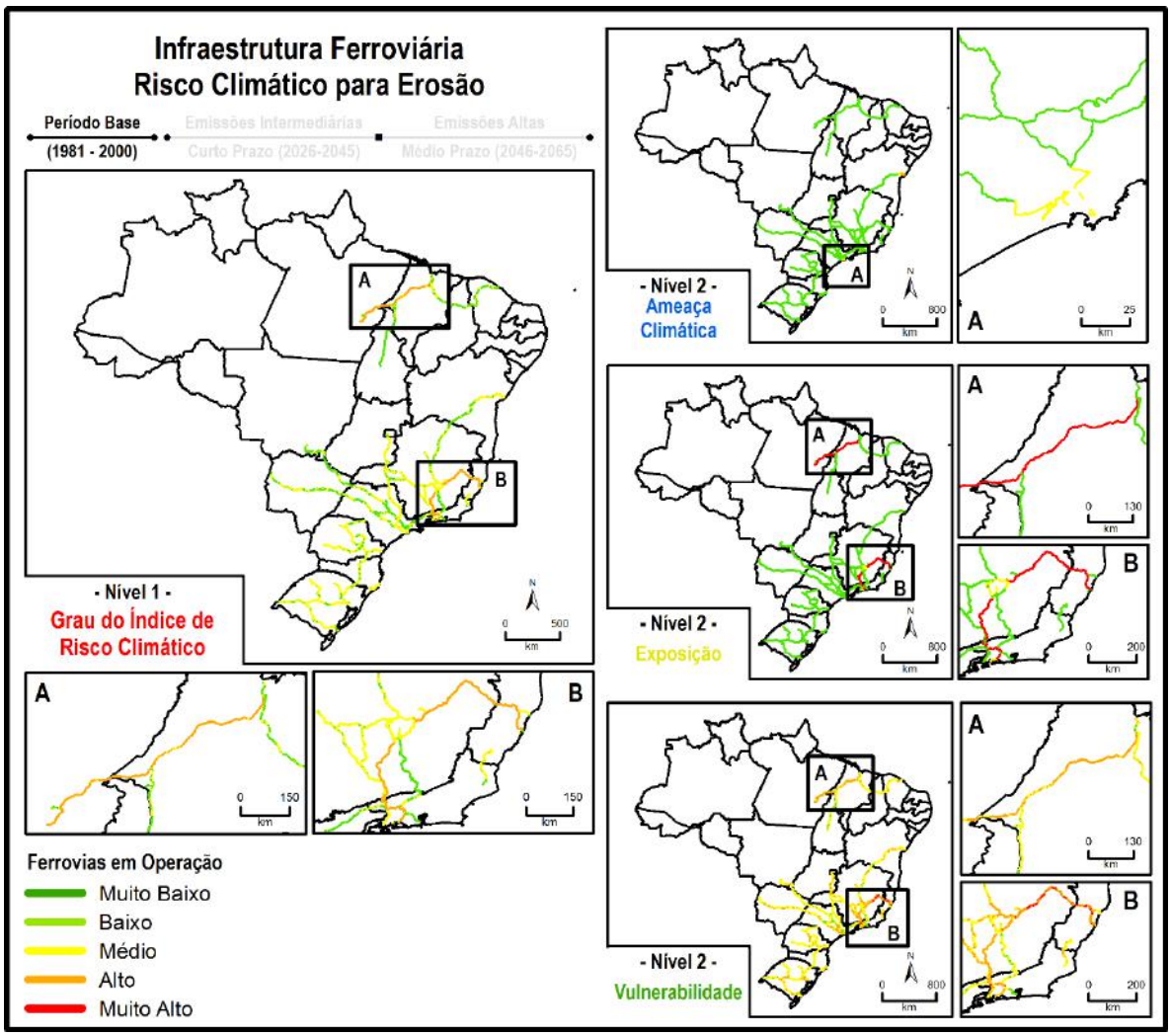
- Bitola (dados do MInfra); e
- Peso da carga (dados do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários de análise: período base (1981-2000); emissões intermediárias (SSP2-4.5) de curto (2026-2045) e médio prazo (2046-2065); e emissões altas (SSP5-8.5) para os mesmos horizontes temporais de curto e médio prazo.

3.2.1 Período base | Erosão

A Figura 13 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o período base.

Figura 13 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se na Figura 13 que os trechos de ferrovias sinalizados com médio e alto grau de IRC a erosão são:

- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Rio de Janeiro/Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

Por sua vez, as ferrovias da Região Sul apresentam risco climático médio a erosão, bem como, parte das ferrovias da região Centro-Oeste e norte do estado da Bahia.

O subíndice do componente de risco “ameaça climática de erosão” para o período base foi

considerado baixo em quase a totalidade do país (98,23%). No que diz respeito à vulnerabilidade à erosão, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos de grau alto e muito alto se concentram nas ferrovias Rio de Janeiro/Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio), Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas) e Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás). Isso se deve à sensibilidade da infraestrutura, mais especificamente ao peso da carga e pela sensibilidade do meio biofísico. Em parte do Estado do Maranhão, a sensibilidade do meio biofísico apresenta níveis altos de erodibilidade e uso e cobertura do solo, o que pode ser verificado exatamente no trecho onde está localizada a Estrada de Ferro Carajás, o qual está intensamente antropizado.

Os trechos com grau muito alto de **exposição** são aqueles das ferrovias que apresentam maior tráfego de composições, especialmente as estradas de ferro associadas ao escoamento da produção mineral brasileira. Portanto, as ferrovias mais expostas são:

- MRS Logística: Minas Gerais, Portos de Santos e Rio de Janeiro;
- Vale S.A. Estrada do Carajás: Carajás (PA) até São Luís (MA); e
- Vale S.A. Estrada de Ferro Vitória a Minas: interior de Minas Gerais até o porto do Espírito Santo.

Assim como ocorreu com a análise do risco climático para o impacto de deslizamentos, os mapas de vulnerabilidade e de exposição ao risco climático de erosão se repetirão para todos os cenários. Portanto, não serão analisados e discutidos nas seções e subseções seguintes, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor.

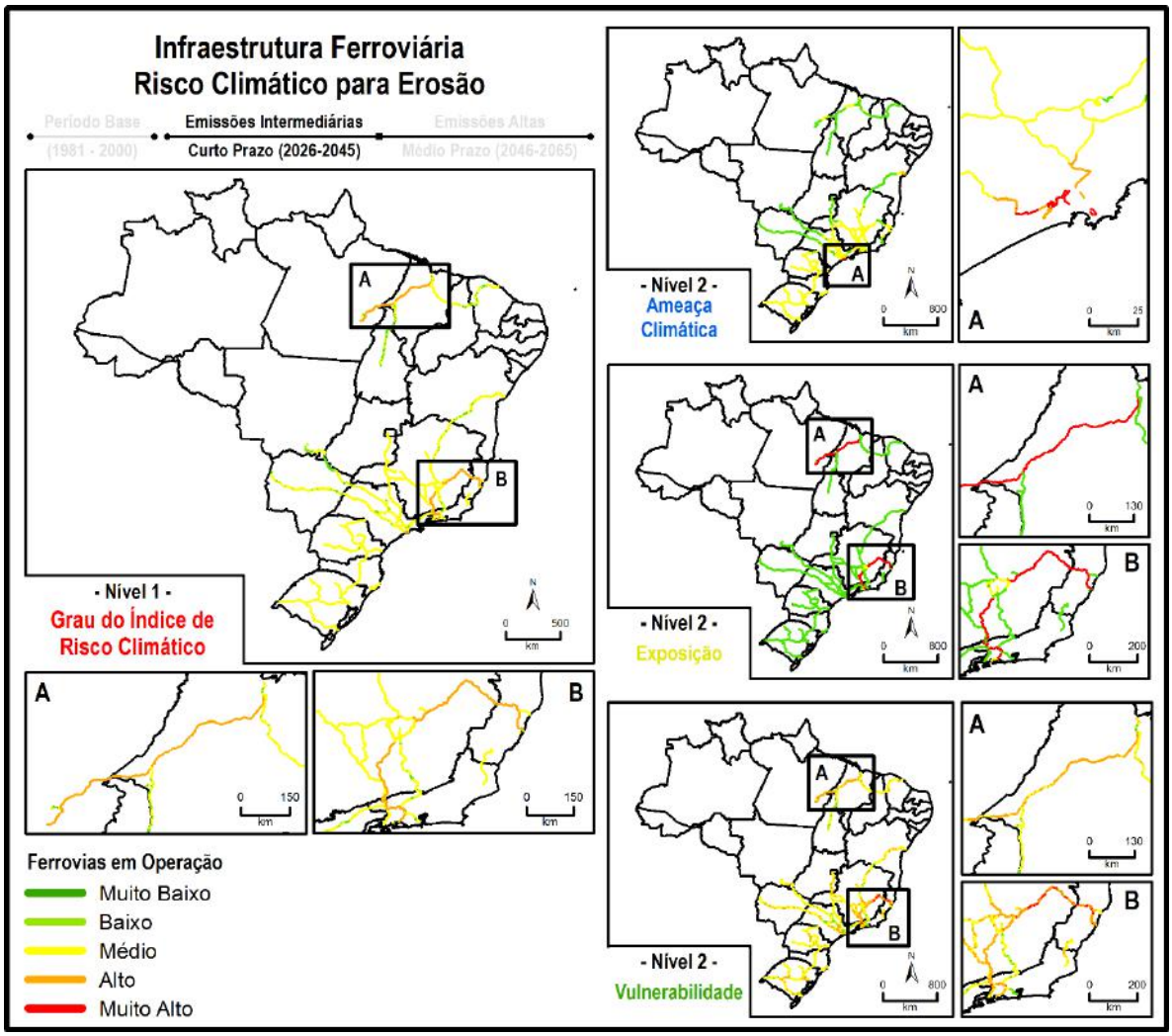
3.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto da erosão, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto e médio prazo.

3.2.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 14 apresenta os mapas resultantes das análises com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 14 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo, que apresentam risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), devido ao volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e ao peso da carga e aos indicadores de sensibilidade do meio biofísico à erosão, que compõem o componente vulnerabilidade.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.);
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

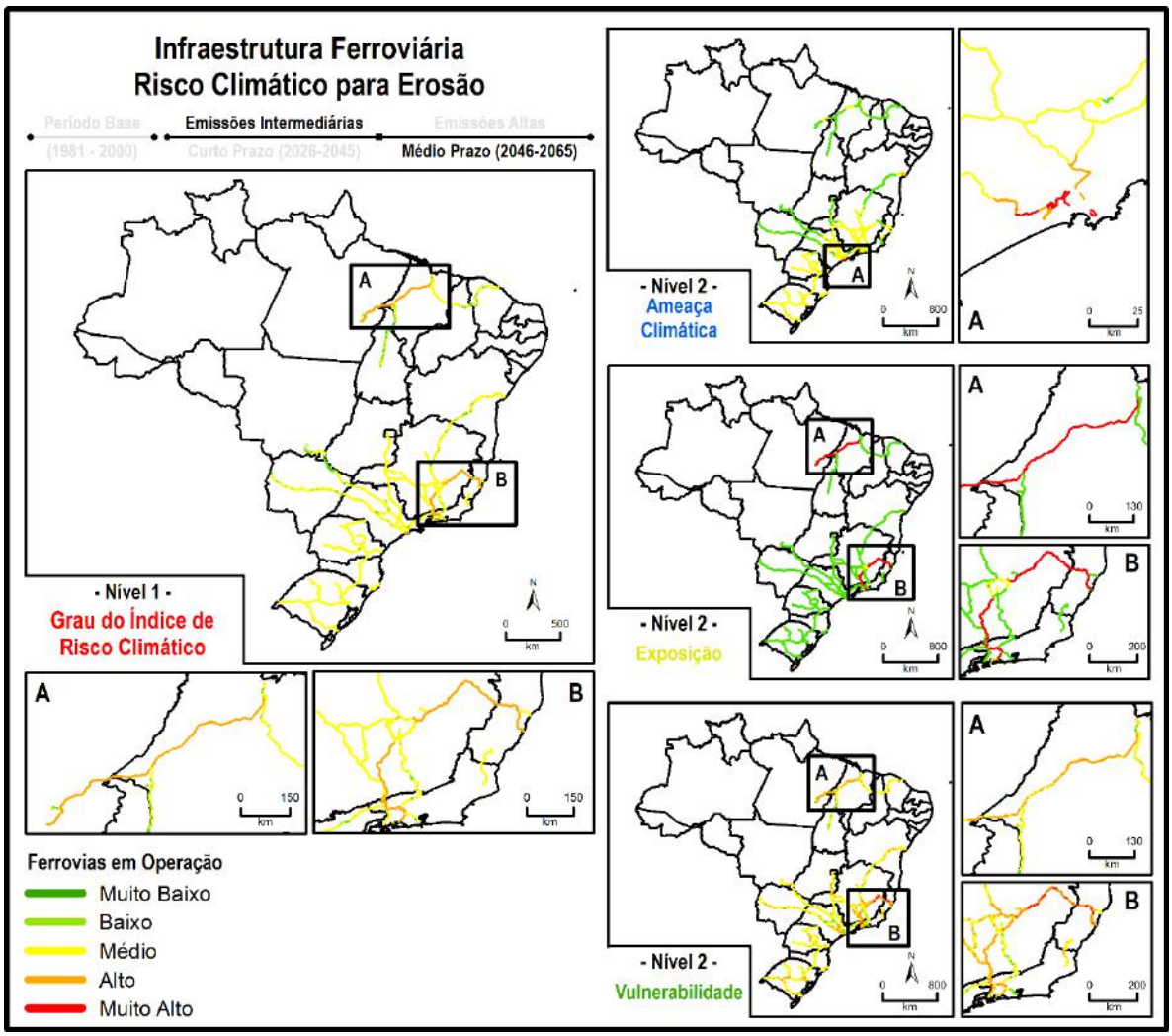
Nesse cenário, ocorre um aumento do risco na maior parte das ferrovias, que passam de baixo (período base) para médio risco. Apenas um trecho da Ferrovia Norte Sul em Tocantins e alguns trechos de ferrovias localizados em diversos estados da região Centro-Oeste e na Bahia permanecem com baixo risco climático de impacto na infraestrutura devido à erosão.

Para o componente do risco ameaça climática, mudanças importantes ocorreram nas regiões Sul e Sudeste se comparado ao período base: graus medianos e alto de ameaça à erosão podem ser verificados na Estrada de Ferro do Litoral (SP); nas regiões Norte e Nordeste, pequenos trechos da Estrada de Ferro Carajás apresentam graus medianos, e, especialmente no litoral da Bahia, pode ser observado graus medianos e altos na Estrada de Ferro Belo Horizonte x Salvador. Contudo, nas demais regiões brasileiras as mudanças foram pouco perceptíveis.

3.2.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 15.

Figura 15 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), conforme apresentado na Figura 15.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Considerando-se este cenário de emissões intermediárias em um horizonte temporal de médio prazo em relação ao período base, a maior parte das ferrovias passa de baixo para médio risco. Foram mantidos em baixo risco apenas trechos nos estados do Tocantins e da Bahia, e na região Centro Oeste.

O resultado da ameaça climática à erosão não sofreu alteração significante se comparada ao resultado do horizonte de curto prazo em um cenário de emissões intermediárias, com quase a totalidade da malha apresentando risco baixo e médio.

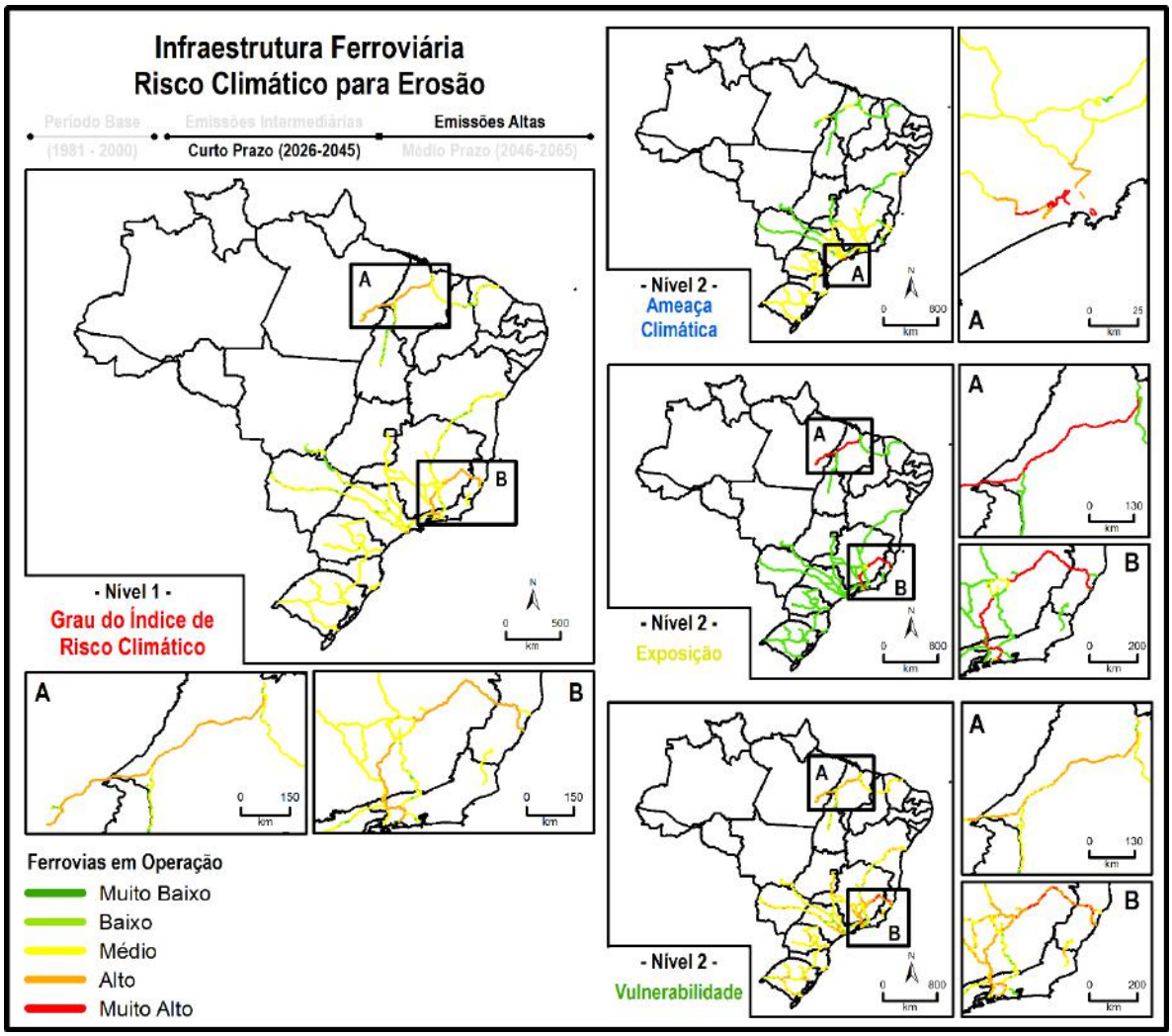
3.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de erosão na infraestrutura ferroviária considerando-se um cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

3.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 16 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).

Figura 16. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), conforme apresentado na Figura 16.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Para o cenário de emissões altas em um horizonte temporal de curto prazo em relação ao período base, a maioria das ferrovias passa de baixo risco para médio risco; apenas trechos de ferrovia nos estados de Tocantins e da Bahia e poucos trechos de ferrovias na região Centro-Oeste se mantiveram com risco baixo.

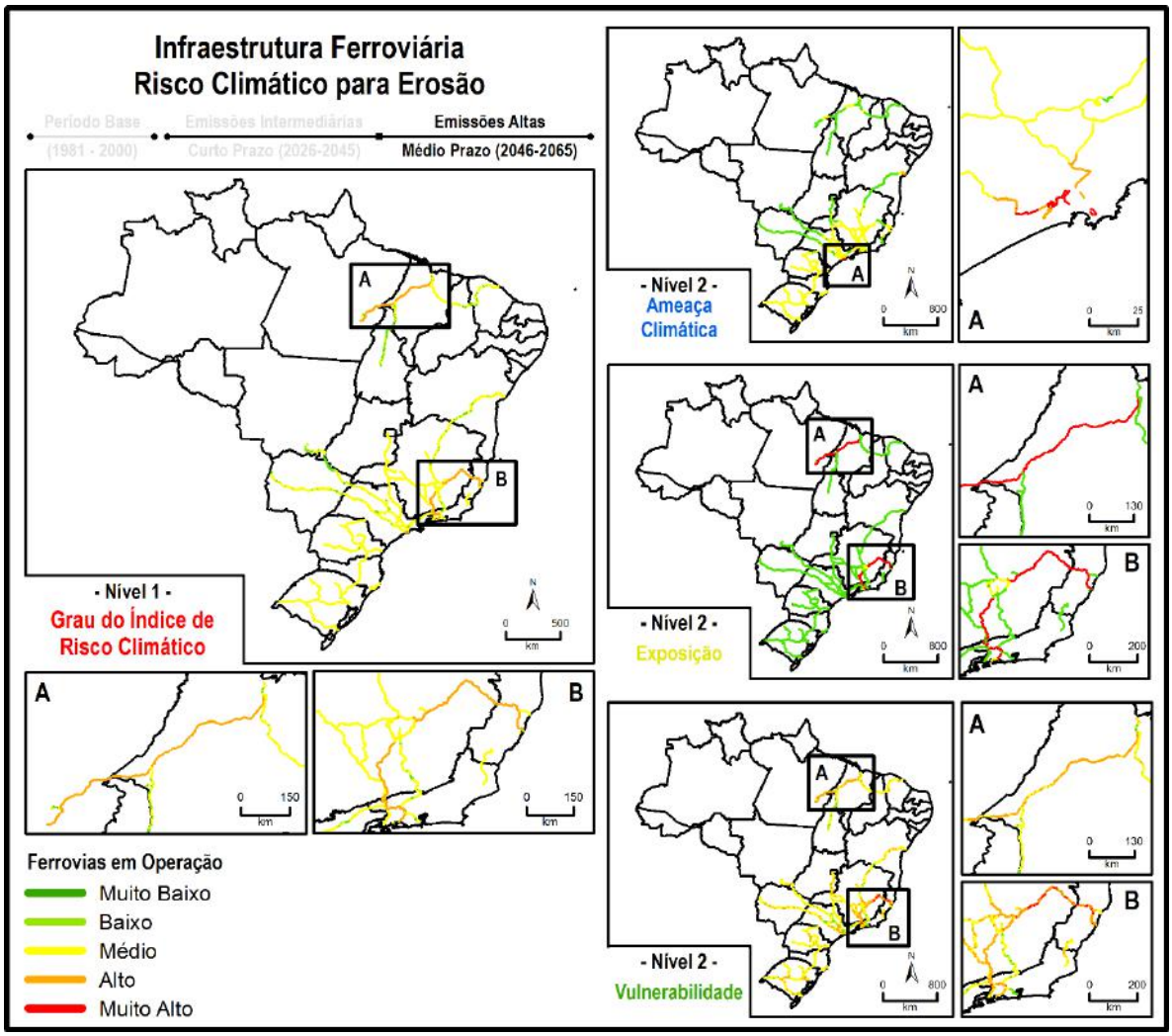
A ameaça climática resultante da erosão ficou próxima ao resultado encontrado considerando-se o cenário de emissões anteriormente apresentado (cenário de emissões intermediárias em um

horizonte temporal de médio prazo). Com isso, quase toda a malha apresenta baixo e médio risco, e a variação de risco entre os cenários foi considerada pouco significativa.

3.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 17 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, de exposição e de vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).

Figura 17 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos, conforme apresentado na Figura 17, continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), tal qual apresentado para o período base e nos cenários e horizontes temporais anteriores.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Para o cenário de emissões altas em um horizonte temporal de médio prazo (2046-2065), a maior parte das ferrovias passa de baixo risco (segundo o período base) para médio risco, mantendo com risco baixo apenas em trecho do Estado do Tocantins e trechos selecionados na região Centro-Oeste e no Estado da Bahia.

O índice da ameaça climática devido à erosão obteve resultado próximo ao encontrado para o cenário de emissões intermediárias, bem como para o horizonte temporal de curto prazo nesse cenário de emissões (alta). Portanto, quase a totalidade da malha ferroviária brasileira apresenta baixo e médio risco climático em sua infraestrutura devido ao impacto da erosão, e a variação de risco entre os cenários foi pequena.

3.2.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto de erosão

Os trechos ferroviários que apresentaram alto grau de risco climático devido ao impacto de erosão em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo foram:

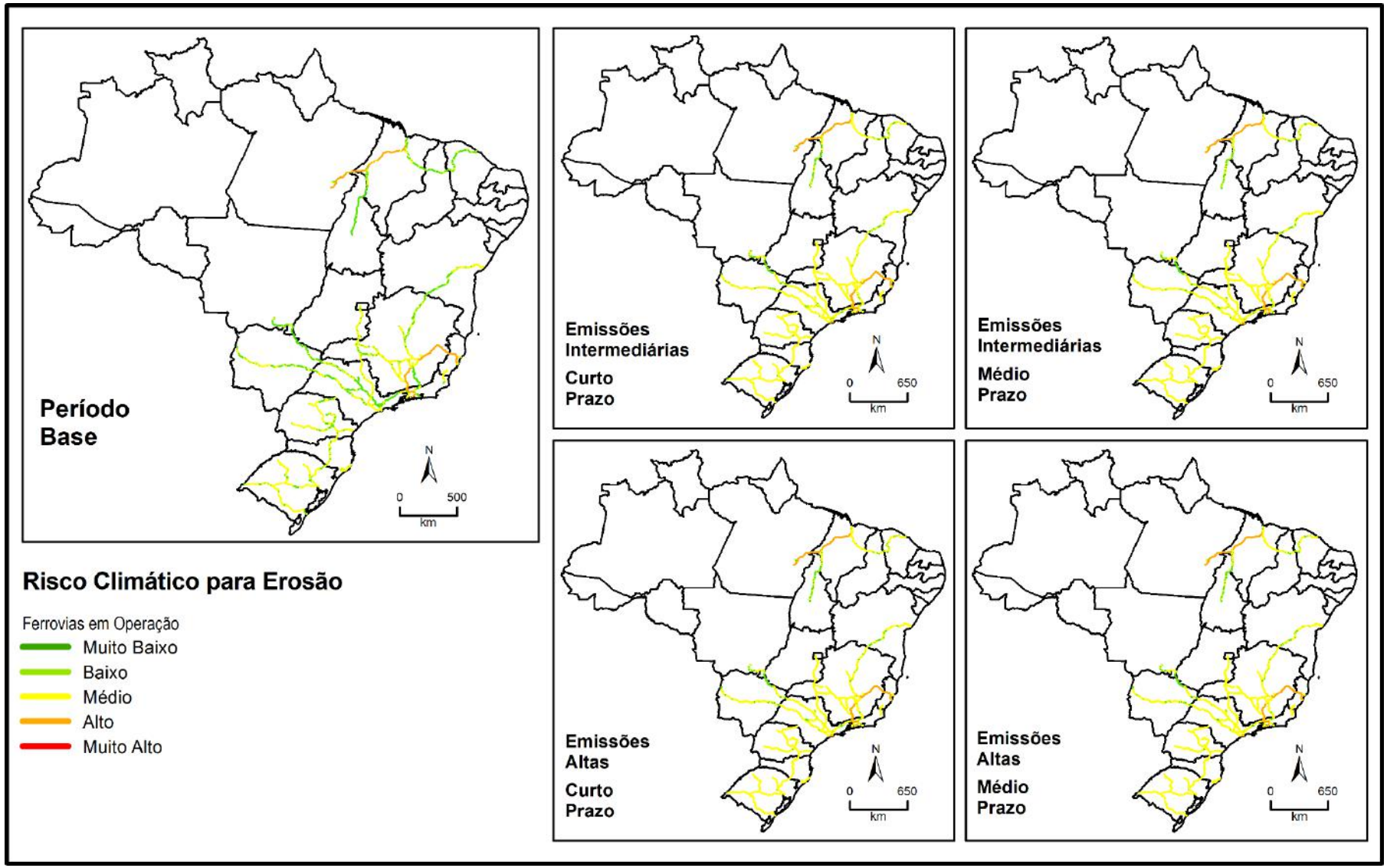
- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas X Rio, operada pela MRS Logística);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

Estas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e elevado peso de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura. Além disso, um destaque especial pode ser dado à sensibilidade do meio biofísico dessas regiões conforme já elucidado na Seção 3.1.4.

De modo geral, a infraestrutura da malha ferroviária federal brasileira apresenta médio risco climático devido ao impacto da erosão, já que não existem extensas quilometragens de ferrovias com vulnerabilidade ou ameaça altas ou muito altas.

Entretanto, tanto para o cenário de emissões intermediárias quanto para o de emissões altas, independentemente do horizonte temporal considerado, não houve grandes variações do risco climático. A Figura 18 apresenta a síntese dos mapas apresentados para o risco climático na infraestrutura ferroviária federal brasileira devido ao impacto da erosão.

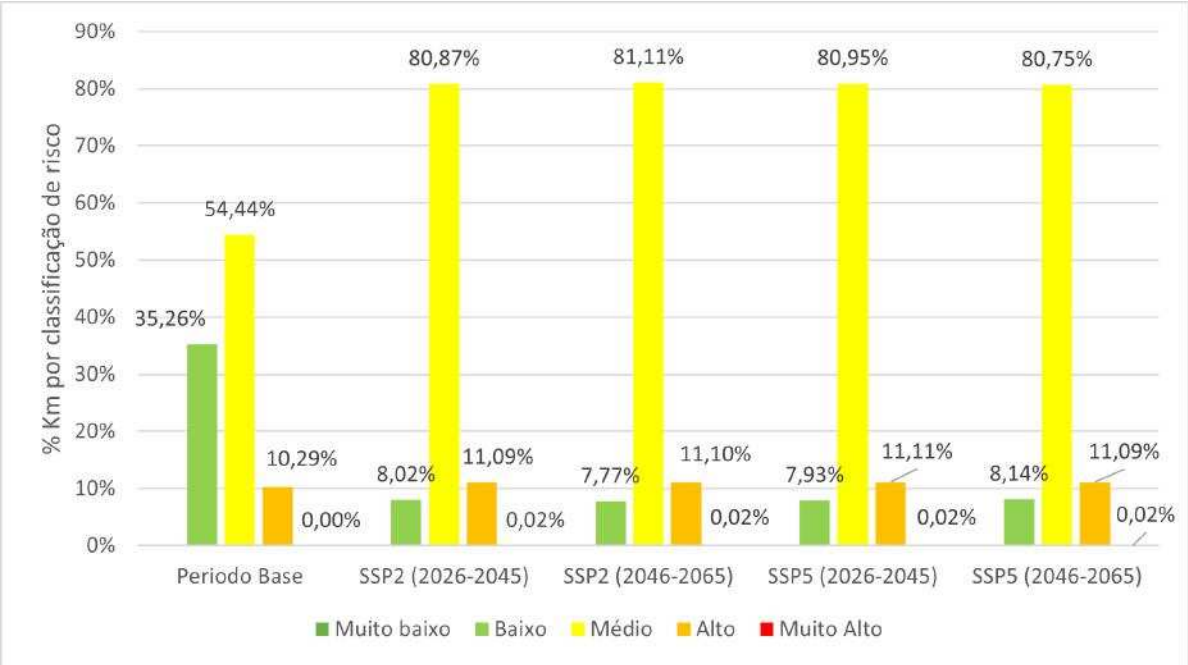
Figura 18 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentada a Figura 19, com a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão.

Figura 19 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 19, notam-se poucas variações entre os graus de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) entre os cenários e projeções, porém notável diferença entre o período base e demais cenários. Em todos os cenários e horizontes temporais considerados, 11% da malha ferroviária se encontra em áreas de alto risco. Além disso, entre o período base e os cenários futuros, há um aumento de 27% na distribuição da quilometragem das ferrovias com risco climático médio. Entretanto, esse aumento não se torna uma tendência ao longo dos diferentes horizontes temporais ou cenários de emissões, já que, independentemente do cenário avaliado, 81% das ferrovias se mantêm com risco climático médio devido ao impacto da erosão. Para o período base, 35% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão, 54% sob risco médio e 10% sob risco alto.

Ainda de acordo com a Figura 19, para os cenários e horizontes subsequentes, o IRC devido ao impacto de erosão é baixo em 8% das ferrovias, médio em 81% e alto 11%. Essa constância no valor do índice de risco climático entre os diferentes cenários decorre do componente ameaça, apresentado na Tabela 4, a qual apresenta o percentual da quilometragem das ferrovias de acordo com o grau de ameaça climática para impactos devido à erosão para o período base e em cada um dos cenários analisados.

Tabela 4 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Erosão) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,04%	98,23%	1,38%	0,34%	0,00%
SSP2 (2026-2045)	0,00%	38,38%	60,07%	1,27%	0,29%
SSP2 (2046-2065)	0,00%	38,01%	60,43%	1,27%	0,29%
SSP5 (2026-2045)	0,00%	38,55%	59,85%	1,31%	0,29%
SSP5 (2046-2065)	0,00%	38,64%	59,79%	1,28%	0,29%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 4, para o componente "ameaça climática", observa-se que a maior diferença se dá entre o período base e todos os demais cenários. Nas projeções, aproximadamente 60% da malha ferroviária apresenta níveis médios de ameaça climática, enquanto, no período base, praticamente todo o território apresenta baixa ameaça climática devido ao impacto à erosão. Isso pode ser explicado pela diferença existente no cálculo da ameaça climática que, no período base, se dá por meio de dados do histórico de clima observados, enquanto para os cenários futuros utiliza projeções.

A Tabela 5 apresenta a distribuição da quilometragem das ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão para cada um dos cenários analisados. Observando-se a tabela é possível notar que há pouca variação com relação à quilometragem suscetível a impactos devido à erosão entre os cenários futuros e horizontes temporais.

Tabela 5 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	6.284,69	9.703,31	1.834,26	-
SSP2 (2026-2045)	0	1.429,95	14.418,26	1.976,83	3,35
SSP2 (2046-2065)	0	1.385,70	14.460,04	1.979,29	3,35
SSP5 (2026-2045)	0	1.413,37	14.431,79	1.979,87	3,35
SSP5 (2046-2065)	0	1.451,97	14.395,87	1.977,20	3,35

Fonte: Elaboração própria (2022).

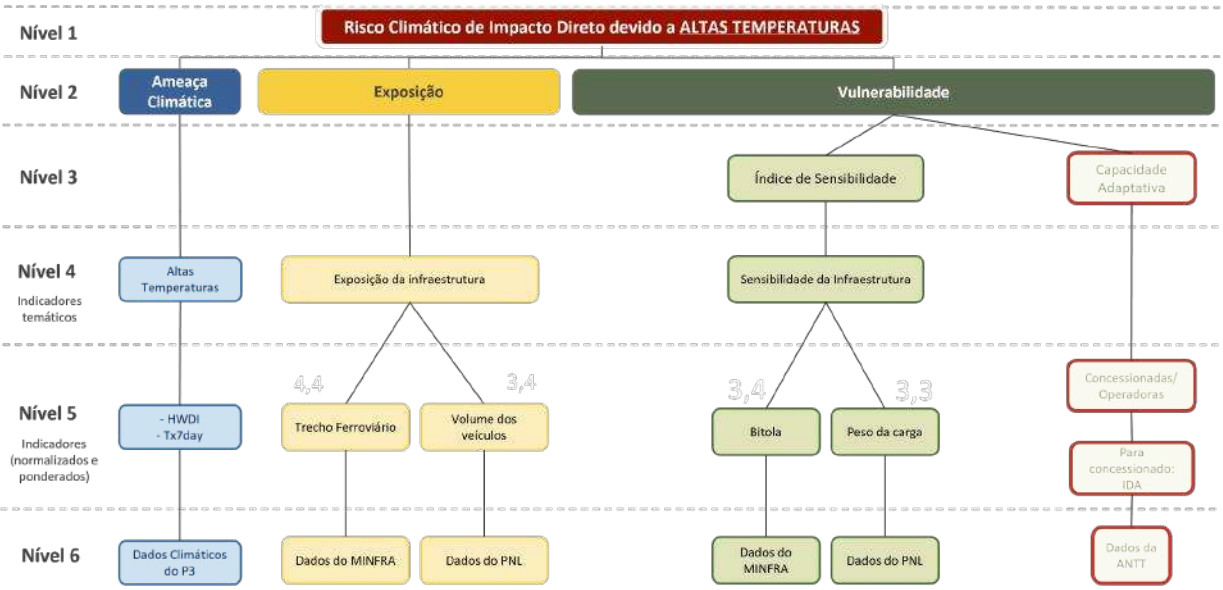
Apesar da pequena variação entre as quilometragens distribuídas em cada categoria de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto), vale a pena ressaltar, como dito anteriormente, a diferença

entre a quilometragem com risco baixo de impacto devido à erosão entre o período base (6.284,69 Km, equivalente a 35% da malha ferroviária) e os demais cenários - uma redução de cerca de 77% - e o surgimento de trechos de ferrovias com risco muito alto de impacto devido à erosão em todas as projeções realizadas.

3.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

O IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas para a infraestrutura ferroviária foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e dos subíndices sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático na infraestrutura ferroviária devido ao impacto direto de altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme expresso na Figura 20, para compor o subíndice de ameaça climática (ou indicador temático de altas temperaturas), foram considerados os dados de:

- HWDI: duração de ondas de calor (em dias); e
- Tx7day: média de temperatura dos 7 (sete) dias consecutivos mais quentes do ano.

Para o subíndice de exposição, como em todos os cenários, foram considerados os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dados do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, como nos demais impactos considerados, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

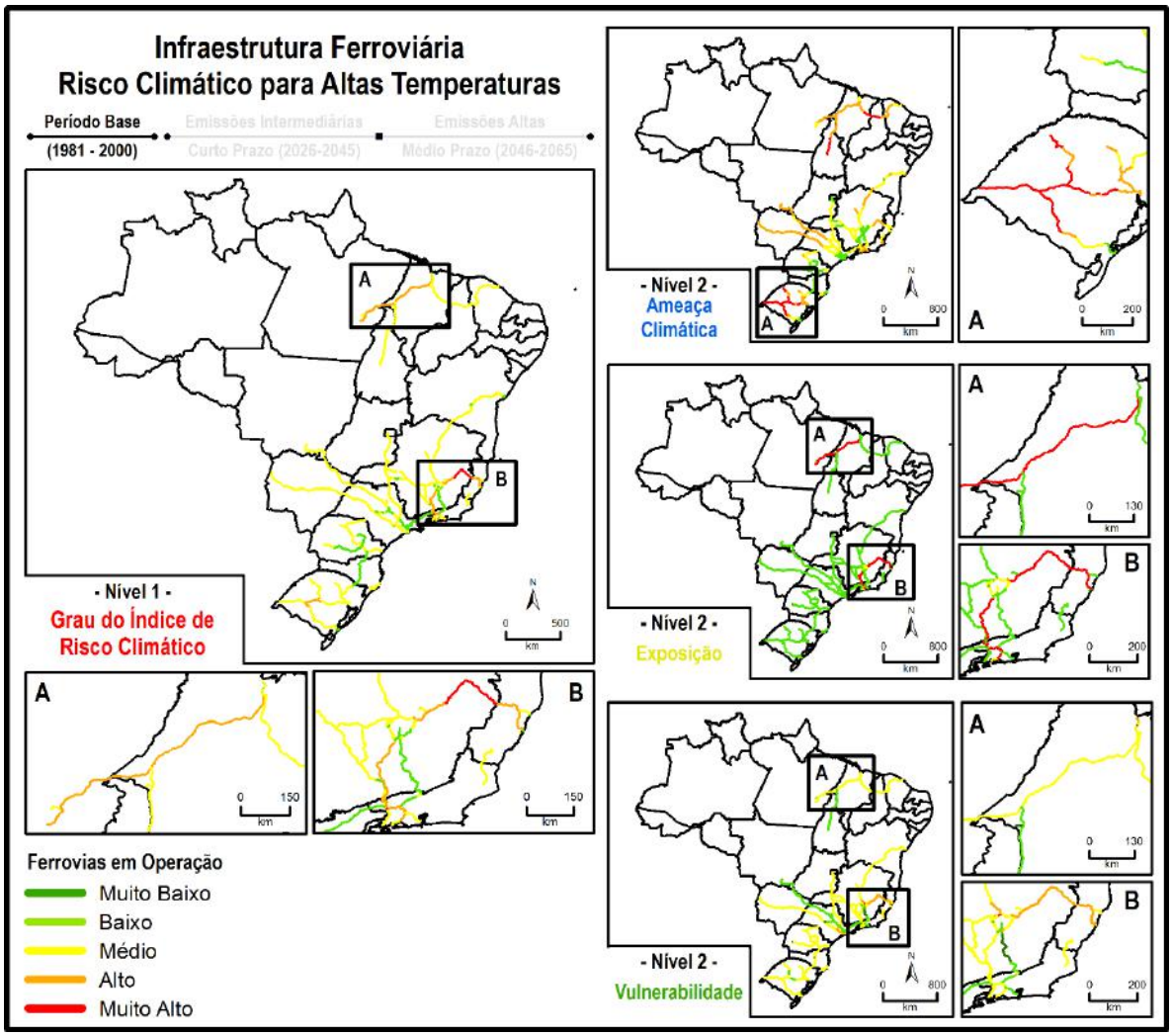
Além disso, como se trata de um impacto direto na infraestrutura ferroviária, não há sensibilidade do meio biofísico; portanto, o subíndice de vulnerabilidade para o impacto direto devido às altas temperaturas foi composto apenas pela sensibilidade da infraestrutura (dados de bitola, provenientes do MInfra, e peso da carga, do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários de análise: período base (1981 - 2000); emissões intermediárias (SSP2-4.5), para horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065); e emissões altas (SSP5-8.5), para os mesmos horizontes temporais.

3.3.1. Período base | Altas temperaturas

A Figura 21 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o mapa de IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas (Nível 1), para o período base.

Figura 21. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 21, os maiores IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária federal brasileira foram observados na Região Sudeste, com destaque para os estados de Minas Gerais e do Espírito Santo (onde se verificam graus alto e muito alto de impacto), bem como, Rio de Janeiro (com grau alto). Também se destacam, no Norte/ Nordeste, o eixo Pará-Maranhão (grau alto), e no Sul, um trecho no Rio Grande do Sul, entre Cacequi e Dilermando de Aguiar (grau alto).

Tais trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A); e
- Rio Grande do Sul entre Cacequi e Dilermando de Aguiar (Estrada de Ferro Porto Alegre-Uruguaiana).

Os riscos climáticos calculados para essas ferrovias advêm principalmente da exposição, devido ao volume de veículos que trafegam nesses trechos, e da vulnerabilidade, relacionada especificamente ao peso da carga transportada (sensibilidade de infraestrutura). Para o cálculo da vulnerabilidade, diferente dos impactos intermediários (ou indiretos) apresentados anteriormente, como se trata de um impacto direto na infraestrutura, não foram considerados indicadores de sensibilidade do meio biofísico. Os trechos com maiores graus (alto e muito alto) de sensibilidade da infraestrutura se localizam no trecho Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas).

Por fim, com relação à ameaça climática, destacam-se as ferrovias localizadas no estado do Rio Grande do Sul, no trecho entre Uruguaiana e Santa Maria (Estrada de Ferro Porto Alegre-Uruguaiana), que apresentam alto grau de ameaça climática calculado para o período de base.

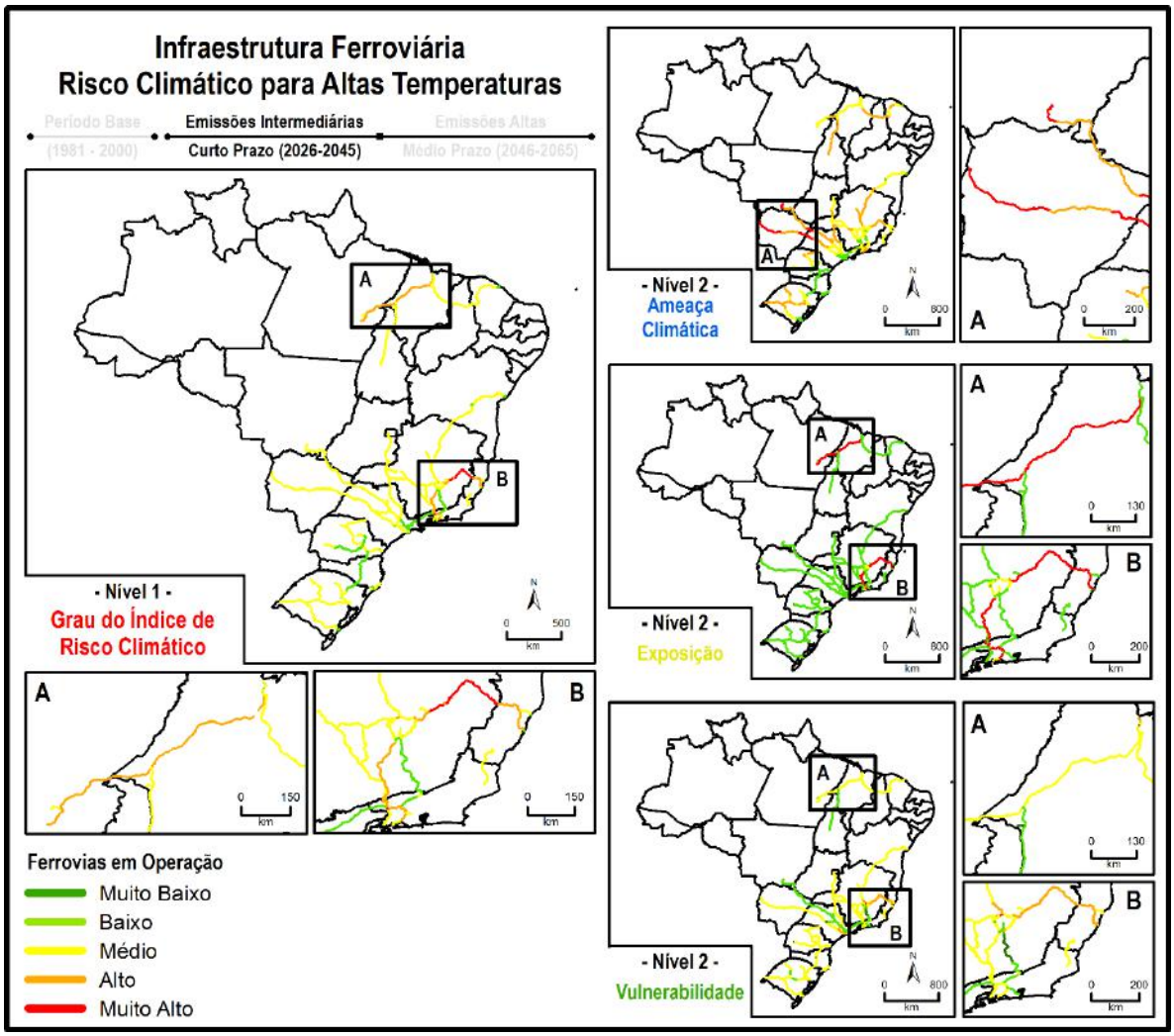
3.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura ferroviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias nos horizontes temporais de curto (2026 - 2045) e médio (2046 - 2065) prazos.

3.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 22 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026 - 2045).

Figura 22 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com maiores graus de IRC se concentram na região Sudeste, nos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, e na Região Norte/Nordeste, no Eixo Pará-Maranhão, conforme apresentado na Figura 22. Conforme apresentado na Seção 3.3.1 para o período base, aqui o elevado IRC também decorre do volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e do peso da carga, que compõe o componente de vulnerabilidade.

Os trechos com maior risco climático encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

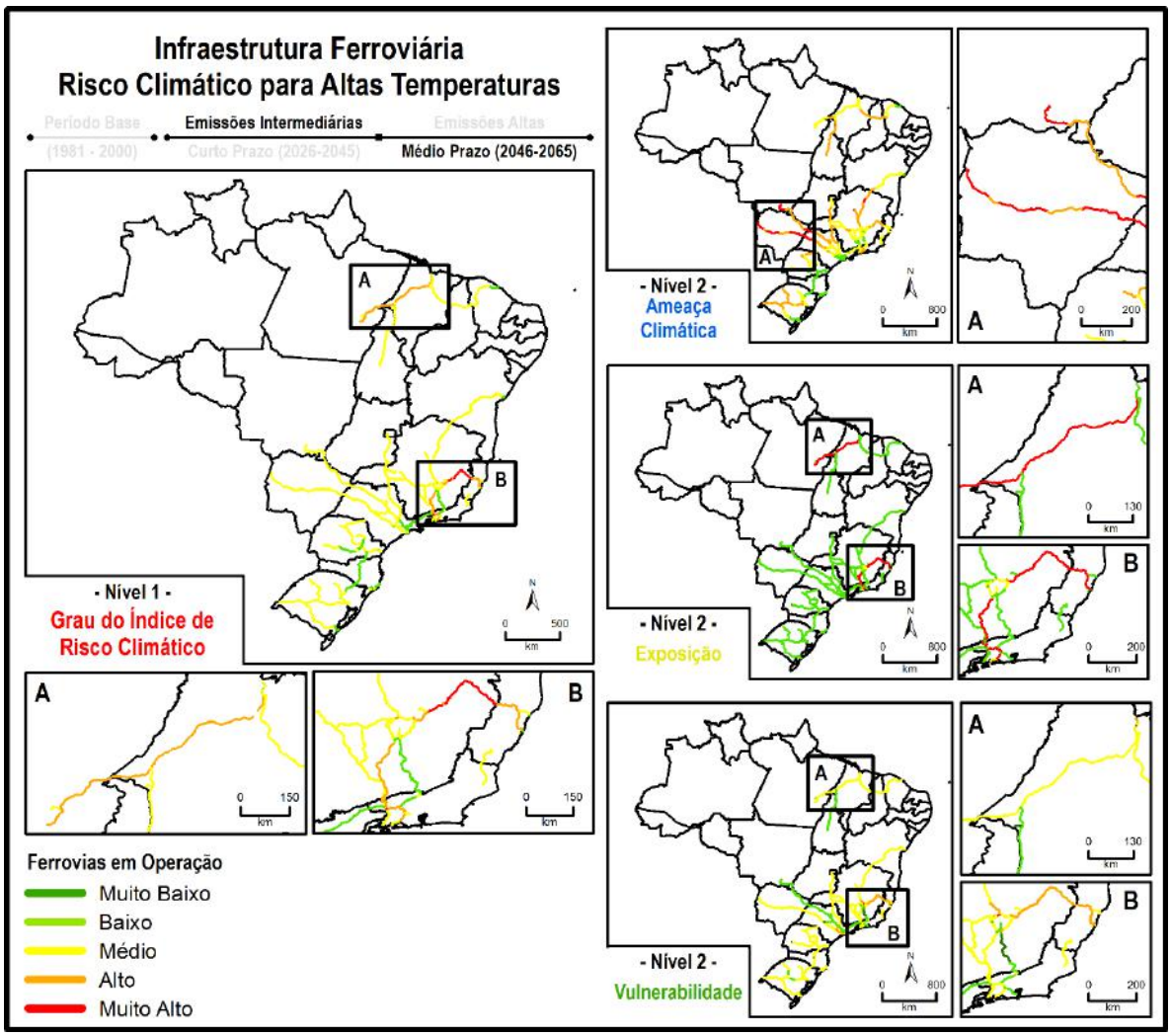
Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no componente de ameaça climática, em que a malha do Estado do Rio Grande do Sul - especificamente no trecho de Santa Maria a Uruguaiana (RMS EF 153, EF 290, EF 497 ou Estrada de Ferro Porto Alegre - Uruguaiana) - passa de grau muito alto para alto, e partes dos estados da Região Centro-Oeste (MS e MT), em que

os Estados do Mato Grosso (EF 364 RMN ou Ferrovia Norte do Brasil) e Mato Grosso do Sul (Estrada de Ferro 265 - RMO ou Estrada de Ferro Noroeste do Brasil) que passaram de grau alto para grau muito alto. Alguns trechos de ferrovias no Maranhão e em Minas Gerais se mantém com alto grau de ameaça climática.

3.3.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065) são apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se a manutenção das principais ferrovias sob risco de impacto direto devido a altas temperaturas, se comparado ao cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). A principal diferença está no aumento da ameaça climática nas ferrovias da

região Centro-Oeste, com destaque para a Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, tendência essa já observada entre o período base e o cenário SSP2 2026-2045.

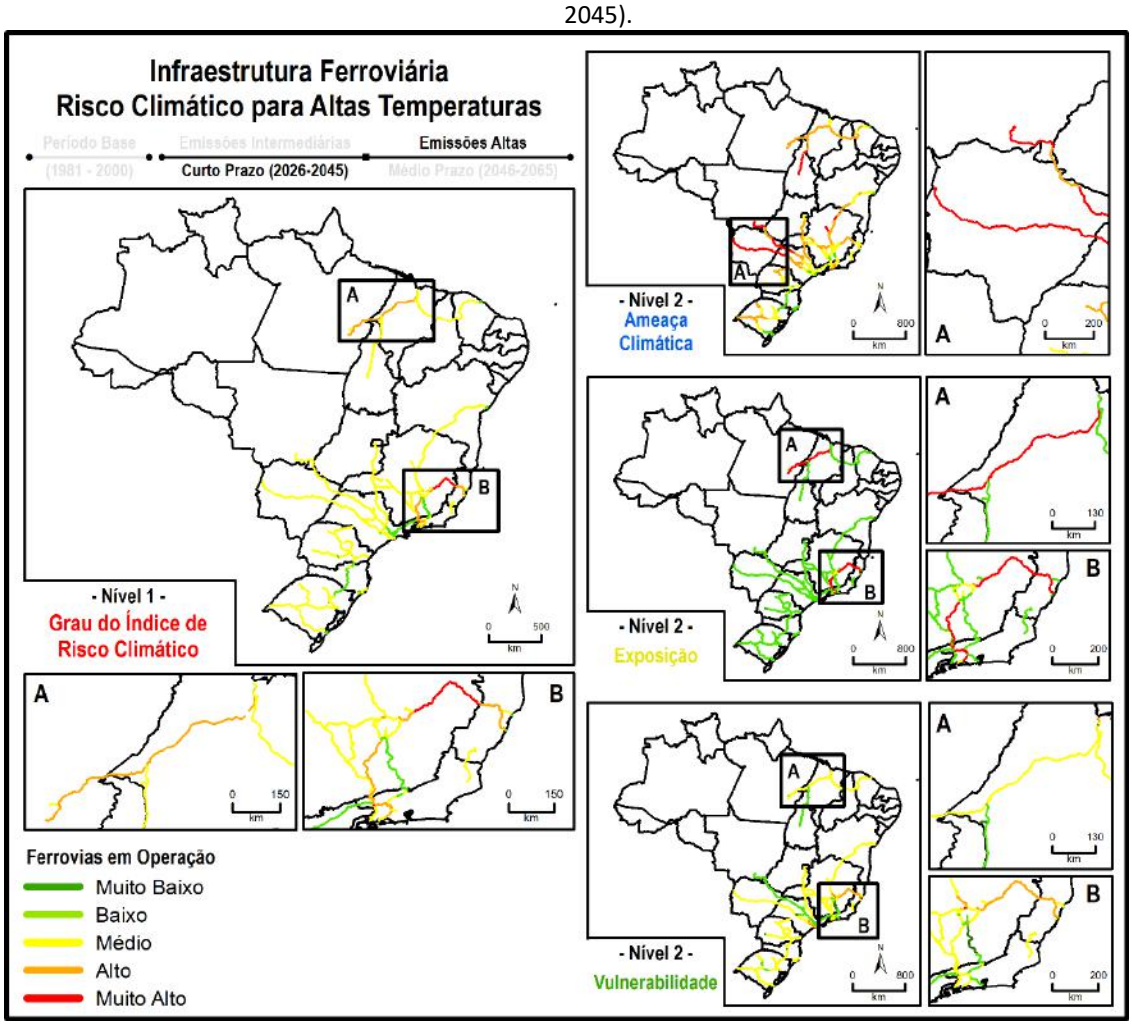
3.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nessa subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura ferroviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

3.3.3.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 24 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).

Figura 24 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando a Figura 24, nota-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas se concentram na região Sudeste (especificamente entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e Minas Gerais e Rio de Janeiro), e na Região Norte/Nordeste, no Eixo Pará-Maranhão, onde trafegam os maiores volumes de veículos e de peso de carga (componente exposição). Tais trechos equivalem às ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

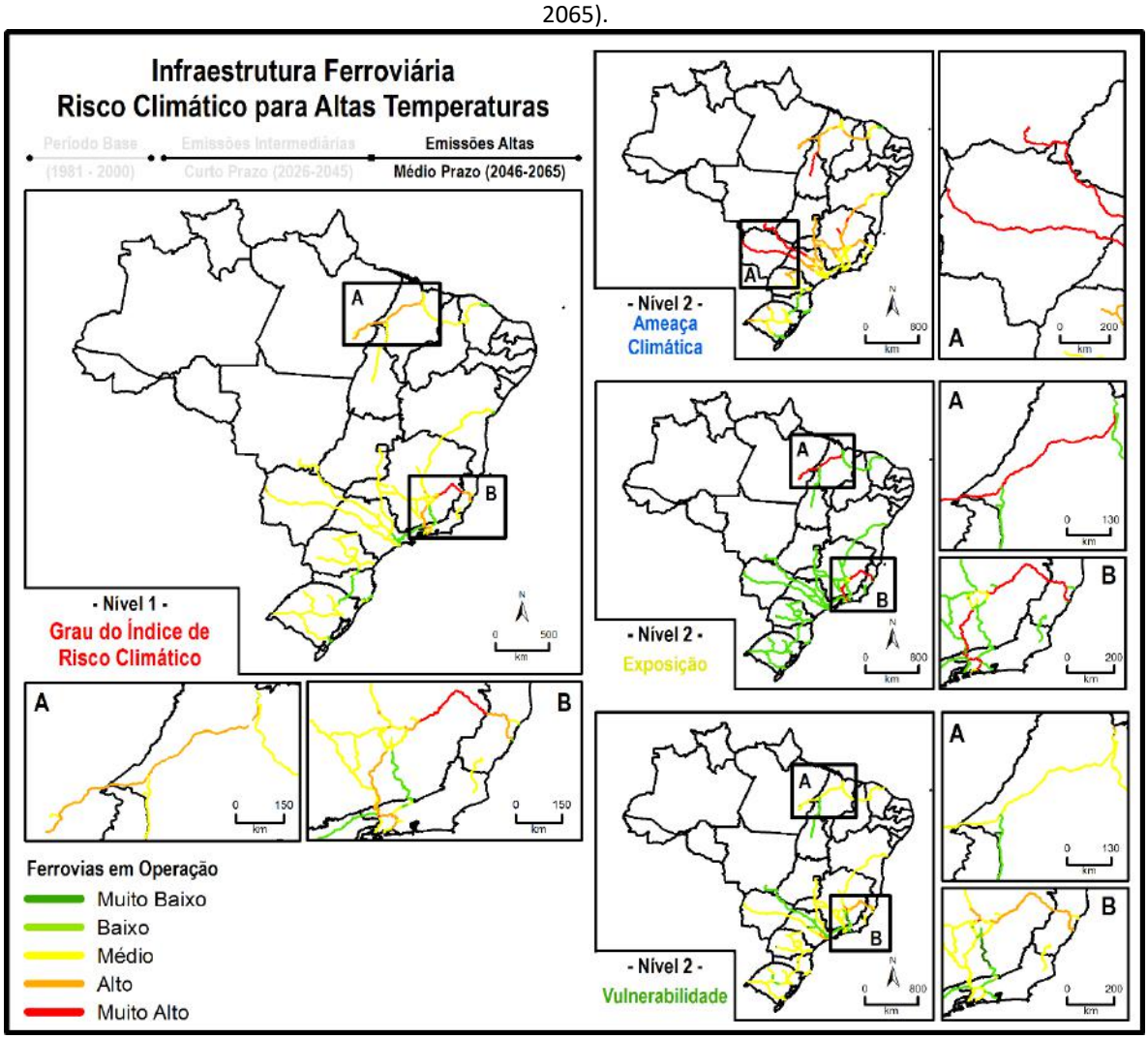
Para esse cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo, na região Centro-Oeste, praticamente toda a extensão da Ferrovia Norte do Brasil, localizada no estado do Mato Grosso (EF 364 Rumo Malha Norte - RMN), e da Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, localizada no estado do Mato Grosso do Sul (EF 265 – Rumo Malha Oeste - RMO), aparecem com grau muito alto de ameaça climática devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Além disso, notam-se outros trechos em que o subíndice de ameaça climática foi elevado: entre os estados de Minas Gerais - Bahia (FCA - Estrada de Ferro 116) e em toda a malha ferroviária dos estados do Pará e do Maranhão, que apresentam, nesse cenário (SSP5 2026-2045), alto grau de ameaça climática.

3.3.3.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 25 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).

Figura 25. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Verifica-se, pela Figura 25, pouca variação das áreas de alto risco climático de impacto direto na infraestrutura ferroviária devido às altas temperaturas para este horizonte de médio prazo (em comparação com o horizonte temporal de curto prazo, considerando-se o mesmo cenário de emissões - ver Subseção 3.3.3.1). No entanto, observa-se uma expansão das áreas de alto e muito alto grau de ameaça climática, que se amplia e passa a atingir áreas de ferrovias localizadas na Região Noroeste do Estado de São Paulo, especificamente na Estrada de Ferro Noroeste do Brasil (operada pela Rumo Logística).

Assim como observado para o horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045), praticamente toda a extensão da Ferrovia Norte do Brasil, no estado do Mato Grosso (EF 364 RMN), e da Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, no Mato Grosso do Sul (EF 265 - RMO), aparecem com grau alto de ameaça climática nesse cenário (SSP5 2046-2065). Além disso, notam-se trechos que também apresentam alto grau de ameaça climática entre Minas Gerais e Bahia (FCA - Estrada de Ferro 116) e em toda a malha ferroviária localizada nos estados do Pará e do Maranhão.

3.3.4 Análise do Risco Climático devido ao Impacto Direto de Altas temperaturas

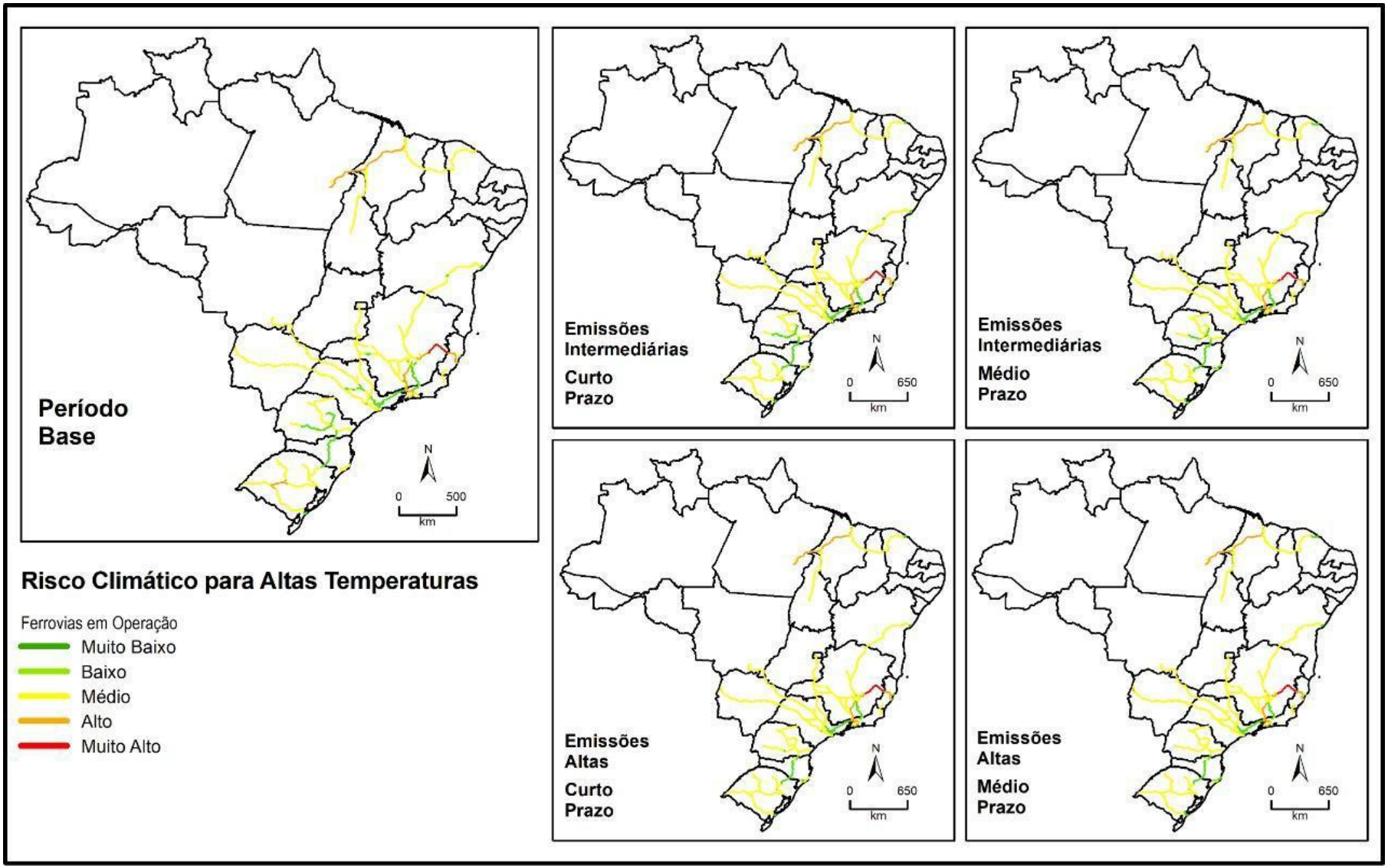
Os trechos ferroviários que apresentaram os maiores IRC devido às altas temperaturas, em todos os cenários e horizontes temporais considerados no presente projeto, foram:

- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Rio de Janeiro/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio de Janeiro, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

Essas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e transportam elevados pesos de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura, a qual, por sua vez, compõe o indicador de vulnerabilidade.

Nesse contexto, é importante destacar as variações verificadas nos mapas de ameaça climática, que representaram uma tendência de aumento no grau desse componente do risco climático, em especial na Região Centro-Oeste brasileira, e em alguns estados localizados nas Regiões Sudeste e Nordeste;: no nordeste do estado de São Paulo (na Estrada de Ferro Noroeste do Brasil), bem como, em partes dos estados de Minas Gerais e da Bahia (na Estrada de Ferro Bahia-Minas FCA 116), como pode ser observado na Figura 26.

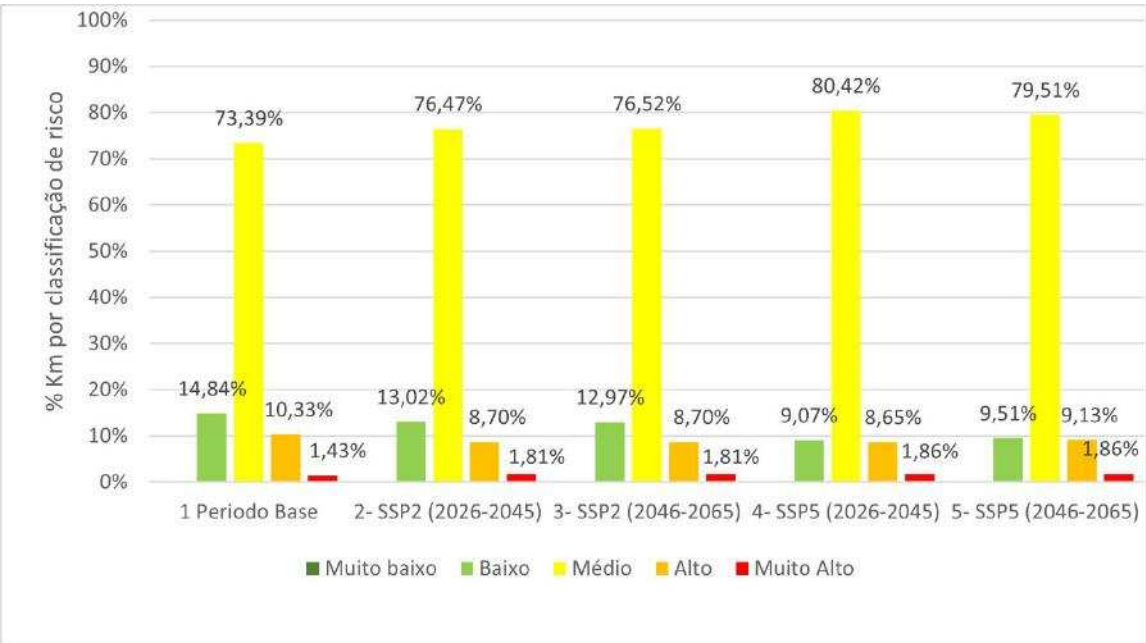
Figura 26 - Síntese: Mapa de Risco Climático de impacto a infraestrutura devido a altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os diferentes cenários e horizontes, temporais, apresenta-se a Figura 27, com a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Figura 27 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 27, notam-se poucas variações entre os graus de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) conforme se modificam os cenários de emissões e os horizontes temporais. Há uma predominância de trechos de ferrovias com médio grau de risco climático. Destacam-se ainda as reduções nos trechos de ferrovias sob grau baixo de risco climático à medida que se aumenta o cenário de emissões e/ou modifica-se o horizonte temporal (havendo uma ampliação apenas diante do cenário de emissões altas considerando-se um horizonte temporal de médio prazo), e os crescimentos para as áreas sob risco médio e muito alto. Os trechos com alto grau de risco climático, apresentam um decréscimo em relação ao período base, embora entre os cenários de emissões intermediárias (SSP2) e alta (SSP5) no horizonte de médio prazo observa-se um comportamento contrário.

Para o **período base**, observa-se uma predominância de trechos de ferrovias sob risco climático médio de impacto direto em sua infraestrutura, correspondendo a 73,39% do total. Os trechos sob baixo risco climático correspondem a 14,84% das ferrovias, e aqueles sob risco alto ou muito alto somam 11,76%.

Ainda perante a Figura 27, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045)**, o IRC de impacto direto devido a altas temperaturas continua sendo predominantemente médio nas ferrovias brasileiras, correspondendo a 76,47% do total. Nota-se um pequeno decréscimo dos trechos com graus baixo (13,02%) e alto (8,7%), em relação ao período base. Contudo, há um pequeno aumento dos trechos com grau muito alto, o qual se mantém abaixo de 2%.

Mantendo-se o cenário de emissões e modificando-se o **horizonte temporal** para **médio prazo (SSP2 2046-2065)**, mudanças sutis podem ser verificadas: os trechos sob médio risco aumentaram de 76,47% para 76,52%, com consequente redução dos trechos sob baixo risco de 13,02% para 12,97%. Os demais trechos mantiveram-se constantes.

No **cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)**, de acordo com a Figura 27, os trechos ferroviários com risco médio representam 80,42%, enquanto os trechos com baixo risco somam 9,07% - uma variação de cerca de 4% em relação ao período base e aproximadamente 3% para o cenário intermediário. As categorias do gráfico apresentado na Figura 27 representativas dos demais graus de risco climático apresentaram pequenas variações em relação aos cenários de emissões intermediárias. Esse mesmo padrão foi observado para o **horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065)**.

De forma geral, cerca de 10% da malha ferroviária federal brasileira apresentou graus alto e muito alto de risco climático de impacto direto devido a altas temperaturas. Observou-se um aumento nos trechos com risco climático médio de 73% da malha no período base, para 79% no cenário pessimista considerando-se o horizonte de médio prazo. Essa variação decorre principalmente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 6 apresenta o percentual dos trechos, por grau de ameaça climática, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 6 - Quilometragem (em %) de ferrovias, por graus de ameaças climáticas, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Altas temperaturas) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,07%	20,52%	38,39%	32,33%	8,68%
SSP2 (2026-2045)	0,13%	16,34%	42,27%	35,58%	5,67%
SSP2 (2046-2065)	0,13%	15,54%	40,82%	35,78%	7,73%
SSP5 (2026-2045)	0,13%	8,42%	37,71%	39,55%	14,19%
SSP5 (2046-2065)	0,13%	5,81%	41,50%	37,02%	15,53%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 6, para o componente “ameaça climática”, os trechos com grau de risco baixo caíram de 20,52% (período base) para 5,81% (no cenário de altas emissões e médio horizonte temporal - SSP5 2046-2065). Também se observa aumento dos trechos de ferrovias nas categorias de risco climático: médio (38,39% no período base para 41,5%); alto (de 32,33% para 37,02%); e muito alto (de 8,68% para 15,53%, um aumento de quase 100%).

A Tabela 7 apresenta a distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Tabela 7 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	2.658,57	13.143,38	1.850,40	256,81
SSP2 (2026-2045)	0	2.322,28	13.644,89	1.551,73	323,40
SSP2 (2046-2065)	0	2.313,79	13.653,38	1.551,73	323,40
SSP5 (2026-2045)	0	1.617,61	14.349,56	1.543,50	331,63
SSP5 (2046-2065)	0	1.696,00	14.185,68	1.628,98	331,63

Fonte: Elaboração própria (2022).

A partir da observação da Tabela 7, é possível notar uma tendência de aumento dos trechos ferroviários com graus de risco climático médio, alto e muito alto, e uma consequente diminuição dos trechos com baixo risco. Caminhando-se do período base em direção ao cenário pessimista (emissões altas) em um horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065), os trechos com grau muito alto de risco climático aumentam cerca de 30%, passando de 256,81 km para 331,63 km. Por outro lado, as áreas com baixo risco climático reduzem de 2.658,57 km para 1.696,00 km (redução de aproximadamente 36%).

4. Conclusão - Modo Ferroviário

Na malha ferroviária federal brasileira, os trechos de alto e muito alto risco representam 10% a 12% da malha para os três impactos (deslizamento, erosão e altas temperaturas) e em todos os cenários analisados (período base e as quatro projeções realizadas). Desse modo, cerca de 2.000 km de ferrovias no Brasil se encontram com alto e muito alto grau de risco. Cabe aqui reforçar que risco alto e muito alto não significam necessariamente que o nível de criticidade é alto pois esta é uma avaliação relativa e não absoluta. Os trechos de alto e muito alto risco que se repetem em todos os cenários e projeções são:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio de Janeiro, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas Gerais, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Isso se deve ao fato de os componentes **exposição** e **vulnerabilidade** (mais especificamente o subíndice de **sensibilidade da infraestrutura**) ser o mesmo em todos os impactos e cenários.

No que tange ao **risco climático de impactos na infraestrutura ferroviária devido ao deslizamento**, os trechos com graus de risco alto e muito alto estão concentrados no Sul/Sudeste brasileiro (Serra do Mar e Serra Geral). Essas áreas se mantiveram com alto grau de risco ao longo da análise, sendo a evolução de trechos de grau baixo de risco para médio a principal tendência observada entre os cenários e os horizontes temporais. Diferente dos outros impactos, foi observada uma concentração

dos trechos de risco alto e médio, e percentual considerável de áreas com baixo grau de risco, variando de cerca de 30% no período base para 20% no cenário pessimista de médio prazo (SSP5 2046-2065). Essa tendência acompanha o componente de **ameaça climática,** que tem menos de 1% de áreas de alto risco, tanto no período base, quanto nas projeções, mas com uma inversão entre baixo e médio risco climático para o período base, com 74,8% de ferrovias com baixa ameaça e 24,1% com altas, enquanto no cenário pessimista e médio prazo esses valores chegam a 28,5% e 70,65%, respectivamente.

Já para a análise do **risco climático de impactos na infraestrutura ferroviária devido à erosão,** observa-se uma distribuição mais homogênea do IRC pelo país, com quase toda a malha apresentando grau médio de risco (54% no período base e 81% nas projeções). Desse modo, é importante compreender a erosão como uma ameaça que deve ser tratada de forma sistêmica no planejamento e na operação ferroviária. As áreas de alto risco se concentram nas ferrovias com maior volume e peso de carga transportados, totalizando 10% da malha com risco alto; contudo, não apresenta trechos com risco muito alto. Nessa análise, foram verificadas alterações marginais entre as projeções, com variações substanciais entre essas e o período base, havendo trechos com baixo risco variando de 35% para apenas 8% nas projeções. Essa diferença é ainda mais acentuada no componente **ameaça climática**, que, no período base, apresenta 98% da malha com baixo grau de ameaça e, nas projeções, apenas 28%. Para esse componente do risco climático, menos de 1% das áreas tem alto ou muito alto grau de ameaça climática.

A análise de **risco climático de impacto direto na infraestrutura ferroviária devido a altas temperaturas** resultou em cerca de 73% da malha com risco médio ou alto no período base, que se eleva para cerca de 80% no cenário de altas emissões (SSP5). Diferente do risco de impacto devido ao deslizamento, aqui os trechos com baixo risco a altas temperaturas se concentram no litoral e nas Estradas de Ferro Vitória x Minas Gerais e Carajás.

Outra diferença importante observada no impacto devido a altas temperaturas foi a variação na ameaça climática ao longo dos cenários e a participação dos trechos com alto e muito alto risco desde o período base até o SSP5 (2046-2065). No período base, esses trechos representam, respectivamente, 32% e 8% da malha ferroviária; já no cenário pessimista de médio prazo, estes percentuais chegam a 37% e 15% respectivamente. Esse avanço acontece especialmente nas ferrovias do Centro-Oeste e do Oeste Paulista, onde observa-se, ao longo da evolução dos mapas, o incremento da ameaça climática do centro do Brasil em direção ao litoral.

Ainda na análise de altas temperaturas, as áreas com risco climático médio são dispersas, e as áreas de alto e muito alto risco se distribuem nas regiões mais interioranas, apresentando um gradiente que decresce no sentido do litoral (do Centro-Oeste para o litoral). A partir da análise foi possível notar um aumento nos trechos com alto grau de **ameaça climática** de 8% para 15% entre o período base e o cenário de altas emissões de médio prazo (SSP5 2046-2065). Mesmo sendo um percentual relativamente baixo, esse resultado traz à luz novos trechos ferroviários que estão sob alto grau de ameaça climática a altas temperaturas.

Em relação à **exposição da infraestrutura**, cujo principal indicador é o peso da carga, observa-se que apenas quatro estradas de ferro foram consideradas com exposição muito alta da infraestrutura, são elas:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas Gerais x Rio, operada pela MRS Logística);

- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de ferro do litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Tais ferrovias são responsáveis pelo escoamento de minérios para os portos exportadores e apresentam alto tráfego de composições. Desse modo, trata-se de áreas de importância estratégica para a economia brasileira.

O componente **vulnerabilidade** é composto por dois subíndices, a sensibilidade biofísica e a sensibilidade da infraestrutura. O subíndice de **sensibilidade biofísica** foi calculado a partir de bases específicas para os impactos devido ao deslizamento e à erosão, exceto para altas temperaturas, que, por se tratar de um impacto direto na infraestrutura, não considerou esse subíndice em seus cálculos. Já a **sensibilidade da infraestrutura** se mantém a mesma para todos os cenários. Logo, tem-se em parte uma sobreposição de tais áreas, mas também algumas áreas/*hotspots* específicos. Assim, observam-se áreas comuns de alta vulnerabilidade:

- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale SA); e
- Trecho final da Ferrovia Minas Gerais - Santos.

Apesar desta confluência observada para o impacto intermediário de erosão, a Estrada de Ferro Vitória a Minas passa para muito alto risco climático, e a Estrada de Ferro Carajás entra no rol das áreas de alta vulnerabilidade. Já para o deslizamento, as áreas de alto e muito alto risco são distribuídas nas regiões Sul e Sudeste, em especial em áreas de relevo acidentado, acompanhando a Serra Geral no Sul do Brasil e a Serra do Mar. Outro ponto relevante na análise é que, para o impacto devido à erosão, não existem pontos de baixa vulnerabilidade, mostrando que essa é uma questão que está além das regionalidades; já o deslizamento, apresenta áreas de muito alto e baixo risco.

No levantamento e mapeamento de vulnerabilidades e riscos climáticos é importante validar os resultados (de SHREBININ *et al.*, 2019). No entanto, não foi possível realizar a validação no âmbito do projeto AdaptaVias devido à falta de dados de registros de impactos nas rodovias e ferrovias. Futuramente uma validação dos resultados pode ser realizada comparando os IRC do período base com os registros de impacto das concessionárias, DNIT e outros.

Diante do apresentado, sugere-se que estudos futuros sobre o risco climático das ferrovias brasileiras sejam desenvolvidos, com análises específicas de risco climático sobre as ferrovias que ainda encontram-se em fase de planejamento (ou seja, não construídas) e que a análise de risco climático se dê de forma mais específica para determinados *hotspots*, que seriam aquelas áreas de ferrovias que nesse estudo foram identificadas, já no período base, com risco alto ou muito alto, ou cujo risco aumente considerando-se os diferentes cenários e horizontes temporais. Ao focar em ferrovias específicas, futuros estudos podem incluir bases mais robustas sobre a infraestrutura existente, permitindo uma análise mais aprofundada dos riscos.

5. Modo Rodoviário

O modo de transporte rodoviário é o responsável pela maior movimentação de cargas no Brasil (MInfra, 2021). Para avaliar o risco climático da infraestrutura rodoviária foram considerados os **cinco impactos** da mudança do clima mencionados anteriormente. Para cada um dos impactos intermediários, foram elaborados Índices de Risco Climático considerando-se **três cenários**: (a) período base (1981-2000); (b) cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5); e (c) cenário emissões altas (SSP5-8.5). Cada cenário, com exceção do período base, foi calculado para **dois horizontes temporais**: (i) curto prazo (2026-2045) e (ii) médio prazo (2046-2065).

Para compreender os mapas dos IRC (Nível 1), é necessário observar os mapas relacionados à ameaça climática, à exposição e à vulnerabilidade da rede rodoviária federal (Nível 2 da estrutura hierárquica), já que o risco é o resultado da combinação destes componentes. O componente de vulnerabilidade foi calculado apenas com informações sobre sensibilidade (Nível 3), uma vez que os dados disponíveis para capacidade adaptativa não puderam ser incorporados na análise - não atendiam aos critérios de abrangência e formato.

A exposição é principalmente a presença de elementos (infraestrutura, sistemas etc.) em lugares que podem ser adversamente afetados por impactos da mudança do clima. Além da localização geográfica, a exposição também pode considerar a importância dos elementos expostos. No caso da infraestrutura rodoviária, os indicadores utilizados para exposição foram: o volume médio diário anual (VMDA) e o trecho rodoviário. A heterogeneidade do VMDA na malha analisada e alta concentração de veículos em trechos específicos ficou representada nos mapas de exposição. A metodologia adotada priorizou utilizar o máximo de dados existentes, cabendo em estudos futuros adicionar novos indicadores para compor a exposição de forma que o resultado representa ainda melhor a exposição na malha rodoviária brasileira.

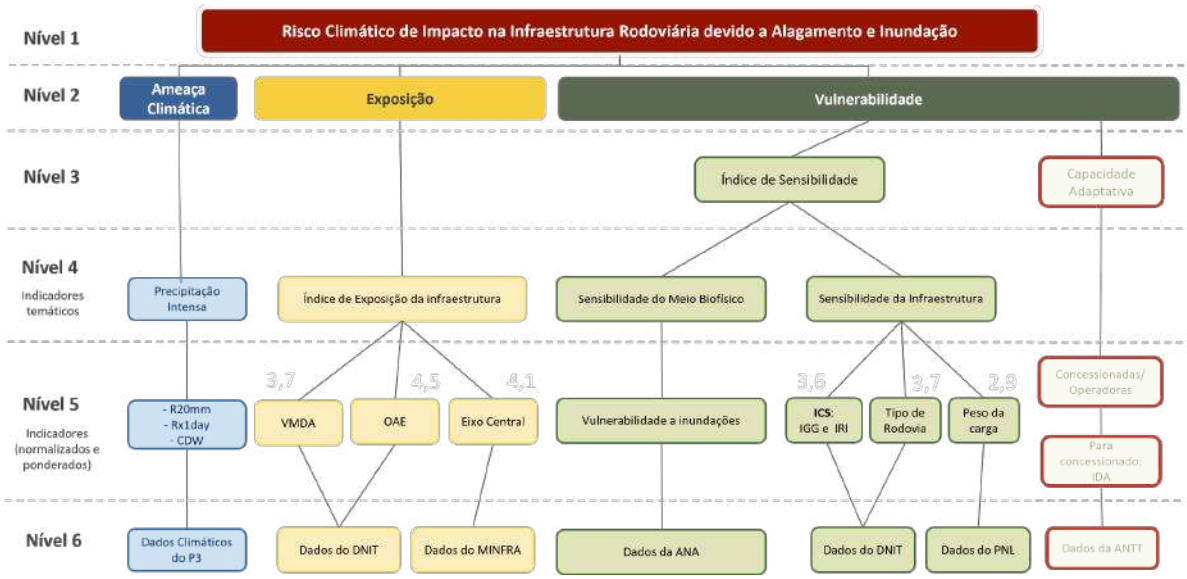
Outra observação relevante é em relação às diferenças entre os segmentos apresentados nos mapas de índice de risco climático, ameaças climáticas, exposição e vulnerabilidade. A ameaça consegue compreender áreas em que não foi possível obter os dados de vulnerabilidade e exposição, e por conseguinte, gerar os resultados de índice de risco climático. Desse modo, ficou decidido manter a ameaça mais ampla para não perder essa perspectiva nacional. Faz-se necessário salientar que diferenças nos valores totais e parciais de extensão dos trechos rodoviários podem e devem ocorrer. Isso é devido ao processo topológico de conversão de polígono (área) para linha. Essa transformação pode acarretar pequenas diferenças (alguns metros por trecho), os quais, uma vez somados, resultam em extensões de quilômetros de diferença. Ainda assim, tais diferenças são irrelevantes quando contextualizadas em um cenário nacional.

A seguir são apresentados os principais resultados, por impacto intermediário, obtidos para a infraestrutura rodoviária nacional. Para cada mapa de risco climático, são apresentados os mapas dos seus componentes. Por fim, é feita uma análise comparativa dos riscos climáticos por cenários e horizontes.

5.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de alagamento/inundação

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de alagamento/inundação foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e dos subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 28.

Figura 28 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 28, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou superior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico:

- Mapa de vulnerabilidade a inundações da Agência Nacional de Águas (ANA); e
- Sensibilidade da infraestrutura, calculada a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL).

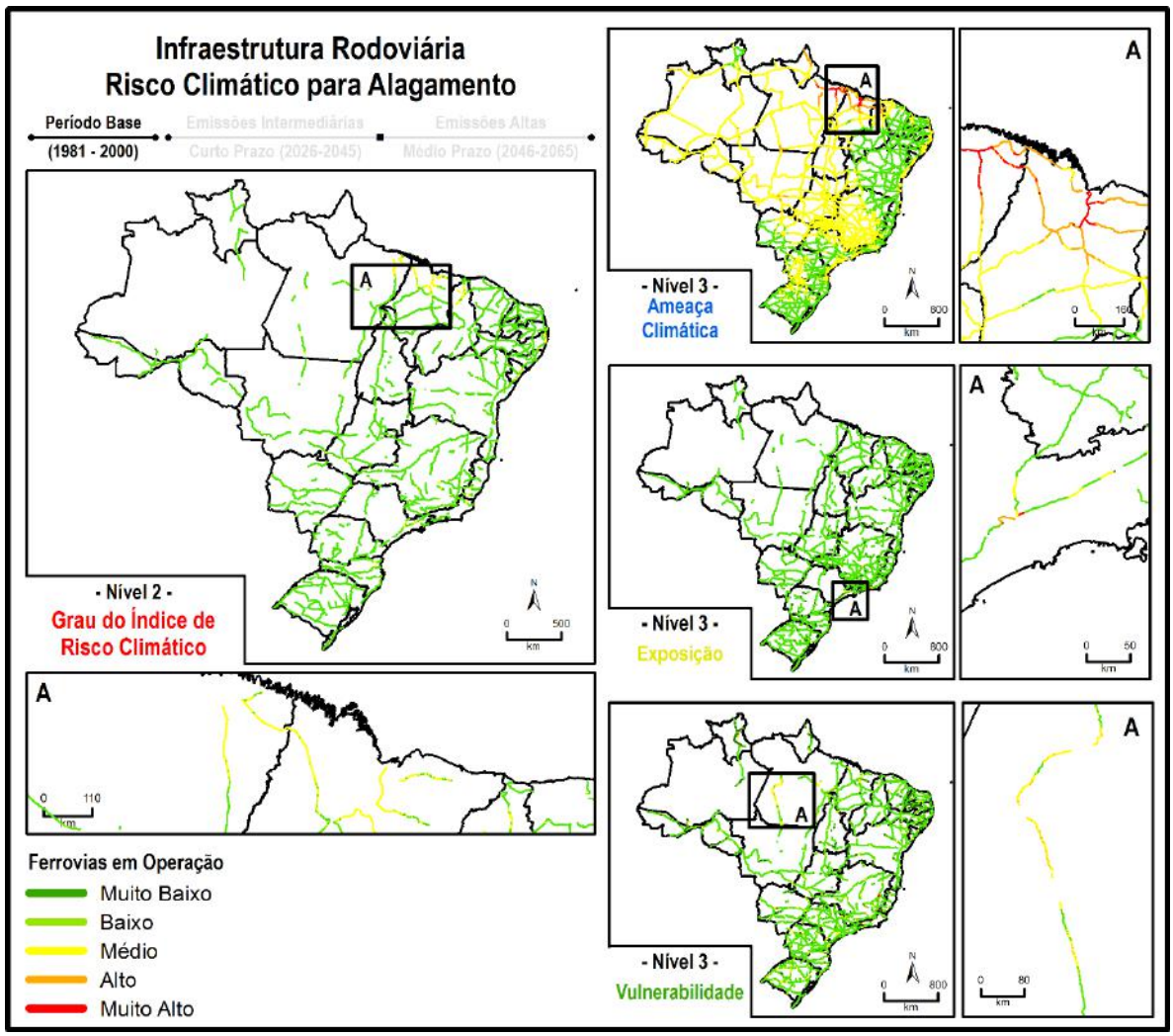
A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final (5.1.4) consolidando a análise de risco devido ao impacto de alagamento/inundação.

5.1.1 Período base | Impacto devido a alagamento/inundação

Quanto ao **Índice de Risco Climático** de impacto devido a alagamento/inundação (Nível 1), para o período base, composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade, verifica-se que os trechos com maior grau de risco climático são trechos de rodovias no Pará e Maranhão, além de alguns trechos de rodovias nos Estados do Nordeste, em especial perto do litoral (BR-101). As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau alto ou muito alto de risco climático de impacto devido a alagamentos/inundação (Figura 29).

A Figura 29 apresenta também os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2).

Figura 29 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias nos Estados do Pará e Maranhão se encontram com grau alto e muito alto de **ameaça climática**. Além destes, destacam-se muitos trechos com ameaças médias em quase toda a região

Norte e Centro-Oeste, bem como, em Minas Gerais, além de trechos no litoral do Nordeste, no interior da região Sul e em São Paulo.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a alagamento e inundação, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, a única rodovia com grau de ameaça climática médio e alto é a BR-163, que obteve baixo valor do ICS atestado nestes trechos rodoviários. Todas as demais rodovias têm grau baixo ou muito baixo.

A única rodovia com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** é a Rodovia Presidente Dutra (BR-116), em função do elevado volume de veículos que transitam por ela diariamente. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

Os mapas de vulnerabilidade e de exposição, para cada impacto analisado, se manterão os mesmos observados para o período base, repetindo-se em todos os cenários (emissões intermediárias e altas) e horizontes temporais considerados (curto prazo e médio prazo), já que a vulnerabilidade é determinada pela sensibilidade do meio físico e a sensibilidade da infraestrutura, e a exposição relaciona-se principalmente com VMDA de veículos que trafegam na rodovia. Neste estudo, não foram feitas modelagem acerca das possíveis variações de infraestrutura e/ou fluxo de veículos. Assim, não serão analisados e discutidos nas análises dos cenários/ horizontes temporais, sendo apresentados apenas para os períodos-base, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor, sendo que em anexo são apresentados os mapas completos.

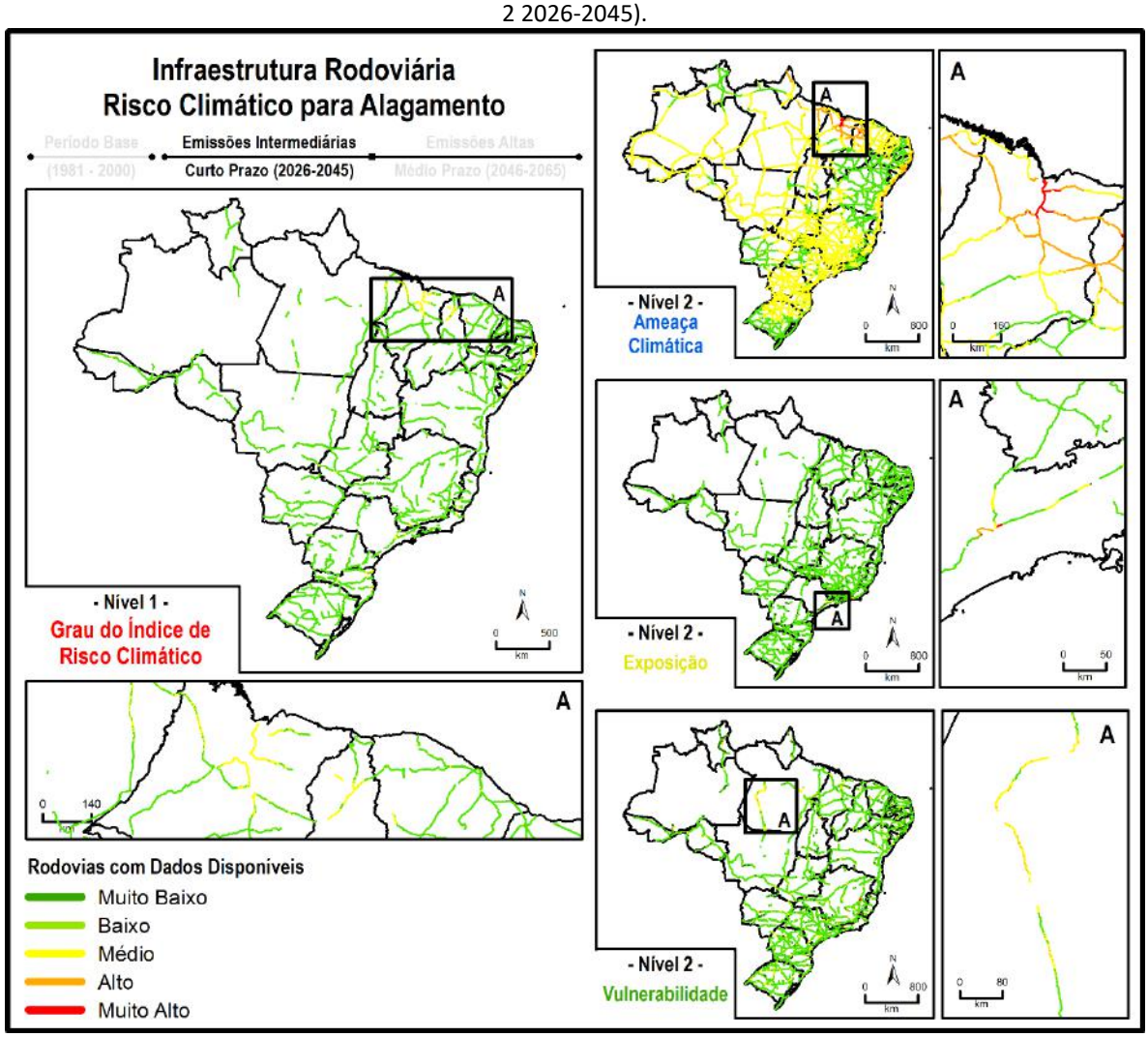
5.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de alagamento e inundação, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

5.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 30 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 30- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



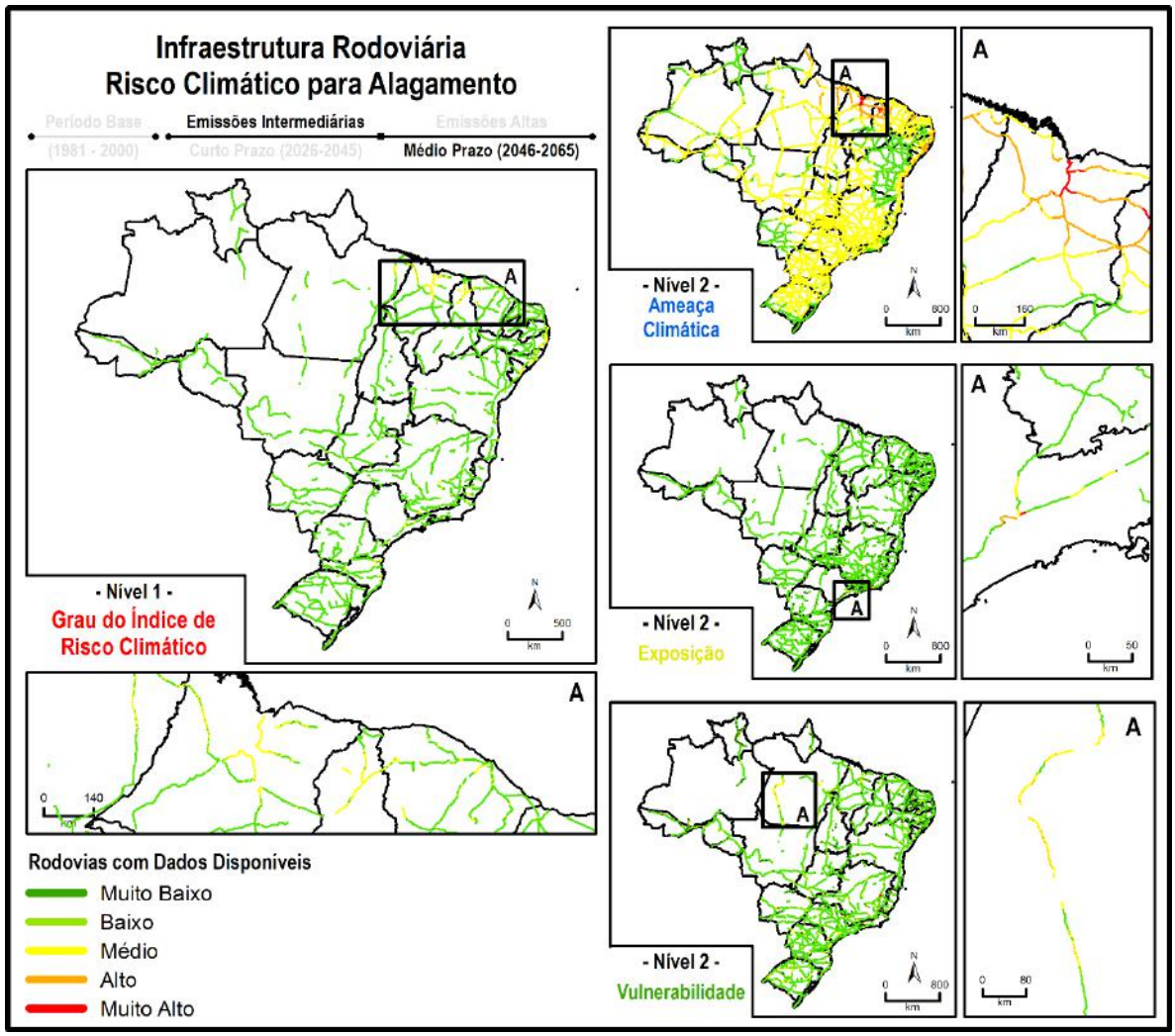
Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se praticamente o mesmo resultado do período base: todas as rodovias têm grau de IRC muito baixo ou baixo, com exceção de alguns trechos no Pará e no Maranhão, além de partes de rodovias no litoral do Nordeste, as quais têm grau de risco climático médio. A única diferença em relação ao período base são alguns trechos de rodovias no Piauí e nas regiões Sul e Sudeste, que passaram para o grau médio de risco climático. Cabe ainda ressaltar que quando se realiza uma análise em relação à ameaça climática nota-se que houve um aumento de regiões que passam de grau baixo, no período base, para médio, no SSP2-4.5 de curto prazo, com destaque para os estados de São Paulo e Paraná.

5.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 31.

Figura 31- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O mapa mostra praticamente o mesmo resultado do horizonte temporal de curto prazo: alguns trechos no Pará, Maranhão e Piauí, além de trechos pontuais nas regiões Sul e Sudeste, têm grau de risco climático médio, enquanto as demais rodovias têm risco baixo e muito baixo de sofrer impactos devido a alagamentos e inundações no futuro, considerando-se o cenário de emissões intermediário. Destaca-se ainda que, em relação às ameaças climáticas, identifica-se um maior acréscimo de áreas com grau médio no SSP2-4.5 de médio prazo em relação ao SSP2-4.5 de curto prazo, com destaque para as rodovias dos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul.

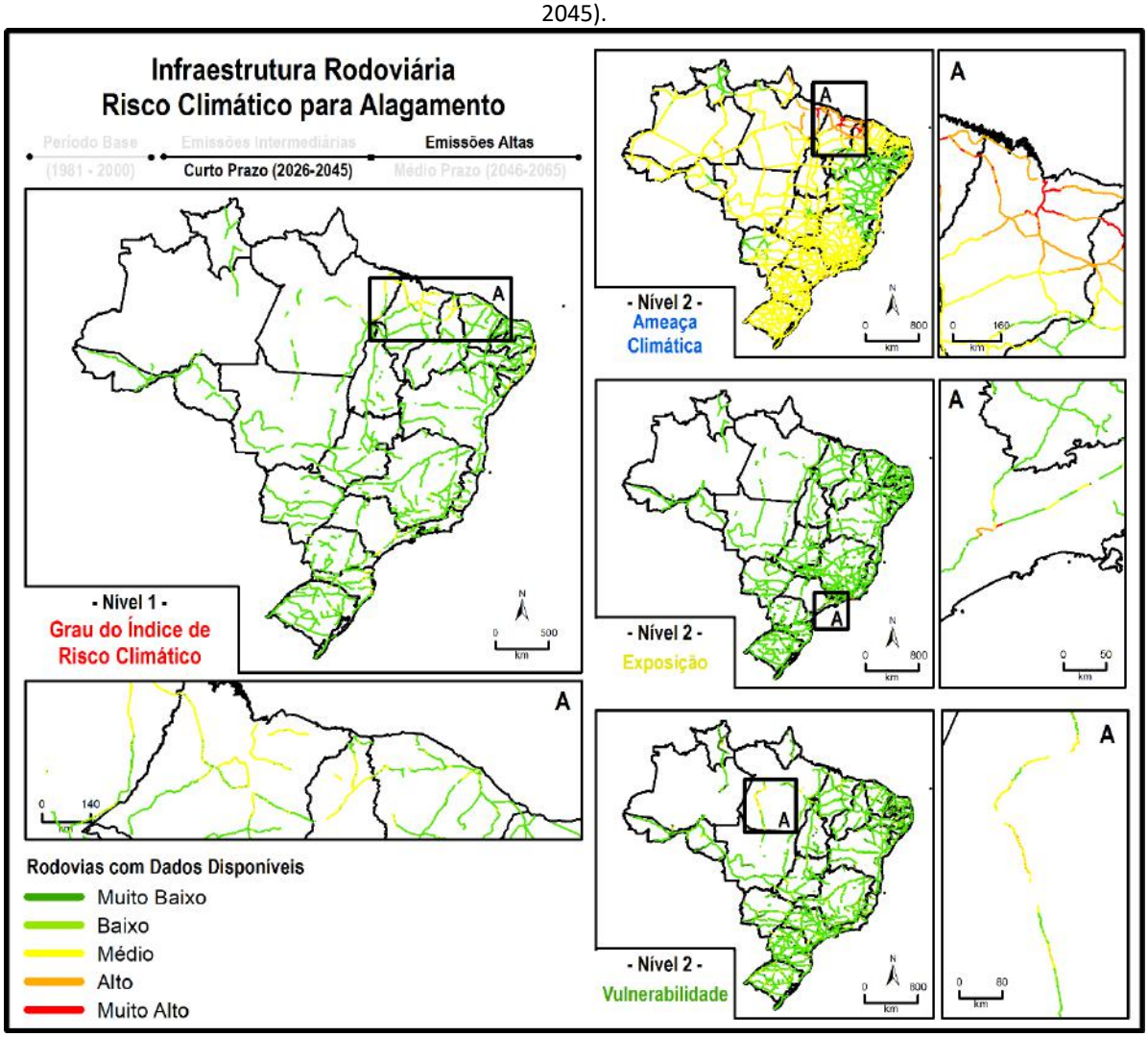
5.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

São apresentados a seguir os resultados do IRC devido ao impacto de alagamento e inundação para o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 32 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 32- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



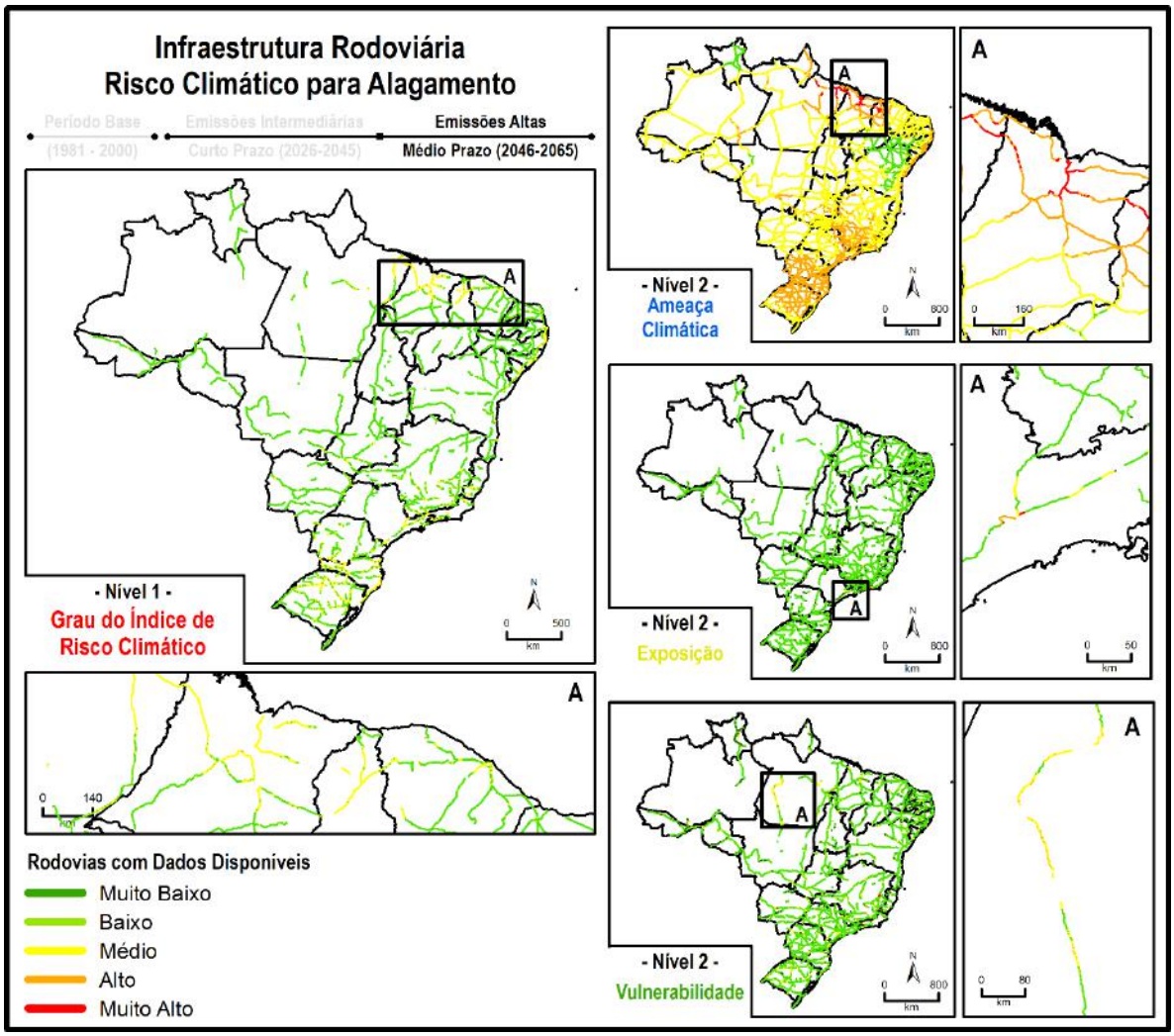
Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se resultados semelhantes aos obtidos para o cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de médio prazo: alguns trechos no Pará, Maranhão e Piauí, além de trechos pontuais nas regiões Sul e Sudeste, têm grau de risco climático médio, e as demais rodovias têm risco baixo e muito baixo de sofrer impactos devido a alagamentos e inundações no futuro, considerando-se o cenário de emissões altas e curto prazo. Isso advém do aumento de trechos rodoviários com grau médio neste cenário em relação ao período base com destaque para os estados das regiões Sul, Centro-Oeste e Sudeste.

5.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 33 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 33- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Além dos trechos com grau médio de risco climático observado no horizonte temporal de curto prazo, nota-se a tendência de aumento do grau de risco para o nível médio em várias rodovias nas regiões Sul e Sudeste do país. Em relação ao SSP5 de curto prazo, nota-se que o mapa de ameaça climática do SSP5 de médio prazo apresenta uma grande quantidade de trechos com grau alto de risco de impacto, com destaque para os estados da Região Sul e Sudeste e o litoral do Nordeste.

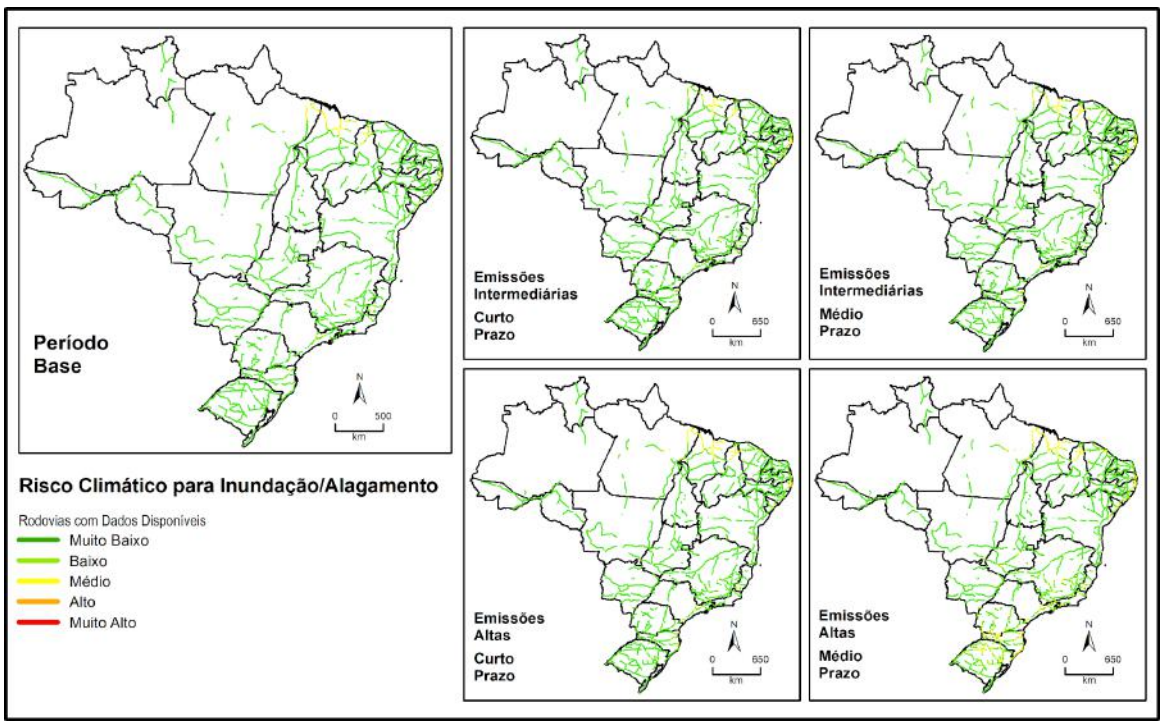
5.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a alagamento/inundação

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de alagamento e inundação em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo estão nas partes litorâneas dos estados Maranhão, Piauí, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Nos cenários de emissões altas, ainda aparecem rodovias em estados do Sul e Sudeste, como Rio de Janeiro, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, mas, no entanto, em nenhum cenário, atingiram o grau alto do risco climático.

Estas rodovias se destacam porque apresentam os maiores graus de ameaça climática, e a exposição e vulnerabilidade não variam muito entre as rodovias. Como os componentes vulnerabilidade e exposição foram mantidos ao longo da análise, o fator de variação do risco climático de impacto devido a alagamentos/inundação por cenário e horizonte temporal é a ameaça climática.

Conforme pode ser observado na Figura 34, que sintetiza o risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação sobre a infraestrutura federal de transporte rodoviário brasileira, o cenário de emissões intermediárias não apresenta variações significativas entre os horizontes temporais decorrentes do componente da ameaça climática. Porém, no cenário de emissões altas, nota-se um aumento do número de rodovias com grau de risco climático médio, em especial nas regiões Sul e Sudeste.

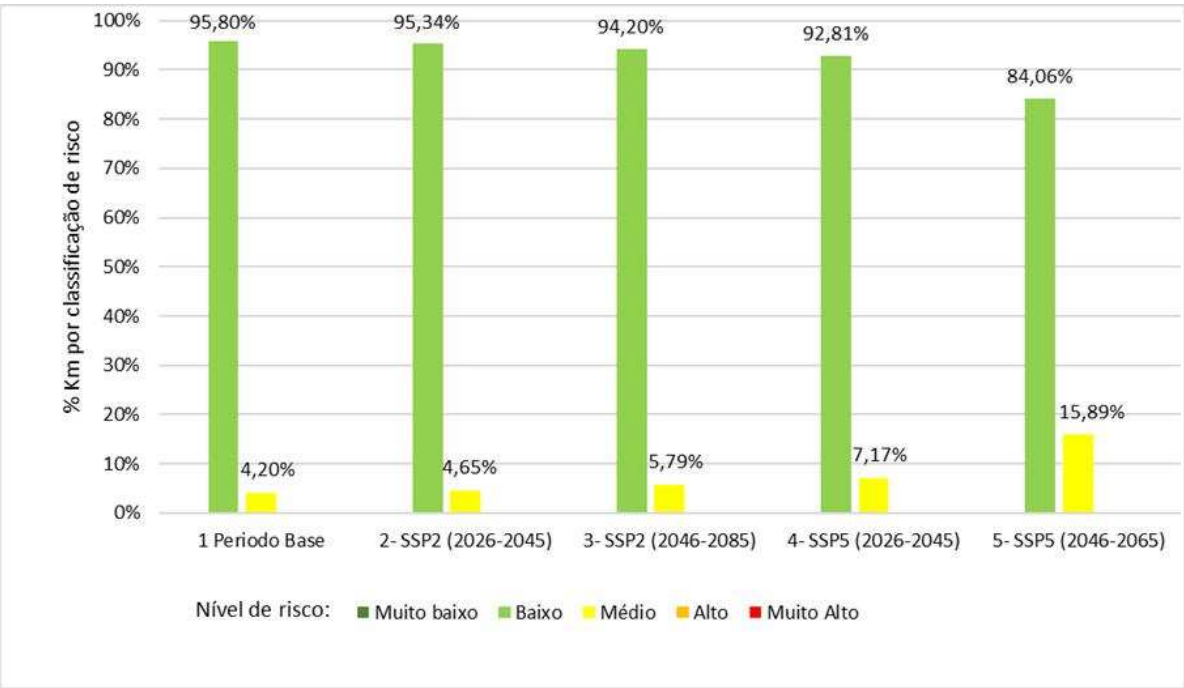
Figura 34 - Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e os horizontes temporais, é apresentado, na Figura 35, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 35 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

No cenário de emissões altas (SSP5), 84,06% da infraestrutura rodoviária brasileira analisada se mantêm em grau baixo; contudo, observa-se uma tendência de aumento dos trechos com grau médio, em especial no cenário de emissões altas no horizonte temporal de médio prazo.

A Tabela 8 apresenta o percentual dos trechos rodoviários, por grau de **ameaça climática,** para impactos devido a alagamento/ inundação em cada um dos cenários analisados e o período base.

Tabela 8 - Quilometragem (em %) de rodovias, por graus de ameaças climáticas, para cada um dos cenários analisados para alagamento/inundação.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,01%	40,57%	55,92%	2,84%	0,65%
SSP-2 (2026-2045)	0,03%	29,48%	66,25%	3,97%	0,28%
SSP-2 (2046-2065)	0,02%	21,46%	73,35%	4,78%	0,39%
SSP-5 (2026-2045)	0,00%	17,83%	76,46%	4,83%	0,87%
SSP-5 (2046-2065)	0,01%	7,60%	61,75%	29,50%	1,14%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Tabela 8, verifica-se que, no **período base**, predominam trechos com ameaça climática baixa (40,57%) e média (55,92%), sendo os trechos sob muito baixa ameaça praticamente

imperceptíveis (0,01%), e os trechos rodoviários com ameaça alta e muito alta, somados, equivalentes a 3,49%. Ao se modificar o cenário - **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) -, no horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)**, ocorre um ligeiro aumento de trechos sob alta ou muito alta ameaça para alagamento/inundação - de 4,25%, bem como, um aumento de 10,33% em comparação ao período base de áreas sob ameaça média, atingindo o valor de 66,25%, e um aumento discreto de trechos sob ameaça muito baixa (0,03%), sendo este último pouco representativo no panorama nacional. Há, por sua vez, uma redução de 11,09% de trechos sob ameaça climática baixa para alagamento/ inundação.

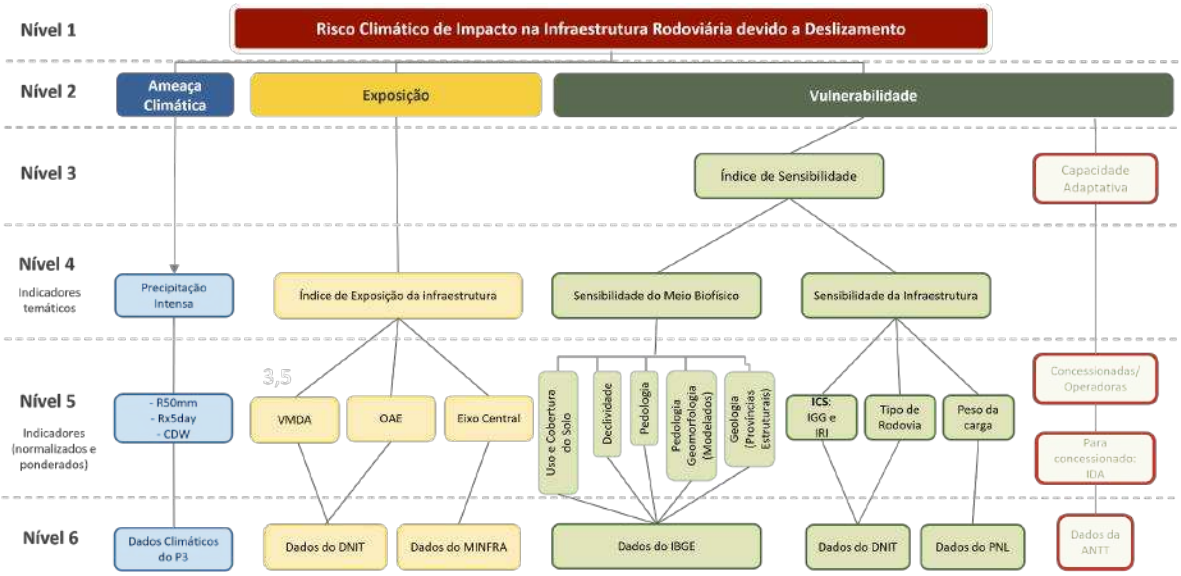
No cenário de emissões intermediárias (SSP-2), a **longo prazo (2046-2065)**, os trechos sob ameaça climática muito baixa permanecem praticamente desprezíveis (0,02%), e se observa, tal como no horizonte temporal de curto prazo, redução de trechos sob ameaça climática baixa (atingindo 21,46%), com um aumento dos trechos sob ameaça climática média (73,35%), alta (4,78%) e muito alta (0,39%).

No **cenário de emissões altas (SSP-5), a curto prazo (2046-2065),** não são encontrados trechos sob ameaça climática muito baixa, e permanece o padrão verificado no cenário SSP-2 (2016-2065): redução de trechos de rodovias sob baixa ameaça a alagamentos/ inundações (atingindo 17,83%) e aumento de trechos sob ameaça média (76,46%, maior percentual atingido para esse grau de ameaça) ou alta/muito alta (que, somadas, correspondem a 5,7% da infraestrutura rodoviária federal). A longo prazo, tornam a surgir, ainda sem relevância, trechos sob ameaça muito baixa (0,01%), permanecendo o padrão de redução de trechos sob ameaça baixa (atingindo 7,60%). Mas, diferentemente do que ocorre nos cenários anteriormente analisados, verifica-se neste cenário e horizonte temporal médio (2046-2065) uma redução de trechos sob ameaça média (61,75%), com um aumento acentuado do percentual de trechos rodoviários sob alto grau de ameaça, que atinge 29,50%, e muito alta, de 1,14%, sendo esse o cenário e período temporal onde a ameaça climática devido ao impacto de alagamentos/ inundações será mais crítico.

5.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de deslizamento foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 36.

Figura 36 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 36, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R50mm: número de dias com chuva igual ou maior a 50 mm;
- Rx5day: chuva máxima acumulada em 5 (cinco) dias; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

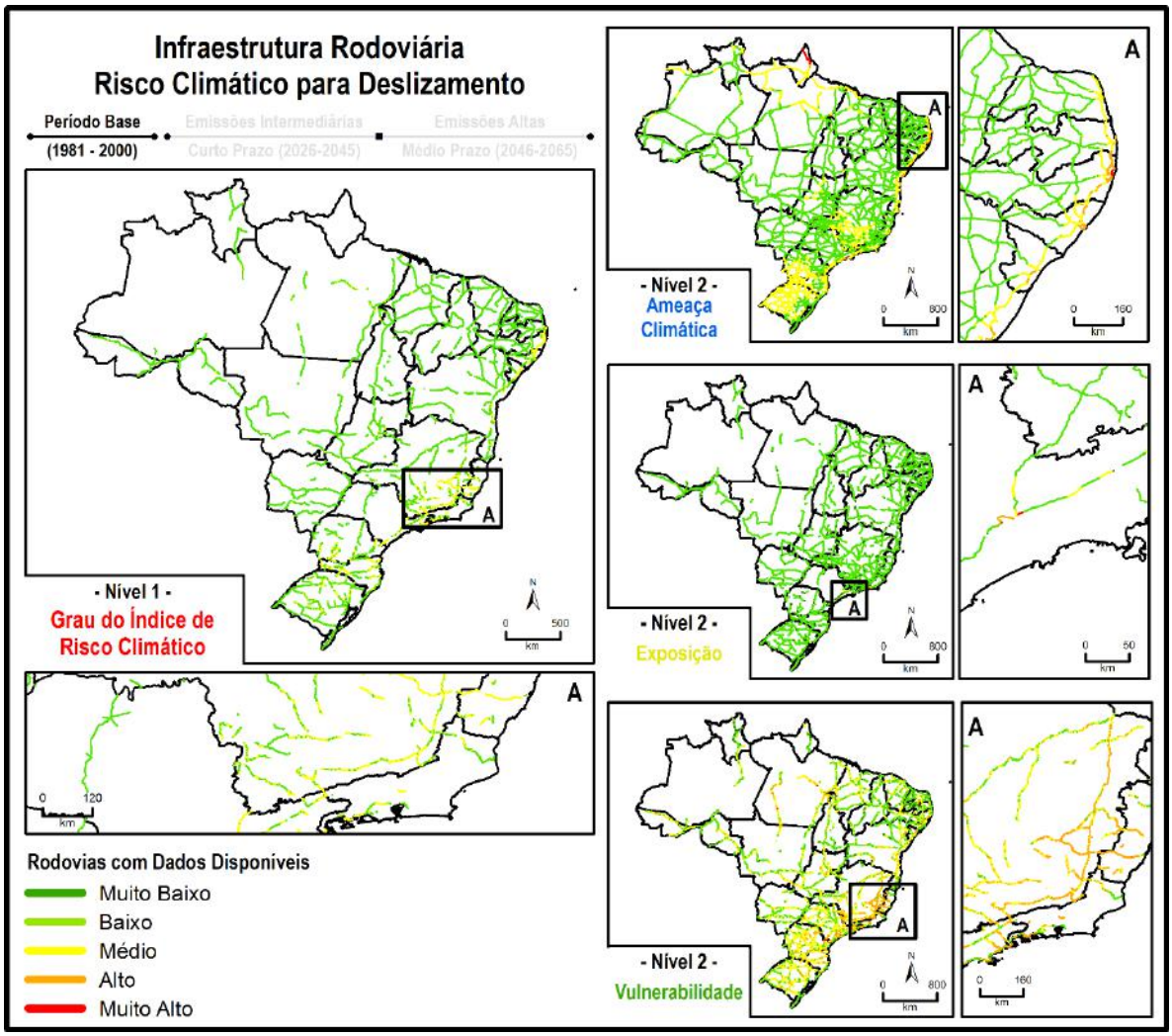
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador temático calculado a partir de mapa de uso e cobertura do solo, mapa de declividade, mapa de pedologia, mapa de pedologia e geomorfologia modelados, e mapa de geologia – estruturas geológicas (dados do IBGE).
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador temático calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de deslizamento.

5.2.1 Período base | Impacto devido ao deslizamento

A Figura 37 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido ao deslizamento (Nível 1), para o período base.

Figura 37 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático** - composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade - para deslizamento é muito influenciado pelo relevo acidentado, sendo os trechos rodoviários com grau médio de risco climático os localizados no Sudeste, especialmente na Serra do Mar, na Serra Geral (em Santa Catarina), no litoral de Pernambuco e Alagoas. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau alto ou muito alto de risco climático de impacto devido a deslizamento (Figura 37).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias no Estados do Amapá e litoral do Nordeste se encontram com alto e muito alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos com ameaças médias em quase todo o

norte do Pará e sul de Minas Gerais, assim como a região da Serra do Mar, além de trechos no litoral do Nordeste e São Paulo e na região Sul, principalmente no interior.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** ao deslizamento, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos rodoviários com grau médio e alto concentram-se na região Sudeste e Sul. Todas as demais rodovias têm grau médio ou baixo, com pequenos trechos com grau alto ou muito alto, principalmente no norte do estado do Paraná e do Pará.

As únicas rodovias que apresentam trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** são a BR-116 e a BR-381, localizadas em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

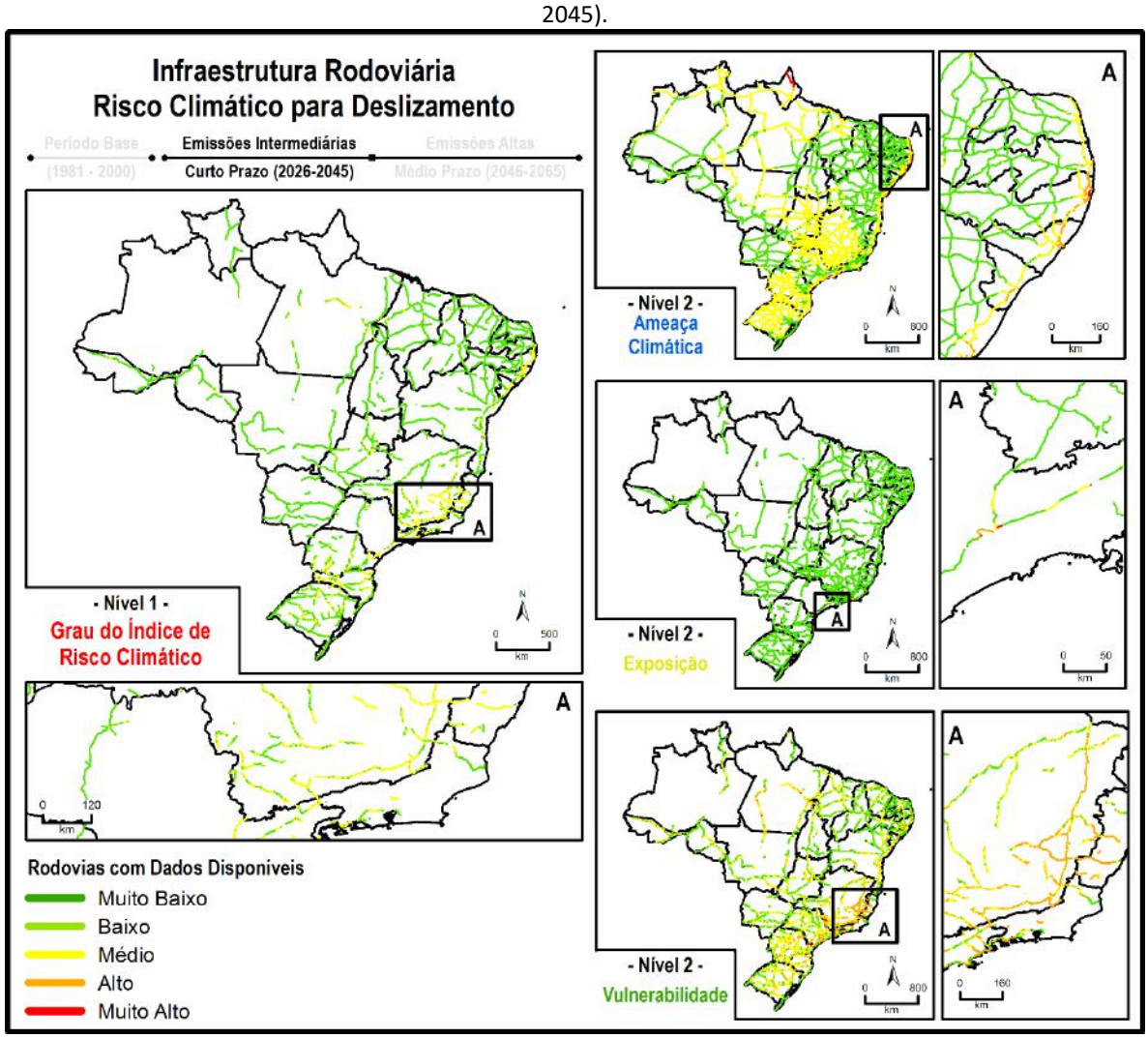
5.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de deslizamento, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

5.2.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 38 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 38 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



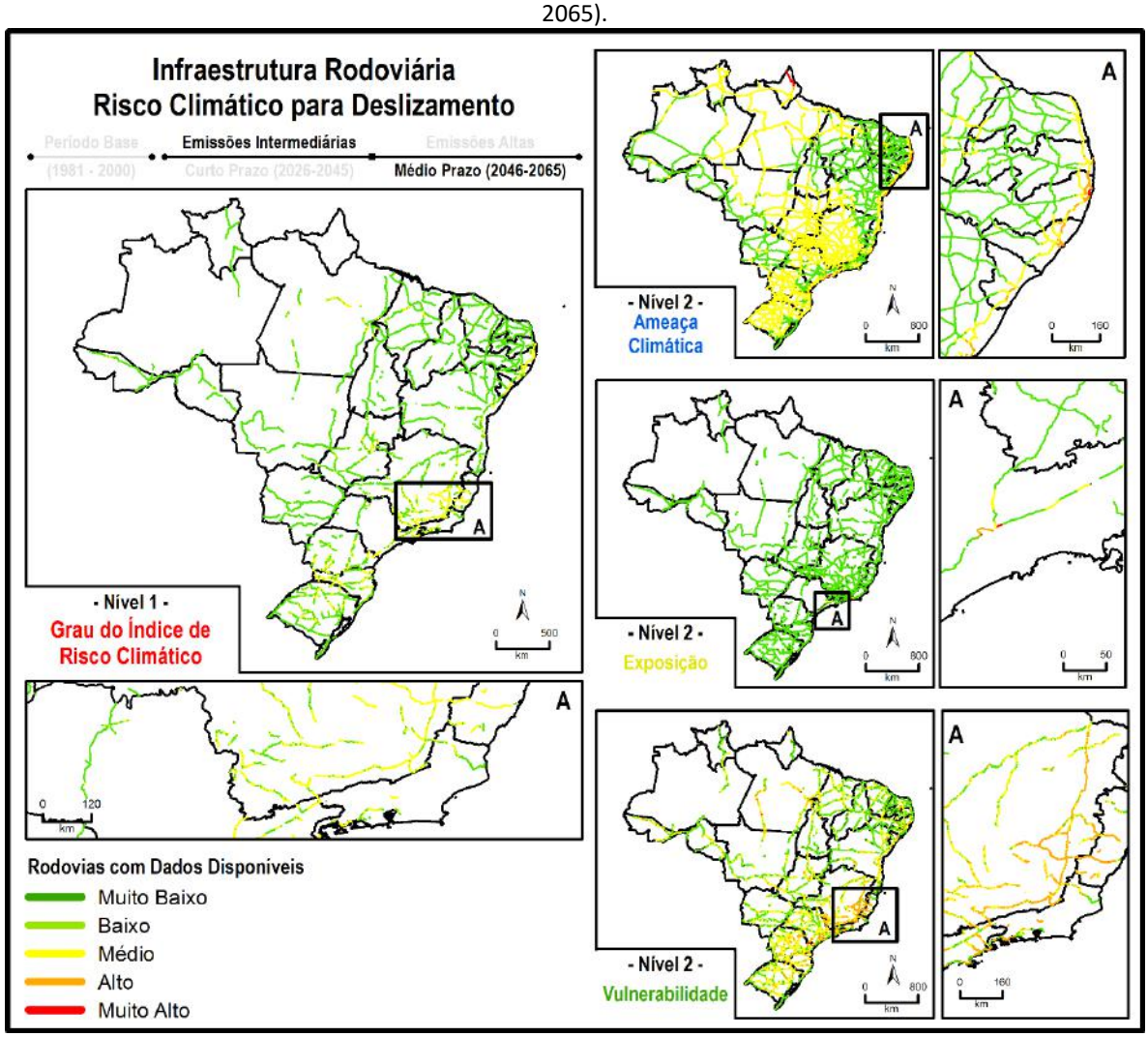
Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos de rodovias com IRC que se destacam na Figura 38 estão concentrados na Região Sudeste e em algumas rodovias na região Sul que apresentam risco médio, principalmente pelo relevo acidentado da região devido a presença da Serra do Mar e Serra Geral, respectivamente. Essas serras são cadeias de montanhas com pontos que estão acima de 1.500 metros de altitude. O litoral do Nordeste também chama a atenção, com a concentração de risco médio no litoral, mais especificamente na BR-101. Quanto ao mapa de ameaça climática, identifica-se que há um aumento de trechos com grau médio, em relação ao período base, com destaque para as rodovias dos estados da Região Sul, Sudeste e Centro- Oeste.

5.2.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1) em trechos rodoviários, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os maiores graus de risco climático devido ao impacto do deslizamento estão concentrados na Região Sudeste, Sul e no litoral do nordeste, principalmente na BR-101, com o IRC predominantemente médio, e alguns trechos de IRC alto nessas regiões. Percebem-se poucas mudanças do período curto para médio prazo, conforme apresentado na Figura 39. Isso advém do fato de que os mapas de ameaça climática dos períodos de curto e médio prazos do SSP2 são praticamente iguais, não havendo grande variação nos graus dos trechos das rodovias.

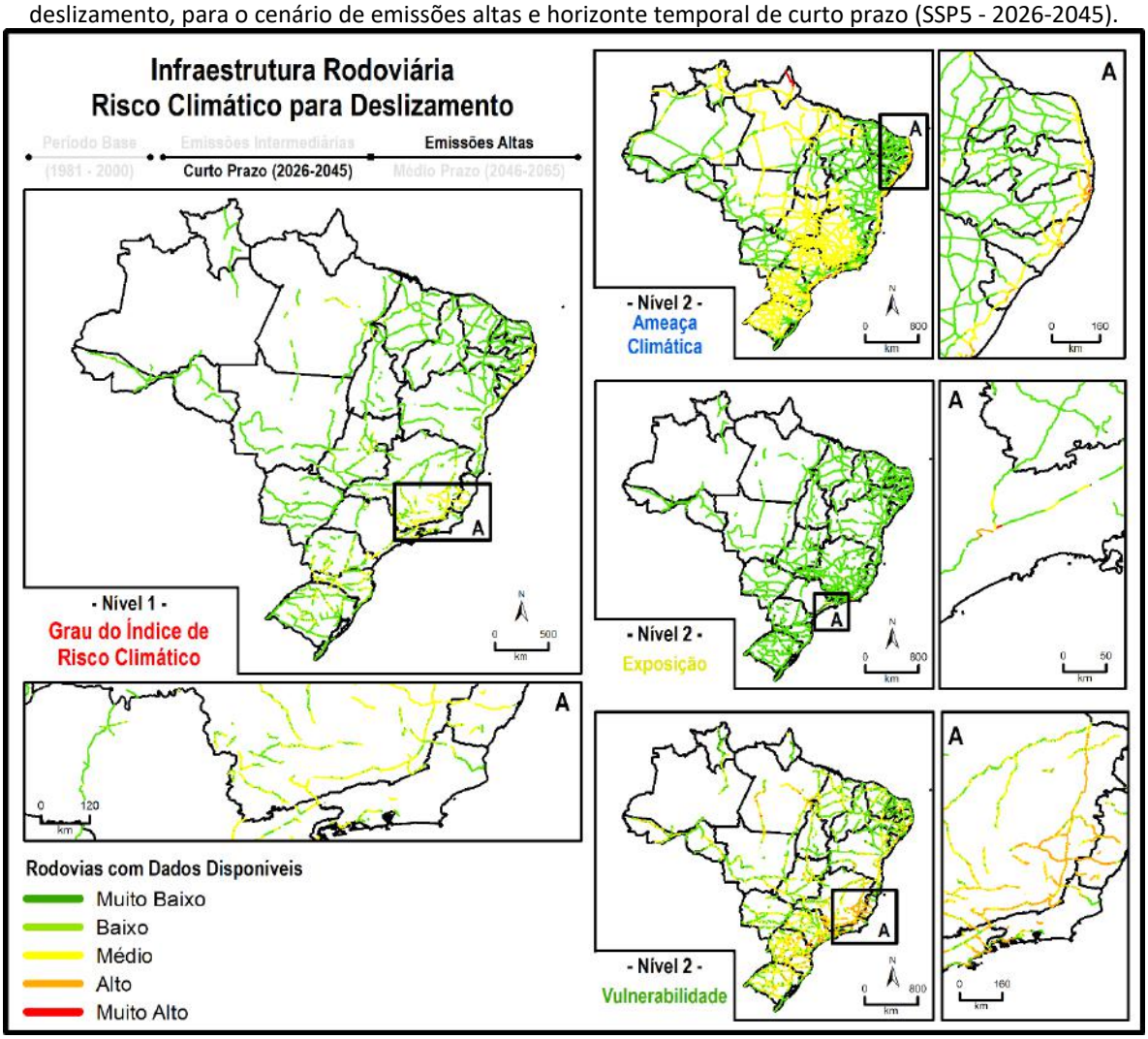
5.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de deslizamento para a infraestrutura rodoviária brasileira, considerando o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 40 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 40 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

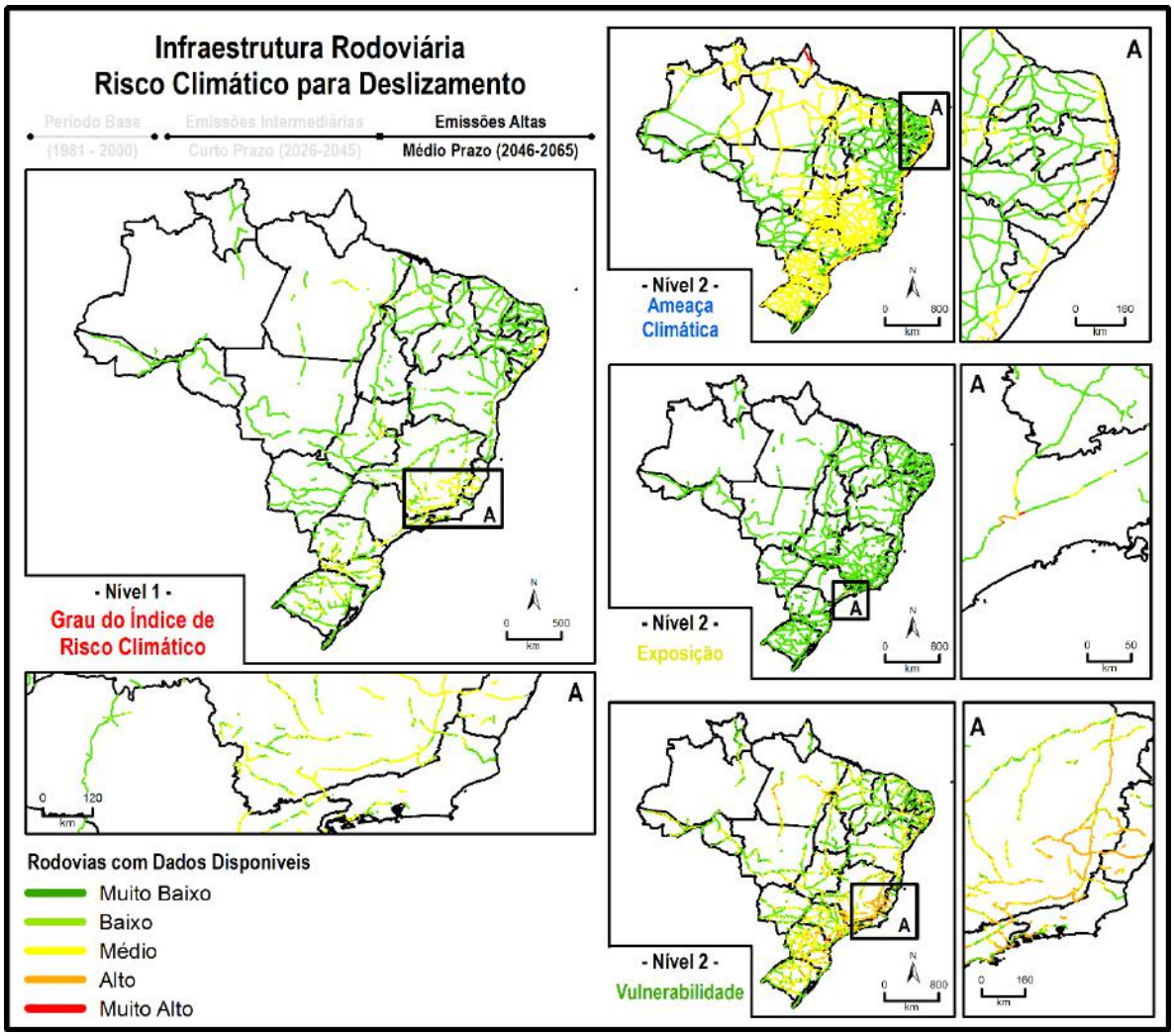
Pela análise da Figura 40, observa-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamento no cenário de emissões altas ao curto prazo também se concentram nas regiões Sudeste, Sul e litoral do Nordeste, principalmente na BR-101. As mudanças entre os cenários anteriores são pouco perceptíveis; contudo, há uma tendência de permanência da ameaça climática de grau médio nas regiões Sul, Sudeste e litoral do Nordeste, além da BR-230, no Pará.

5.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 41 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o

cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5-2046-2065) na infraestrutura de transporte rodoviária brasileira.

Figura 41- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 41, considerando-se o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo, observa-se que alterações do grau de risco climático devido ao impacto de deslizamento não são visíveis entre os horizontes temporais. As regiões Sudeste, Sul e o litoral do Nordeste, principalmente na BR-101, concentram o IRC médio, que equivale ao maior IRC encontrado. Além disso, há uma tendência de permanência da ameaça climática de grau médio nas regiões Sul, Sudeste e litoral do Nordeste, além do Pará.

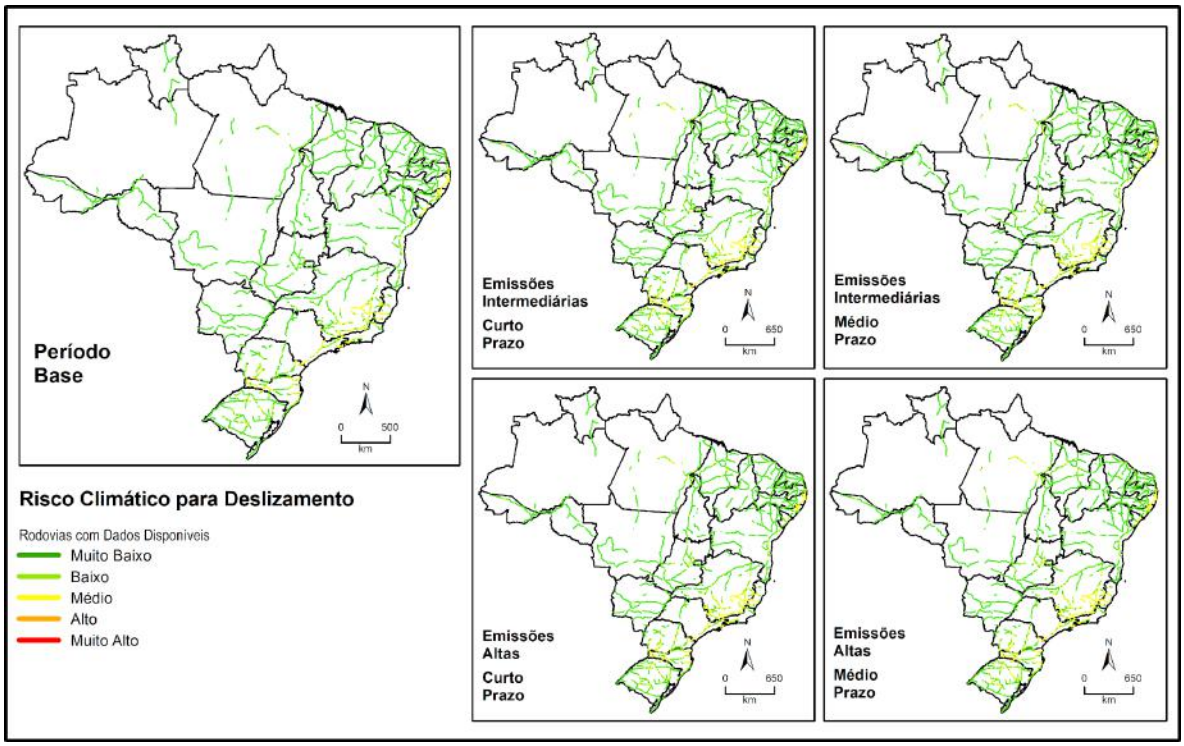
5.2.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamento, em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo, estão nas regiões Sul, Sudeste, litoral do Nordeste, e, no Norte, apenas a BR-230, no Pará.

As regiões Sudeste e Sul se destacam pelos altos graus de sensibilidade do meio biofísico (susceptibilidade a deslizamento), principalmente pela presença da Serra do Mar e Serra Geral (as quais apresentam altas declividades), assim como é nesses locais em que podem ser encontrados graus medianos e altos para erodibilidade e para uso e cobertura do solo profundamente antropizados, o que demonstra a falta da vegetação natural.

Notou-se que tanto o cenário de emissões intermediárias quanto o de emissões altas apresentaram variações pouco visíveis nos mapas decorrentes do componente da ameaça climática, porém é importante ressaltar que há uma propensão de permanência da ameaça climática de grau médio e uma mudança de grau baixo para médio na BR-230 no Pará, conforme pode ser observado na Figura 42, que sintetiza o risco climático devido ao impacto do deslizamento sobre a infraestrutura federal de transporte rodoviário brasileira.

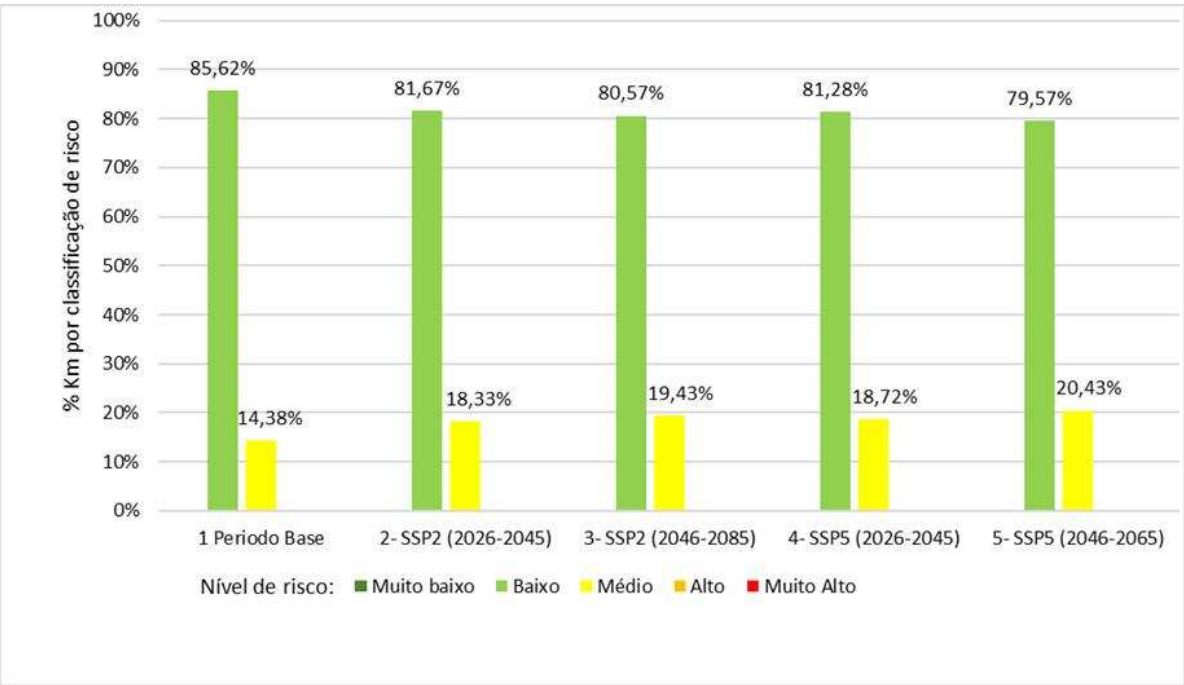
Figura 42- Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de deslizamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentada, na Figura 43, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 43 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 43, para o **período base**, 85,62% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de deslizamento e 14,38% sob risco médio. Os trechos com graus alto, muito alto e muito baixo de ameaça não aparecem nessa visualização devido a escala das barras.

Ainda de acordo com a Figura 43, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045)**, o IRC devido ao impacto de deslizamento é baixo em 81,67% das rodovias, médio em 18,33%. Considerando o mesmo cenário, mas com **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se que 80,57% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto do deslizamento e 19,43% encontram-se sob médio risco. Nesse cenário, a maior diferença em relação ao período base é o aumento da quilometragem de nível médio de risco em 5,05% (de 14,38% para 19,43%) e, por sua vez, as quilometragens de baixo risco sofrem redução de 3,95% (85,62% para 81,67%).

Em um **cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 81,28% das rodovias encontram-se sob risco climático baixo devido ao impacto por deslizamento e 18,72% sob risco médio. Conforme aumenta-se o cenário de emissões, em um mesmo horizonte temporal (curto prazo), ocorre uma redução de 0,39% da quilometragem de rodovias sob baixo risco, enquanto as áreas sob médio risco aumentam na mesma proporção. Considerando-se o **cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065)**, 79,57% da quilometragem de rodovias se encontrará sob risco climático baixo e 20,43% sob risco climático médio de impacto devido ao deslizamento.

De forma geral, observa-se na Figura 43 um padrão de pequena redução das extensões de rodovias sob baixo risco climático ao impacto de deslizamento, e um aumento de tais extensões sob risco médio, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal. Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 9 apresenta o percentual dos

trechos de quilometragem de rodovias por grau de ameaça climática para impactos devido ao deslizamento em cada um dos cenários analisados.

Tabela 9 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas em cada um dos cenários analisados para deslizamento.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,02%	75,36%	23,45%	0,82%	0,35%
SSP2 (2026-2045)	0,02%	48,55%	50,12%	0,95%	0,36%
SSP2 (2046-2065)	0,02%	40,35%	58,35%	0,91%	0,37%
SSP5 (2026-2045)	0,02%	45,08%	53,70%	0,85%	0,35%
SSP5 (2046-2065)	0,02%	39,20%	59,52%	0,91%	0,35%

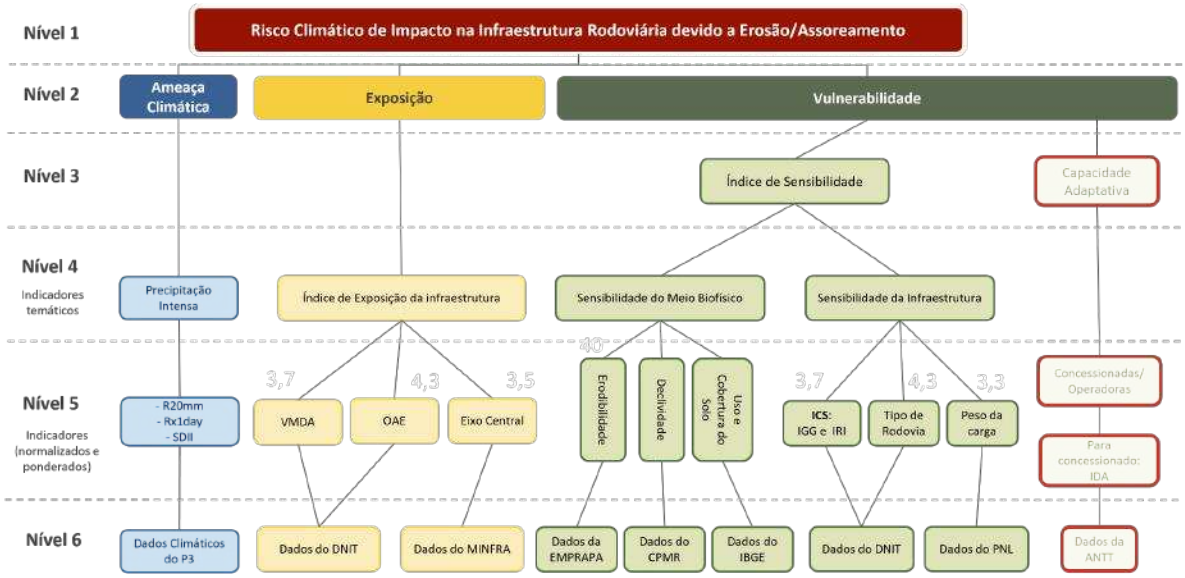
Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o componente de ameaça climática, único que varia entre os cenários de emissões, a quilometragem classificada como baixo risco caiu de 75,36% (período base) para 48,55% (SSP2 – 2026-2045). Mantendo-se o horizonte temporal, mas alterando-se o cenário para SSP5, verifica-se que esse valor cai para 45,08%. Essa redução se dá porque os trechos passam para o grau médio de ameaça climática. Observa-se um aumento no grau médio de ameaça climática de 23,45% (período base) para 50,12% (SSP2 – 2026-2045) e para 53,70 (SSP5 – 2026-2045), e as classes de risco alto e muito alto se mantiveram em menos de 1%.

5.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de erosão/assoreamento foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 44.

Figura 44 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a erosão/assoreamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 44, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou maior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia; e
- SDII - índice de intensidade de precipitação simples: indica intensidade de extremos de chuva.

O subíndice de exposição considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

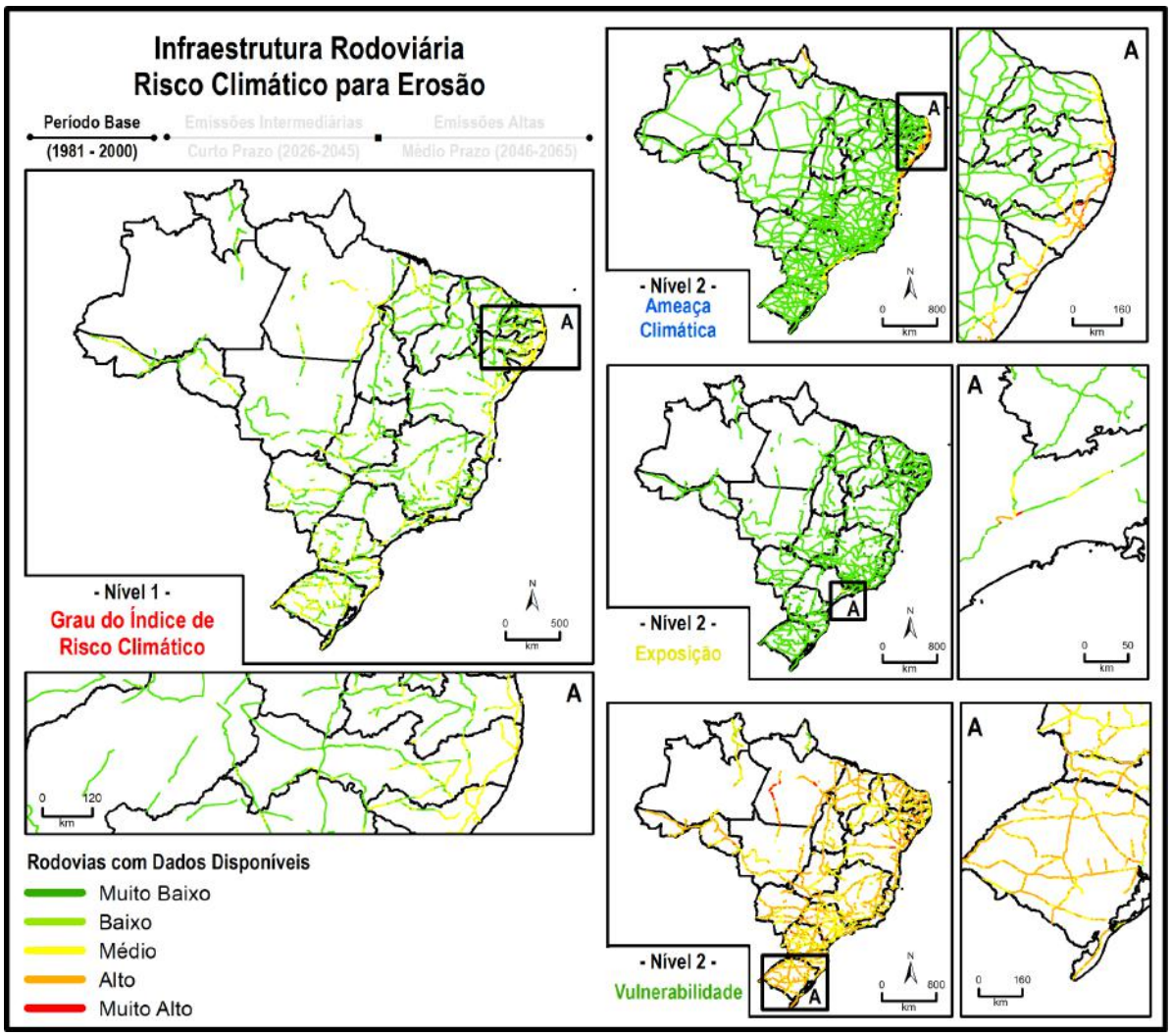
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador calculado a partir do mapa de erodibilidade da EMBRAPA, mapa de declividade do CPRM e mapa de uso e cobertura do solo do IBGE; e
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de erosão/assoreamento.

5.3.1 Período base | Erosão

A Figura 45 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à erosão (Nível 1), para o período base.

Figura 45 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De acordo com a Figura 45, o IRC é maior em trechos de rodovias no Pará, em rodovias localizadas em estados do Sul e em trechos rodoviários dos Estados do Nordeste, em especial no litoral (BR-101). As demais rodovias têm grau de risco climático baixo; não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido à erosão alto ou muito alto.

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias nos Estados de Amapá e no litoral de estados da região Nordeste encontram-se com alto e muito alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos com ameaças médias no litoral de São Paulo, Paraná e Santa Catarina.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** à erosão, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, quase todas as rodovias apresentam grau de ameaça climática médio e alto. A BR-163, no Pará, chama a atenção por acomodar muitos trechos com grau alto e muito alto de vulnerabilidade à erosão. Além disso, o estado do Rio Grande do Sul concentra trechos de rodovias com grau alto.

As únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** estão na BR-116 e BR-381 em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

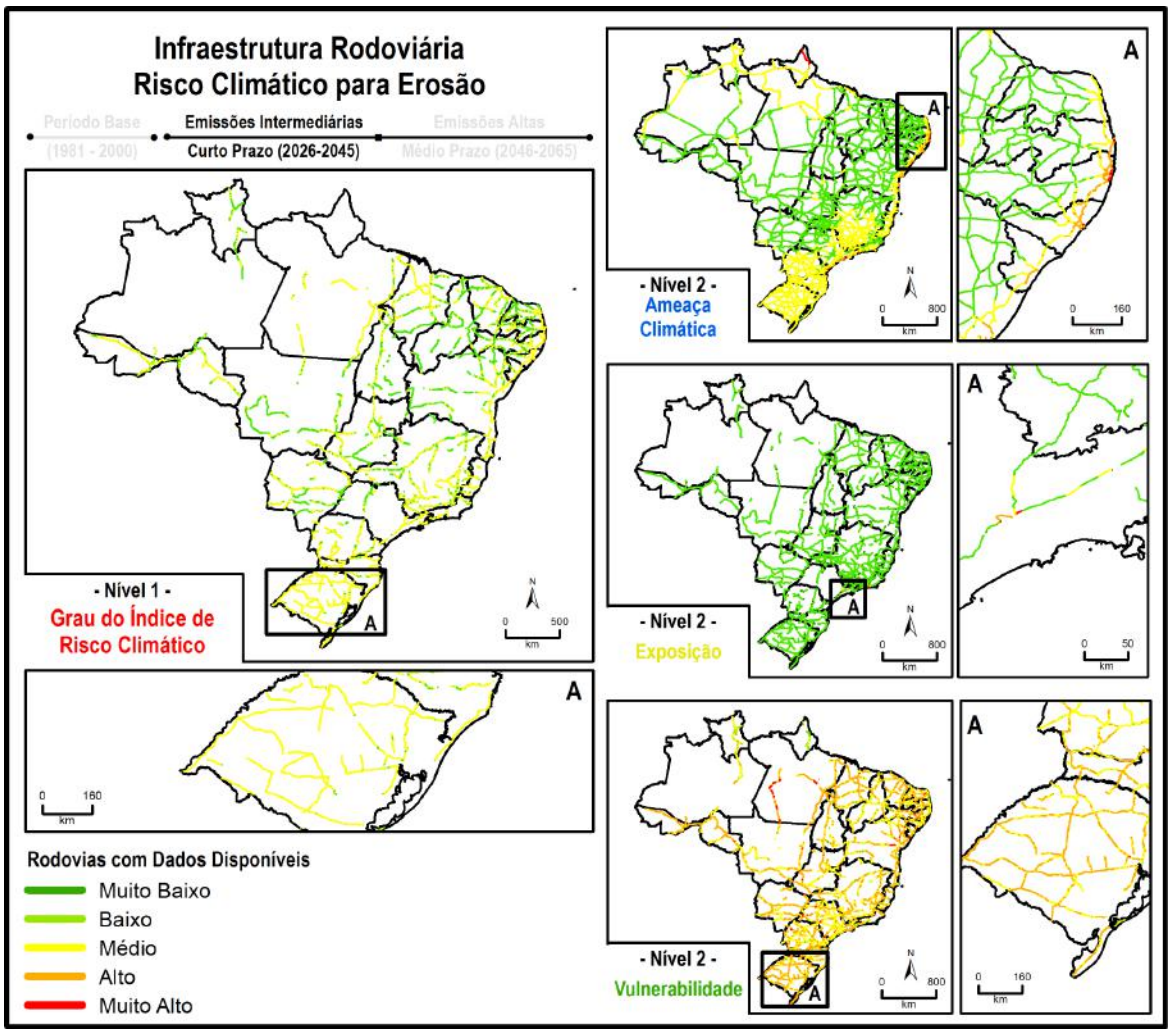
5.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto da erosão na infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto e médio prazo.

5.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 46 apresenta os mapas resultantes das análises, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 46. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Além disso, pode ser observado o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro, quando comparado com o período-base. Existem também outros trechos de concentrações do IRC médio que podem ser encontrados no litoral da Região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

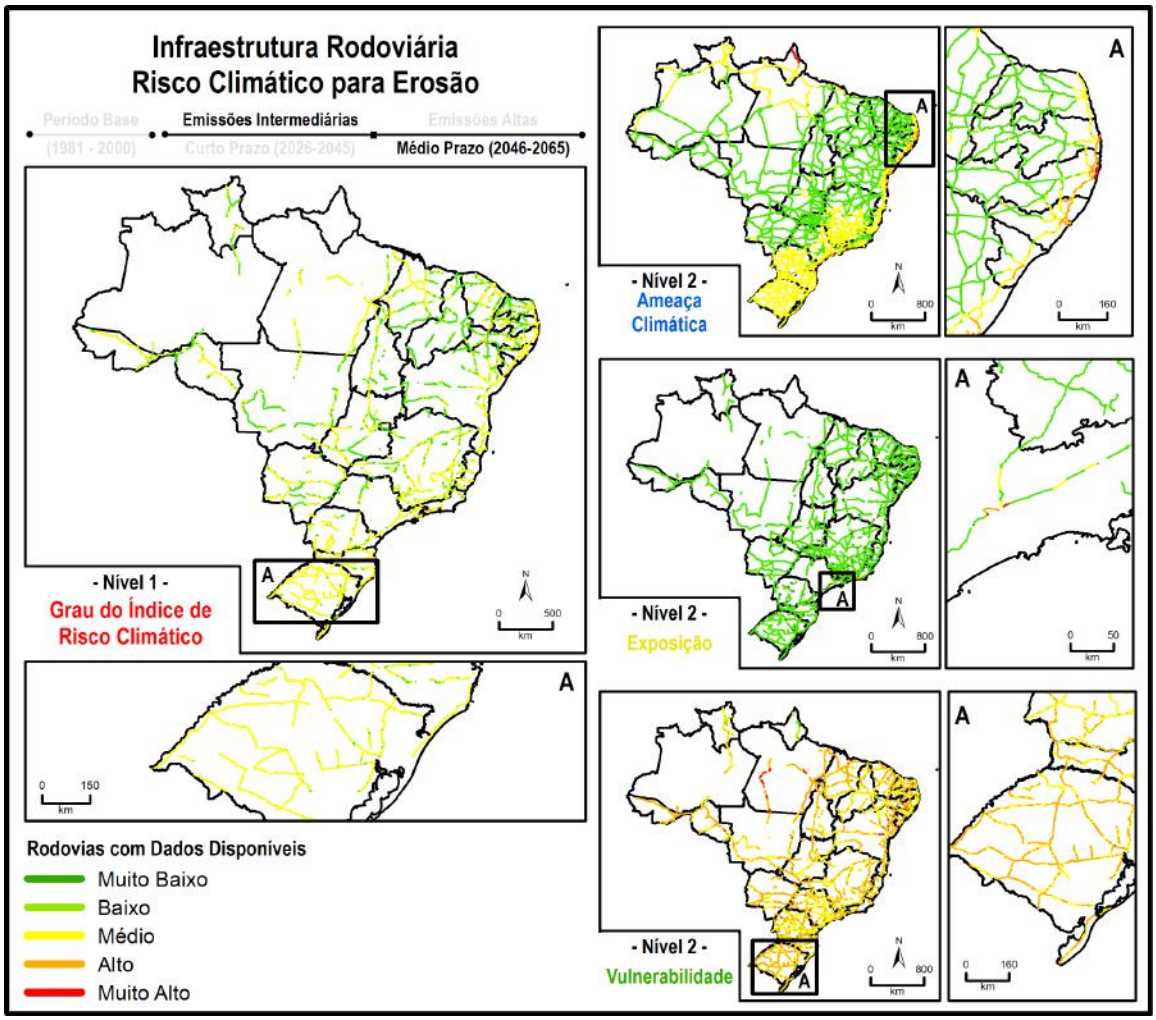
Considerando especificamente o Nível 2, nota-se que embora os mapas de exposição e vulnerabilidade sejam os mesmos para todos os cenários, para ameaça climática, os estados que compõem a Região Sul (principalmente) e Sudeste do Brasil passam de grau baixo, no cenário base, para grau médio, no cenário intermediário de curto prazo.

5.3.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão (Nível 1) para o

cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 47.

Figura 47- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Observa-se ainda o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro quando comparado com o período base; contudo, quando comparado ao período de curto prazo, as mudanças não são perceptíveis. Existem também outros trechos de concentrações do IRC médio que podem ser encontrados no litoral da região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Nos mapas de Nível 2, nota-se que as mudanças são imperceptíveis quando comparado ao cenário de emissões intermediárias de curto prazo; contudo, quando comparado ao período base, existe um aumento de risco de baixo para médio de ameaça climática nos estados do Sul e Sudeste brasileiro.

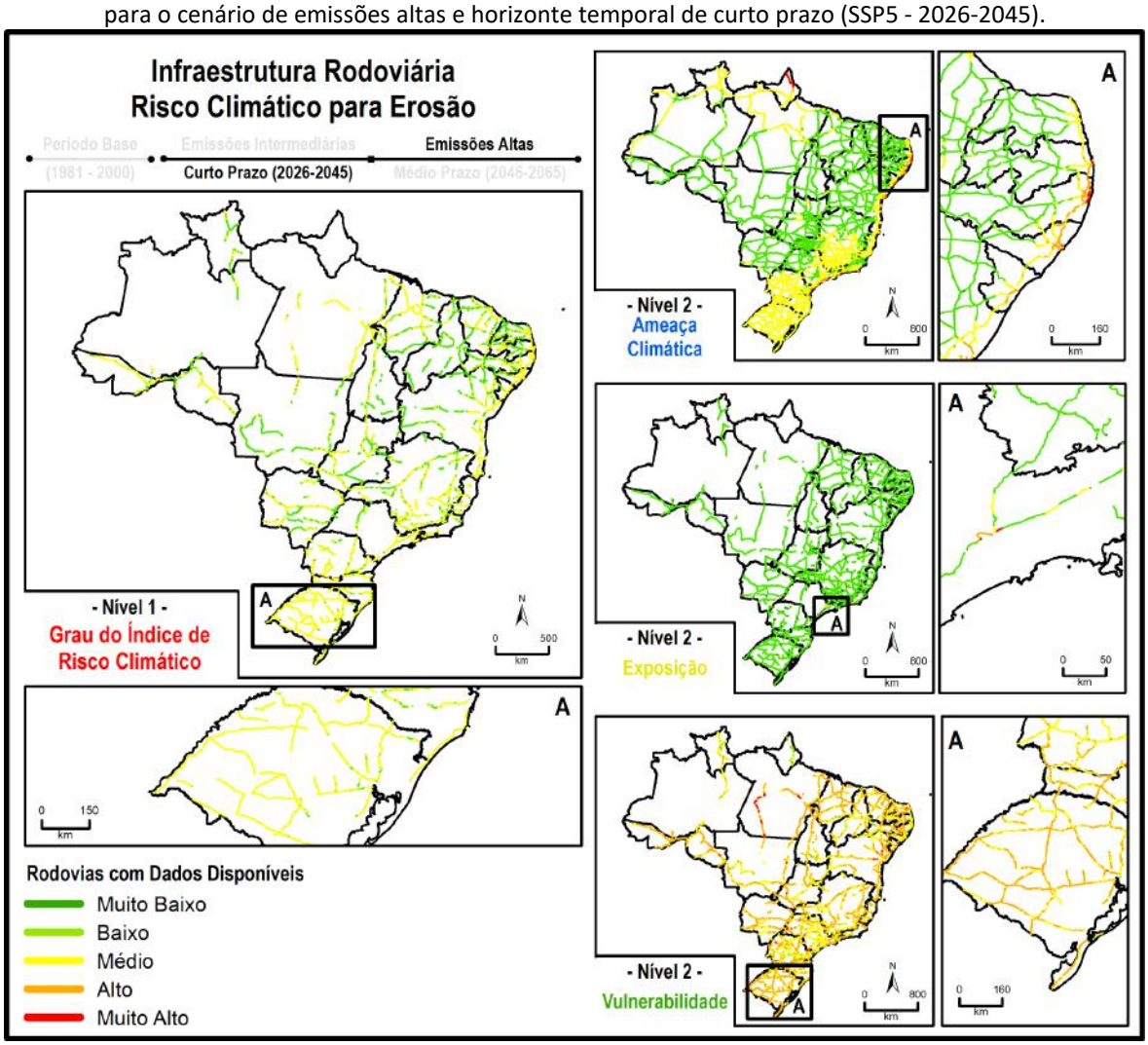
5.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de erosão na infraestrutura rodoviária considerando-se um cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.3.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 48 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 48 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

De acordo com a Figura 48, os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Assim como ocorre no IRC de emissões intermediárias, as mudanças não são perceptíveis nos mapas. A concentração dos trechos de IRC

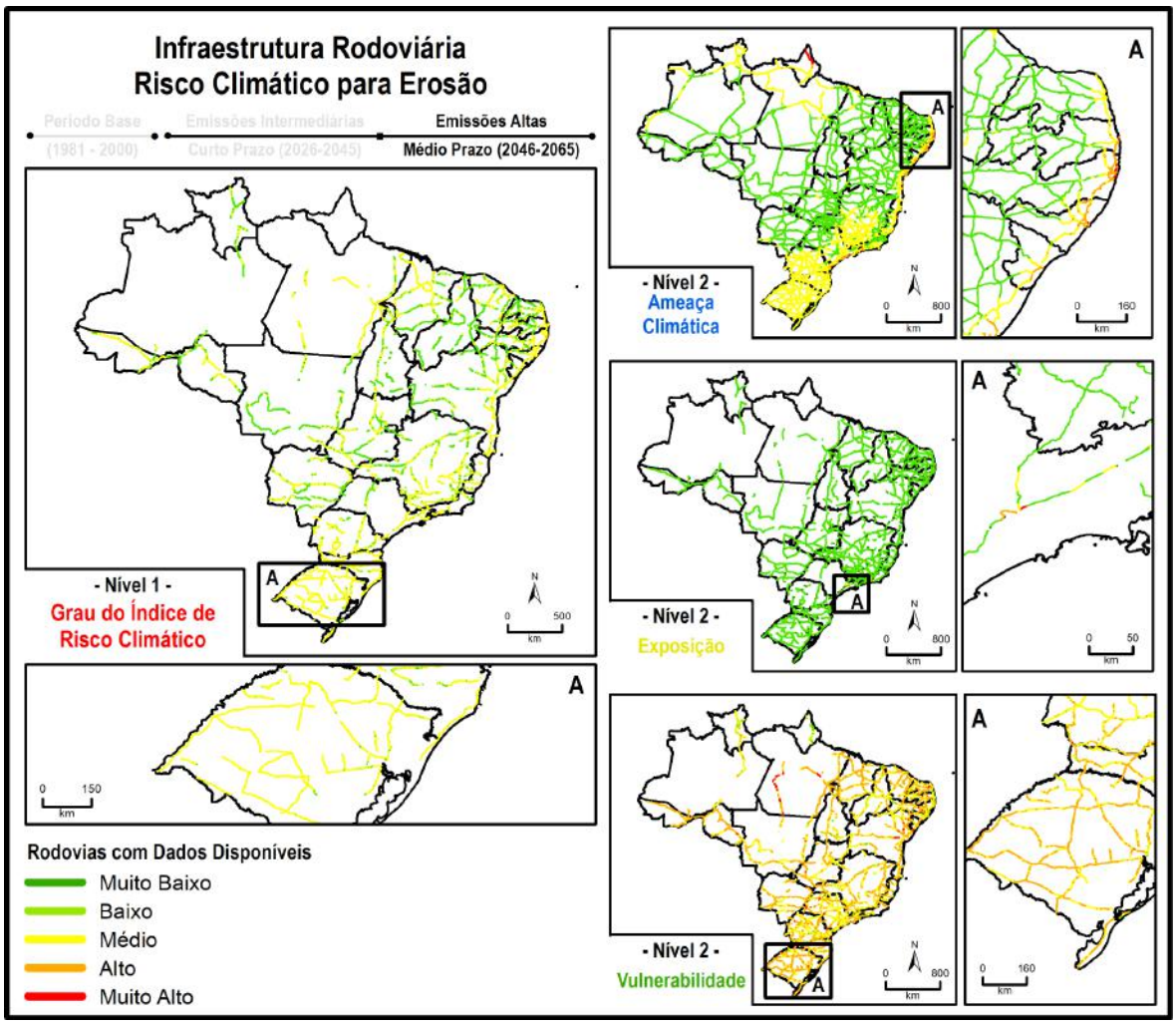
médio pode ser encontrada também no litoral das Regiões Nordeste e Sudeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Cabe ainda destacar que mudanças nos mapas do Nível 2 (ameaça climática, exposição e vulnerabilidade) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo são imperceptíveis quando comparadas com o Nível 2 das emissões intermediárias de curto prazo.

5.3.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 49 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, de exposição e de vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) na infraestrutura rodoviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065).

Figura 49 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Assim como no IRC de emissões intermediárias e emissões altas de curto prazo,

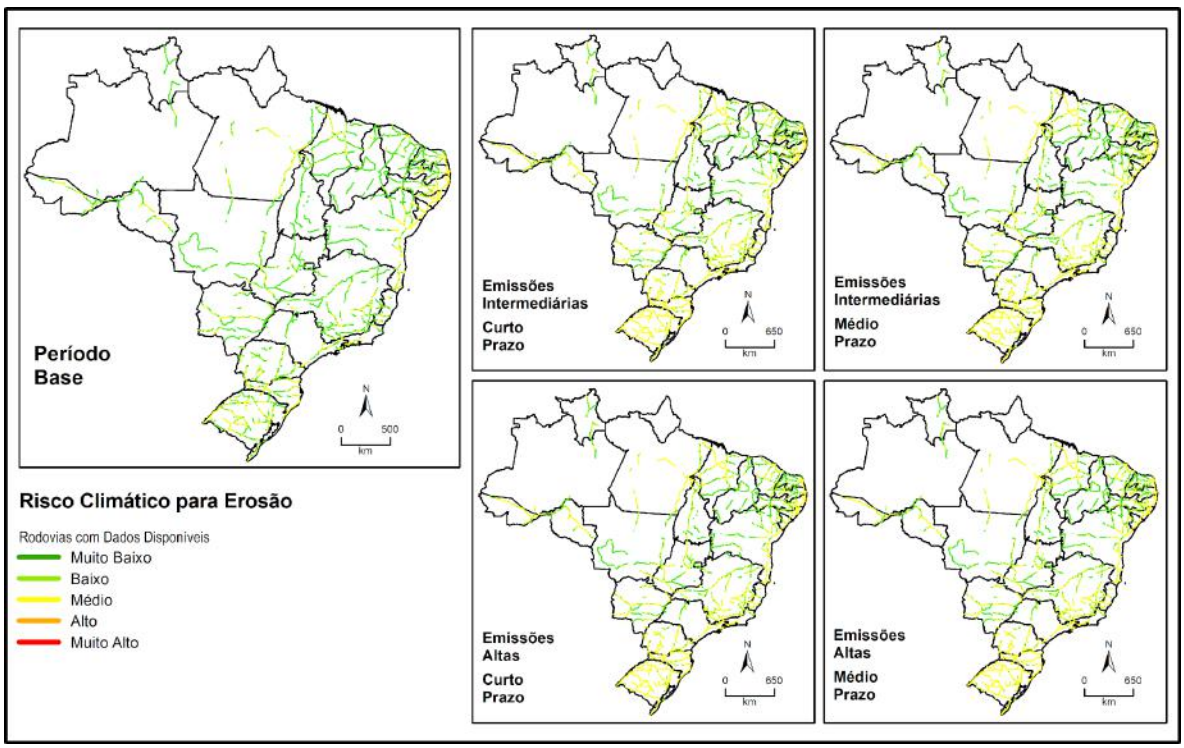
as mudanças não são perceptíveis. A concentração dos trechos de IRC médio pode ser encontrada também no litoral das Regiões Nordeste e Sudeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Destaca-se ainda que, mais uma vez, as mudanças nos mapas do Nível 2 (ameaça climática, exposição e vulnerabilidade) são imperceptíveis quando comparadas com o nível 2 das emissões intermediárias de curto e médio prazos e emissões altas de curto prazo.

5.3.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a erosão

A Figura 50 sintetiza os mapas de risco climático da infraestrutura rodoviária federal brasileira devido ao impacto direto da erosão. Nela, nota-se que as maiores variações de nível de risco climático encontram-se quando o cenário base é comparado aos demais cenários. Entretanto, quando se compara os horizontes temporais para os cenários de emissões intermediárias e altas, essas variações são praticamente imperceptíveis nos mapas.

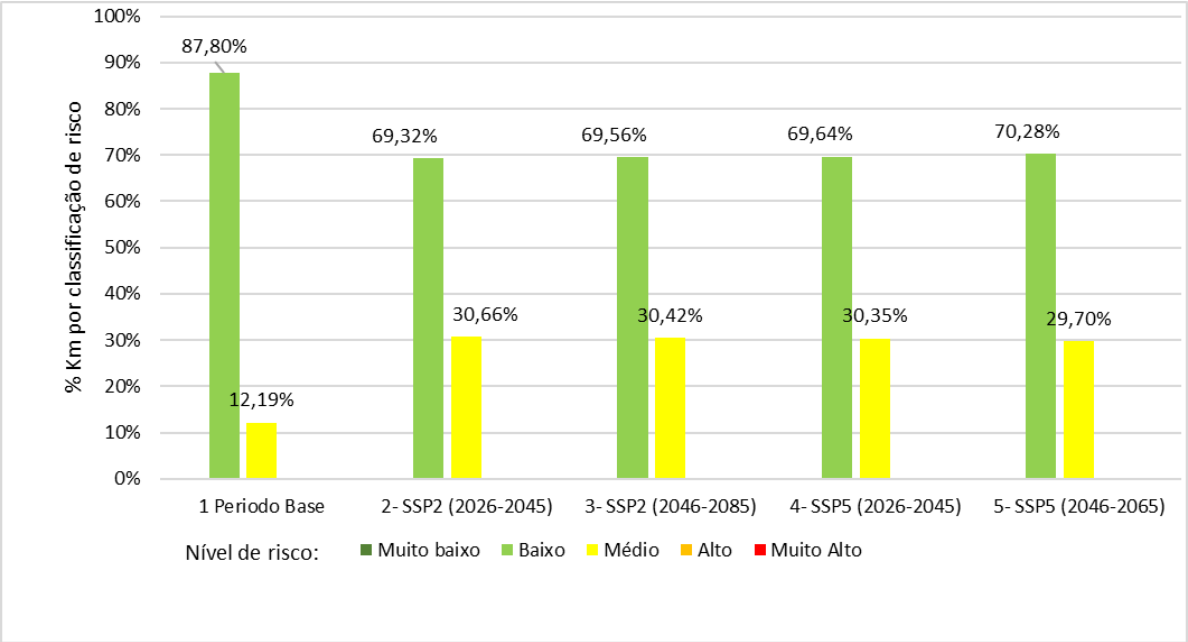
Figura 50 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e os horizontes temporais, é apresentada, na Figura 51, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão.

Figura 51. Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o **período base**, conforme exposto na Figura 51, 87,80% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão e 12,19% sob risco médio. Ainda de acordo com a Figura 51, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo** (SSP2 - 2026-2045), o IRC devido ao impacto de erosão é baixo em 69,32% das rodovias, médio em 30,66%. Isso mostra que quando comparado ao período base, aumentou-se o percentual de trechos com grau médio de risco e diminuiu-se o percentual de trechos com grau baixo.

Considerando ainda o cenário intermediário, mas com **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se que 69,56% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão e 30,42% encontram-se sob médio risco. Com isso, mostra-se que pouca variação é apresentada entre os horizontes temporais para o cenário de emissões intermediárias.

Em um **cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 69,64% das rodovias encontram-se sob risco climático baixo devido ao impacto de erosão e 30,35% sob risco médio. Já, considerando-se o **cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065)**, 70,28% da quilometragem de rodovias se encontrará sob risco climático baixo e 29,70% sob risco climático médio de impacto devido ao deslizamento.

De modo a realizar uma análise mais precisa dos resultados, a Tabela 10 apresenta o percentual dos trechos rodoviários, por grau de ameaça climática, para impactos devido à erosão em cada um dos cenários analisados e o período base.

Tabela 10 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para erosão.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,00%	94,71%	3,84%	1,31%	0,14%
SSP2 (2026-2045)	0,01%	60,31%	37,92%	1,35%	0,42%
SSP2 (2046-2065)	0,01%	60,92%	37,38%	1,28%	0,41%
SSP5 (2026-2045)	0,01%	60,92%	37,38%	1,28%	0,41%
SSP5 (2046-2065)	0,01%	62,48%	35,80%	1,32%	0,40%

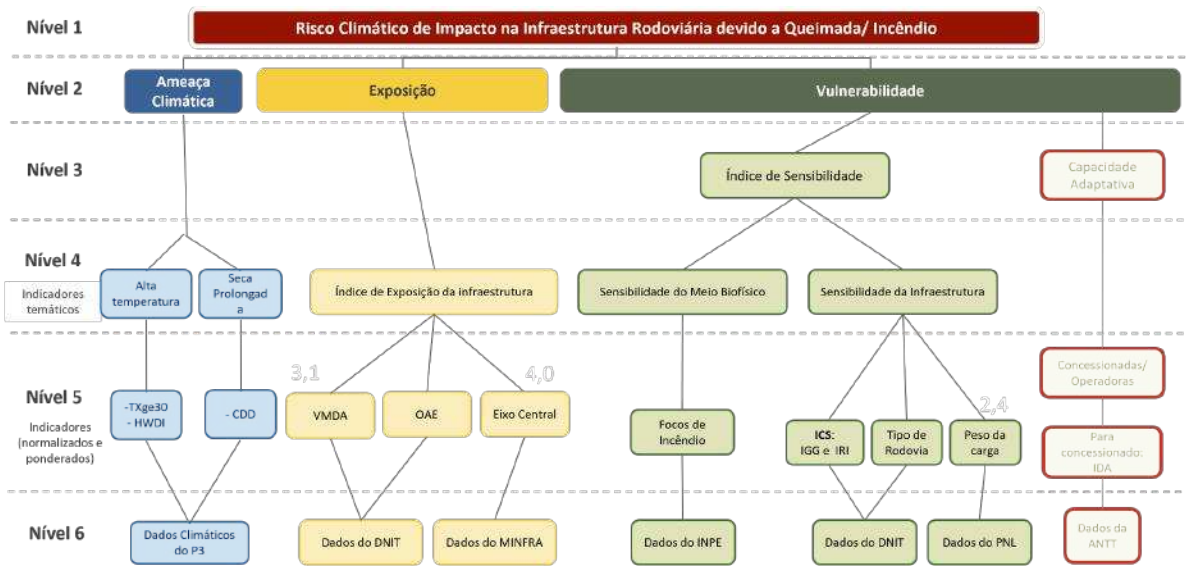
Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Tabela 10, nota-se que há um expressivo aumento dos trechos rodoviários sob grau de ameaça médio e consequente redução dos trechos sob grau de ameaça baixo em todos os cenários considerados, em comparação ao período base, mas não há alterações significativas entre os cenários.

5.4. Índice de Risco Climático devido ao impacto de queimada/ incêndio

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de queimada/incêndio foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 52.

Figura 52 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada/ incêndio.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 52, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de altas temperaturas e seca prolongada), foram considerados os dados de:

- TXge30: número de dias com temperatura máxima acima de 30°C, que indica a frequência de temperaturas altas;
- HWDI - *Heat Wave Duration Index* (Índice de duração de ondas de calor):período máximo em cada ano de pelo menos 5 dias consecutivos onde a temperatura máxima é de pelo menos 5 graus C mais quente do que a climatologia diária do período base (indica a persistência de temperaturas altas); e
- CDD: número máximo de dias secos consecutivos, que indica persistência de seca.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

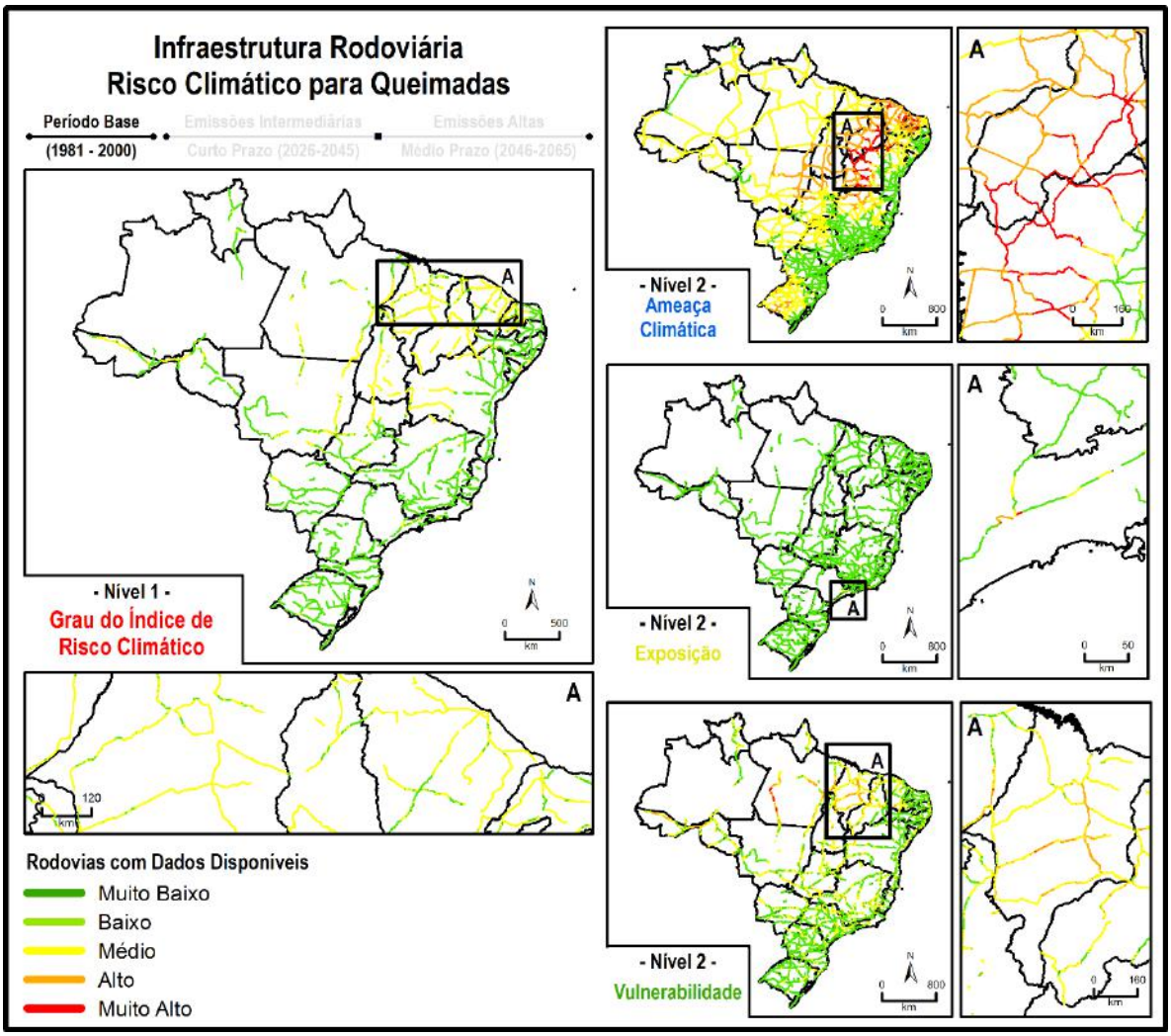
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador calculado a partir do mapa de incêndio do INPE; e
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de queimada/incêndio.

5.4.1 Período base | Queimada

A Figura 53 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido a queimada/incêndio (Nível 1), para o período base.

Figura 53 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à queimada, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático** - composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade - devido ao impacto de queimadas/incêndios na infraestrutura rodoviária federal brasileira indica que existem trechos com risco climático médio (o maior grau encontrado) no Maranhão, Piauí, Ceará, Tocantins e o interior do Rio Grande do Norte e Paraíba, além de alguns trechos em rodovias no interior da Bahia e em estados da região Centro-Oeste. O estado do Acre chama a atenção com a BR-364, com grau médio. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a queimadas alto ou muito alto (Figura 53).

Apenas trechos de rodovias nos Estados de Maranhão, Piauí e interior da Bahia apresentam-se com grau muito alto de **ameaça climática**. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas e médias no estado do Rio Grande do Sul, na região Centro-Oeste, norte de Minas Gerais e no interior da região Nordeste, além de praticamente toda região Norte com grau médio.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a queimadas/incêndios, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, as rodovias com grau de ameaça climática muito alto

e/ou alto concentram-se nos estados do Maranhão, Piauí e Pará. O estado do Acre e outros estados inseridos na região Centro-Oeste destacam-se por apresentarem trechos rodoviários com grau de ameaça climática altos e médios. Todas as demais rodovias têm grau baixo e médio.

As únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** estão na BR-116 e BR-381 em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

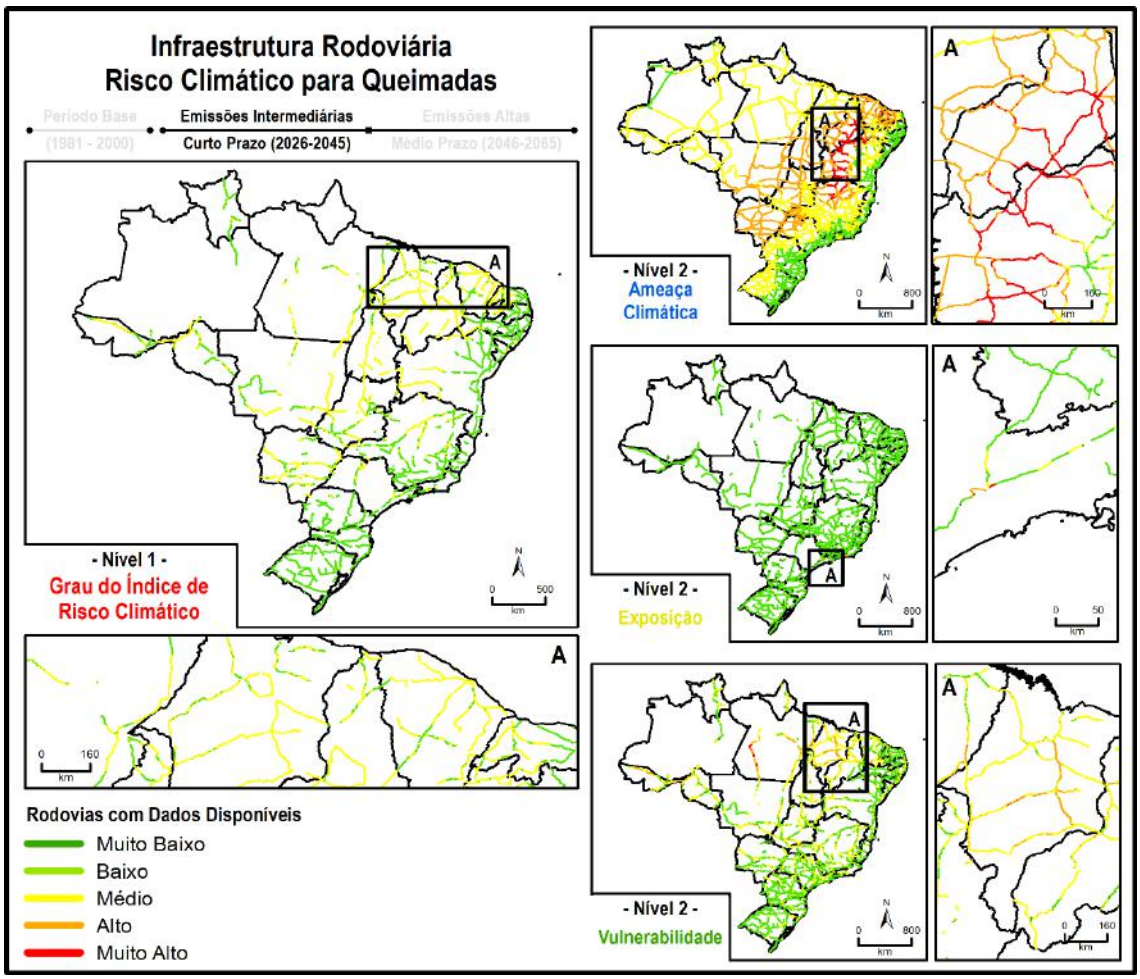
5.4.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção são apresentados os resultados do IRC de impacto devido a queimadas/incêndios sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

5.4.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 54 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo.

Figura 54 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com maiores graus de IRC se concentram no interior da região Nordeste (estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte), em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás) e interior do Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 54, que apresentam risco climático médio de impacto devido a queimadas/ incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 54).

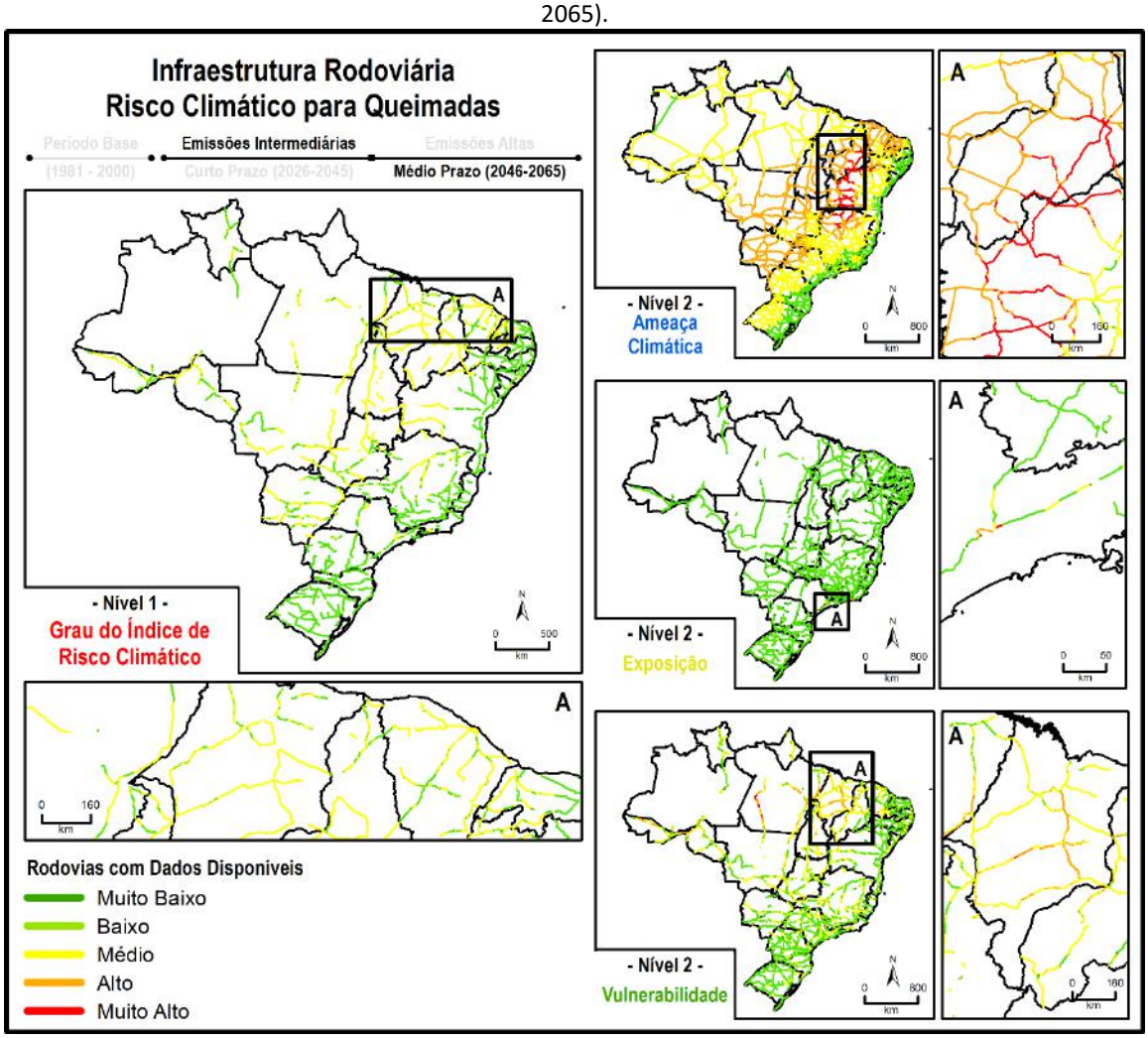
Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no aumento de trechos rodoviários sob risco climático médio, especialmente no estado do Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais.

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta e alta, continuam se concentrando no Nordeste, principalmente nas rodovias que atravessam o interior da Bahia em direção ao estado do Piauí, e na região Centro-Oeste. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste, e médias em todo o interior das regiões Sul, Sudeste e Norte.

5.4.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 55 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo.

Figura 55 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático (IRC)** para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo, tal como ocorre no horizonte temporal de curto prazo, se concentram na região Nordeste (estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, e interior da Bahia), em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás) e interior do Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 55, que apresentam risco climático médio de impacto devido à queimadas/ incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 55).

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta continuam se concentrando no Nordeste, tal como apresentado para o período base e cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo, principalmente nas rodovias que atravessam o interior da Bahia em direção ao estado do Piauí e de Minas Gerais. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste e Centro-Oeste, e médias em toda a região Norte, bem como, interior das regiões Sul e Sudeste do país. As rodovias localizadas no litoral do País (do Rio Grande do Sul ao Rio Grande do Norte) encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 55).

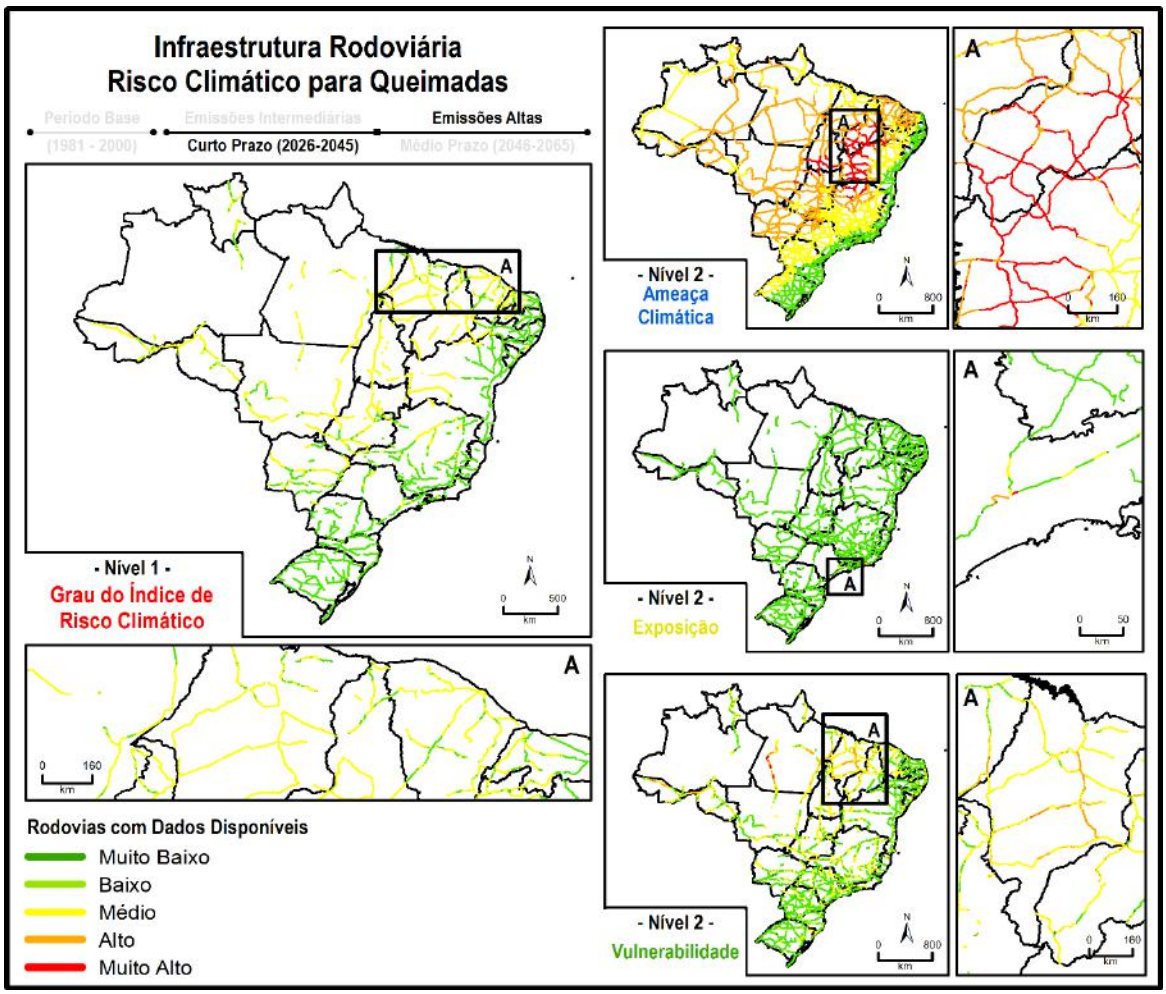
5.4.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto devido a queimadas/incêndios sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

5.4.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 56 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo.

Figura 56 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

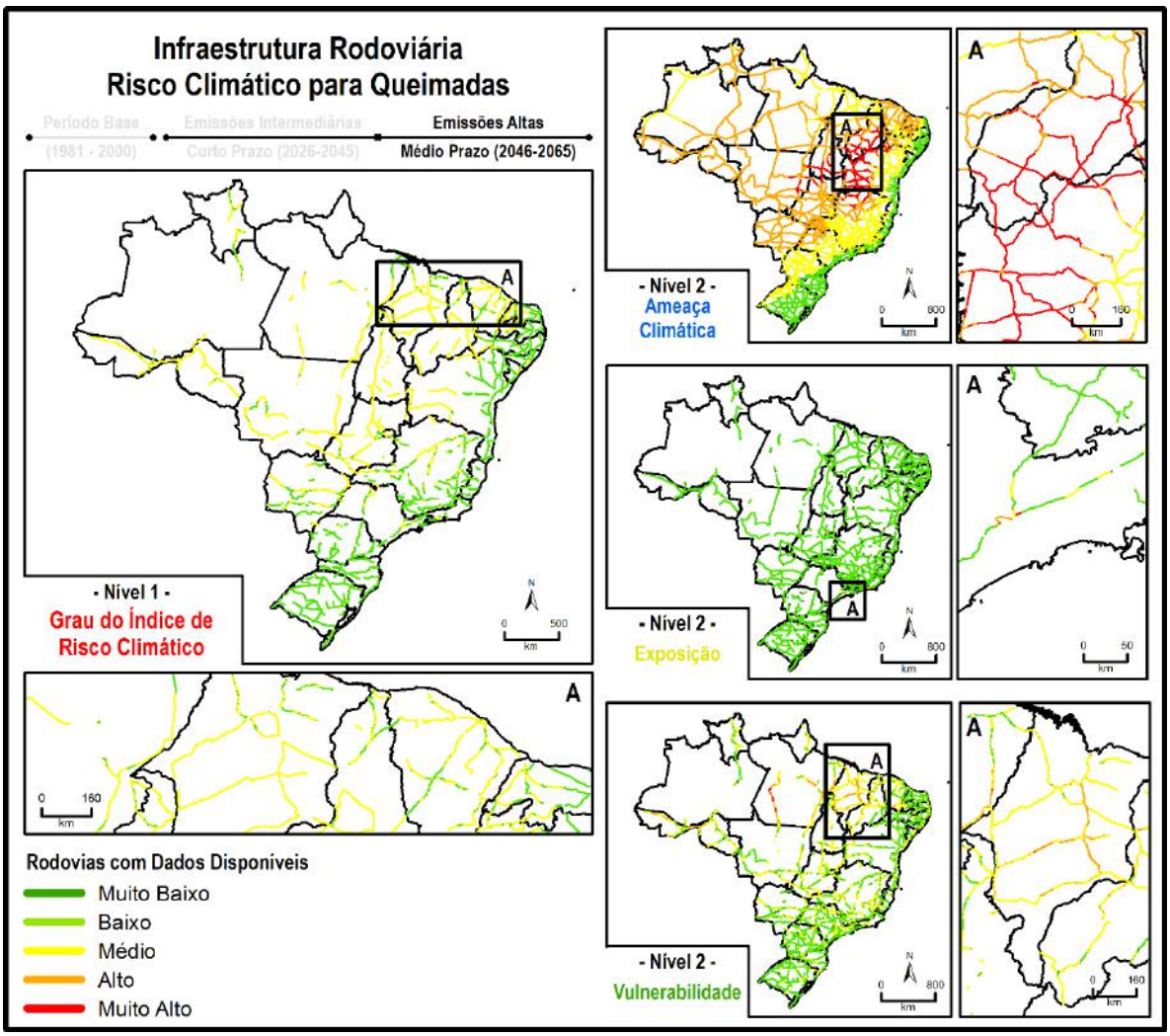
O **Índice de Risco Climático (IRC)** para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo, tal como ocorre no cenário de emissões intermediárias para ambos os horizontes temporais analisados, se concentra na região Nordeste, em parte da região Centro-Oeste e Norte e interior do Sudeste (Figura 56), que apresentam risco climático médio de impacto devido à queimada/ao incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 56).

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta continuam se concentrando no Nordeste, especialmente no interior da Bahia e Piauí, bem como, ao norte do Estado de Minas Gerais. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste, Norte e em todo o Centro-Oeste, e médias no interior das regiões Sul, Sudeste, parte da região Nordeste e extremo norte do Brasil (estados do Amazonas, Acre, Amapá e Roraima). As rodovias localizadas no litoral do país (do Rio Grande do Sul ao Rio Grande do Norte) encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 56).

5.4.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 57 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo.

Figura 57 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 5-2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O Índice de Risco Climático (IRC) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo não sofre mudanças sensíveis se comparado ao observado nos cenários anteriores (Figura 57),

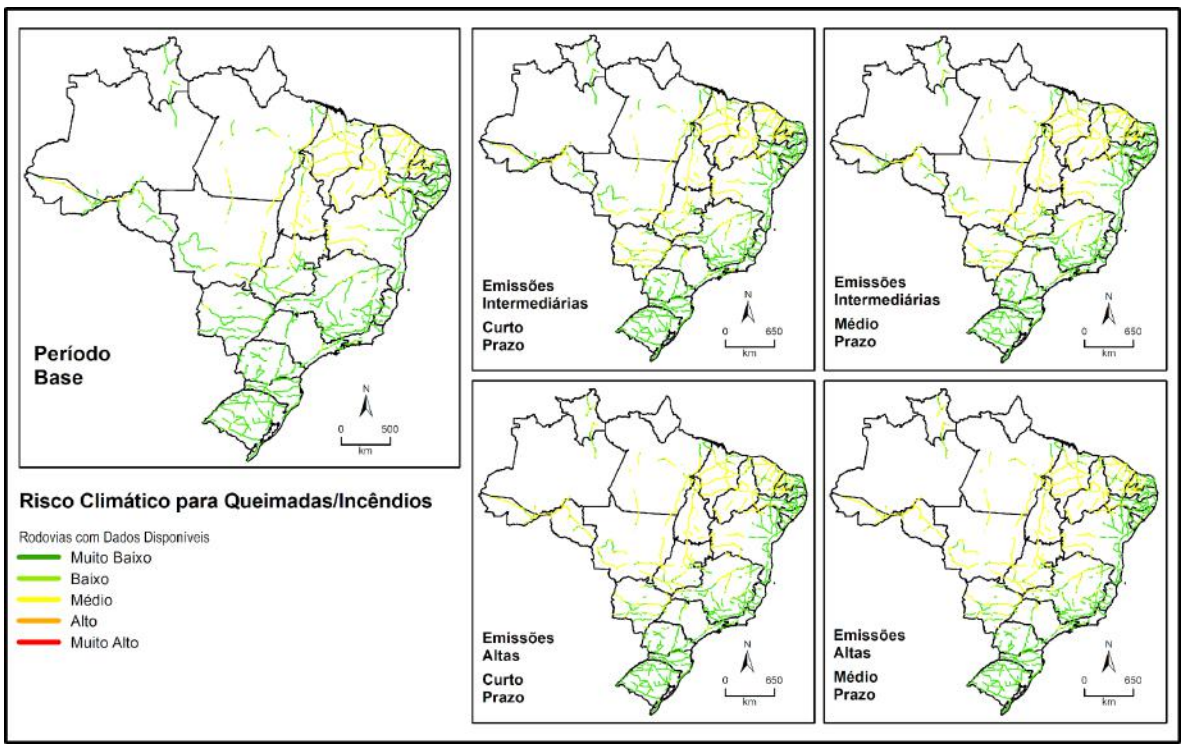
predominando trechos rodoviários com risco climático médio de impacto devido a queimadas/ incêndio por todo o interior do país, nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, e as demais rodovias localizadas no litoral brasileiro e na região Sul apresentando grau de risco climático baixo (Figura 57).

A **ameaça climática** permanece muito alta no Nordeste (interior da Bahia e Piauí), bem como, ao norte do Estado de Minas Gerais. Além desses, predominam trechos com ameaças altas por todo o país, e médias no interior das regiões Sul, Sudeste, parte da região Nordeste e extremo Norte do Brasil. As rodovias localizadas no litoral do país encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 57).

5.4.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a queimada

A Figura 58 apresenta a síntese dos mapas do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio para o período base e os cenários de emissões intermediárias e altas, em ambos os horizontes temporais.

Figura 58 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de queimada.

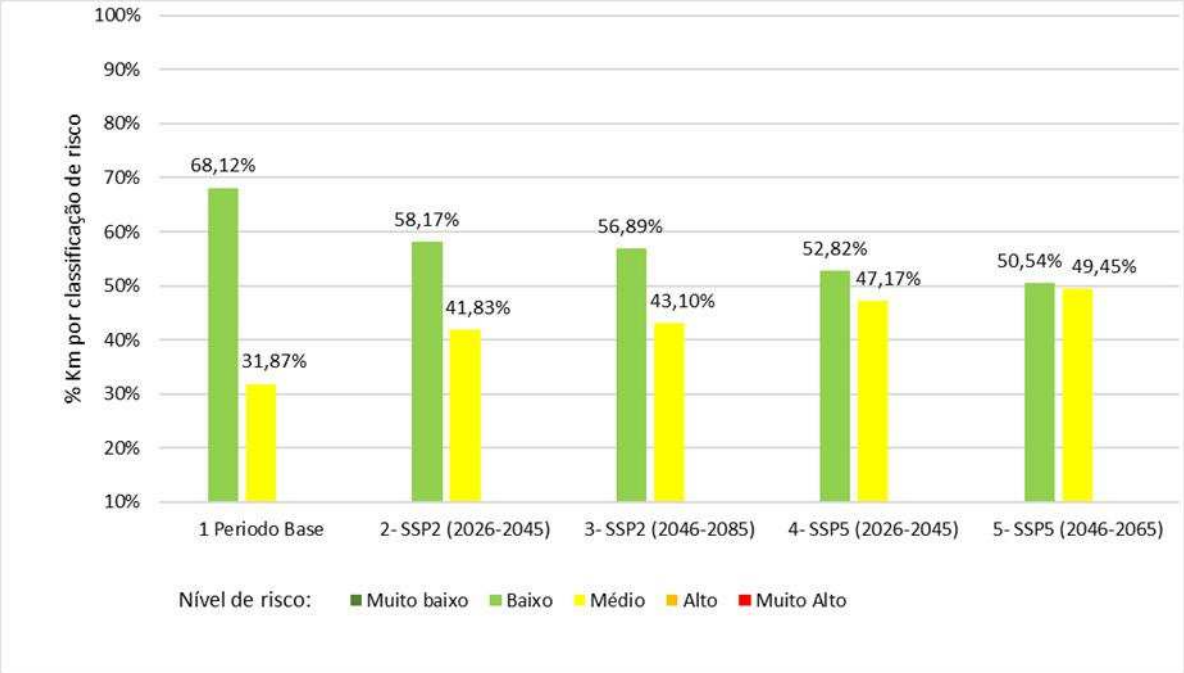


Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 58, observa-se que o **risco climático** devido ao impacto de queimada/incêndio para o período base é predominantemente baixo para todo o território brasileiro, com algumas áreas com risco médio no interior do Nordeste brasileiro e parte do Centro-Oeste e Norte. Conforme modifica-se o cenário para emissões intermediárias, os trechos de rodovias sob baixo risco diminuem, se considerado o horizonte temporal de curto prazo, reduzindo progressivamente para o horizonte temporal de médio prazo, e para o cenário de emissões altas, de curto e longo prazos. Enquanto isso, ocorre um aumento dos trechos de rodovias sob médio risco, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil.

De modo a facilitar a visualização do crescimento de trechos rodoviários com risco médio na infraestrutura de transportes federal, e as diferenças entre os diferentes cenários e horizontes temporais, apresenta-se a Figura 59, com a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a queimadas/incêndios.

Figura 59 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 59, percebe-se que, no **período base**, 68,13% das rodovias federais encontram-se sob baixo risco devido ao impacto de queimadas/incêndios, e 31,87% encontram-se sob médio risco. Em um **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) e horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)**, verifica-se uma redução de 9,95% dos trechos sob baixo risco, passando a 58,17%, e um crescimento equivalente de trechos sob médio risco, passando a 41,83%. Modificando-se o horizonte temporal para **médio prazo (2046-2065)**, observa-se a redução de trechos sob baixo risco, bem como, o aumento de trechos sob médio risco, sendo aproximadamente 1,28% para ambos os graus de risco. Por fim, em um **cenário de emissões altas (SSP-5)**, ocorre novamente um aumento do grau de risco de trechos de rodovias federais: 52,82% de trechos sob baixo risco no horizonte temporal de **curto prazo (2026-2045)**, e 50,54%, no de **médio prazo (2046-2065)**; e 47,17% de trechos sob médio risco em curto prazo, e 49,45%, em médio prazo. Portanto, no pior cenário (emissões altas e horizonte temporal de médio prazo), quase metade das rodovias federais brasileiras encontrar-se-ão sob médio risco devido ao impacto de queimada/incêndio.

Essa variação decorre unicamente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A **ameaça climática** é muito alta, especialmente nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Pará, com trechos de ameaça alta e média em todo o interior dos demais estados do Norte, Nordeste e Centro-Oeste e parte norte de Minas Gerais, e baixa ao longo de rodovias localizadas no litoral brasileiro (Figura 58). Por sua vez, a **exposição** não sofre alterações ao longo dos cenários, permanecendo a mesma, com as únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto sendo a BR-116 e BR-

381, ambas em São Paulo, e as demais rodovias com exposição baixa ou muito baixa. A ameaça média contribui especialmente na região Sul para os valores dos IRCs mais altos. O mesmo ocorre com a **vulnerabilidade**, que em todos os cenários, bem como, no período base, permanece com diversos trechos de rodovias no país apresentando vulnerabilidade baixa e média, com exceção de trechos no Pará, que possuem vulnerabilidade alta ou muito alta.

A Tabela 11 apresenta o percentual dos trechos, por grau de ameaça climática, para impactos devido a queimadas/incêndios em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 11 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para queimada/ incêndios.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,16%	34,42%	46,20%	15,89%	3,33%
SSP2 (2026-2045)	0,03%	20,59%	48,20%	26,89%	4,29%
SSP2 (2046-2065)	0,03%	17,41%	50,58%	28,27%	3,71%
SSP5 (2026-2045)	0,03%	19,76%	37,21%	36,50%	6,50%
SSP5 (2046-2065)	0,03%	17,40%	34,24%	41,12%	7,21%

Fonte: Elaboração própria (2022).

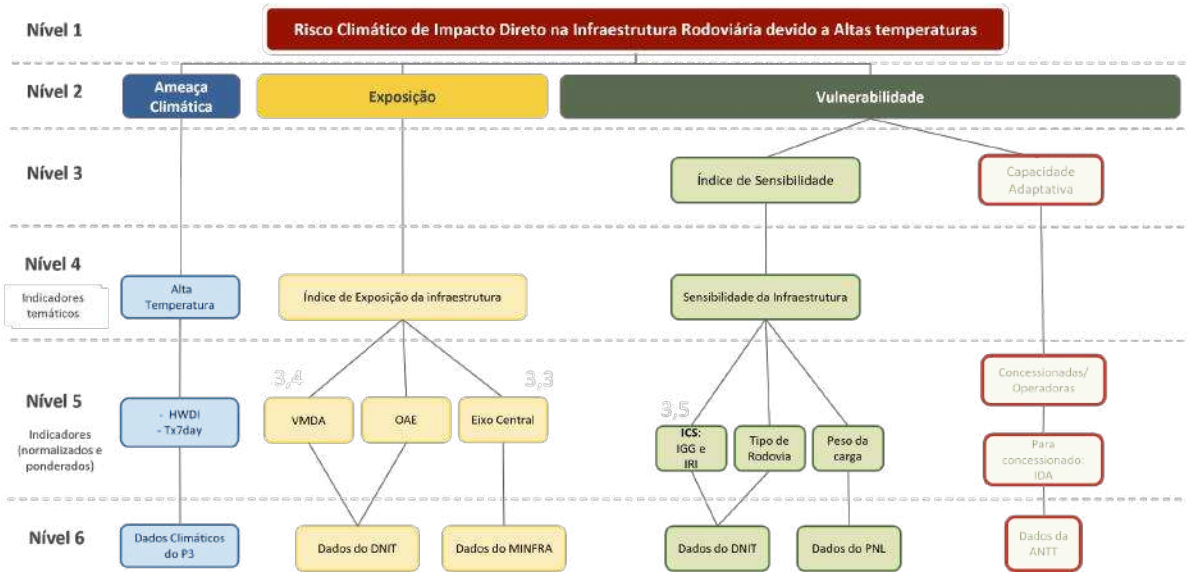
Conforme se observa na Tabela 11, no **período base**, predominam no país trechos sob baixo e médio grau de ameaça climática (34,42% e 46,21%, respectivamente). Os trechos sob muito baixa ameaça são poucos (0,16%), e aqueles sob risco alto ou muito alto, somados, equivalem a 19,22%. Com a mudança dos cenários analisados e horizontes temporais considerados, verifica-se um aumento progressivo de trechos sob risco muito alto e alto - 31,18% para emissões intermediárias e curto prazo, 32,56% para o mesmo cenário de emissões, mas o período de médio prazo, 43% para cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo, e 48,33% para o mesmo cenário de emissões a médio prazo. Portanto, verifica-se que, entre ⅓ e quase ½ da infraestrutura rodoviária federal brasileira está sob ameaça climática alta ou muito alta de impactos devido a queimadas/ incêndios.

Os trechos sob risco médio aumentam do período-base ao SSP-2 (2026-2045) - de 46,21% a 48,20% (curto prazo) e 50,58% (médio prazo) (Tabela 11) -, diminuindo no cenário SSP-5 - 37,20% (curto prazo) e 34,24% (médio prazo). Isso se deve à mudança do grau de ameaça de trechos que, antes categorizados como média, passaram a alta ou muito alta. Por sua vez, os trechos sob ameaça muito baixa e baixa sofrem redução, considerando os diferentes cenários e horizontes temporais.

5.5. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de altas temperaturas foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 60.

Figura 60 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 60, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de altas temperaturas), foram considerados os dados de:

- HWDI (*Heat Wave Duration Index*) - índice de duração de ondas de calor: período máximo em cada ano de, pelo menos, 5 dias consecutivos onde a temperatura máxima é de pelo menos 5 graus C mais quente do que a climatologia diária do período base (indica a persistência de temperaturas altas); e
- Tx7day - média dos 7 (sete) dias consecutivos mais quentes do ano: indica a persistência de temperaturas altas.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

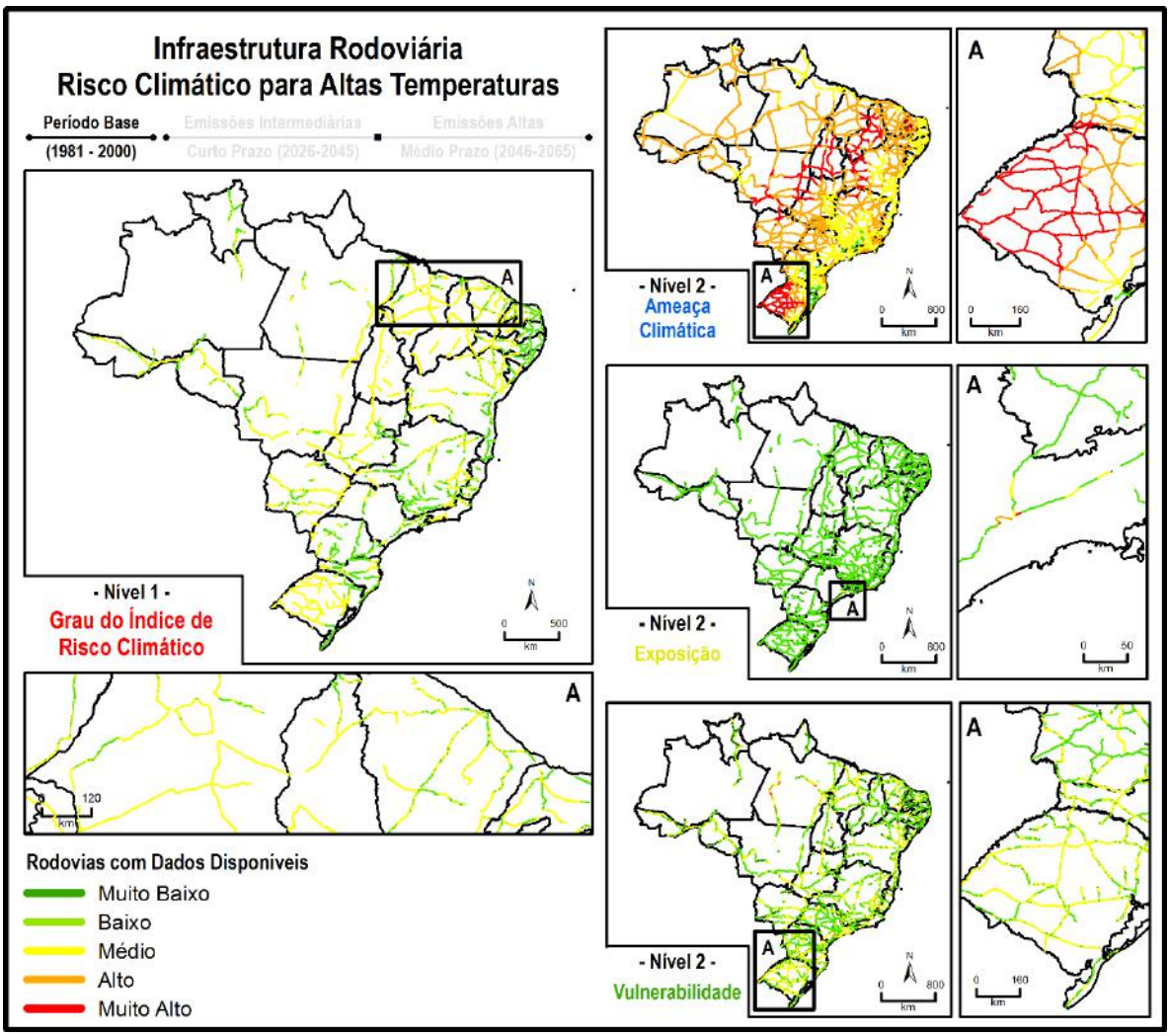
Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade da infraestrutura, calculados a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de altas temperaturas.

5.5.1 Período base | Impacto direto de altas temperaturas

A Figura 61 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido às altas temperaturas (Nível 1), para o período base.

Figura 61 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O maior IRC, grau médio de risco climático médio, foi verificado em trechos de rodovias nos estados do Maranhão, Piauí e Ceará, além de quase todos os trechos de rodovias nos Estados do Rio Grande do Sul e Tocantins. Cabe destacar ainda rodovias que têm grau de risco climático baixo como, por exemplo, as pertencentes aos estados do Paraná e Santa Catarina no Sul e do litoral do Nordeste brasileiro. Além disso, ressalta-se que não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a altas temperaturas com grau alto ou muito alto (Figura 61).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verificam-se trechos de rodovias localizadas nos Estados do Piauí, Tocantins, no interior da Bahia, no Mato Grosso e principalmente no Rio Grande do Sul com grau muito alto de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos de rodovias com grau alto em quase toda a região Norte, Centro-Oeste, interior da região

Nordeste, e nos estados de Minas Gerais e São Paulo. Os estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo, Santa Catarina, bem como, trechos localizados nos litorais do estado de São Paulo e da região Nordeste encontram-se com grau médio e alto.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a altas temperaturas, composta apenas pela sensibilidade da infraestrutura já que não existe sensibilidade do meio biofísico para esse impacto, destacam-se os Estados do Rio Grande do Sul, com grau de ameaça climática médio em muitos trechos, e do Pará, com trechos rodoviários com grau alto e muito alto. Todas as demais rodovias têm grau médio e baixo de ameaça climática devido a altas temperaturas, com alguns pontos apresentando grau muito baixo.

As únicas rodovias que apresentam trechos de rodovias com grau médio, alto e muito alto de **exposição** localizam-se na BR-116 e BR-381, em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

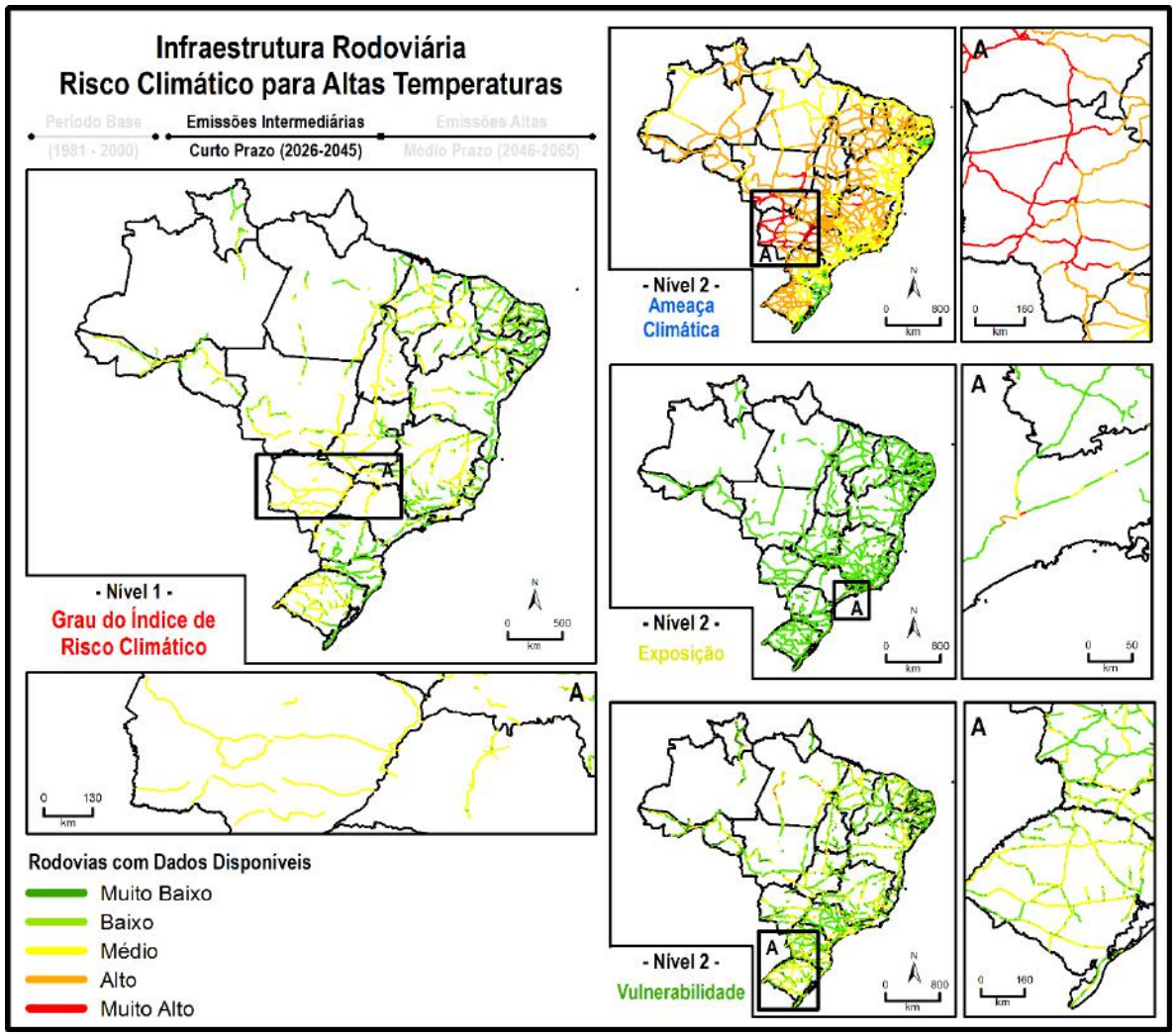
5.5.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias nos horizontes temporais de curto (2026 - 2045) e médio (2046 - 2065) prazos.

5.5.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 62 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026 - 2045).

Figura 62 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

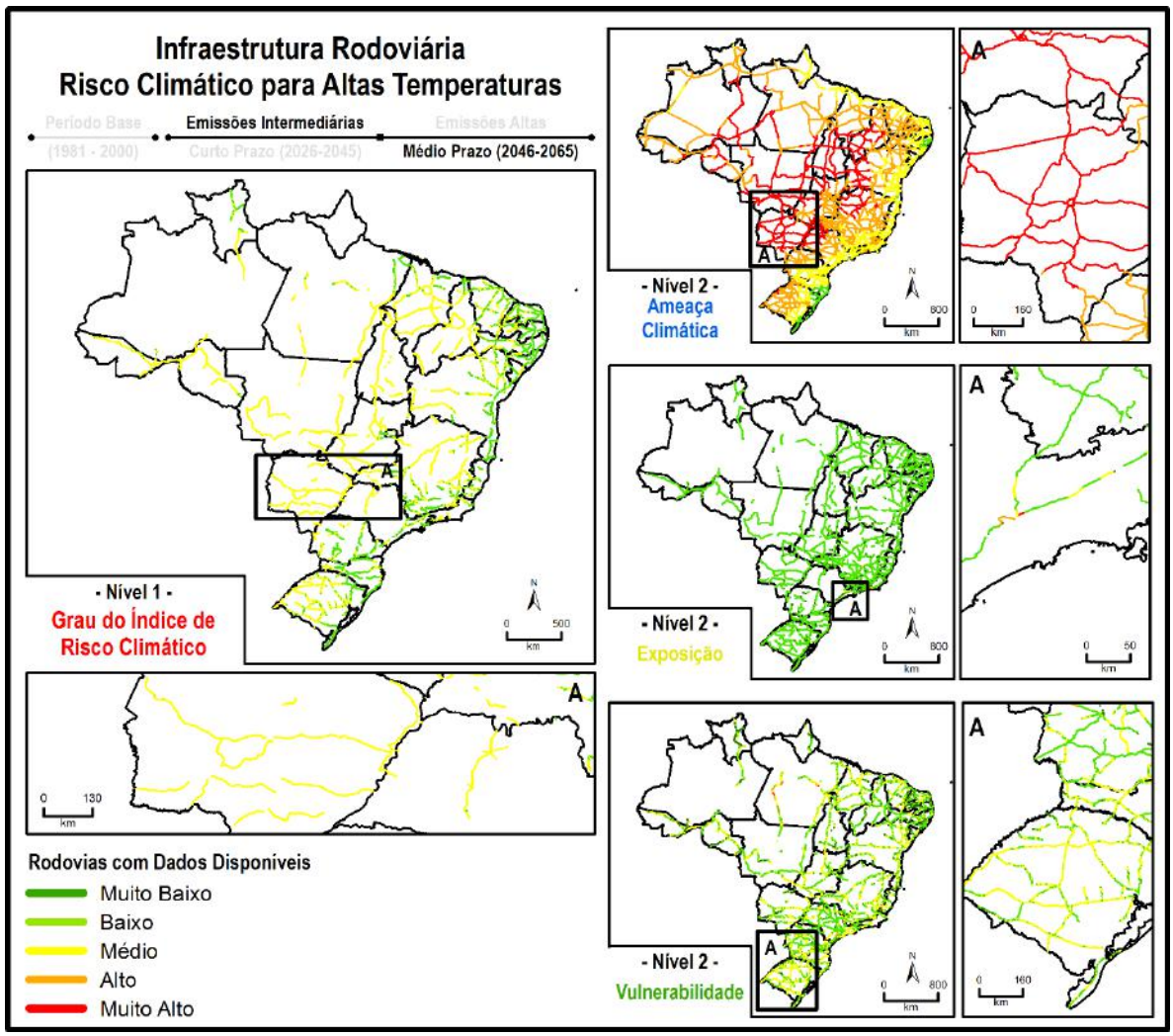
Os trechos com maiores graus de IRC se concentram em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul e Goiás) e Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 62, que apresentam risco climático médio devido ao impacto direto de altas temperaturas. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo e muito baixo (Figura 62).

Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no componente de **ameaça climática**, em que os trechos sob ameaça muito alta e alta, antes concentrados na região Sul do país - especificamente no Estado do Rio Grande do Sul, onde passam ao grau de ameaça alto e médio no interior desse estado, indo ao grau baixo no litoral -, passam se concentrar nos estados da Região Centro-Oeste (MS e MT), apesar de estarem presentes em rodovias distribuídas por todo o interior do país. Excetuam-se parte da região Norte, onde se verificam trechos de rodovias com grau de ameaça climática médio devido a altas temperaturas, e por todo o litoral brasileiro, onde há trechos sob risco médio e baixo.

5.5.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 63.

Figura 63 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se a manutenção das rodovias sob risco de impacto direto devido a altas temperaturas, se comparado ao cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045). A principal diferença está no aumento da ameaça climática nas rodovias da região Centro-Oeste e no interior do Nordeste brasileiro, bem como, no norte do Estado de Minas Gerais.

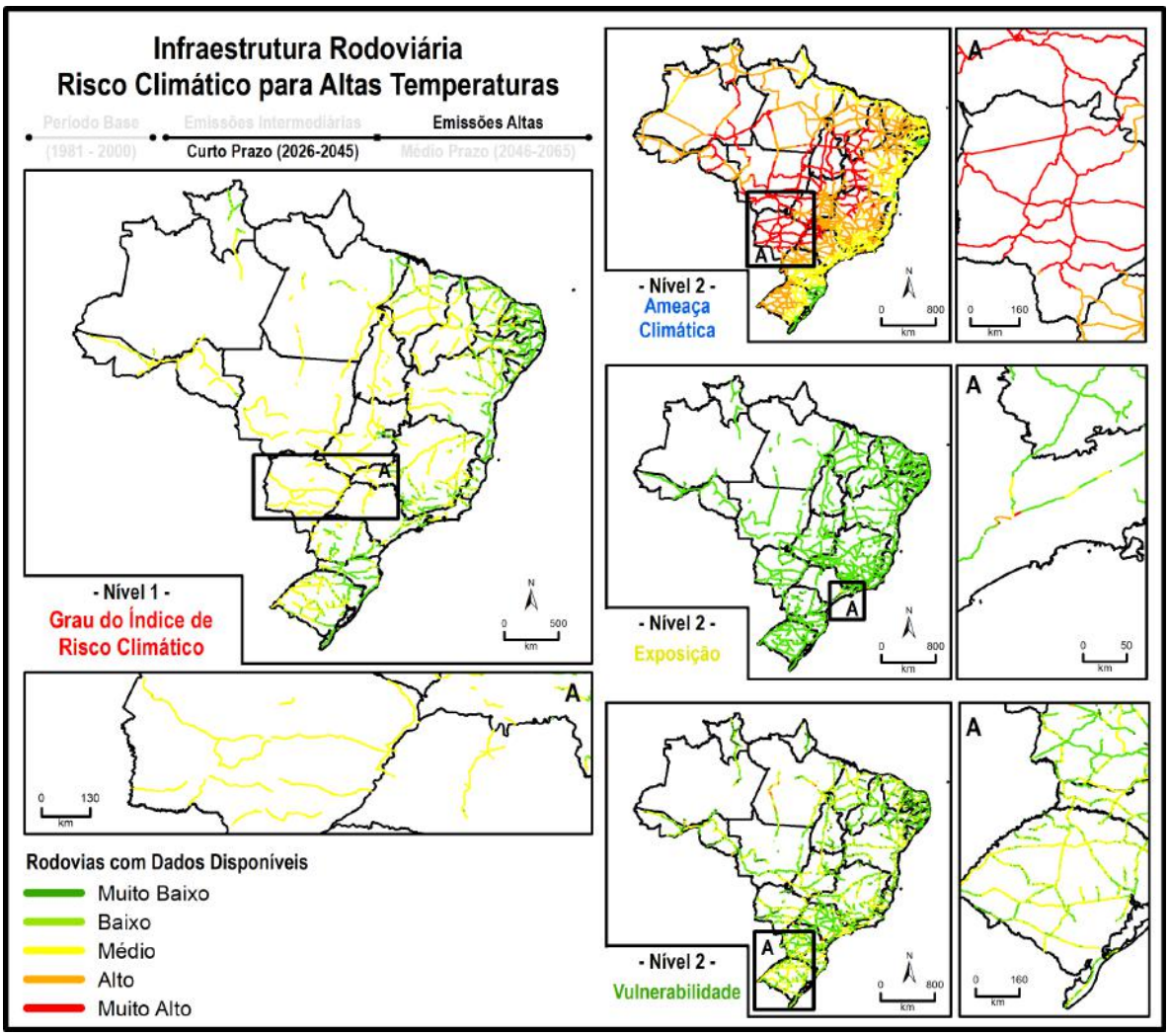
5.5.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio prazos (2046-2065).

5.5.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 64 apresenta os mapas resultantes para a infraestrutura rodoviária, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 64 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando a Figura 64, nota-se as rodovias localizadas ao longo do litoral brasileiro, bem como, nos estados de Santa Catarina e Paraná apresentam nível baixo de risco de impacto devido às altas temperaturas. Já os maiores graus de risco climático médio devido ao impacto direto de altas temperaturas estão na região Centro-Oeste, Norte, interior da região Nordeste e Sudeste, e no Sul concentrados no estado do Rio Grande do Sul.

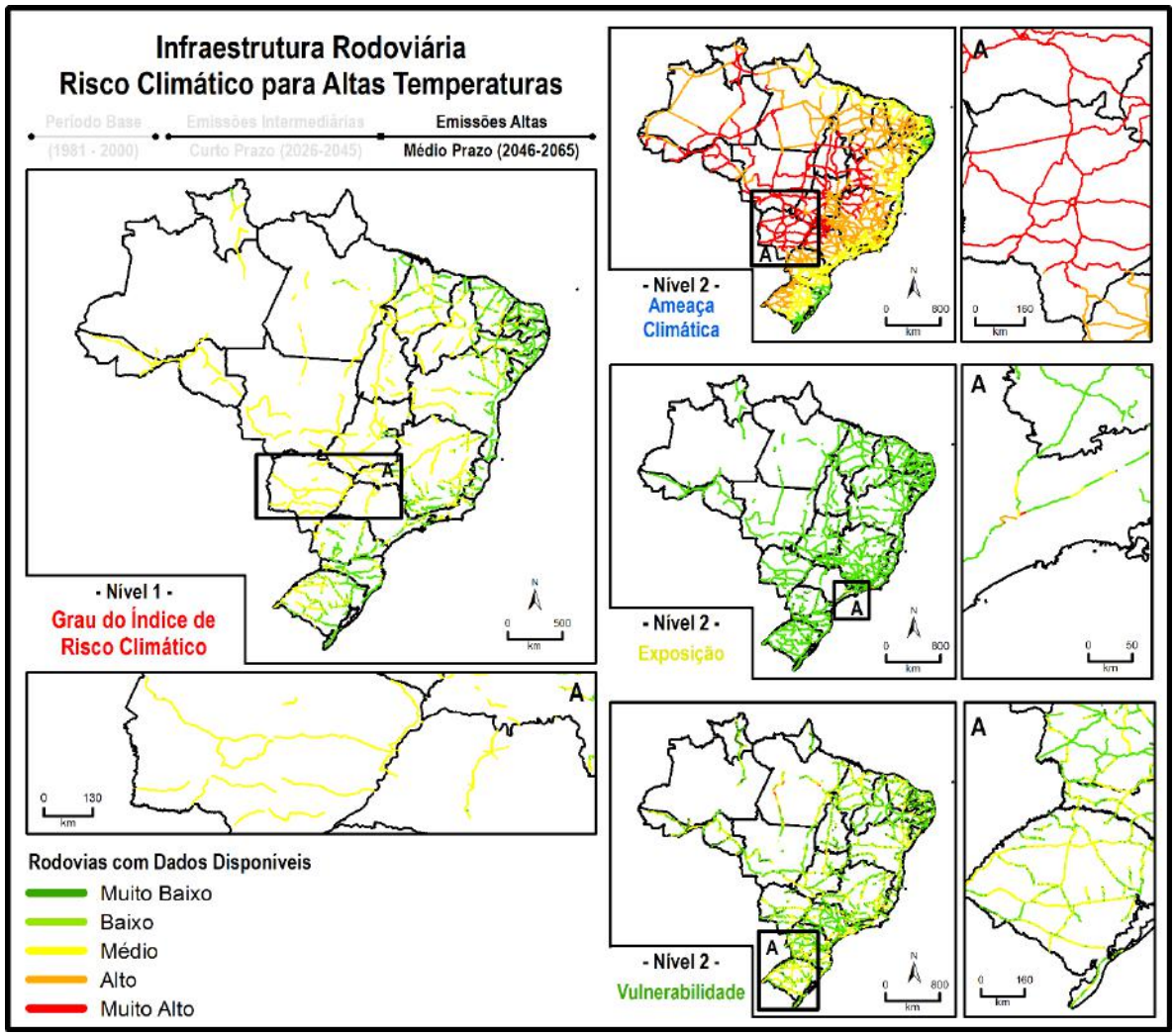
Se comparado ao período base (Figura 61) e ao cenário de emissões intermediárias, mantendo-se o horizonte temporal (curto prazo) (Figura 62), verifica-se uma diminuição dos trechos de rodovias sob baixo risco e um aumento de trechos de rodovias sob médio risco; já se compararmos ao cenário de emissões baixas e horizonte temporal de longo prazo (Figura 63), verifica-se uma redução de trechos rodoviários sob risco médio devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Verifica-se para o Nível 2 o aumento de trechos no Norte, Centro-Oeste e interior do Nordeste do Brasil sob ameaça climática muito alta e alta, com destaque ao estado do Mato Grosso do Sul, onde todas as rodovias analisadas encontram-se sob muito alto grau de ameaça climática; além disso, aumentam também os trechos com ameaça média e baixa (distribuídas ao longo do litoral brasileiro, perpassando as regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Norte), com redução de trechos rodoviários com ameaça climática devido ao impacto direto de altas temperaturas muito baixa.

5.5.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 65 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 65 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

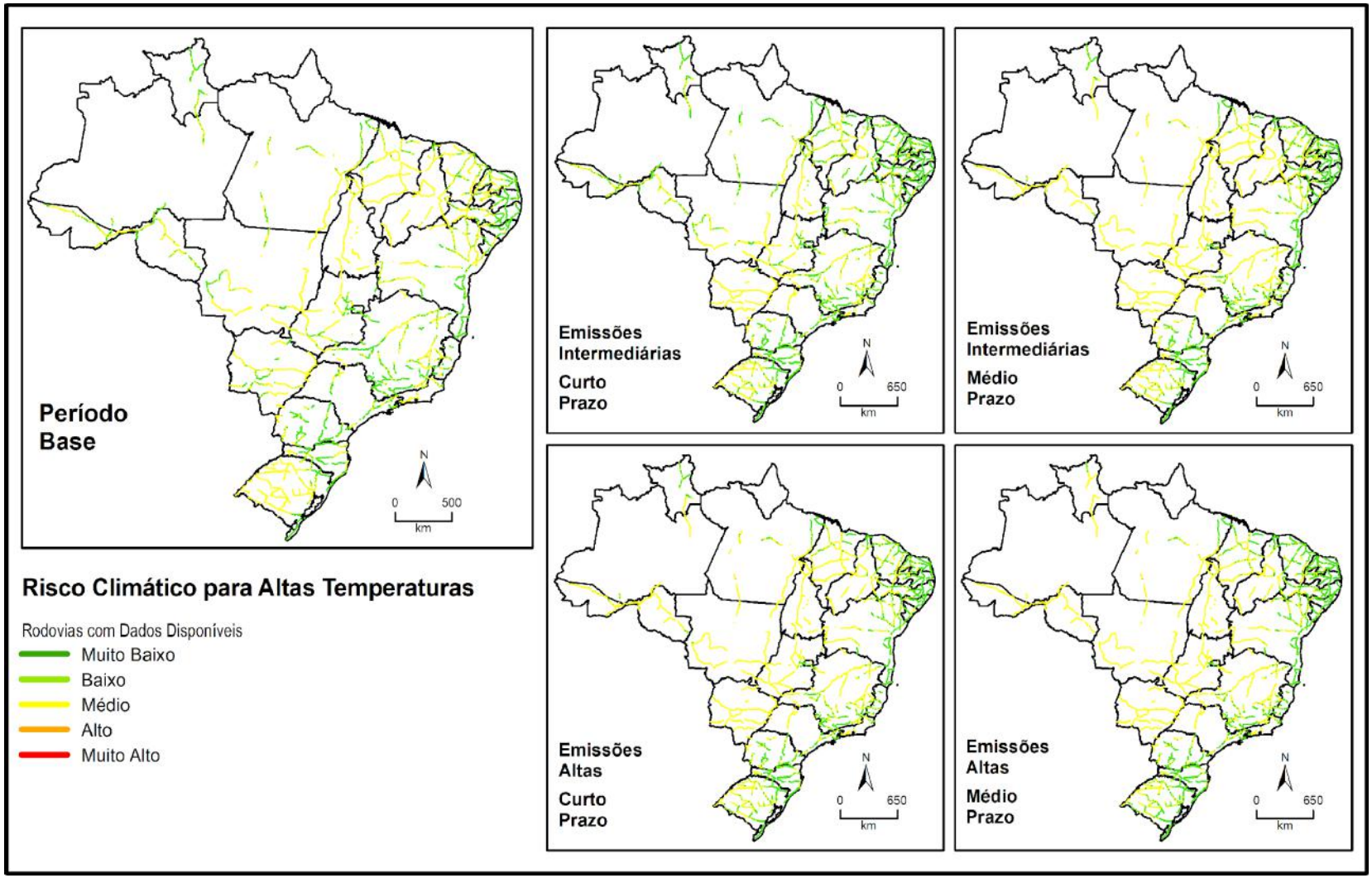
Observa-se uma redução dos trechos sob risco climático médio e um aumento de trechos sob baixo risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas; contudo, elas continuam seguindo o mesmo padrão de distribuição territorial verificado nos cenários e horizontes temporais anteriores (trechos sob médio risco distribuídos no interior do país, enquanto os sob baixo risco localizam-se mais ao litoral).

A ameaça climática, como componente do risco climático, no cenário de altas emissões e horizonte temporal de médio prazo, tem um aumento nas rodovias sob muito alto risco, médio e baixo devido ao impacto direto de altas temperaturas, enquanto ocorre uma redução dos trechos sob risco alto e muito baixo.

5.5.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

A Figura 66 abaixo sintetiza os mapas de risco climático da infraestrutura rodoviária federal brasileira devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Figura 66 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas.



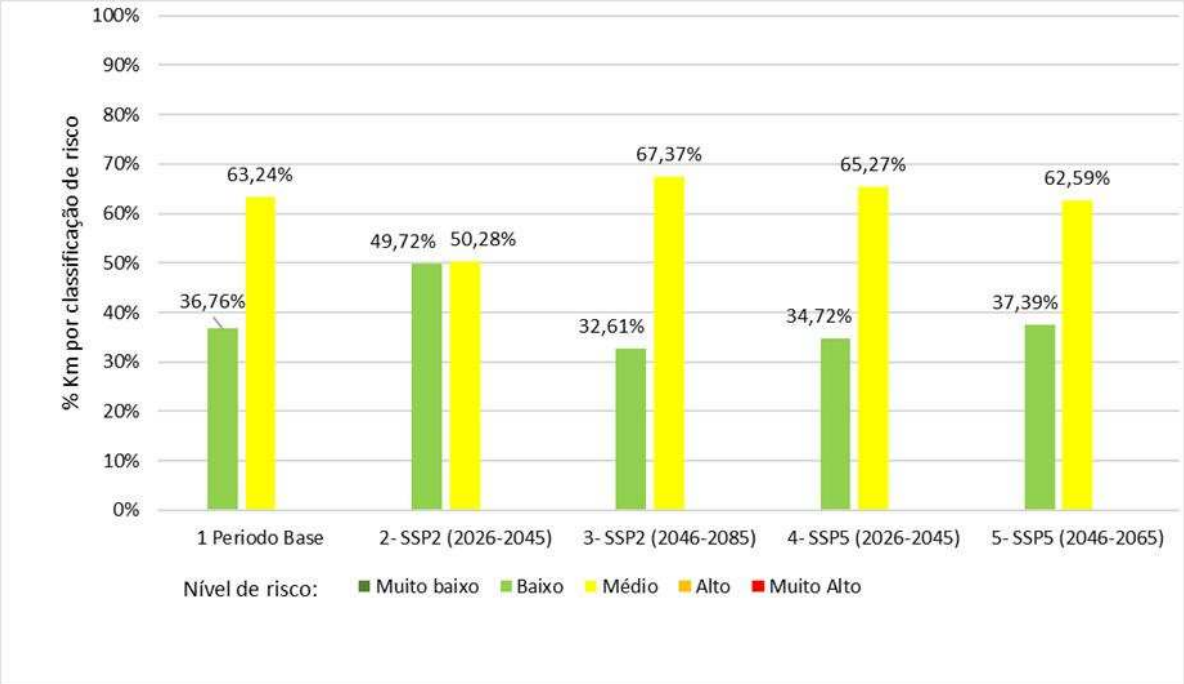
Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos rodoviários que apresentam os maiores IRCs devido ao impacto direto das altas temperaturas localizam-se no interior do país, distribuídos entre todas as regiões do Brasil, enquanto as rodovias localizadas no litoral do país, para todos os cenários e horizontes temporais considerados, encontram-se sob baixo risco de impacto. Destaque para o estado do Rio Grande do Sul, que tem suas rodovias sob risco médio para todos os cenários considerados.

Esse resultado se dá principalmente pela componente de ameaça climática com as temperaturas mais altas no interior do país e pela vulnerabilidade média que contribui especialmente na região Sul para os valores dos IRCs mais altos.

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os diferentes cenários e horizontes, temporais, apresenta-se a Figura 67, com a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Figura 67 - Distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido às altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 67, nota-se que as rodovias brasileiras se encontram sobre baixo e médio risco climático, com poucas variações entre o período base e os diferentes cenários e horizontes temporais, com exceção à variação acentuada entre o período base e o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo. Há uma predominância de trechos de rodovias com médio grau de risco climático.

Para o **período base**, 36,76% das rodovias encontram-se sob baixo risco, e 63,24% sob médio risco. Ao mudar para o **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) e horizonte temporal de curto prazo** (2026-2045), ocorre um aumento de trechos de rodovias sob baixo risco (49,72%) e uma redução dos trechos sob médio risco (50,28%). Mantendo-se o cenário de emissões e modificando-se o **horizonte temporal para médio prazo** (2046-2065), verifica-se um aumento dos trechos sob médio

risco (67,37%) e uma redução de trechos sob baixo risco (32,61%), sendo este o cenário onde se verificam os maiores percentuais de trechos rodoviários sob médio risco de impacto direto devido a altas temperaturas.

Para o **cenário de emissões altas (SSP-5)**, ocorre um decréscimo percentual dos trechos de rodovias sob médio risco (65,27% para o horizonte temporal de curto prazo e 62,59% para o horizonte temporal de médio prazo), e, por conseguinte, um crescimento dos trechos sob baixo risco (34,72% e 37,39%, respectivamente). Essa variação decorre principalmente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 12 apresenta o percentual dos trechos, por grau de **ameaça climática**, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 12 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para impactos diretos devido às altas temperaturas.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,01%	1,53%	32,70%	52,37%	13,39%
SSP2 (2026-2045)	0,01%	3,41%	40,11%	51,65%	4,82%
SSP2 (2046-2065)	0,01%	2,46%	26,23%	45,17%	26,13%
SSP5 (2026-2045)	0,01%	2,57%	27,65%	46,29%	23,48%
SSP5 (2046-2065)	0,01%	3,80%	28,37%	40,21%	27,61%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 12, observa-se o aumento da ameaça climática para o cenário SSP-2 2026-2045 em relação ao período base em todos os graus analisados, com exceção do muito baixo, que não sofre alterações entre os cenários. Contudo, o percentual de trechos rodoviários sob ameaça climática baixa, média e alta diminuem no cenário SSP-2 2046-2065, ao passo que os trechos sob grau muito alta aumentam, atingindo 26,13%.

Nos cenários de emissões altas, ocorre um aumento progressivo dos trechos rodoviários sob ameaça baixa e média, com uma ligeira queda (SSP-5 2026-2045) e um novo crescimento (SSP-5 - 2046-2065) de trechos rodoviários sob ameaça alta e muito alta. Essas reduções se dão devido ao aumento no grau de ameaça alto e muito alto no SSP-2 no médio prazo e no SSP-5 nos dois horizontes temporais, ou seja, maior as emissões de Gases de Efeito Estufa e mais distante o horizonte temporal, maior a ameaça climática que chega a 27,61% no SSP5 no médio prazo.

6. Conclusão - Modo Rodoviário

Quanto ao **alagamento/inundação**, no período base, todas as rodovias têm grau de IRC muito baixo ou baixo, com exceção de alguns trechos no Pará e no Maranhão, além de partes de rodovias no litoral do Nordeste, as quais têm grau de risco climático médio. Variações quase imperceptíveis são encontradas nos cenários de emissões intermediárias nos horizontes de curto e médio prazos. Já nos cenários de emissões altas, ainda aparecem rodovias em Estados do Sul e Sudeste brasileiros como Rio de Janeiro,

São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No pior cenário (SSP-5 - 2046-2065), 84,06% se mantêm em grau baixo; contudo, se observa uma tendência de aumento dos trechos com grau médio, em função dos aumentos dos graus de ameaça climática.

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de **deslizamento**, em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo, estão localizadas nas Regiões Sul e Sudeste (Serra do Mar e Serra Geral), no Litoral do Nordeste e, sendo que na Região Norte, apenas a BR-230 (Altamira-Marabá), no Pará apresenta-se nesta situação. Cabe destacar que o IRC é fortemente afetado pela susceptibilidade ao deslizamento (relevo mais acidentado, entre outros fatores) no Sudeste e Sul (Serra do Mar e Serra Geral) e litoral dos estados de Pernambuco e Alagoas. De forma geral, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal, observa-se um padrão de pequena redução das extensões de rodovias sob baixo risco climático ao impacto de deslizamento e um aumento de tais extensões sob risco médio, . Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de **ameaça climática**. Isso se deve ao aumento das áreas de médio grau de ameaça entre o período base e o cenário de altas emissões (SSP-5) para o horizonte de médio prazo (2046-2065) para praticamente toda a Região Sul e para os estados de Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás e litoral, que corresponde a BR-101.

Quanto ao impacto relacionado à **erosão**, que tem forte relação com o uso do solo, os trechos com IRC mais significativos se concentram nas rodovias no Pará, em rodovias localizadas em Estados do Sul e em trechos rodoviários dos Estados do Nordeste, em especial no litoral (BR-101), que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo; não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a erosão alto ou muito alto. Além disso, pode ser observado o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro, em função do aumento do grau de risco de impacto da **ameaça climática**, quando se compara os cenários de intermediárias e altas emissões com o período base. Nesses cenários, outros trechos de IRC médio que podem ser observados no litoral da Região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

O IRC devido ao impacto de **queimada/incêndio** para o período base é baixo para 68,12% do território brasileiro, com 31,87% das áreas com risco médio no interior do Nordeste brasileiro (Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte e sertão da Bahia) e parte do Norte (Tocantins e Pará). Conforme modifica-se o cenário para emissões intermediárias, os trechos de rodovias sob baixo risco diminuem, se considerado o horizonte temporal de curto prazo, reduzindo progressivamente para o horizonte temporal de médio prazo, e para o cenário de emissões altas, de curto e longo prazos. Assim, os trechos sob risco médio aumentam na mesma proporção.

Esse aumento de trechos rodoviários de grau médio ocorre, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, em que os impactos das **ameaças climáticas** crescem com horizonte temporal e cenários de emissões. Isso faz com que ocorra um equilíbrio entre trechos de baixo e médio graus no SSP-5 (2046-2065) com 50,54% dos trechos com baixo grau de risco e 49,45% com médio grau.

Em relação aos **impactos diretos devido às altas temperaturas**, nota-se que, diferente do que ocorre com os demais impactos analisados, já no período base há um predomínio de trechos com grau médio (63,24%). Isso ocorre porque aproximadamente 60% dos trechos apresentam grau alto ou muito alto de ameaça no período base e nos cenários analisados. Os trechos rodoviários que apresentam os maiores IRCs devido ao impacto direto das altas temperaturas localizam-se no interior do país, distribuídos em todas as Regiões do País, enquanto as rodovias localizadas no litoral do país,

para todos os cenários e horizontes temporais considerados, encontram-se sob baixo risco de impacto. No Sul do país, destaca-se o estado do Rio Grande do Sul, que tem suas rodovias sob médio risco para todos os cenários considerados.

Esse resultado se dá principalmente pela componente de **ameaça climática** com as temperaturas mais altas no interior do País e pela vulnerabilidade média que contribui especialmente na Região Sul para os valores dos IRCs mais altos. Cabe destacar ainda que, considerando o cenário de emissões intermediárias (SSP-2), os trechos com grau médio de risco caem para 50,28% em curto prazo (2026-2045) e sobem para 67,37% em médio prazo (2046-2065) em comparação ao período base. Já para o cenário de altas emissões (SSP-5), os trechos com médio risco representam 65,25% em curto prazo (2026-2045) e 62,59% em médio prazo (2046-2065).

Tudo que foi exposto indica que quando se analisa os impactos da mudança climática na infraestrutura rodoviária, os graus de risco de impacto não se repetem nas regiões e que, no geral, são baixos ou médios. Isso se deve fundamentalmente ao fato de que a **exposição** (Nível 2) apresenta grau baixo em todo o país, exceto em alguns pequenos trechos onde o VMDA de veículos é muito elevado, sendo que este é o indicador que mais interfere nos graus de risco de impacto da exposição.

Outro componente que precisa ser destacado é a vulnerabilidade, composta por dois subíndices, a sensibilidade biofísica e a sensibilidade da infraestrutura. O subíndice de **sensibilidade biofísica** foi calculado a partir de bases específicas para os impactos devido ao alagamento, deslizamento, erosão e queimada/incêndio, exceto para altas temperaturas, que, por se tratar de um impacto direto na infraestrutura, não considerou esse subíndice em seus cálculos. Já a **sensibilidade da infraestrutura** se mantém a mesma para todos os impactos e cenários porque não se conseguiu dados para diferenciar a sensibilidade da infraestrutura entre os vários impactos analisados e porque não foram feitas modelagens para o desenvolvimento futuro da infraestrutura.

Além disso, em termos de **ameaça climática**, o que se destacam são os impactos diretos devido às altas temperaturas, que no pior cenário (SSP-5 – 2046-2065) chega a 27% de trechos com grau muito alto e 40% de grau alto em relação a ameaça climática. Outro ponto de atenção são as queimadas, onde os trechos de alto risco chegam a 41% e de muito alto risco a 7%, conforme pode ser visualizado no mapa de ameaças.

Por fim, recomenda-se que novos estudos sobre o risco climático das rodovias brasileiras sejam desenvolvidos. Por exemplo, pode-se realizar ajustes nos mapas das componentes de risco, principalmente, por meio do tratamento de *outliers* da exposição (fortemente impactada pelo VMDA) e da vulnerabilidade (impactada pelo peso da carga dos veículos que trafegam nas rodovias). Além disso, podem ser realizadas análises específicas de risco climático sobre os trechos rodoviários que ainda se encontram em fase de planejamento (ou seja, não construídas).

Outra oportunidade de estudo futuro consiste na realização de análises mais específicas para determinados *hotspots*, que seriam aquelas áreas de rodovias ou até rodovias específicos que nesse estudo foram identificadas com maiores graus de risco de impacto, já no período base, ou cujo risco aumente considerando-se os diferentes cenários e horizontes temporais. Ao focar em rodovias específicas, futuros estudos podem incluir bases mais robustas sobre a infraestrutura existente, permitindo uma análise mais aprofundada dos riscos. Inclusive possibilitando a inclusão de indicadores de capacidade adaptativa, em falta nesse projeto, em virtude da necessidade de representação de todo o território brasileiro que apresenta dimensões continentais. A identificação

e inclusão de novos indicadores para rodovias específicas pode demandar um aprimoramento e adaptação das cadeias de impacto e da identificação dos fatores de risco climático porque em função dos contextos regionais ou locais podem surgir novos elementos diferenciados que contribuem para o risco climático.

7. Referências Bibliográficas

AZEVEDO, Joel Solon Farias. Técnica Delphi um Guia Passo a Passo. Disponível em: <http://www.joelazevedo.com.br/?p=1900>. Acesso em: 21/ 01/2022.

BARRETO, Naurinete JC et al. Multivariate intraseasonal rainfall index applied to South America. **Meteorological Applications**, v. 26, n. 4, p. 521-527, 2019.

BARRETO, Naurinete JC et al. Maximum covariance analysis to identify intraseasonal oscillations over tropical Brazil**. Climate Dynamics**, v. 49, n. 5, p. 1583-1596, 2017.

BLACKWOOD, L., RENAUD, F. G., GILLESPIE, S.: **Nature-based solutions as climate change adaptation measures for rail infrastructure**. Nature-Based Solutions, p. 100013, 2022.

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. **UK Climate Change Risk Assessment Evidence Report: Chapter 4, Infrastructure**. Report prepared for the Adaptation Sub-Committee of the Committee on Climate Change, London, 2016.

DAWSON, A. Anticipating and Responding to Pavement Performance as Climate Changes. **Green Energy and Technology**, 127–157. 2014.

EVANS, C.; TSOLAKIS, D.; NAUDE, C. **Framework to address the climate change impacts on road infrastructure assets and operations**. ARRB Group: Melbourne, 2009. Disponível em: https://www.australasiantransportresearchforum.org.au/sites/default/files/2009_Evans_Tsolakis_Naude.pdf Acesso em: 05 maio 2021.

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

HEINZ-PETER, B. Risks and consequences of wards on railway infrastructure. **Journal of Polish Safety and Reliability Association**, v. 8(1), p. 1-11, 2017.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B. et al. (eds.)]. Cambridge & New York, 2014.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S.

PILECKA, E., *et al*: **Analysis of a Landslide on a Railway Track Using Laser Scanning and FEM Numerical Modelling. Applied Sciences**, v. 12, n. 15, p. 7574, 2022.

Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844, 2022.

MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z. R. J., LEWIS, J., GIDDEN, M. J., VOGEL, E., FREUND, M., BEYERLE, U., GESSNER, C., NAUELS, A., BAUER, N., CANADELL, J. G., DANIEL, J. S., JOHN, A., KRUMMEL, P. B., LUDERER, G., MEINSHAUSEN, N., MONTZKA, S. A., RAYNER, P. J., REIMANN, S., SMITH, S. J., van den

BERG, M., VELDERS, G. J. M., VOLLMER, M. K., & WANG, R. H. J.: **The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500**, Geosci. Model Dev., 13, 3571–3605, 2020. MInfra. **PNL - Plano Nacional de Logística. 2021**. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf

MInfra. **PNL - Plano Nacional de Logística. 2021**. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf

MInfra - Ministério da Infraestrutura. Rodovias Federais - Informações Gerais - Sistema Federal de Viação (atualização: abril. 2021). Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/rodovias-federais/rodovias-federais-informacoes-gerais-sistema-federal-de-viacao. Acesso em: maio. 2021.

MNDAWE, M. B.; NDAMBUKI, J. M.; KUPOLATI, W. K.; BADEJO, A. A.; DUNBAR, R. 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, 2015.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation: Special Report 290. Washington, D.C.: **Transportation Research Board**, 2008.

NEMRY, F.; DEMIREL, H. **Impacts of climate change on transport: a focus on road and rail transport infrastructure**s. Luxembourg: Publications Office, 2012.

PALIN, E. J. *et al.*: **Implications of climate change for railway infrastructure**. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 12, n. 5, p. e728, 2021.

RATTANACHOT, W.; WANG, Y.; CHONG, D.; SUWANSAWAS, S. Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. **Transport Policy**, 41, 159–166, 2015.

SCHUSTER, R. L., HIGHLAND, L.: **Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the western hemisphere**. Denver (CO): US Department of the Interior, US Geological Survey, 2001.

de SHERBININ, A., BUKVIC, A., ROHAT, G., *et al.* **Climate vulnerability mapping: A systematic review and future prospects**. WIREs Climate Change, 2019.

SONG, Y.; WRIGHT, G.; WU, P.; THATCHER, D.; MCHUGH, T.; LI, Q.; WANG, X. Segment-Based Spatial Analysis for Assessing Road Infrastructure Performance Using Monitoring Observations and Remote Sensing Data. **Remote Sensing**, 10(11), 1696, 2018.

WILKS, Daniel S. Comparison of probabilistic statistical forecast and trend adjustment methods for North American seasonal temperatures. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 4, p. 935-949, 2014.

WORLD BANK. **Climate and Disaster Risk Screening - Sector Screening Guidance note Transportation sector [s. l.]**, 2017. Disponível em: https://climatescreeningtools.worldbank.org/sites/default/files/guidance_note/TRANSPORTATION_Guidance_Note.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

8. Referências da Base de Dados Cartográficos

[1] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2021. Base de dados da malha rodoviária federal do Sistema Nacional de Viação (SNV). Formato *shapefile*. Base cedida para uso do presente estudo. Acesso em 2021.

[2] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2020. Base de dados dos Limites das Unidades Federativas do Brasil. Formato *shapefile*. Acesso em abril de 2021. Link de acesso: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html?edicao=30138&t=acesso-ao-produto

[3] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018. Obras de Arte Especiais. Acesso pelo Visualizador de Informações Geográficas (VGEO) em outubro de 2021. Link de acesso: http://servicos.dnit.gov.br/vgeo/

[4] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2020. Volumetria Média Diária Anual. Planilha com dados de 2020 e georreferenciada pelo código SNV de cada trecho rodoviário. Acesso em 2021.

[5] Ministério da Infraestrutura (MINFRA), 2021. Base de dados da malha ferroviária nacional. Formato s*hapefile*. Base cedida para uso do presente estudo. Acesso em 2021.

[6] Empresa de Planejamento e Logística (EPL), 2021. Plano Nacional de Logística 2035. Base de dados em formato *shapefile*. Utilização do cenário base para 2017. Acesso em outubro de 2021. Link de acesso: https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl

[7] Agência Nacional de Águas (ANA), 2014. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações. Base de dados em formato *shapefile*. Superintendência de Usos Múltiplos e Eventos Críticos (SUM). Acesso em Outubro de 2021.

[8] Embrapa Solos, 2020. Mapa de Erodibilidade dos Solos à Erosão Hídrica do Brasil. Base de dados em formato *shapefile*. Acesso em outubro de 2021.

[9] Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2010. Mapa de Declividade do Brasil. Base de dados em formato raster (tiff). Acesso em maio de 2021.

[10] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2018. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra. Base de dados em formato *shapefile*. Acesso em maio de 2021. Link de acesso: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=downloads

[11] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2019. Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil. Base de dados em formato *shapefile*. Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil. Acesso em maio de 2021.

[12] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018. Índice de Condição de Superfície. Acesso pelo Visualizador de Informações Geográficas (VGEO) em outubro de 2021. Link de acesso: http://servicos.dnit.gov.br/vgeo/

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 5 - Análise de Risco Climático

Dezembro de 2022

Consultoria: Associação GITEC/COPPE

Comitê gestor:

REVISÕES

DATA	AUTOR	VERSÃO
07/10/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	1.0
21/10/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	2.0
08/11/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	3.0
30/11/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	4.0
08/12/2022	ASSOCIAÇÃO GITEC/COPPE	5.0 (FINAL)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias..... 11
Figura 2 - Fatores que contribuem para o Risco Climático. 14
Figura 3. Hierarquia dos indicadores e subíndices..... 15
Figura 4 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos..... 20
Figura 5 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o período base. 21
Figura 6 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 23
Figura 7 Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 24
Figura 8 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)..... 25
Figura 9 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065). ... 26
Figura 10 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de deslizamentos..... 28
Figura 11 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 29
Figura 12 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a erosão..... 32
Figura 13 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o período base. 33
Figura 14 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). 35
Figura 15 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065). 36
Figura 16. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)..... 38
Figura 17 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065)..... 39
Figura 18 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão..... 41
Figura 19 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados..... 42
Figura 20 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático na infraestrutura ferroviária devido ao impacto direto de altas temperaturas..... 44
Figura 21. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o período base. 45
Figura 22 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). 47
Figura 23 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065). 48

Figura 24 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045). 49
Figura 25. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065). 51
Figura 26 - Síntese: Mapa de Risco Climático de impacto a infraestrutura devido a altas temperaturas. 53
Figura 27 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados. 54
Figura 28 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação. 60
Figura 29 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o período base. 61
Figura 30- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 63
Figura 31- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 64
Figura 32- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045). 65
Figura 33- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). 66
Figura 34 - Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação. 67
Figura 35 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação para cada um dos cenários analisados. 68
Figura 36 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento 70
Figura 37 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o período base. 71
Figura 38 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 73
Figura 39 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 74
Figura 40 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045). 75
Figura 41- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). .. 76
Figura 42- Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de deslizamento 77
Figura 43 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 78
Figura 44 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a erosão/assoreamento. 80
Figura 45 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o período base. 81

Figura 46. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 83
Figura 47- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 84
Figura 48 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)..... 85
Figura 49 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065). 86
Figura 50 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão. 87
Figura 51. Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para cada um dos cenários analisados..... 88
Figura 52 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada/ incêndio. 89
Figura 53 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à queimada, para o período base. 91
Figura 54 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 92
Figura 55 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 94
Figura 56 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)..... 95
Figura 57 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 5-2046-2065). 96
Figura 58 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de queimada. 97
Figura 59 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para cada um dos cenários analisados. 98
Figura 60 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas. 100
Figura 61 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o período base. 101
Figura 62 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 103
Figura 63 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 104
Figura 64 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045). 105
Figura 65 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065). 107
Figura 66 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas..... 108
Figura 67 - Distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido às altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados. 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Situação das ferrovias federais..... 19
Tabela 2 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados..... 30
Tabela 3 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento, para cada um dos cenários analisados. 31
Tabela 4 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados..... 43
Tabela 5 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados..... 43
Tabela 6 - Quilometragem (em %) de ferrovias, por graus de ameaças climáticas, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados..... 55
Tabela 7 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados. 56
Tabela 8 - Quilometragem (em %) de rodovias, por graus de ameaças climáticas, para cada um dos cenários analisados para alagamento/inundação. 68
Tabela 9 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas em cada um dos cenários analisados para deslizamento. 79
Tabela 10 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para erosão..... 89
Tabela 11 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para queimada/ incêndios..... 99
Tabela 12 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para impactos diretos devido às altas temperaturas. 110

LISTA DE SIGLAS

AbE	Adaptação baseada em Ecossistemas
ACM	Análise de Máxima Covariância
AR5	*IPCC Fifth Assessment Report* (em português, Quinto Relatório de Avaliação do IPCC)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BIRD	Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento
DER/DF	Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFPO	Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
FCA	Ferrovia Centro Atlântica S.A.
FI	Fator de Impacto
FWD	*Falling Weight Deflectometer*
FTC	Ferrovia Tereza Cristina
FTL	Ferrovia Transnordestina Logística
GIZ	*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*
IGG	Índice de Gravidade Global
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT	*Internet of Things*
IRC	Índice de Risco Climático
IRI	*International Roughness Index*
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (em português, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MInfra	Ministério da Infraestrutura
MRS	MRS Logística S.A.
MRV	Mensuração, Reporte e Verificação
OAE	Obras de Arte Especiais
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNL	Plano Nacional de Logística

PROADAPTA	Projeto Apoio ao Brasil na Implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima
RMN	Rumo Malha Norte S.A.
RMO	Rumo Logística
RMP	Rumo Malha Paulista S.A.
RMS	Rumo Malha Sul S.A.
SAM	Sistema de Administração da Manutenção
SBN	Soluções Baseadas na Natureza
SGO	Sistema de Gestão de Obras de Artes Especiais
SSP	*Shared Socio-Economic Pathways*
TdR	Termo de Referência
TIC	Tecnologia de Informação e Comunicação
VLI	VLI Multimodal S.A.
VMA	Velocidade Máxima Autorizada

Índice

1. Introdução 11
2. Abordagem Metodológica 14
2.1. Normalização dos indicadores 16
2.2. Ponderação dos indicadores 16
2.3. Agregação dos indicadores 18
3. Modo Ferroviário 19
3.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 20
3.1.1 Período base | Impacto devido a deslizamentos 21
3.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 22
3.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 22
3.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 24
3.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 25
3.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 25
3.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 26
3.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a deslizamentos 27
3.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão 31
3.2.1 Período base | Erosão 33
3.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 34
3.2.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 34
3.2.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 36
3.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 37
3.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 37
3.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 39
3.2.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto de erosão 40
3.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 44
3.3.1. Período base | Altas temperaturas 45
3.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 46
3.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 46
3.3.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 48
3.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 49
3.3.3.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 49
3.3.3.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 50
3.3.4 Análise do Risco Climático devido ao Impacto Direto de Altas temperaturas 52
4. Conclusão - Modo Ferroviário 56
5. Modo Rodoviário 59
5.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de alagamento/inundação 60

5.1.1 Período base | Impacto devido a alagamento/inundação 61
5.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 62
5.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 62
5.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 63
5.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 64
5.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 65
5.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 66
5.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a alagamento/inundação 67
5.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 69
5.2.1 Período base | Impacto devido ao deslizamento 71
5.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 72
5.2.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 72
5.2.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 73
5.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 74
5.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 75
5.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 75
5.2.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto de deslizamento 76
5.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão 79
5.3.1 Período base | Erosão 81
5.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 82
5.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 82
5.3.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 83
5.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 85
5.3.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 85
5.3.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 86
5.3.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a erosão 87
5.4. Índice de Risco Climático devido ao impacto de queimada/ incêndio 89
5.4.1 Período base | Queimada 90
5.4.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 92
5.4.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 92
5.4.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 93
5.4.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 95
5.4.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 95
5.4.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 96
5.4.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a queimada 97
5.5. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 99
5.5.1 Período base | Impacto direto de altas temperaturas 101

5.5.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) 102
5.5.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 102
5.5.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 104
5.5.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5) 105
5.5.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045) 105
5.5.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065) 106
5.5.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas 107
6. Conclusão - Modo Rodoviário 110
7. Referências Bibliográficas 114
8. Referências da Base de Dados Cartográficos 116

Anexos:

- Anexo I. Mapas (A3)

1. Introdução

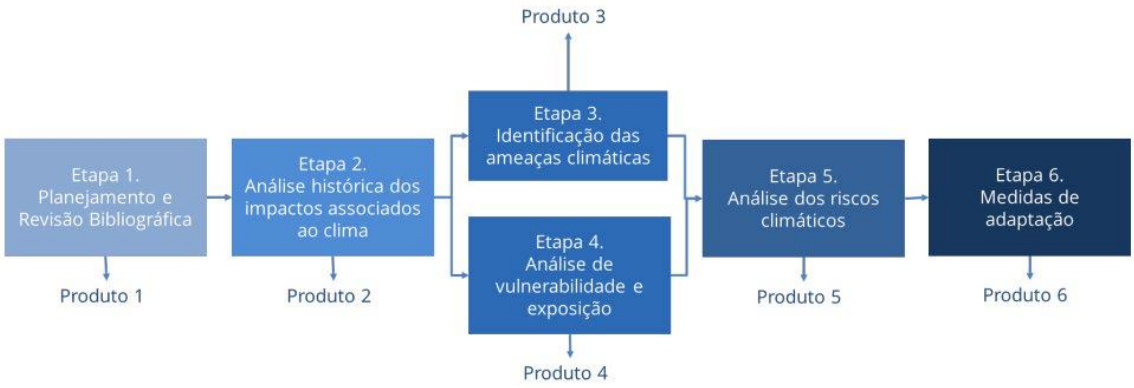
O presente relatório é parte do estudo "Levantamento de impactos e riscos climáticos sobre a infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) existente e projetada" (ou "Estudo AdaptaVias"), que tem como objetivo fornecer informações que sirvam como subsídio para o desenvolvimento de estratégias de adaptação à mudança do clima para o setor, no âmbito do Memorando de Entendimento celebrado entre o Ministério da Infraestrutura (MInfra) com a *Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH no Brasil, que conta com o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e é executado pela parceria formada entre a GITEC Brasil, GITEC-IGIP GmbH e o Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, no Projeto "Apoio ao Brasil na Implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima - PROADAPTA".

Esse estudo, conforme apresentado no Produto 1 (Parte 1 - Plano de Trabalho), está dividido em 6 (seis) etapas:

- **Etapa 1** - Consiste no levantamento de dados e estudos existentes e descreve a lógica empregada para o planejamento do estudo e a realização da revisão bibliográfica;
- **Etapa 2** - Busca identificar os impactos do clima na infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) brasileira, com base em análise de dados e séries históricas;
- **Etapa 3** - Visa identificar as ameaças climáticas aplicáveis à realidade da infraestrutura de transporte terrestre brasileira;
- **Etapa 4** - Consiste na identificação e na análise das vulnerabilidades existentes e do grau de exposição da infraestrutura de transporte terrestre brasileira;
- **Etapa 5** - Visa analisar o risco climático, com o detalhamento de suas informações para munir os tomadores de decisão de dados atualizados;
- **Etapa 6** - É uma etapa de fechamento, onde serão elencadas as medidas de adaptação necessárias, considerando-se os diferentes impactos e as ameaças, ou seja, as respostas a serem dadas diante dos cenários elaborados pelo consultor externo contratado pela GIZ.

O fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxo metodológico do Estudo AdaptaVias.



Fonte: Elaboração própria (2021).

O **PRODUTO 5 (Análise dos riscos climáticos)**, resultante da Etapa 5, apresentado neste relatório, visa analisar o risco climático para a infraestrutura federal de transporte terrestre (rodoviário e ferroviário) brasileira, considerando aspectos operacionais e estruturais. A presente etapa buscou responder às seguintes perguntas norteadoras:

Perguntas norteadoras da Etapa 5

5.1. "Qual é o nível de risco climático (ameaça x exposição x sensibilidade x capacidade adaptativa) da infraestrutura de transporte terrestre federal brasileira?";

5.2. "Quais são as regiões e áreas com maior nível de risco climático para cada tipo de modal?";

5.3. "Quais são as regiões onde os riscos tendem a aumentar ou diminuir no futuro?".

Para avaliar o risco de impacto climático na **infraestrutura ferroviária** brasileira foram priorizados três impactos da mudança do clima na infraestrutura:

- Impactos devido a deslizamentos;
- Impactos devido a erosão; e
- Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Os **deslizamentos de terra**, um dos impactos biofísicos mais relevantes nas ferrovias, podem ser acentuados devido a fatores ecológicos (vegetação suprimida em áreas de regulação hídrica e estabilização de taludes) e fatores de engenharia (impermeabilização do solo e a drenagem inadequada, que direcionam a água para locais suscetíveis a movimentos de massa e cortes em taludes por infraestrutura linear). Esses fatores são, em muitos casos, fruto da redução de atividades de fiscalização, manutenção e planejamento. Os deslizamentos podem causar uma série de danos em elementos da infraestrutura ferroviária; entre eles, podemos citar dano no sistema de drenagem ou até o colapso da plataforma (SCHUSTER & HIGHLAND, 2001; PILECKA *et al.*, 2022).

Já na **erosão**, os impactos tendem a ser agravados por sensibilidades na superfície vegetal degradada e em áreas com erosão não tratada. Além disso, destaca-se que a falta de capacidades adaptativas como práticas de proteção de talude inexistentes ou ineficazes, frequência de manutenção das ferrovias reduzida e falta de controle do uso e ocupação do solo são fatores agravantes para intensificação dos impactos, como o aumento das enxurradas, colmatação do lastro, desguarnecimento do lastro (BLACKWOOD *et al.*, 2022) e até mesmo colapso da plataforma ferroviária (PALIN, 2021).

Em relação aos potenciais impactos das altas temperaturas e de ondas de calor nas ferrovias (**expansão térmica**), podem ser mencionados: (i) Flambagem do trilho (empenamento), gerando defeitos de geometria e comprometendo o uso da via, sendo mais suscetível no trilho soldado contínuo do que no trilho de junta (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; NEMRY e DEMIREL, 2012; DAWSON et al., 2016; HEINZ-PETER, 2017; WORLD BANK, 2017); (ii) Alterações na catenária (rede de alimentação elétrica aérea) devido a variação na cota do terreno em torno das fundações dos postes de fixação (WORLD BANK, 2017; HEINZ-PETER, 2017); e (iii) Superaquecimento de equipamentos elétricos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008).

Para avaliação da **infraestrutura rodoviária**, por sua vez, foram priorizados cinco impactos da mudança do clima na infraestrutura:

- Impactos devido a alagamentos e inundações;

- Impactos devido a deslizamento;
- Impactos devido a erosão;
- Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas; e
- Impactos devido a queimadas.

Alagamentos e inundações são desencadeados quando o volume precipitado de chuvas é elevado em um pequeno intervalo de tempo e/ou ocorre um longo período de precipitação. Uma série de fatores pode contribuir para esses impactos como, por exemplo, a drenagem subdimensionada e entupida devido à falta de planejamento e manutenção, a impermeabilidade do solo e a vegetação degradada, que reduzem o potencial de infiltração de água no solo. Os elementos de infraestrutura rodoviária expostos a alagamentos e inundações (plataforma, pontes, viaduto, drenagem e outros) podem sofrer diminuição da vida útil devido a danos prematuros de materiais e estrutura (MNDAWE *et al*., 2015; RATTANACHOT *et al*., 2015), porque o método construtivo e o material usado em sua construção não estão adequados, ou por falta de manutenção, de diagnósticos e de conhecimento aprofundado, além da ausência de normas e processos que orientem as construções para melhor suportar a ocorrência de eventos climáticos extremos .

Os **deslizamentos** podem ocorrer quando há alto volume de precipitação em pouco tempo ou dias consecutivos de chuva. Além desses eventos climáticos, fatores ecológicos - como a vegetação suprimida em lugares onde poderia contribuir para a regulação hídrica e a estabilização de taludes - , bem como fatores de engenharia - como a impermeabilização do solo e drenagem inadequada, são fatores que aumentam o risco de deslizamentos. Em muitos casos, essa situação é fruto da redução de atividades de fiscalização, manutenção e planejamento. Os deslizamentos podem causar uma série de danos em elementos da infraestrutura rodoviária, como a ruptura de taludes e de estruturas de contenção, e até mesmo colapso de corpo estradal (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009; NEMRY e DEMIREL, 2012; RATTANACHOT *et al*., 2015).

Os danos e prejuízos na infraestrutura rodoviária devido a **erosão** são principalmente desencadeados por chuvas extremas, tanto de altos volumes pluviométricos, quanto de dias consecutivos de chuva. A erosão é um processo natural que está sendo agravado por sensibilidades ambientais, como a vegetação degradada ou inadequada e a topografia favorável aos processos erosivos. Essas sensibilidades têm como agentes causais, em muitos casos, os desafios de gestão, planejamento e manejo. Os vários elementos da infraestrutura rodoviária expostos às diferentes formas de erosão e seus impactos intermediários, tal como o assoreamento, podem sofrer danos significativos ou até o colapso da estrutura (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; NEMRY e DEMIREL, 2012; DAWSON *et al*., 2016; WORLD BANK, 2017).

Incêndios/queimadas ocorrem em virtude de ameaças climáticas como altas temperaturas máximas e médias, dias consecutivos sem precipitação e ondas de calor. Esses impactos biofísicos podem ser intensificados por meio de sensibilidades, como vegetação degradada, uso indevido do solo, infraestrutura rodoviária frágil, qualidade e tipo dos materiais empregados na execução das obras. Além disso, a inexistência ou a inadequação dos planos de monitoramento de incêndios/queimadas, a reduzida fiscalização do uso e ocupação do solo e a não recuperação de cobertura vegetal de áreas degradadas demonstram ausência de capacidades adaptativas, que contribuem para o aumento da vulnerabilidade da infraestrutura rodoviária. Esse impacto biofísico pode acarretar uma série de danos e prejuízos, como problemas de instabilidade na infraestrutura e danos em dispositivos de

operação (sinalização vertical e horizontal), painéis de mensagem variável - PMV e câmeras de monitoramento (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009).

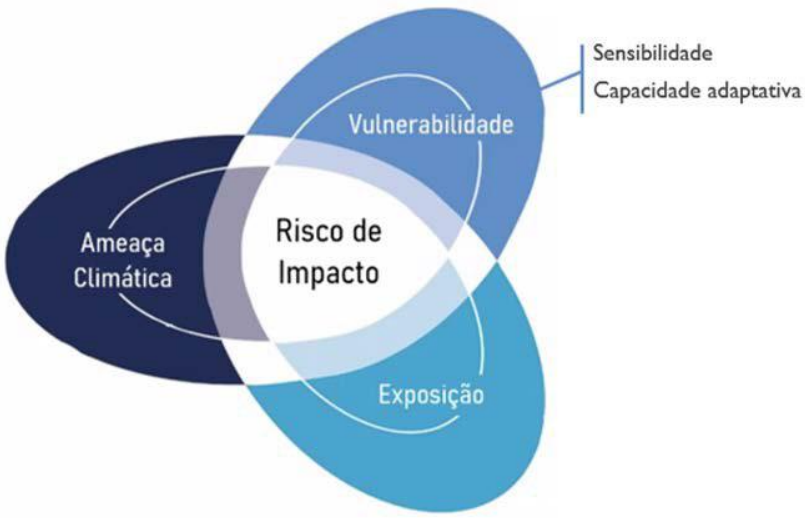
Por fim, tem-se os **impactos diretos devidos às altas temperaturas,** que são intensificados por sensibilidades como infraestrutura rodoviária frágil, qualidade e tipo dos materiais empregados na construção, e por deficiências nas capacidades adaptativas, como falta de diagnóstico e monitoramento. Isso pode acarretar danos e prejuízos à infraestrutura rodoviária como expansão térmica em juntas de dilatação de pontes e superfícies pavimentadas, principalmente de concreto de cimento Portland (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; EVANS *et al*., 2009) e danos à integridade do pavimento em virtude de deflexões elevadas, fissuras transversais, redução da taxa de deformação do pavimento asfáltico e deformação permanente (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2008; DAWSON, 2014; DAWSON *et al*., 2016; SONG *et al*., 2018).

Diante do que foi exposto, há necessidade de que sejam realizados estudos sobre a Análise de Risco Climático para cada um dos impactos biofísicos ou impacto direto na infraestrutura de transporte rodoviário. Para cada um dos impactos intermediários foram elaborados Índices de Risco Climático (IRC) para três cenários: período base (1981-2000), cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) e cenário de emissões altas (SSP5-8.5) e dois horizontes temporais (curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065)). O detalhamento metodológico é apresentado a seguir.

2. Abordagem Metodológica

A base metodológica utilizada na Etapa 5 - Análise dos Riscos Climáticos foi fundamentada no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) e corroborada pela metodologia proposta por GIZ, EURAC & UNU-EHS (2018) e pelo AR6 (IPCC, 2022). Tal abordagem considera o risco climático como função da ameaça climática, exposição da infraestrutura e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa) (ver Figura 2).

Figura 2 - Fatores que contribuem para o Risco Climático.



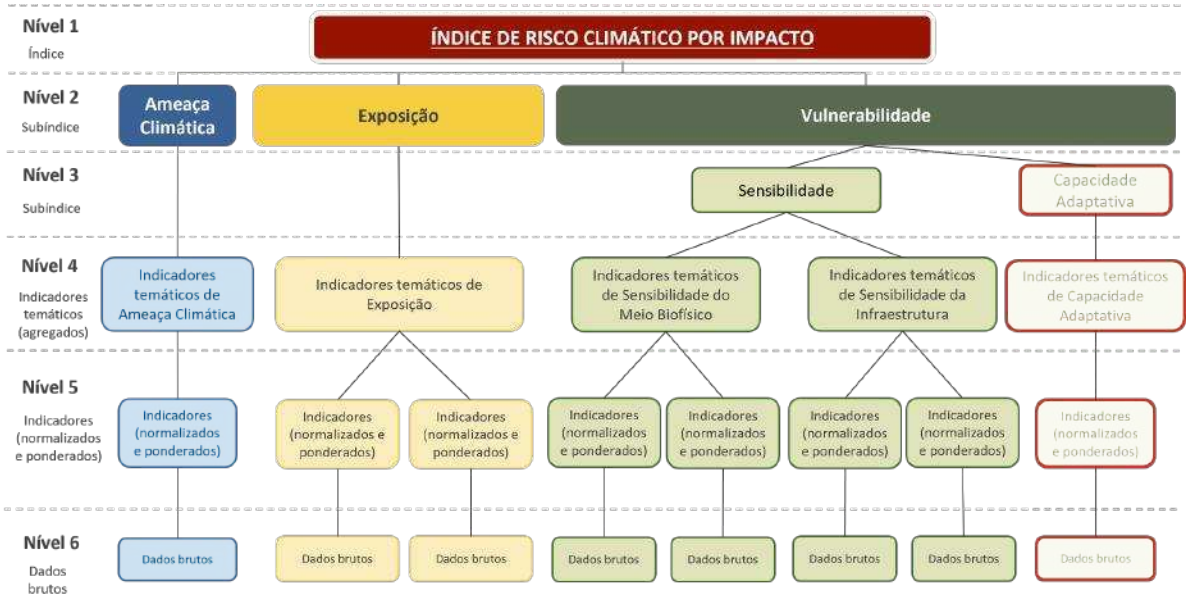
Fonte: Adaptado de IPCC (2014).

Após a identificação das ameaças climáticas e seus indicadores climáticos (Produto 3) e da análise de vulnerabilidade e de exposição e seus indicadores (Produto 4), este produto apresenta a metodologia

e os resultados da agregação para composição do Índice de Risco Climático (IRC). Desse modo, a abordagem metodológica do presente produto consiste principalmente na descrição da forma de normalização, ponderação e agregação dos indicadores e subíndices dos níveis, até chegar ao IRC.

A identificação e a seleção de indicadores nos Produtos 3 e 4 incluiu a verificação quanto à especificação técnica e determina quais indicadores melhor descrevem a ameaça climática, a exposição e a vulnerabilidade, seguindo a lógica hierárquica dos vários níveis, até chegar ao IRC. Ou seja, para o cálculo do IRC deve-se percorrer todos os níveis da estrutura hierárquica relacional utilizada para a construção de indicadores e índices, em ordem decrescente (do 6 ao 1), representada na Figura 3 a seguir. Cabe destacar que no presente relatório as análises se limitaram aos níveis 1, 2 e 3, uma vez que os demais níveis já foram analisados em produtos anteriores.

Figura 3. Hierarquia dos indicadores e subíndices.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Figura 3, nota-se que:

- no Nível 6 (dados brutos), são apresentadas as origens de cada dado utilizado para compor o risco climático final;
- no Nível 5, são expostos os indicadores, normalizados e ponderados, para cada um dos componentes do risco;
- no Nível 4, tem-se os indicadores temáticos separados em indicadores de ameaça, de exposição, de sensibilidade do meio biofísico e de sensibilidade da infraestrutura;
- no Nível 3, os indicadores temáticos de sensibilidade são agregados em um subíndice de sensibilidade; cabe destacar que os Níveis 4 e 3 são iguais devido à ausência de indicadores para representar a capacidade adaptativa;
- o Nível 2 é composto pelos subíndices de vulnerabilidade, exposição e ameaça climática; e
- no Nível 1, tem-se, por fim, o Risco Climático do Impacto analisado.

Todos os processos metodológicos descritos a seguir foram realizados para ambos os modos analisados, ferroviário e rodoviário, para os impactos intermediários priorizados. Para cada impacto de cada modo foram desenvolvidos os Índices de Risco Climático para:

- **Período base:** considera os dados/informações históricas sobre o clima no período 1981-2000 para o cálculo da ameaça climática.
- **Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5):** meio caminho ("*Middle of the road*"). Cenário de emissões no qual o mundo segue um caminho com tendências sociais, econômicas e tecnológicas que não se desviam marcadamente dos padrões históricos (MEINSHAUSEN *et al.*, 2020).
- **Cenário de emissões altas (SSP5-8.5):** marca o extremo superior dos SSP como cenário de altas emissões devido ao desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis no mundo ao longo do século 21 (MEINSHAUSEN *et al.*, 2020).

Dentro de cada cenário de emissão foram considerados dois horizontes temporais:

- **Horizonte de curto prazo:** período entre 2026-2045;
- **Horizonte de médio prazo**: período entre 2046-2065.

Desse modo, para cada impacto intermediário são calculados 5 (cinco) índices de risco climático.

Para exposição e vulnerabilidade, foram utilizados dados do MInfra e do PNL 2035. Assim, a exposição e a vulnerabilidade são mantidas em todos os cenários e horizontes subsequentes.

A seguir são apresentados os métodos de normalização, de ponderação e de agregação, desde o nível 6 para as ameaças climáticas, e a partir do nível 5 para os indicadores temáticos.

2.1. Normalização dos indicadores

Para possibilitar a agregação, os indicadores temáticos do nível 5 foram normalizados a partir de uma função matemática, a fim de tornar os indicadores comparáveis. Foi seguido o mesmo método de normalização utilizado no sistema AdaptaBrasil-MCTI[1], com a utilização da seguinte expressão matemática:

$$I_{ji} = \frac{I_{ai} - I_{jp}}{I_{jm} - I_{jp}}$$

Onde:

- I_{ji} é o valor normalizado do indicador *j* no *i*-ésimo pixel;
- I_{ai} é o valor do indicador no *i*-ésimo pixel;
- I_{jp} representa o valor do indicador *j* no pixel com menor valor referente aos dados observados;
- I_{jm} é o valor do indicador *j* no pixel com maior valor referente aos dados observados.

O resultado dessa normalização é sempre um valor que varia entre 0 e 1, com graus decimais.

2.2. Ponderação dos indicadores

Para obtenção dos pesos dos indicadores climáticos, foi utilizado o método aplicado por Wilks (2014), Barreto *et al*. (2016) e Barreto *et al*. (2019), em que é possível visualizar os detalhes metodológicos.

[1] Disponível em: https://adaptabrasil.mcti.gov.br/

O principal método aplicado é a técnica multivariada Análise de Máxima Covariância (ACM), a qual consiste em identificar e destacar as relações mais significativas no conjunto de dados utilizado. A entrada dessa análise são os resultados da *Singular Value Decomposition* (SVD), que é o método de decomposição matricial aplicado ao conjunto de dados, o qual toma como entrada a matriz de covariância dos dados originais.

O método ACM permite identificar os padrões espaço-temporais mais significativos de uma variável em relação ao conjunto de variáveis, tendo como resultante a associação máxima interna ao conjunto. Diante desse padrão espaço-temporal relacional é possível quantificar a capacidade em reproduzir, individualmente, as variáveis originais, e um dos métodos comumente utilizados é a correlação de Pearson. O valor encontrado é então utilizado como ponderador na equação dos Índices de Ameaça Climática. Esse mesmo método foi utilizado no sistema AdaptaBrasil-MCTI, no caso do setor estratégico da segurança alimentar para os impactos das chuvas intensas.

Para a ponderação dos indicadores de exposição e de sensibilidade foram realizadas 02 (duas) oficinas com especialistas, 01 (uma) para o modo rodoviário e 01 (uma) para o ferroviário, com o objetivo de apresentar os indicadores propostos, validar e atribuir pesos. A etapa de definição dos indicadores de vulnerabilidade e de exposição foi baseada em dados disponíveis na bibliografia e nos resultados da consulta a especialistas. Destaca-se que essa etapa contou com a participação de especialistas indicados pelas instituições-chaves, os quais opinaram sobre a definição de pesos aplicáveis às variáveis dos indicadores de exposição e sensibilidade da infraestrutura de transportes rodoviários e ferroviários.

Foi adotado o método Delphi, que é uma estratégia cada vez mais reconhecida para a construção, o aprimoramento e a ponderação de indicadores. Esse método tem a capacidade de alcançar o consenso, além de ajudar a capturar omissões e inconsistências que podem resultar em uma realidade equivocada. O método Delphi auxilia na construção de soluções e esclarecimentos de questões de projetos por meio de etapas, definidas em: escolher um facilitador, identificar seus especialistas, definir o problema, seguir com rodadas de perguntas e, por fim, a tomada de decisão (Azevedo, s.d.). A metodologia contou com a aplicação de um questionário estruturado (formulário *on-line*) junto a um grupo de especialistas, de forma a buscar a convergência das suas respostas.

Para alcançar esse consenso, a partir dos formulários enviados por *e-mail*, foi possível calcular o índice de Simpson dos indicadores. O índice de Simpson varia de 0 a 1, onde quanto mais próximo o valor de 1, maior é a diversidade na ponderação. A partir dos resultados dos primeiros índices calculados, os valores iguais ou acima de 0,7 foram incluídos em uma nova rodada de avaliação nas oficinas. Ao final, para os valores com maior diversidade na ponderação mesmo após a segunda rodada, optou-se por aplicar a média ponderada, calculada por meio do somatório das multiplicações entre valores e pesos, divididos pelo somatório dos pesos, possibilitando, assim, a obtenção de um valor médio ajustado.

Ao final das rodadas de perguntas com os especialistas foram validados os indicadores que melhor se adequam à realidade.

2.3. Agregação dos indicadores

Para a agregação dos indicadores ponderados do nível 5 ao nível 4 (indicadores temáticos), usou-se a média ponderada (Equação 1). Cabe ressaltar que a ponderação dos indicadores no nível 5 foi realizada na Etapa 4 deste estudo.

Equação 1

$$\text{Nível 4 (Indicador temático)} = \frac{(\text{Indicador 1} * \text{peso}) + (\text{Indicador 2} * \text{peso}) + (\text{Indicador 3} * \text{peso})}{3}$$

A agregação do nível 4 ao nível 3 se dá unicamente pela média simples dos dois indicadores temáticos de sensibilidade: sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico (Equação 2).

Equação 2

$$\text{Nível 3} = \frac{\text{Indicador temático 1} + \text{Indicador temático 2}}{2}$$

O Índice de Risco Climático (IRC) pode ser calculado através da média simples entre os componentes de risco climático (Nível 2 para o Nível 1), segundo a Equação 3:

Equação 3

$$\text{Risco} = \frac{\text{Ameaça} + \text{Exposição} + \text{Vulnerabilidade}}{3}$$

É importante ressaltar que a vulnerabilidade neste estudo foi unicamente composta pela sensibilidade, devido à falta de dados representativos para a capacidade adaptativa (ver Produto 4) e, por isso, não há o que agregar do nível 3 ao nível 2. A sensibilidade, por sua vez, foi dividida em sensibilidade biofísica e sensibilidade da infraestrutura (ver Nível 4, conforme apresentado na Figura 3). Não se aplicou nenhum tratamento de valor atípico (ou *outliers*). Para a composição da equação final do cálculo do risco climático, agregou-se o nível 2 ao nível 1, conforme descrito na Equação 3.

Os valores normalizados tanto do IRC quanto dos componentes foram classificados em cinco classes:

- <= 0,01] = Muito baixo;
-]0,01 - 0,25] = Baixo;
-]0,25 - 0,50] = Médio;
-]0,50 - 0,75] = Alto;
- > 0,75] = Muito alto.

Nessa classificação linear, os riscos alto e muito alto não significam necessariamente que o nível de criticidade é alto, pois esta é uma avaliação relativa, e não absoluta.

Nas próximas seções, serão apresentados os resultados obtidos para os impactos selecionados para o modo ferroviário.

3. Modo Ferroviário

O modo ferroviário de transporte é o responsável pela segunda maior movimentação de cargas no Brasil, atrás somente do transporte rodoviário (MInfra, 2021). A malha viária, categorizada por situação e por concessão, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Situação das ferrovias federais.

Situação da ferrovia[2]	KM
Desativada	4.096,14
Em obra	2.948,99
Em operação	30.006,99
Estudo	5.413,46
Planejada	12.769,57
Total Geral	**55.235,14**

Fonte: ANTT

Como mencionado anteriormente, para avaliar o risco climático na infraestrutura ferroviária foram considerados **três impactos** da mudança do clima na infraestrutura: (1) Impactos devido a deslizamentos; (2) Impactos devido a erosão; e (3) Impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas. Para cada um dos impactos intermediários, foram elaborados Índices de Risco Climático considerando-se **três cenários**: (a) Período base (1981-2000); (b) cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5); e (c) cenário emissões altas (SSP5-8.5). Cada cenário, com exceção do período base, foi calculado para **dois horizontes temporais**: (i) curto prazo (2026-2045) e (ii) médio prazo (2046-2065).

Para compreender os mapas dos componentes do IRC (Nível 1) é necessário observar os mapas relacionados à ameaça climática, à exposição e à vulnerabilidade da rede ferroviária (Nível 2 da estrutura hierárquica), já que o risco é o resultado da combinação destes componentes. O componente de vulnerabilidade foi calculado apenas com informações sobre sensibilidade (Nível 3), uma vez que os dados disponíveis para capacidade adaptativa não puderam ser incorporados na análise (pois não atendiam aos critérios de abrangência e formato).

Faz-se necessário salientar que diferenças nos valores totais e parciais de extensão dos trechos ferroviários podem e devem ocorrer. Isso é devido ao processo topológico de conversão de polígono (área) para linha. Essa transformação pode acarretar pequenas diferenças (alguns metros por trecho), os quais, uma vez somados, resultam em extensões de quilômetros de diferença. Ainda assim, tais diferenças são irrelevantes quando contextualizadas em um cenário nacional.

A seguir são apresentados os principais resultados, por impacto intermediário, obtidos para a infraestrutura ferroviária nacional. Para cada mapa de Risco Climático são apresentados os mapas

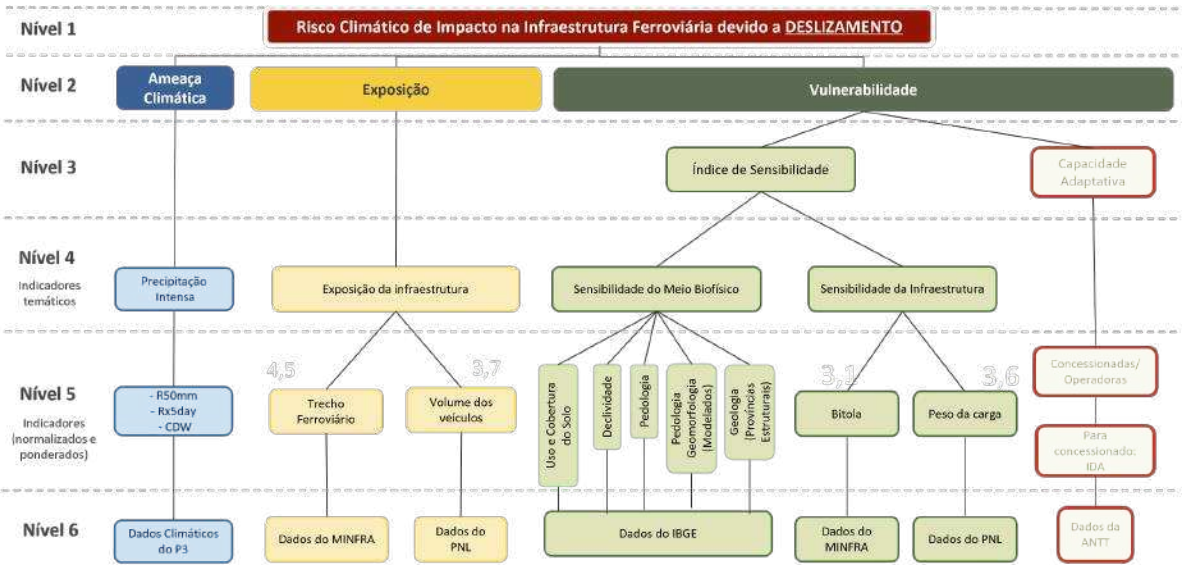
[2] No âmbito do estudo não foram consideradas as ferrovias desativadas.

dos seus componentes e, por fim, é realizada uma análise comparativa dos riscos climáticos por cenários e horizontes.

3.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

O IRC para a infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 4, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R50mm: número de dias com chuva igual ou maior a 50 mm;
- Rx5day: chuva máxima acumulada em 5 dias; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dado do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico:

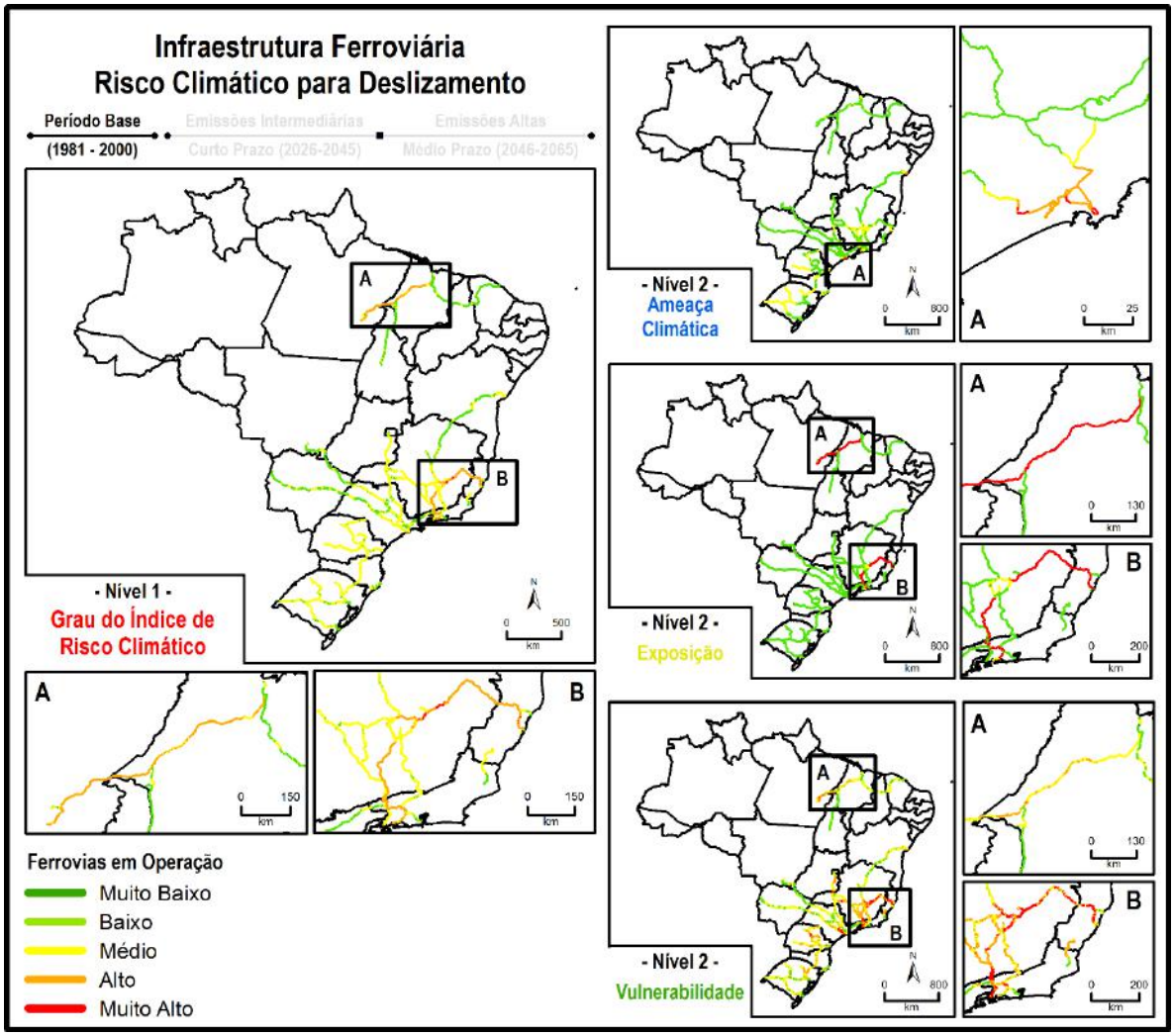
- Mapa de susceptibilidade a deslizamentos - composto por Uso e Cobertura do Solo, Declividade, Pedologia, Pedologia Geomorfologia e Geologia do IBGE; e
- Sensibilidade da infraestrutura, calculados a partir de dados de bitola (dados do MInfra) e peso da carga (dados do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido a deslizamentos.

3.1.1 Período base | Impacto devido a deslizamentos

A Figura 5 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o período base.

Figura 5 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Quanto ao Índice de Risco Climático, composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade, verifica-se que os trechos com graus alto e muito alto se encontram na Região Sudeste, com destaque para os estados de Minas Gerais (graus alto e muito alto), Rio de Janeiro (grau alto), São Paulo (graus alto e muito alto) e Espírito Santo (graus alto e muito alto), e no eixo Pará-Maranhão (grau alto) (Figura 5). Esses trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística);

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

As ferrovias da região sul apresentam risco climático médio ao deslizamento.

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de ferrovias no litoral de São Paulo se encontram com alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se trechos com ameaças médias no Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

No que diz respeito a **vulnerabilidade** a deslizamentos, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos de grau alto e muito alto se concentram nos trechos Minas Gerais/Espírito Santo (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.) e Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Rio de Janeiro x Minas Gerais, operada pela MRS Logística S.A), e aparecem de modo mais pontual na Ferrovia Carajás (operada pela Vale S.A.), e em partes da malha ferroviária do sul do Brasil. Isso se deve à susceptibilidade ao deslizamento em regiões com terreno mais acidentado, como ocorre no Sudeste brasileiro, e ao peso da carga transportada.

Os trechos com grau muito alto de **exposição** se encontram nas ferrovias com maior tráfego de composições, especialmente aquelas estradas de ferro associadas ao escoamento da produção mineral brasileira. Desse modo, as ferrovias mais expostas são:

- Minas Gerais ligação do quadrilátero ferrífero aos Portos de Santos (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística) e do Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Estrada de Ferro Carajás: Carajás (PA) até São Luís (MA);
- Estrada de Ferro Vitória a Minas: interior de Minas Gerais até o porto do Espírito Santo.

Os mapas de vulnerabilidade e de exposição se repetirão para todos os cenários, uma vez que a vulnerabilidade é determinada pela sensibilidade do meio físico e sensibilidade da infraestrutura, e a exposição relaciona-se principalmente com o volume de veículos que trafegam na ferrovia, os quais não sofrem alterações. Assim, não serão analisados e discutidos nas seções e subseções seguintes, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor.

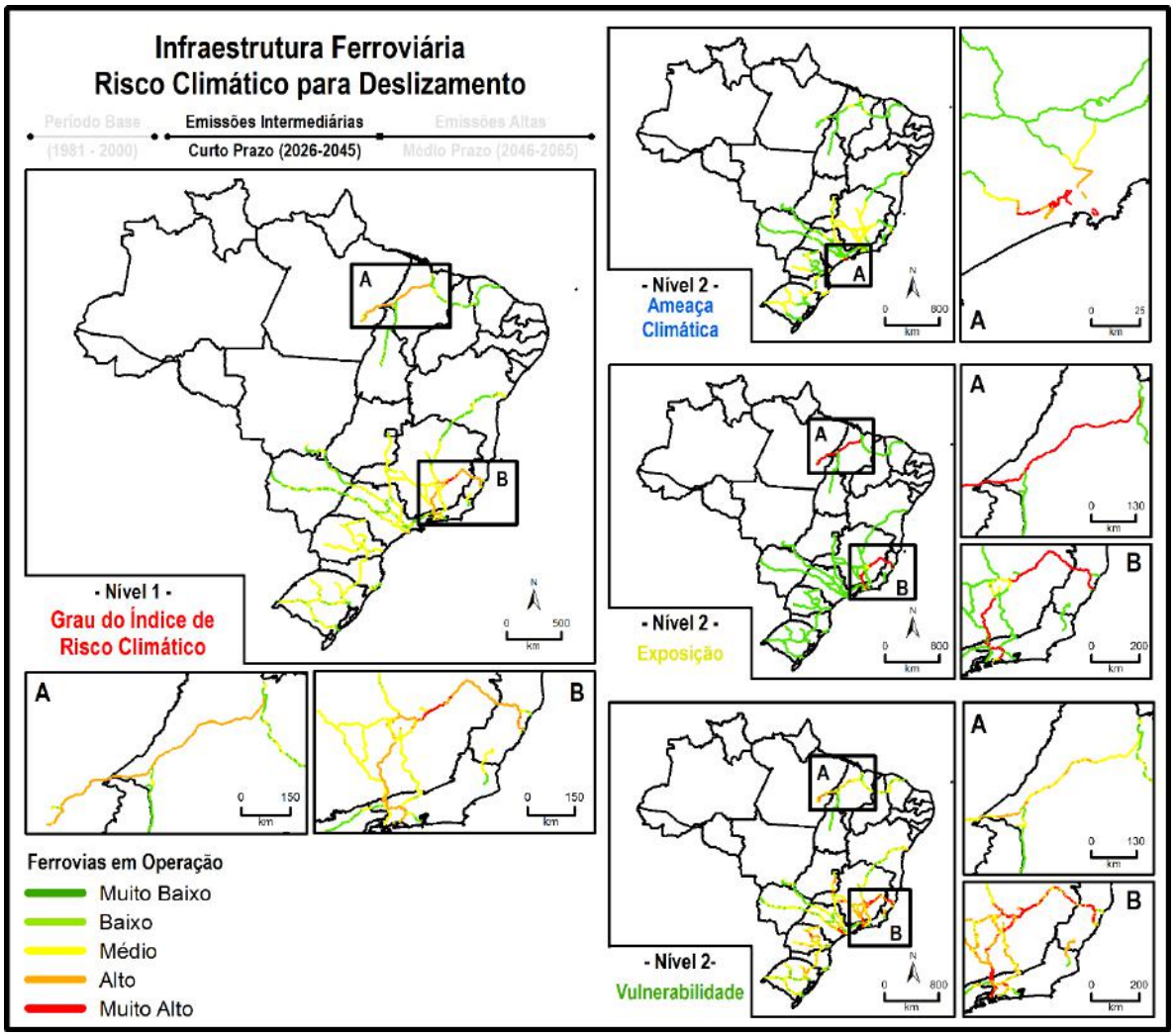
3.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de deslizamento, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

3.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 6 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 6 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo, com risco alto a muito alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco muito alto), conforme apresentado na Figura 6, devido ao volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e ao peso da carga e aos indicadores de suscetibilidade a deslizamentos, que compõem o componente vulnerabilidade.

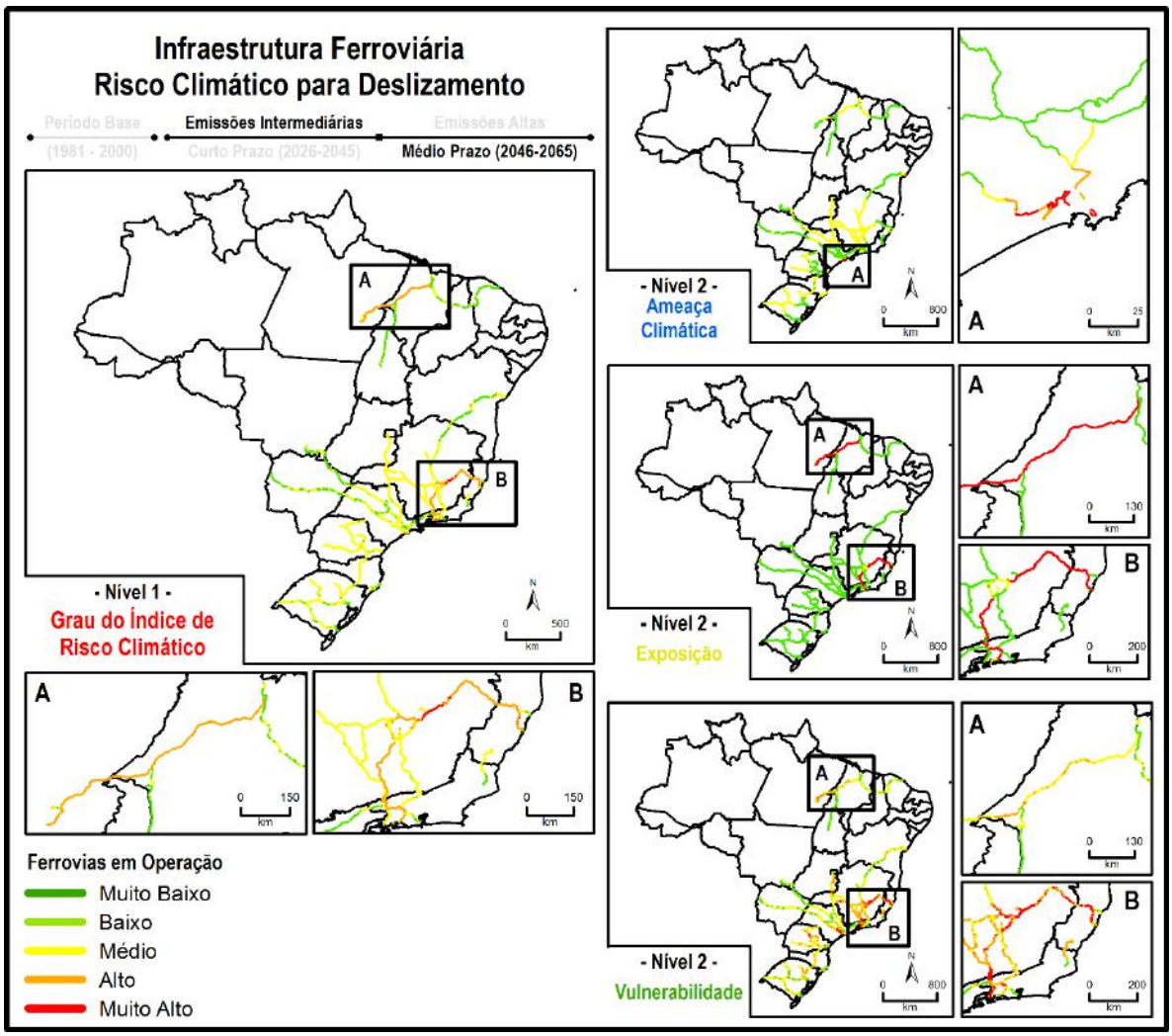
Os trechos com maior risco diante do cenário apresentado encontram-se nas seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

3.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045) são apresentados na Figura 7.

Figura 7 Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos estão concentrados na Região Sudeste e no Eixo Pará-Maranhão, conforme apresentado na Figura 7. Tais trechos correspondem às rodovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

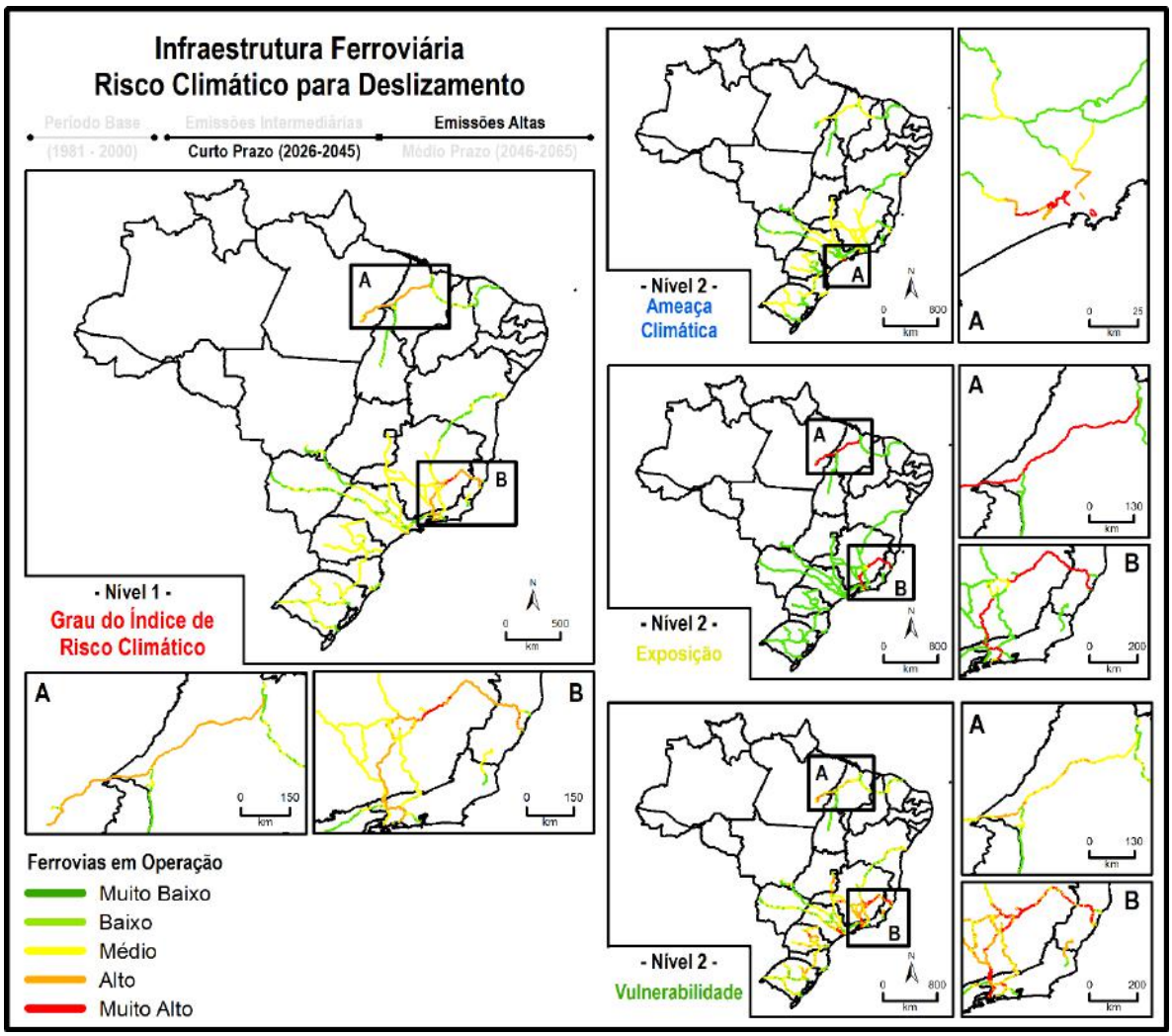
3.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de deslizamentos para o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

3.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 8 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 8 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

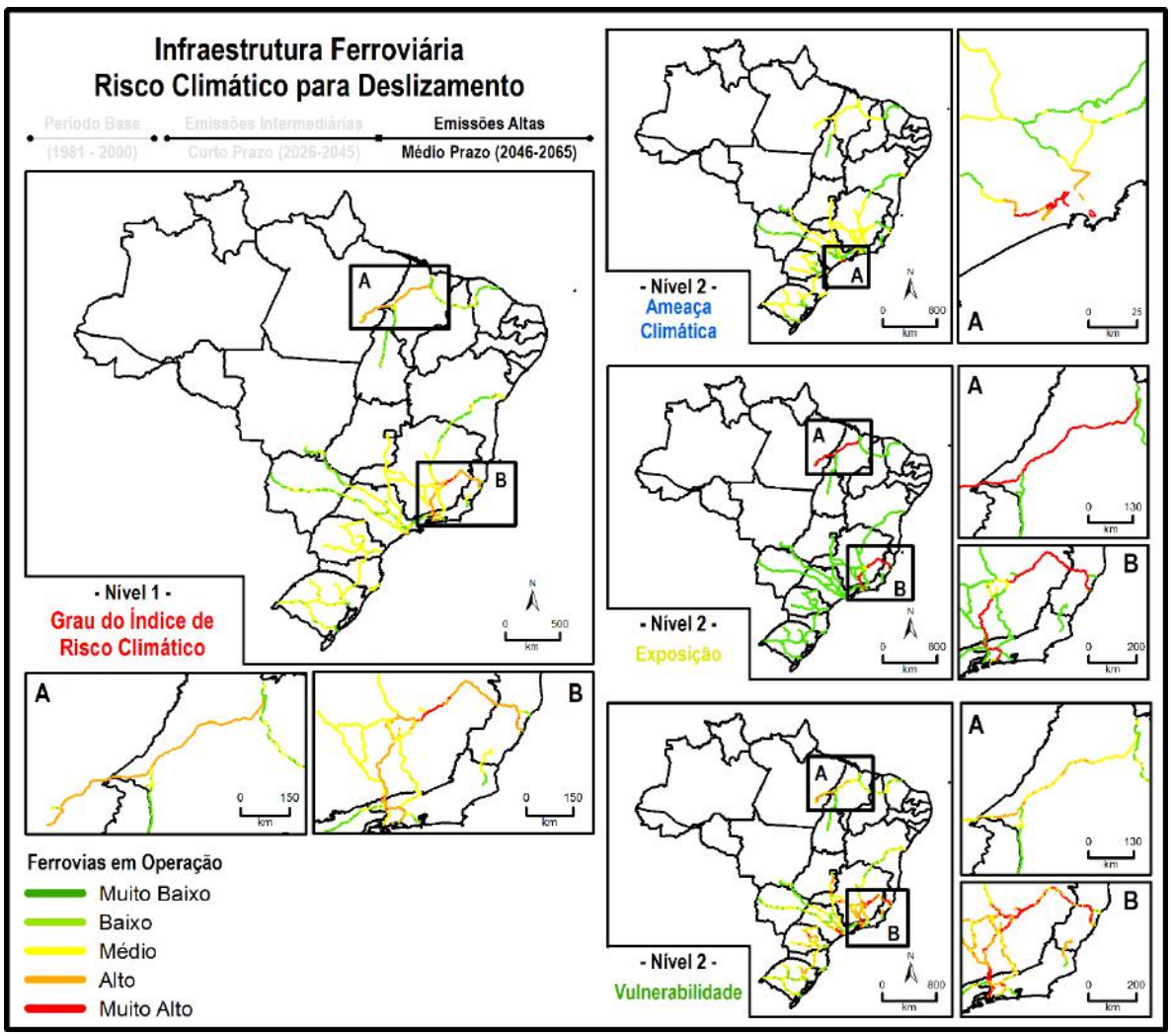
Pela análise da Figura 8, observa-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos também se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais/ Espírito Santo, Minas Gerais/ Rio de Janeiro e São Paulo) e no Eixo Pará-Maranhão, que são as que apresentam maiores volumes de veículos e peso de carga (componente de exposição). Tais trechos equivalem às ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

3.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 9 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 9 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a deslizamentos, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os mapas apresentados na Figura 9 mostram que, assim como aconteceu para os diferentes cenários e horizontes temporais descritos anteriormente, os maiores índices (risco alto e muito alto) ficam concentrados na Região Sudeste e no Eixo Pará-Maranhão. Os trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística);

- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

3.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a deslizamentos

Os trechos ferroviários que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamentos em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo foram:

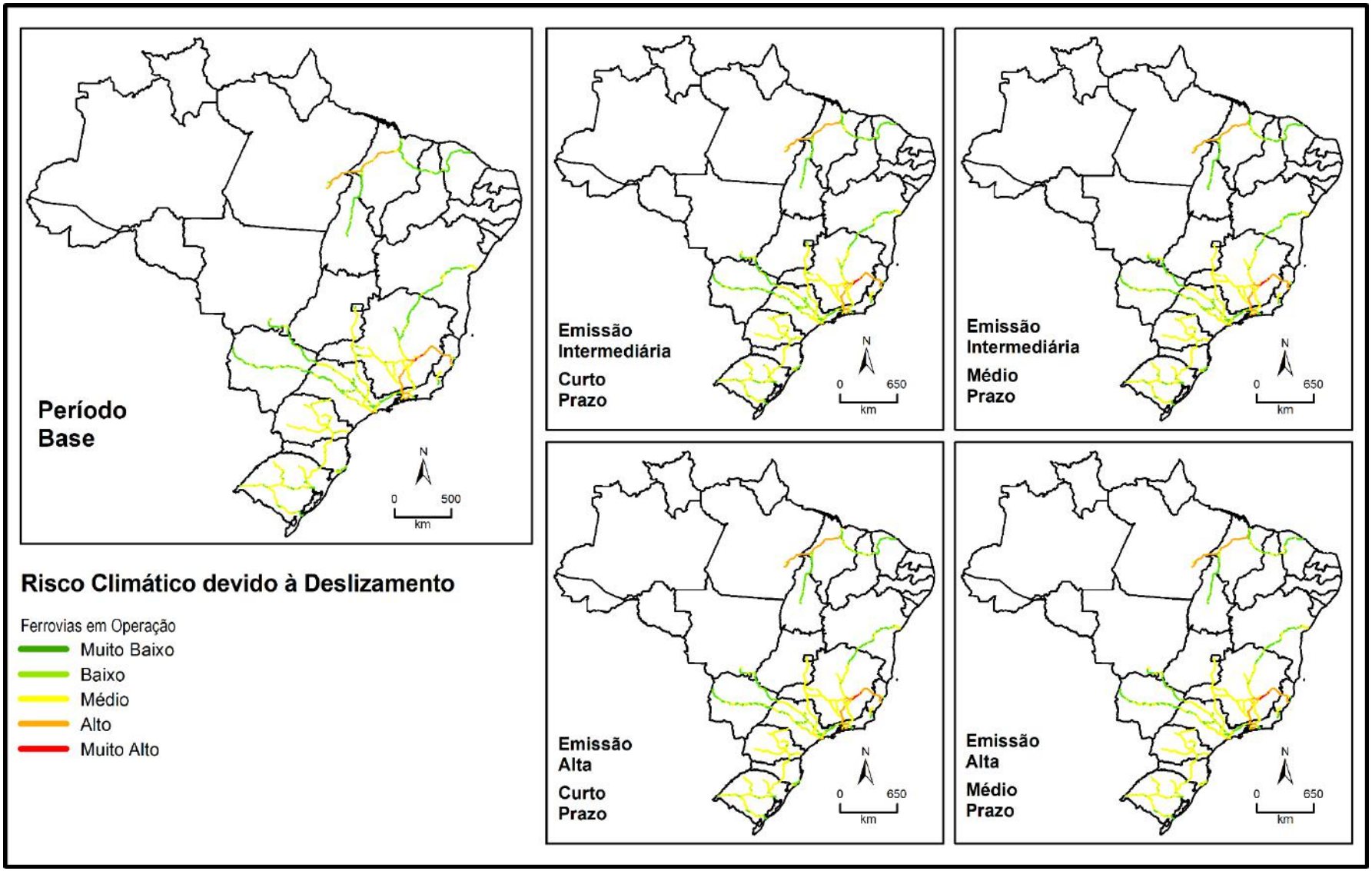
- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas X Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

Estas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e elevado peso de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura. Além disso, um destaque especial pode ser dado à sensibilidade do meio biofísico dessas regiões (suscetibilidade a deslizamentos).

A Região Sudeste - onde se localizam as Estradas de Ferro Minas X Rio, Vitória a Minas e do Litoral de São Paulo, por exemplo, é onde estão localizados os maiores graus de susceptibilidade a deslizamento, principalmente pela presença da Serra do Mar (altas declividades), assim como é onde podem ser encontrados graus medianos e altos para erodibilidade e uso e cobertura do solo profundamente antropizados, o que demonstra a falta da vegetação natural. A cobertura vegetal apresenta função importante de proteção do solo contra as diversas situações de desequilíbrio que ocorrem na natureza, causadas, principalmente, por enxurradas que acarretam erosão, lixiviação, entre outras alterações.

Como os componentes vulnerabilidade e exposição foram mantidos ao longo da análise, o fator de variação do risco climático ao deslizamento por cenário e horizonte temporal é a ameaça climática. Entretanto, notou-se que tanto o cenário de emissões intermediárias quanto o de emissões altas não apresentaram variações significativas decorrentes do componente da ameaça climática, conforme pode ser observado na Figura 10, que sintetiza o risco climático devido ao impacto do deslizamento sobre a infraestrutura federal de transporte ferroviária brasileira.

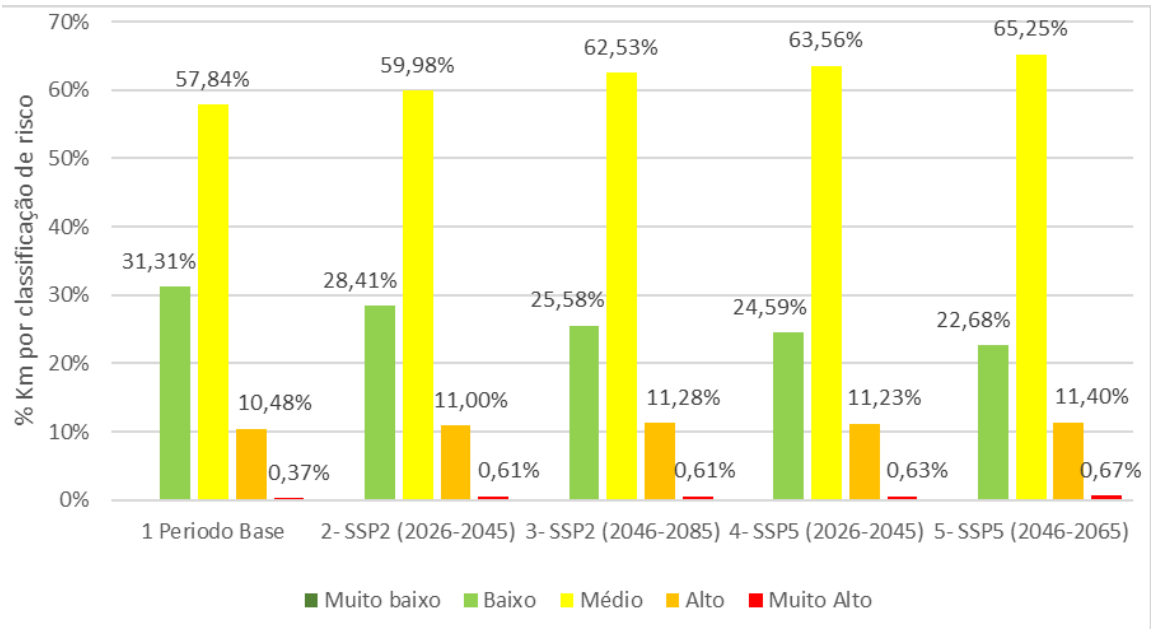
Figura 10 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de deslizamentos.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentado, na Figura 11, a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 11 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 11, para o **período base**, 31,31% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de deslizamento, 57,84% sob risco médio e 10,85% sob risco alto ou muito alto. Trechos com graus alto e muito alto de ameaça representam menos de 1% do total das ferrovias e se encontram no litoral de São Paulo, na chegada ao porto de Santos.

Ainda de acordo com a Figura 11, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045)**, o IRC devido ao impacto de deslizamentos é baixo em 28,41% das ferrovias, médio em 59,98% e alto ou muito alto em 11,61%. Considerando o mesmo cenário, mais um **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se 25,58% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto deslizamentos, 62,53% encontram-se sob médio risco, e 11,89% sob alto ou muito alto risco. Nesse cenário, a maior diferença em relação ao período base é o aumento das áreas de nível médio de risco em 4,69% (de 57,84% para 62,53%) e das áreas de alto e muito alto risco em 1,04% (de 10,85% a 11,89%), enquanto, por sua vez, as áreas de baixo risco sofrem redução de 5,73% (31,31% para 25,58%).

Em um **cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 24,59% das ferrovias encontrar-se-ão sob risco climático baixo devido ao impacto por deslizamentos, 63,56% sob risco médio, e 11,86% sob risco alto ou muito alto. Portanto, conforme aumenta-se o cenário de emissões, considerando-se o mesmo horizonte temporal (curto prazo), verifica-se uma redução percentual de 3,82% da quilometragem de ferrovias sob baixo risco (de 28,41% para 24,59%), enquanto as áreas sob médio e alto/ muito alto risco aumentam, respectivamente, 3,58% (de 59,98% para 63,56%) e 0,25% (de 11,61% para 11,86%). Considerando-se o **cenário de emissões altas com**

horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065), 22,68% da quilometragem de ferrovias se encontrará sob risco climático baixo, 65,25% sob risco climático médio, e 12,07% sob risco climático alto ou muito alto de impacto devido a deslizamentos, conforme também exposto na Figura 11.

De forma geral, observa-se um padrão de redução das extensões de ferrovias sob baixo risco climático ao impacto deslizamento e um aumento de tais extensões sob risco médio ou alto/muito alto, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal. Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática.

A Tabela 2 apresenta o percentual dos trechos por grau de ameaça climática para impactos devido ao deslizamento para cada um dos cenários analisados.

Tabela 2 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Deslizamento) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,04%	74,84%	24,13%	0,89%	0,09%
SSP2 (2026-2045)	0,04%	57,51%	41,77%	0,39%	0,29%
SSP2 (2046-2065)	0,00%	46,56%	52,73%	0,43%	0,29%
SSP5 (2026-2045)	0,00%	39,23%	59,94%	0,54%	0,29%
SSP5 (2046-2065)	0,00%	28,55%	70,65%	0,52%	0,29%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o componente “ameaça climática”, único que varia entre os cenários de emissões, a quilometragem classificada como baixo risco caiu de 74,84% (período base) para 57,51% (SSP2 – 2026-2045). Mantendo-se o horizonte temporal, mas alterando o cenário para SSP5, verifica-se que esse valor cai para 39,23%.

Também se observa um aumento na categoria de médio risco de 24,13% (período base) para 41,77% (SSP2 – 2026-2045) ou para 59,94% (SSP5 – 2026-2045), e as classes de risco alta e muito alta se mantiveram em menos de 1%.

A Tabela 3 apresenta a distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento em cada um dos cenários. A partir desta tabela é possível notar uma tendência ao aumento dos trechos com graus de risco muito alto, alto e médio, e uma consequente diminuição dos trechos com baixo nível, tendência essa já mencionada anteriormente.

Tabela 3 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a deslizamento, para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	5.589,53	10.327,06	1.871,71	66,44
SSP2 (2026-2045)	0	5.062,38	10.687,70	1.959,62	108,27
SSP2 (2046-2065)	0	4.558,17	11.141,15	2.010,39	108,27
SSP5 (2026-2045)	0	4.380,91	11.324,96	2.000,40	111,71
SSP5 (2046-2065)	0	4.040,57	11.626,18	2.031,98	119,24

Fonte: Elaboração própria (2022).

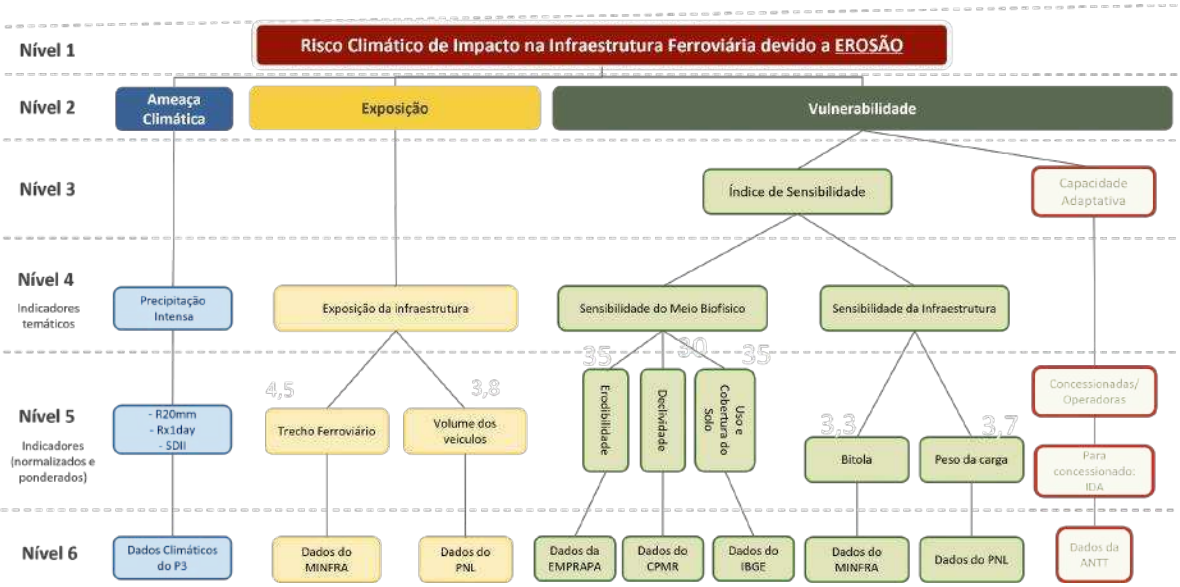
Do período base para o cenário pessimista de médio prazo (SSP5 2046-2065), os trechos com grau muito alto de risco climático aumentam 79%, enquanto os trechos de baixo risco tem uma redução de 28%; já as extensões de médio e alto grau de risco aumentam 13% e 9%, respectivamente. No período base cerca de 58% das ferrovias analisadas têm médio grau de risco climático devido a deslizamento, enquanto no SSP5 (2046-2065) 65% da malha encontra-se nesse nível.

Apesar do agravamento do grau de risco observado, as áreas de alto e muito alto risco continuam representando entre 11% e 12% da malha ferroviária em todos os cenários, havendo pouca variação. Cerca de 2000 km de ferrovias no Brasil se encontram com alto e muito alto grau de risco climático a impactos devido ao deslizamento.

3.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão

O IRC para a infraestrutura ferroviária devido a erosão foi calculado a partir dos dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 12.

Figura 12 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido a erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 12, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou maior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia;
- SDII: índice de intensidade de precipitação simples.

Já para compor o subíndice de exposição, como em todos os cenários, foram considerados os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dados do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura. Os indicadores para sensibilidade do meio biofísico utilizados foram:

- Erodibilidade (dados da EMBRAPA);
- Declividade (dados do CPRM); e
- Uso e Cobertura do Solo (dados do IBGE).

Por sua vez, os indicadores temáticos para sensibilidade da infraestrutura utilizados foram:

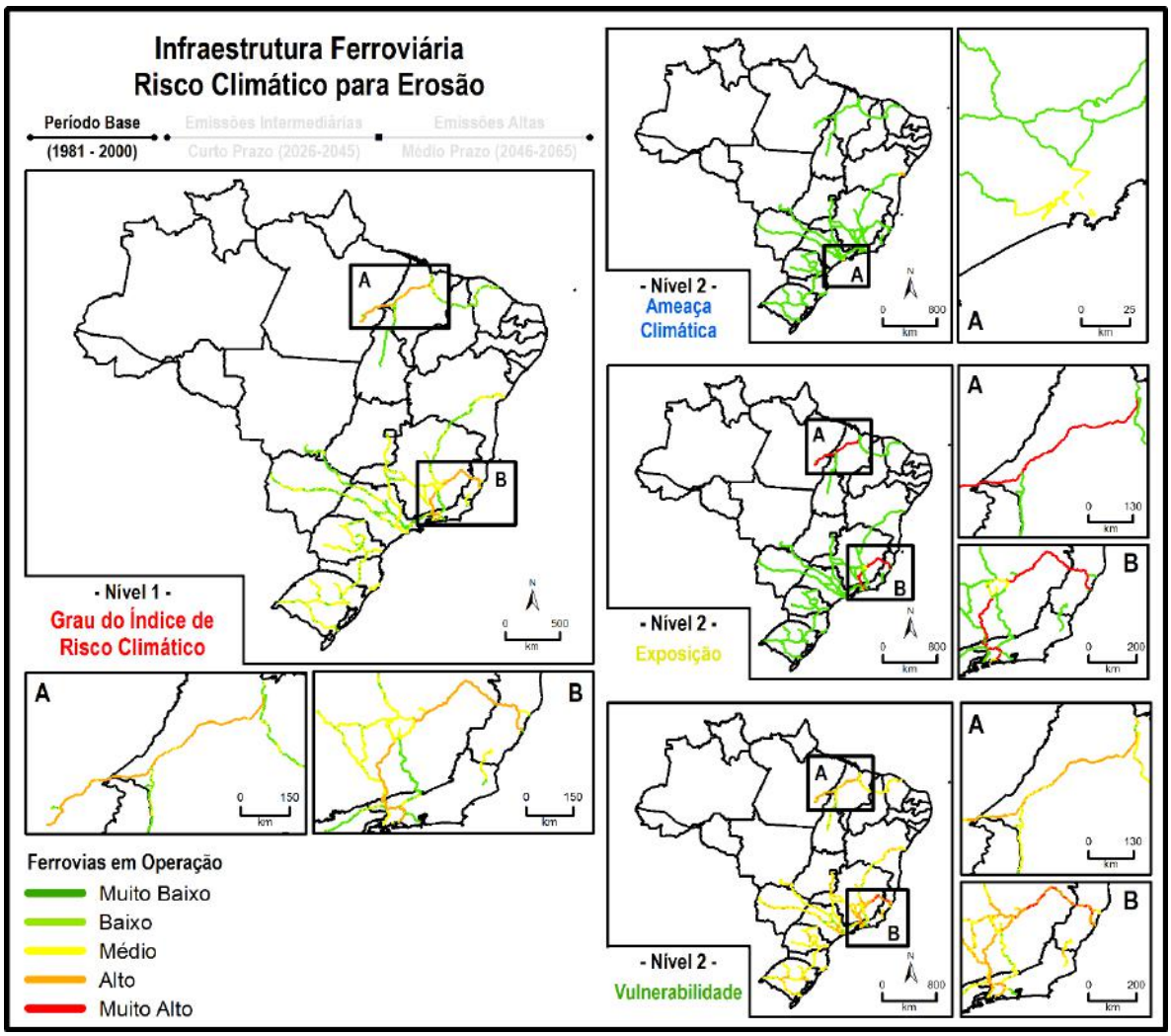
- Bitola (dados do MInfra); e
- Peso da carga (dados do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários de análise: período base (1981-2000); emissões intermediárias (SSP2-4.5) de curto (2026-2045) e médio prazo (2046-2065); e emissões altas (SSP5-8.5) para os mesmos horizontes temporais de curto e médio prazo.

3.2.1 Período base | Erosão

A Figura 13 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o período base.

Figura 13 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se na Figura 13 que os trechos de ferrovias sinalizados com médio e alto grau de IRC a erosão são:

- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Rio de Janeiro/Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

Por sua vez, as ferrovias da Região Sul apresentam risco climático médio a erosão, bem como, parte das ferrovias da região Centro-Oeste e norte do estado da Bahia.

O subíndice do componente de risco “ameaça climática de erosão” para o período base foi

considerado baixo em quase a totalidade do país (98,23%). No que diz respeito à vulnerabilidade à erosão, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos de grau alto e muito alto se concentram nas ferrovias Rio de Janeiro/Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio), Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas) e Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás). Isso se deve à sensibilidade da infraestrutura, mais especificamente ao peso da carga e pela sensibilidade do meio biofísico. Em parte do Estado do Maranhão, a sensibilidade do meio biofísico apresenta níveis altos de erodibilidade e uso e cobertura do solo, o que pode ser verificado exatamente no trecho onde está localizada a Estrada de Ferro Carajás, o qual está intensamente antropizado.

Os trechos com grau muito alto de **exposição** são aqueles das ferrovias que apresentam maior tráfego de composições, especialmente as estradas de ferro associadas ao escoamento da produção mineral brasileira. Portanto, as ferrovias mais expostas são:

- MRS Logística: Minas Gerais, Portos de Santos e Rio de Janeiro;
- Vale S.A. Estrada do Carajás: Carajás (PA) até São Luís (MA); e
- Vale S.A. Estrada de Ferro Vitória a Minas: interior de Minas Gerais até o porto do Espírito Santo.

Assim como ocorreu com a análise do risco climático para o impacto de deslizamentos, os mapas de vulnerabilidade e de exposição ao risco climático de erosão se repetirão para todos os cenários. Portanto, não serão analisados e discutidos nas seções e subseções seguintes, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor.

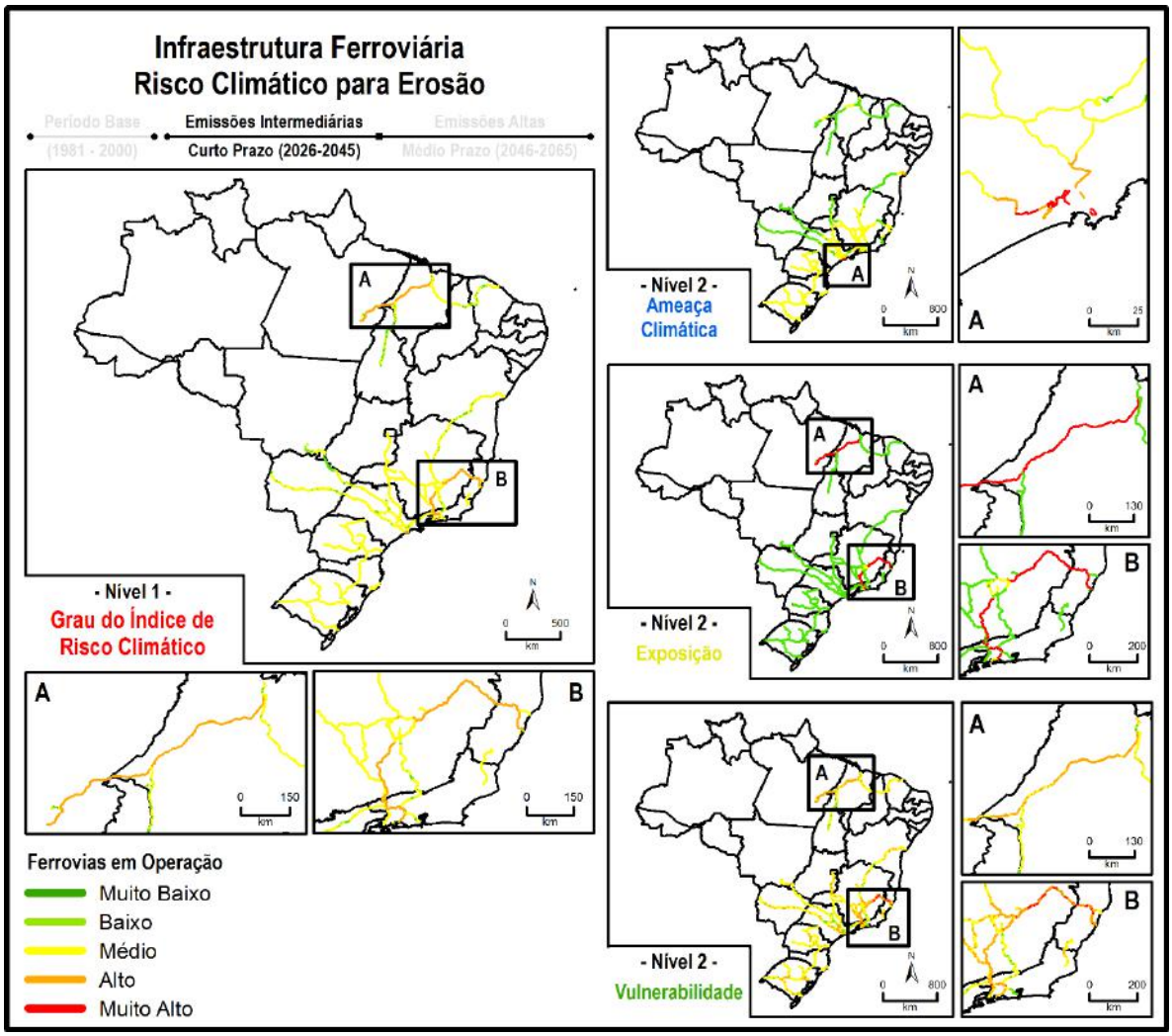
3.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto da erosão, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto e médio prazo.

3.2.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 14 apresenta os mapas resultantes das análises com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 14 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo, que apresentam risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), devido ao volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e ao peso da carga e aos indicadores de sensibilidade do meio biofísico à erosão, que compõem o componente vulnerabilidade.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A.);
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A.); e
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística).

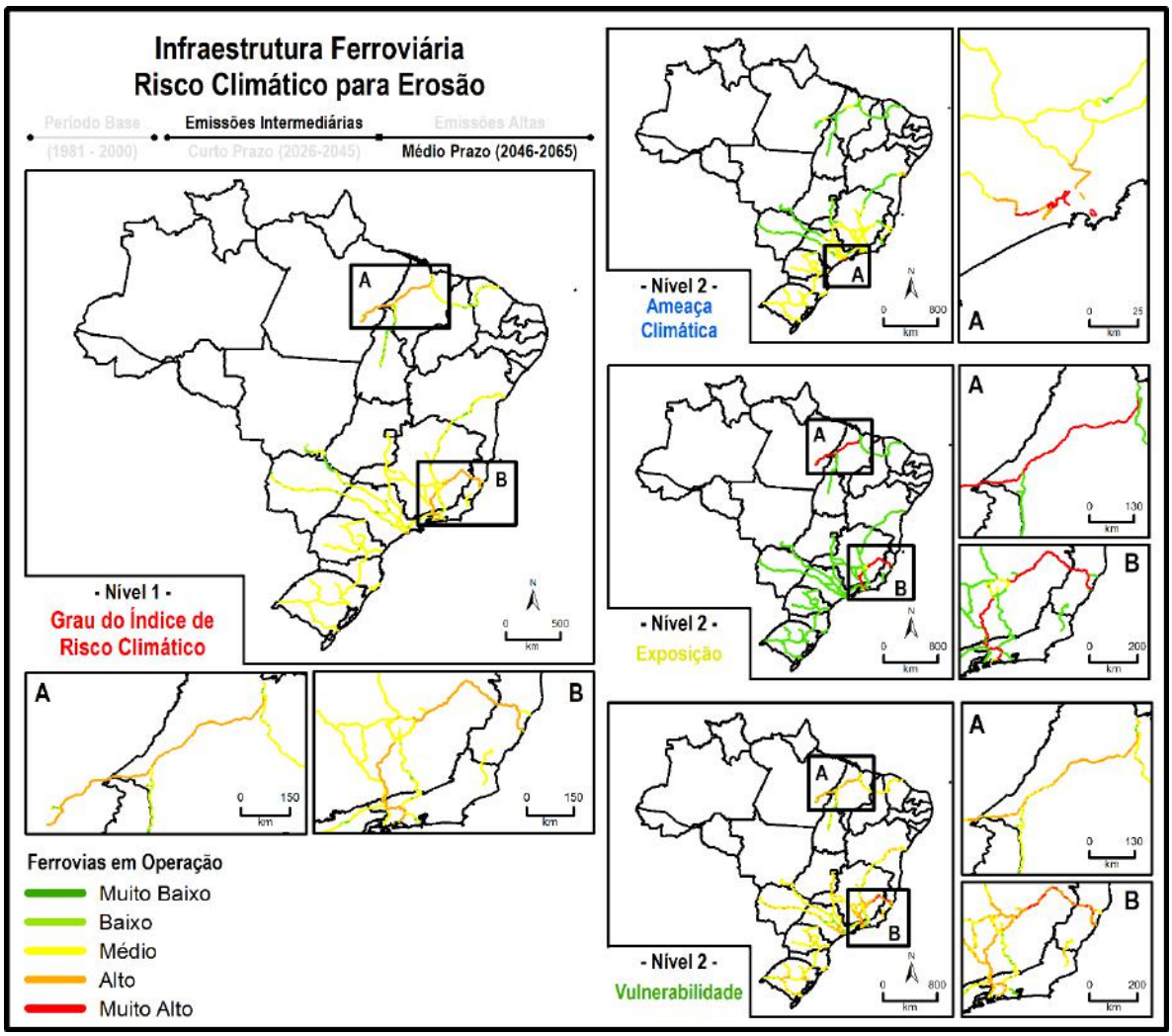
Nesse cenário, ocorre um aumento do risco na maior parte das ferrovias, que passam de baixo (período base) para médio risco. Apenas um trecho da Ferrovia Norte Sul em Tocantins e alguns trechos de ferrovias localizados em diversos estados da região Centro-Oeste e na Bahia permanecem com baixo risco climático de impacto na infraestrutura devido à erosão.

Para o componente do risco ameaça climática, mudanças importantes ocorreram nas regiões Sul e Sudeste se comparado ao período base: graus medianos e alto de ameaça à erosão podem ser verificados na Estrada de Ferro do Litoral (SP); nas regiões Norte e Nordeste, pequenos trechos da Estrada de Ferro Carajás apresentam graus medianos, e, especialmente no litoral da Bahia, pode ser observado graus medianos e altos na Estrada de Ferro Belo Horizonte x Salvador. Contudo, nas demais regiões brasileiras as mudanças foram pouco perceptíveis.

3.2.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 15.

Figura 15 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), conforme apresentado na Figura 15.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Considerando-se este cenário de emissões intermediárias em um horizonte temporal de médio prazo em relação ao período base, a maior parte das ferrovias passa de baixo para médio risco. Foram mantidos em baixo risco apenas trechos nos estados do Tocantins e da Bahia, e na região Centro Oeste.

O resultado da ameaça climática à erosão não sofreu alteração significante se comparada ao resultado do horizonte de curto prazo em um cenário de emissões intermediárias, com quase a totalidade da malha apresentando risco baixo e médio.

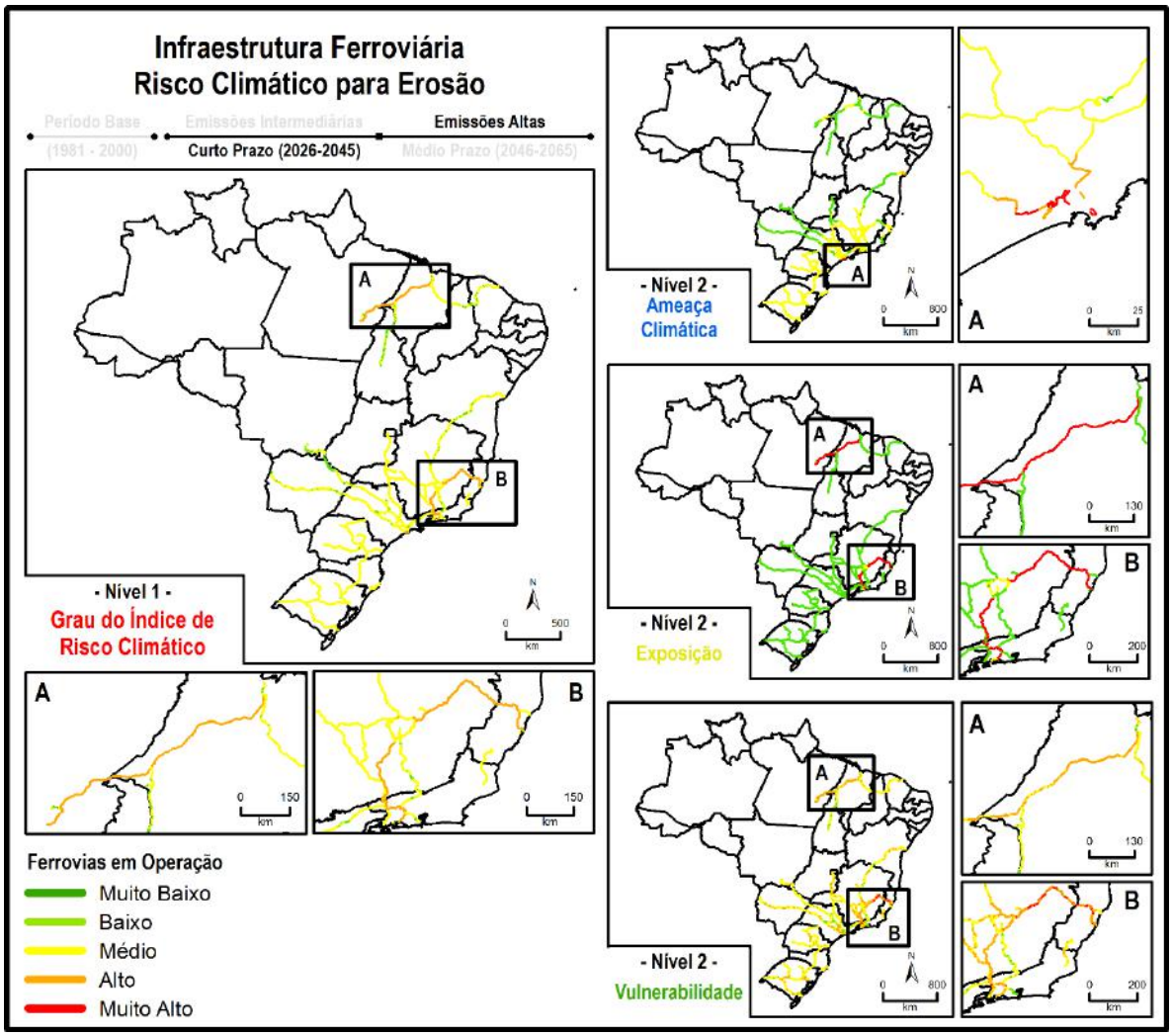
3.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de erosão na infraestrutura ferroviária considerando-se um cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

3.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 16 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).

Figura 16. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), conforme apresentado na Figura 16.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Para o cenário de emissões altas em um horizonte temporal de curto prazo em relação ao período base, a maioria das ferrovias passa de baixo risco para médio risco; apenas trechos de ferrovia nos estados de Tocantins e da Bahia e poucos trechos de ferrovias na região Centro-Oeste se mantiveram com risco baixo.

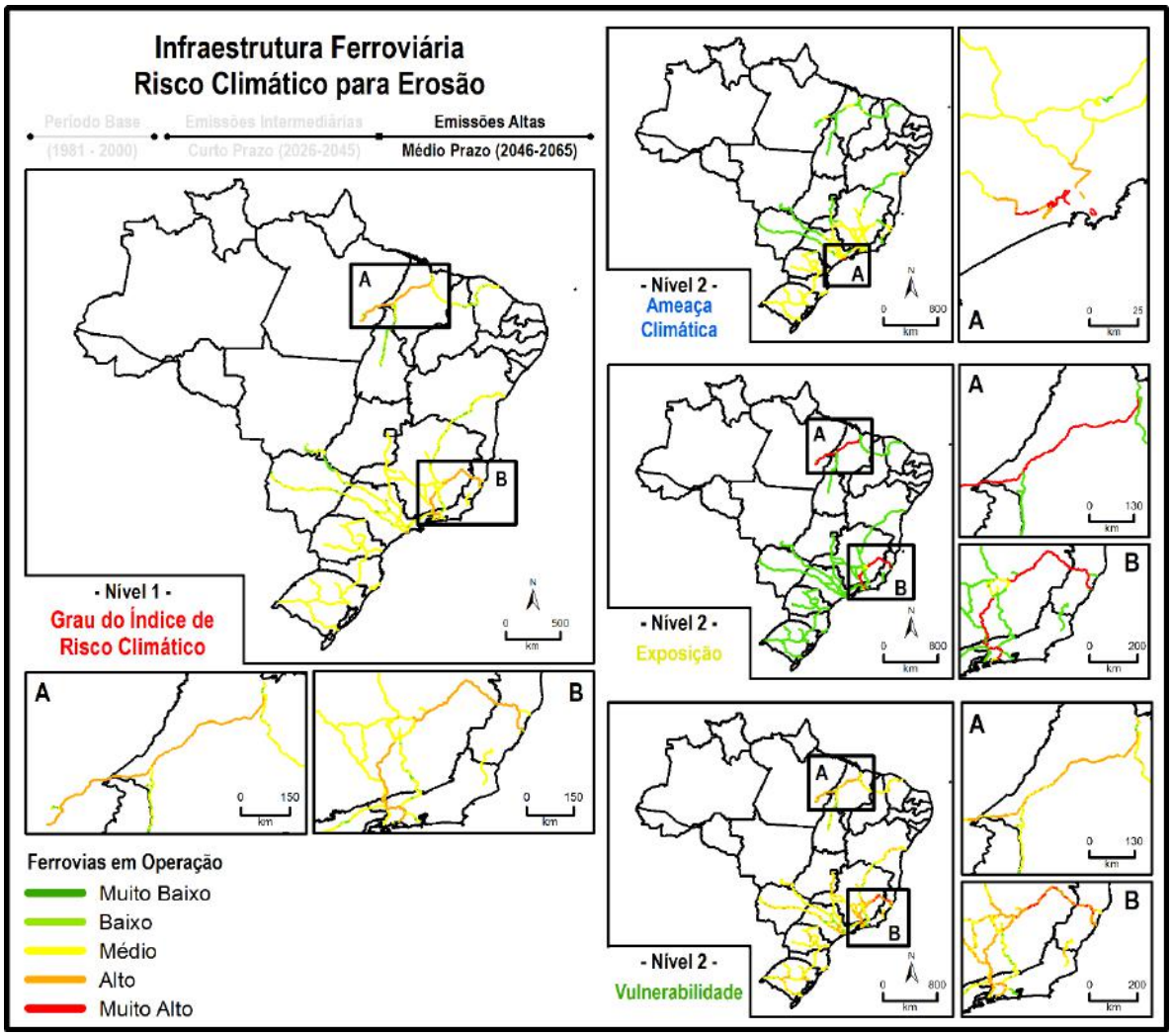
A ameaça climática resultante da erosão ficou próxima ao resultado encontrado considerando-se o cenário de emissões anteriormente apresentado (cenário de emissões intermediárias em um

horizonte temporal de médio prazo). Com isso, quase toda a malha apresenta baixo e médio risco, e a variação de risco entre os cenários foi considerada pouco significativa.

3.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 17 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, de exposição e de vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).

Figura 17 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura ferroviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos, conforme apresentado na Figura 17, continuam se concentrando na Região Sudeste (Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo com risco médio a alto) e no Eixo Pará-Maranhão (com risco alto), tal qual apresentado para o período base e nos cenários e horizontes temporais anteriores.

Os trechos com maior risco encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Para o cenário de emissões altas em um horizonte temporal de médio prazo (2046-2065), a maior parte das ferrovias passa de baixo risco (segundo o período base) para médio risco, mantendo com risco baixo apenas em trecho do Estado do Tocantins e trechos selecionados na região Centro-Oeste e no Estado da Bahia.

O índice da ameaça climática devido à erosão obteve resultado próximo ao encontrado para o cenário de emissões intermediárias, bem como para o horizonte temporal de curto prazo nesse cenário de emissões (alta). Portanto, quase a totalidade da malha ferroviária brasileira apresenta baixo e médio risco climático em sua infraestrutura devido ao impacto da erosão, e a variação de risco entre os cenários foi pequena.

3.2.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto de erosão

Os trechos ferroviários que apresentaram alto grau de risco climático devido ao impacto de erosão em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo foram:

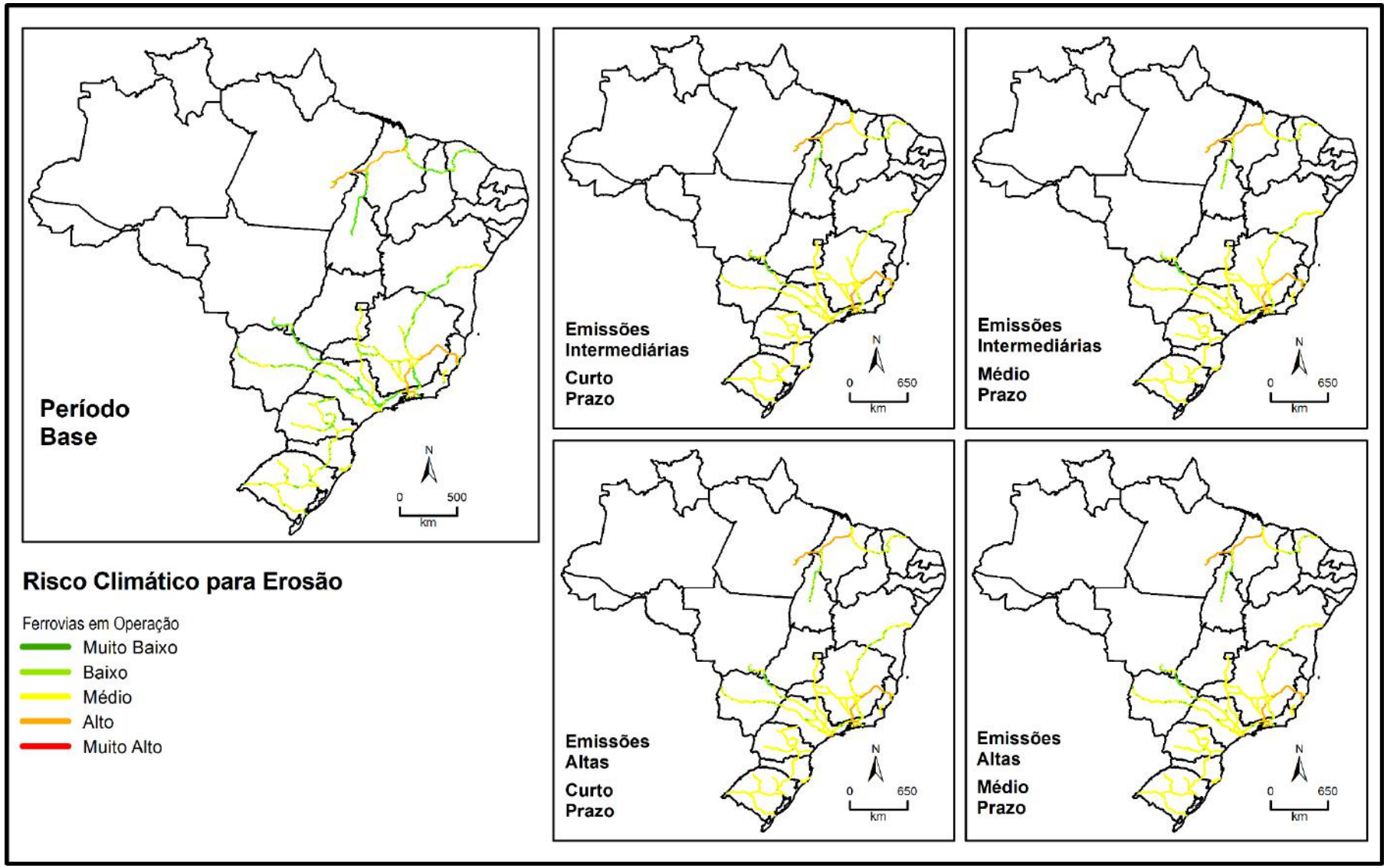
- Pará /Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas X Rio, operada pela MRS Logística);
- São Paulo (Estrada de Ferro do Litoral, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

Estas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e elevado peso de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura. Além disso, um destaque especial pode ser dado à sensibilidade do meio biofísico dessas regiões conforme já elucidado na Seção 3.1.4.

De modo geral, a infraestrutura da malha ferroviária federal brasileira apresenta médio risco climático devido ao impacto da erosão, já que não existem extensas quilometragens de ferrovias com vulnerabilidade ou ameaça altas ou muito altas.

Entretanto, tanto para o cenário de emissões intermediárias quanto para o de emissões altas, independentemente do horizonte temporal considerado, não houve grandes variações do risco climático. A Figura 18 apresenta a síntese dos mapas apresentados para o risco climático na infraestrutura ferroviária federal brasileira devido ao impacto da erosão.

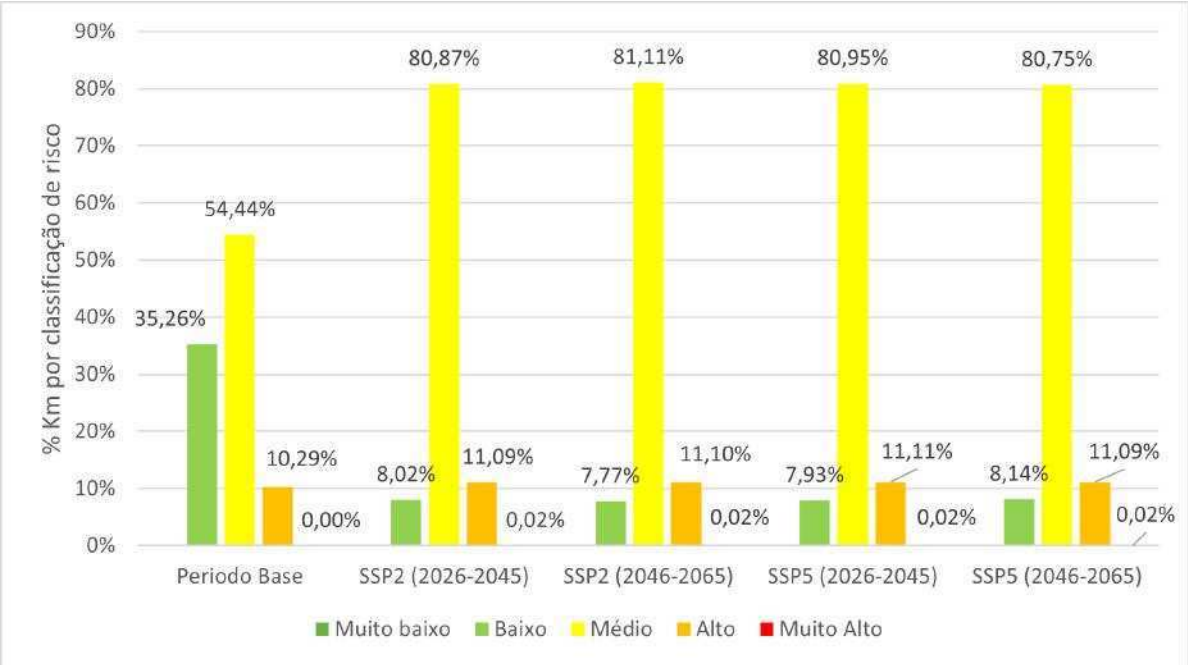
Figura 18 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentada a Figura 19, com a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão.

Figura 19 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 19, notam-se poucas variações entre os graus de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) entre os cenários e projeções, porém notável diferença entre o período base e demais cenários. Em todos os cenários e horizontes temporais considerados, 11% da malha ferroviária se encontra em áreas de alto risco. Além disso, entre o período base e os cenários futuros, há um aumento de 27% na distribuição da quilometragem das ferrovias com risco climático médio. Entretanto, esse aumento não se torna uma tendência ao longo dos diferentes horizontes temporais ou cenários de emissões, já que, independentemente do cenário avaliado, 81% das ferrovias se mantêm com risco climático médio devido ao impacto da erosão. Para o período base, 35% das ferrovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão, 54% sob risco médio e 10% sob risco alto.

Ainda de acordo com a Figura 19, para os cenários e horizontes subsequentes, o IRC devido ao impacto de erosão é baixo em 8% das ferrovias, médio em 81% e alto 11%. Essa constância no valor do índice de risco climático entre os diferentes cenários decorre do componente ameaça, apresentado na Tabela 4, a qual apresenta o percentual da quilometragem das ferrovias de acordo com o grau de ameaça climática para impactos devido à erosão para o período base e em cada um dos cenários analisados.

Tabela 4 - Quilometragem (em %) de ferrovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Erosão) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,04%	98,23%	1,38%	0,34%	0,00%
SSP2 (2026-2045)	0,00%	38,38%	60,07%	1,27%	0,29%
SSP2 (2046-2065)	0,00%	38,01%	60,43%	1,27%	0,29%
SSP5 (2026-2045)	0,00%	38,55%	59,85%	1,31%	0,29%
SSP5 (2046-2065)	0,00%	38,64%	59,79%	1,28%	0,29%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 4, para o componente “ameaça climática”, observa-se que a maior diferença se dá entre o período base e todos os demais cenários. Nas projeções, aproximadamente 60% da malha ferroviária apresenta níveis médios de ameaça climática, enquanto, no período base, praticamente todo o território apresenta baixa ameaça climática devido ao impacto à erosão. Isso pode ser explicado pela diferença existente no cálculo da ameaça climática que, no período base, se dá por meio de dados do histórico de clima observados, enquanto para os cenários futuros utiliza projeções.

A Tabela 5 apresenta a distribuição da quilometragem das ferrovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão para cada um dos cenários analisados. Observando-se a tabela é possível notar que há pouca variação com relação à quilometragem suscetível a impactos devido à erosão entre os cenários futuros e horizontes temporais.

Tabela 5 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	6.284,69	9.703,31	1.834,26	-
SSP2 (2026-2045)	0	1.429,95	14.418,26	1.976,83	3,35
SSP2 (2046-2065)	0	1.385,70	14.460,04	1.979,29	3,35
SSP5 (2026-2045)	0	1.413,37	14.431,79	1.979,87	3,35
SSP5 (2046-2065)	0	1.451,97	14.395,87	1.977,20	3,35

Fonte: Elaboração própria (2022).

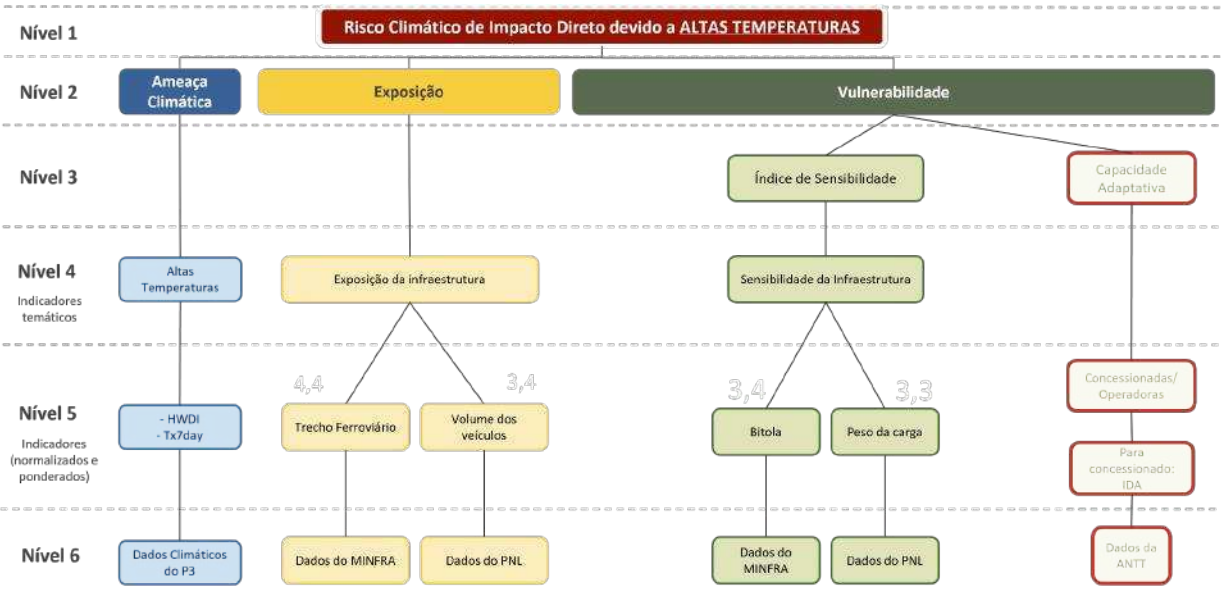
Apesar da pequena variação entre as quilometragens distribuídas em cada categoria de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto), vale a pena ressaltar, como dito anteriormente, a diferença

entre a quilometragem com risco baixo de impacto devido à erosão entre o período base (6.284,69 Km, equivalente a 35% da malha ferroviária) e os demais cenários - uma redução de cerca de 77% - e o surgimento de trechos de ferrovias com risco muito alto de impacto devido à erosão em todas as projeções realizadas.

3.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

O IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas para a infraestrutura ferroviária foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e dos subíndices sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático na infraestrutura ferroviária devido ao impacto direto de altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme expresso na Figura 20, para compor o subíndice de ameaça climática (ou indicador temático de altas temperaturas), foram considerados os dados de:

- HWDI: duração de ondas de calor (em dias); e
- Tx7day: média de temperatura dos 7 (sete) dias consecutivos mais quentes do ano.

Para o subíndice de exposição, como em todos os cenários, foram considerados os indicadores de:

- Localização do trecho ferroviário (dados do MInfra); e
- Volume de veículos (dados do PNL).

Portanto, como nos demais impactos considerados, a exposição advém principalmente do volume de veículos que trafegam no trecho ferroviário.

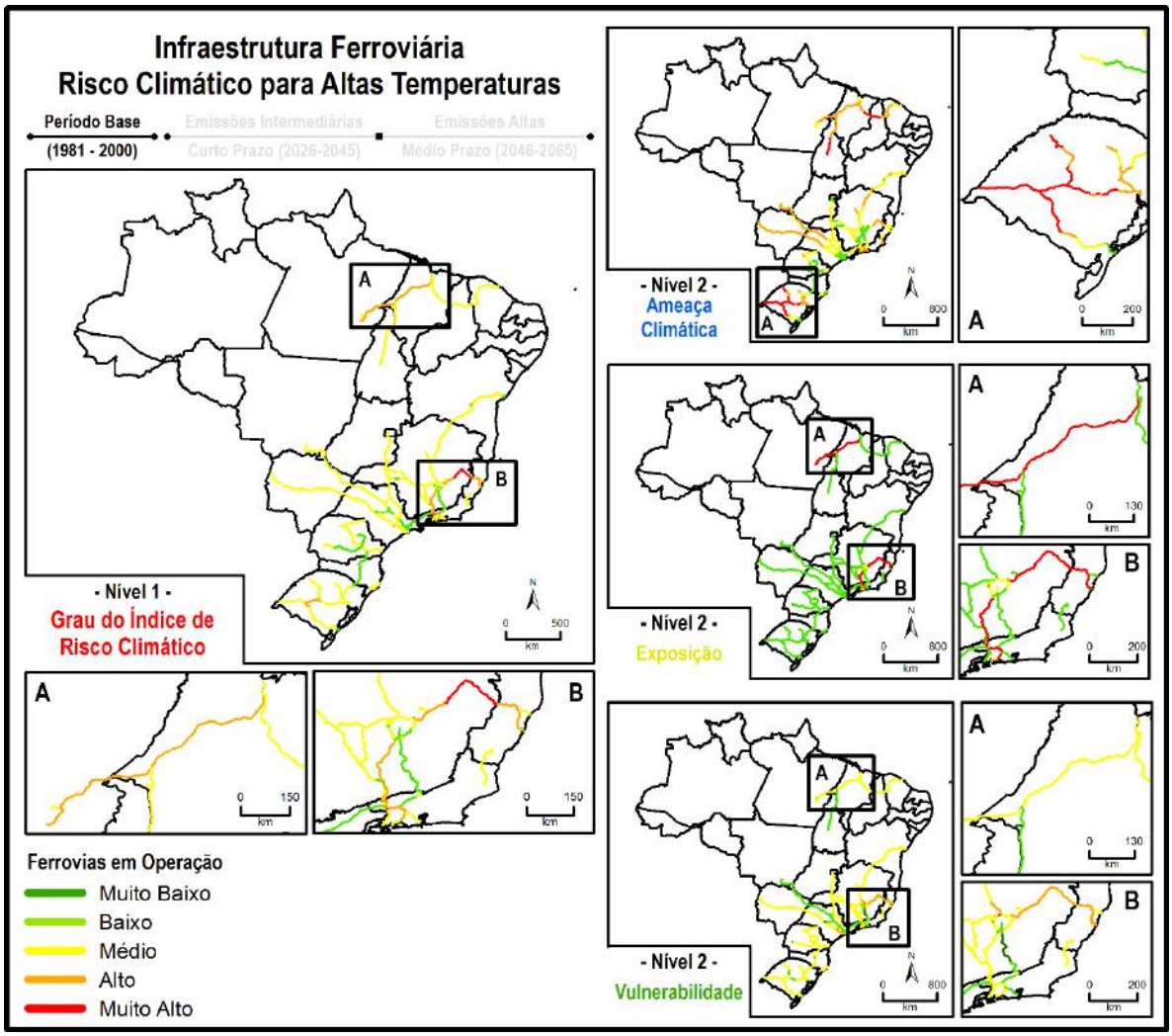
Além disso, como se trata de um impacto direto na infraestrutura ferroviária, não há sensibilidade do meio biofísico; portanto, o subíndice de vulnerabilidade para o impacto direto devido às altas temperaturas foi composto apenas pela sensibilidade da infraestrutura (dados de bitola, provenientes do MInfra, e peso da carga, do PNL).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários de análise: período base (1981 - 2000); emissões intermediárias (SSP2-4.5), para horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065); e emissões altas (SSP5-8.5), para os mesmos horizontes temporais.

3.3.1. Período base | Altas temperaturas

A Figura 21 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o mapa de IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas (Nível 1), para o período base.

Figura 21. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 21, os maiores IRC devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária federal brasileira foram observados na Região Sudeste, com destaque para os estados de Minas Gerais e do Espírito Santo (onde se verificam graus alto e muito alto de impacto), bem como, Rio de Janeiro (com grau alto). Também se destacam, no Norte/ Nordeste, o eixo Pará-Maranhão (grau alto), e no Sul, um trecho no Rio Grande do Sul, entre Cacequi e Dilermando de Aguiar (grau alto).

Tais trechos correspondem às seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A); e
- Rio Grande do Sul entre Cacequi e Dilermando de Aguiar (Estrada de Ferro Porto Alegre-Uruguaiana).

Os riscos climáticos calculados para essas ferrovias advêm principalmente da exposição, devido ao volume de veículos que trafegam nesses trechos, e da vulnerabilidade, relacionada especificamente ao peso da carga transportada (sensibilidade de infraestrutura). Para o cálculo da vulnerabilidade, diferente dos impactos intermediários (ou indiretos) apresentados anteriormente, como se trata de um impacto direto na infraestrutura, não foram considerados indicadores de sensibilidade do meio biofísico. Os trechos com maiores graus (alto e muito alto) de sensibilidade da infraestrutura se localizam no trecho Espírito Santo/Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas).

Por fim, com relação à ameaça climática, destacam-se as ferrovias localizadas no estado do Rio Grande do Sul, no trecho entre Uruguaiana e Santa Maria (Estrada de Ferro Porto Alegre-Uruguaiana), que apresentam alto grau de ameaça climática calculado para o período de base.

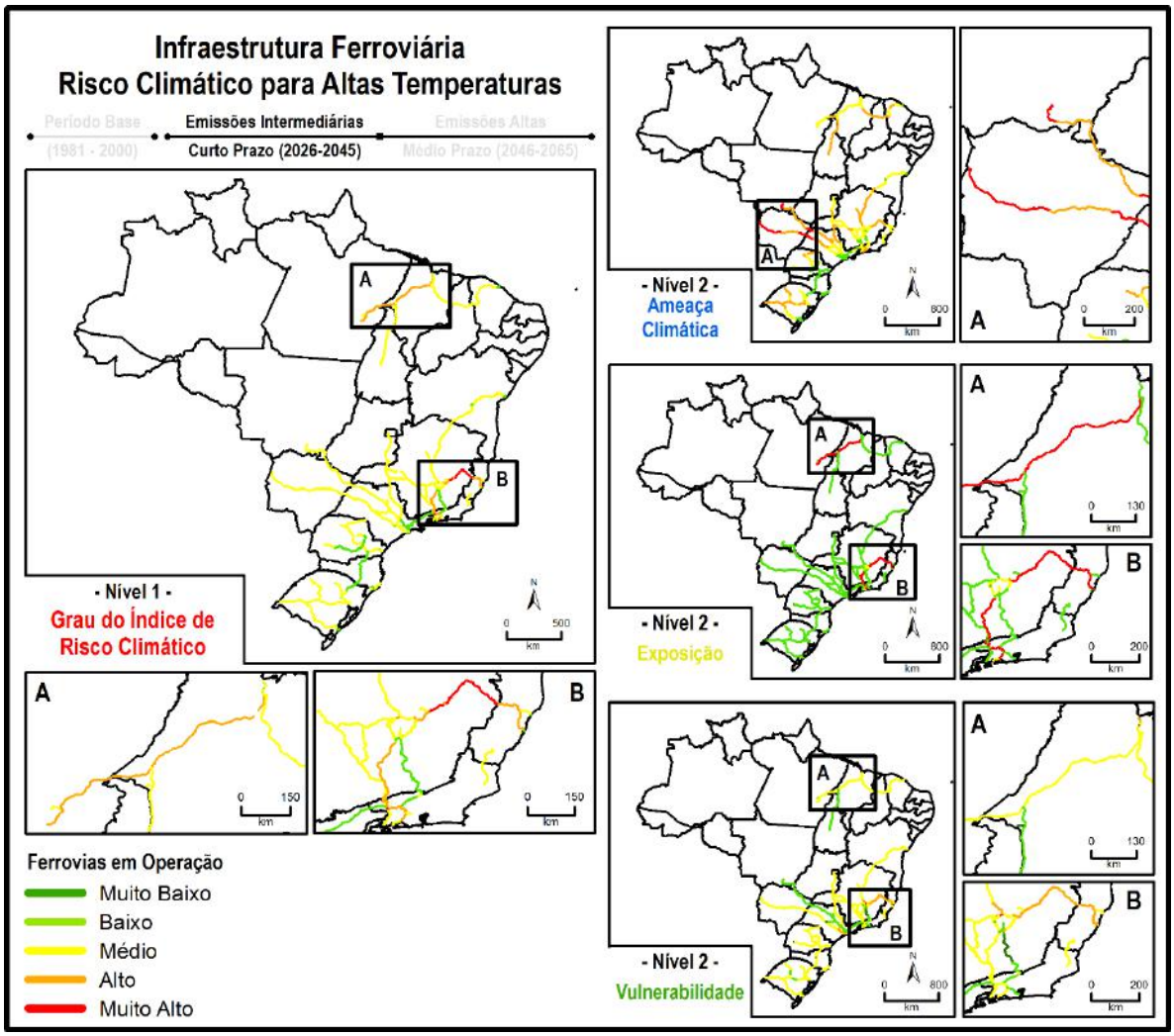
3.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura ferroviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias nos horizontes temporais de curto (2026 - 2045) e médio (2046 - 2065) prazos.

3.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 22 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026 - 2045).

Figura 22 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com maiores graus de IRC se concentram na região Sudeste, nos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, e na Região Norte/Nordeste, no Eixo Pará-Maranhão, conforme apresentado na Figura 22. Conforme apresentado na Seção 3.3.1 para o período base, aqui o elevado IRC também decorre do volume de veículos, que é um dos indicadores do componente de exposição, e do peso da carga, que compõe o componente de vulnerabilidade.

Os trechos com maior risco climático encontram-se nas seguintes ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

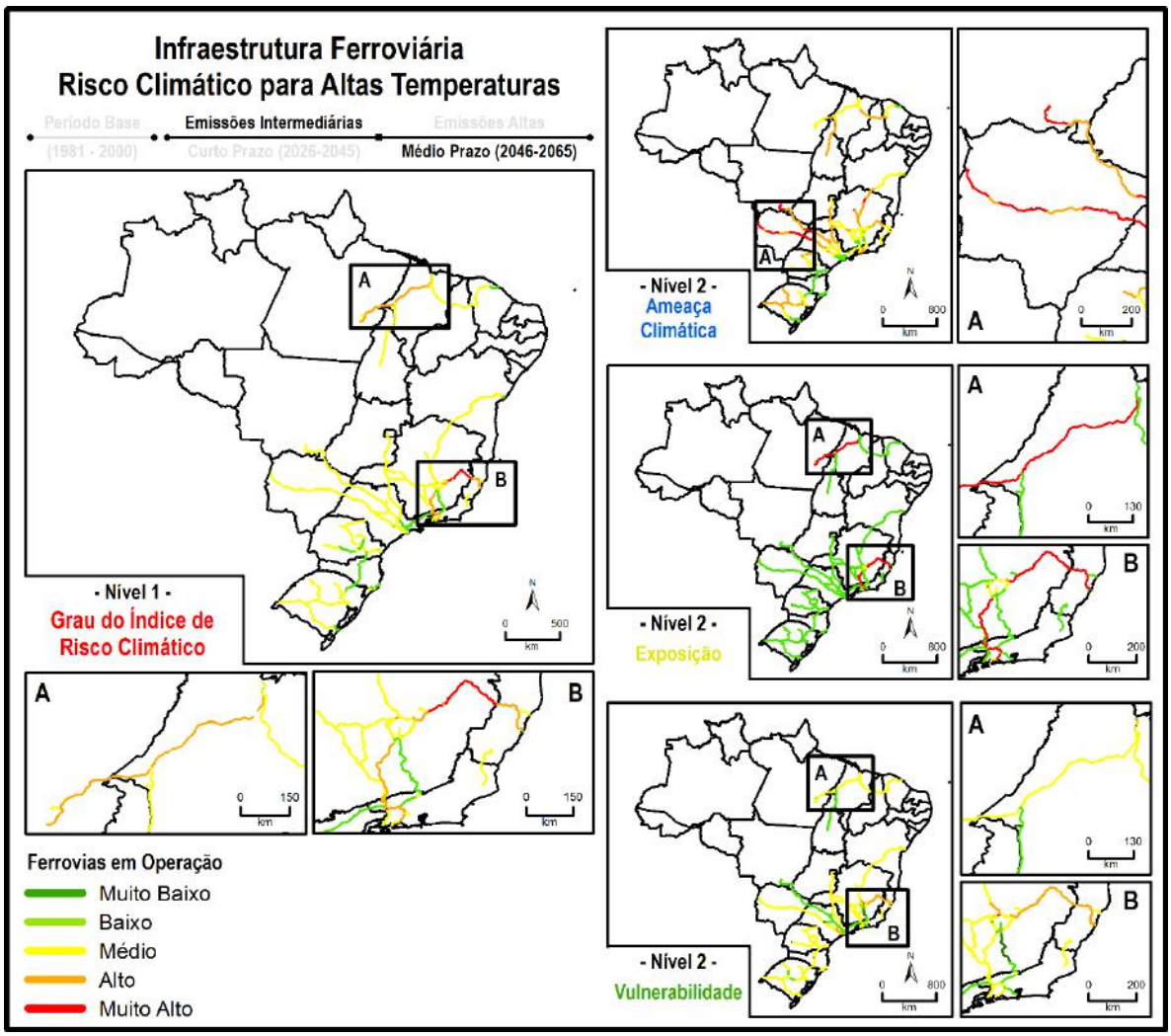
Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no componente de ameaça climática, em que a malha do Estado do Rio Grande do Sul - especificamente no trecho de Santa Maria a Uruguaiana (RMS EF 153, EF 290, EF 497 ou Estrada de Ferro Porto Alegre - Uruguaiana) - passa de grau muito alto para alto, e partes dos estados da Região Centro-Oeste (MS e MT), em que

os Estados do Mato Grosso (EF 364 RMN ou Ferrovia Norte do Brasil) e Mato Grosso do Sul (Estrada de Ferro 265 - RMO ou Estrada de Ferro Noroeste do Brasil) que passaram de grau alto para grau muito alto. Alguns trechos de ferrovias no Maranhão e em Minas Gerais se mantém com alto grau de ameaça climática.

3.3.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065) são apresentados na Figura 23.

Figura 23 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se a manutenção das principais ferrovias sob risco de impacto direto devido a altas temperaturas, se comparado ao cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045). A principal diferença está no aumento da ameaça climática nas ferrovias da

região Centro-Oeste, com destaque para a Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, tendência essa já observada entre o período base e o cenário SSP2 2026-2045.

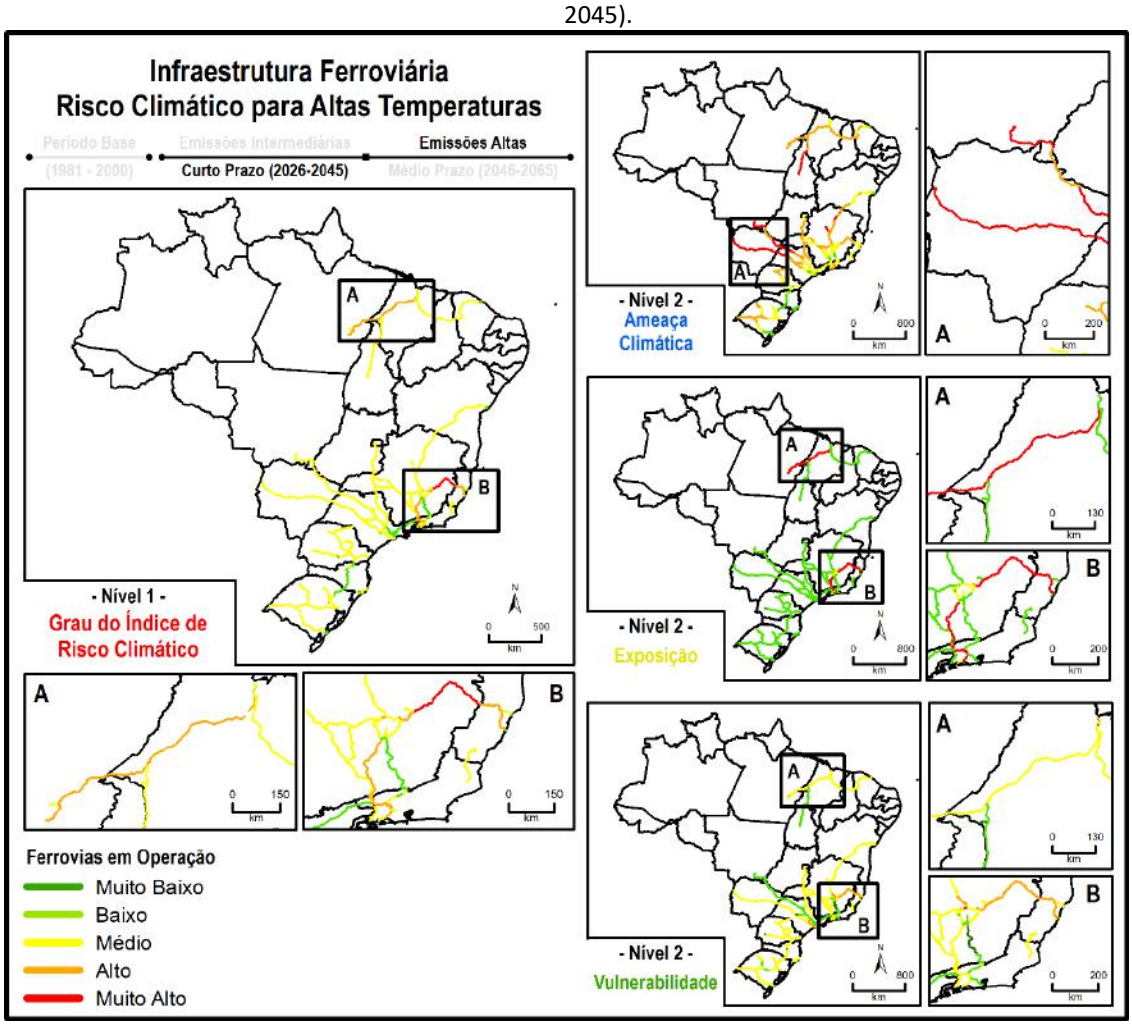
3.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nessa subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura ferroviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

3.3.3.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 24 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).

Figura 24 - Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando a Figura 24, nota-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas se concentram na região Sudeste (especificamente entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e Minas Gerais e Rio de Janeiro), e na Região Norte/Nordeste, no Eixo Pará-Maranhão, onde trafegam os maiores volumes de veículos e de peso de carga (componente exposição). Tais trechos equivalem às ferrovias:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

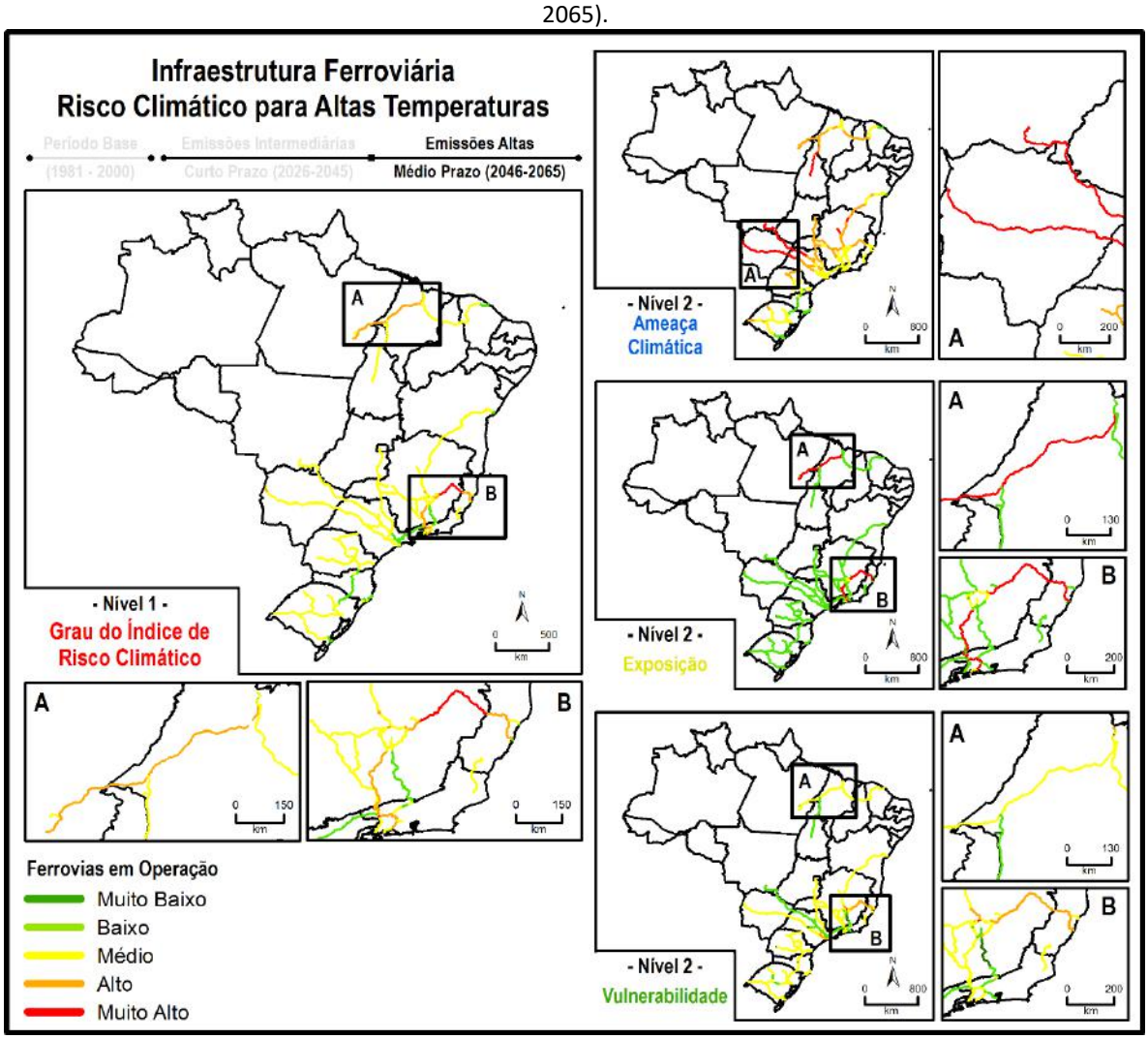
Para esse cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo, na região Centro-Oeste, praticamente toda a extensão da Ferrovia Norte do Brasil, localizada no estado do Mato Grosso (EF 364 Rumo Malha Norte - RMN), e da Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, localizada no estado do Mato Grosso do Sul (EF 265 – Rumo Malha Oeste - RMO), aparecem com grau muito alto de ameaça climática devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Além disso, notam-se outros trechos em que o subíndice de ameaça climática foi elevado: entre os estados de Minas Gerais - Bahia (FCA - Estrada de Ferro 116) e em toda a malha ferroviária dos estados do Pará e do Maranhão, que apresentam, nesse cenário (SSP5 2026-2045), alto grau de ameaça climática.

3.3.3.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 25 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).

Figura 25. Resultado da análise do risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas na infraestrutura ferroviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Verifica-se, pela Figura 25, pouca variação das áreas de alto risco climático de impacto direto na infraestrutura ferroviária devido às altas temperaturas para este horizonte de médio prazo (em comparação com o horizonte temporal de curto prazo, considerando-se o mesmo cenário de emissões - ver Subseção 3.3.3.1). No entanto, observa-se uma expansão das áreas de alto e muito alto grau de ameaça climática, que se amplia e passa a atingir áreas de ferrovias localizadas na Região Noroeste do Estado de São Paulo, especificamente na Estrada de Ferro Noroeste do Brasil (operada pela Rumo Logística).

Assim como observado para o horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045), praticamente toda a extensão da Ferrovia Norte do Brasil, no estado do Mato Grosso (EF 364 RMN), e da Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, no Mato Grosso do Sul (EF 265 - RMO), aparecem com grau alto de ameaça climática nesse cenário (SSP5 2046-2065). Além disso, notam-se trechos que também apresentam alto grau de ameaça climática entre Minas Gerais e Bahia (FCA - Estrada de Ferro 116) e em toda a malha ferroviária localizada nos estados do Pará e do Maranhão.

3.3.4 Análise do Risco Climático devido ao Impacto Direto de Altas temperaturas

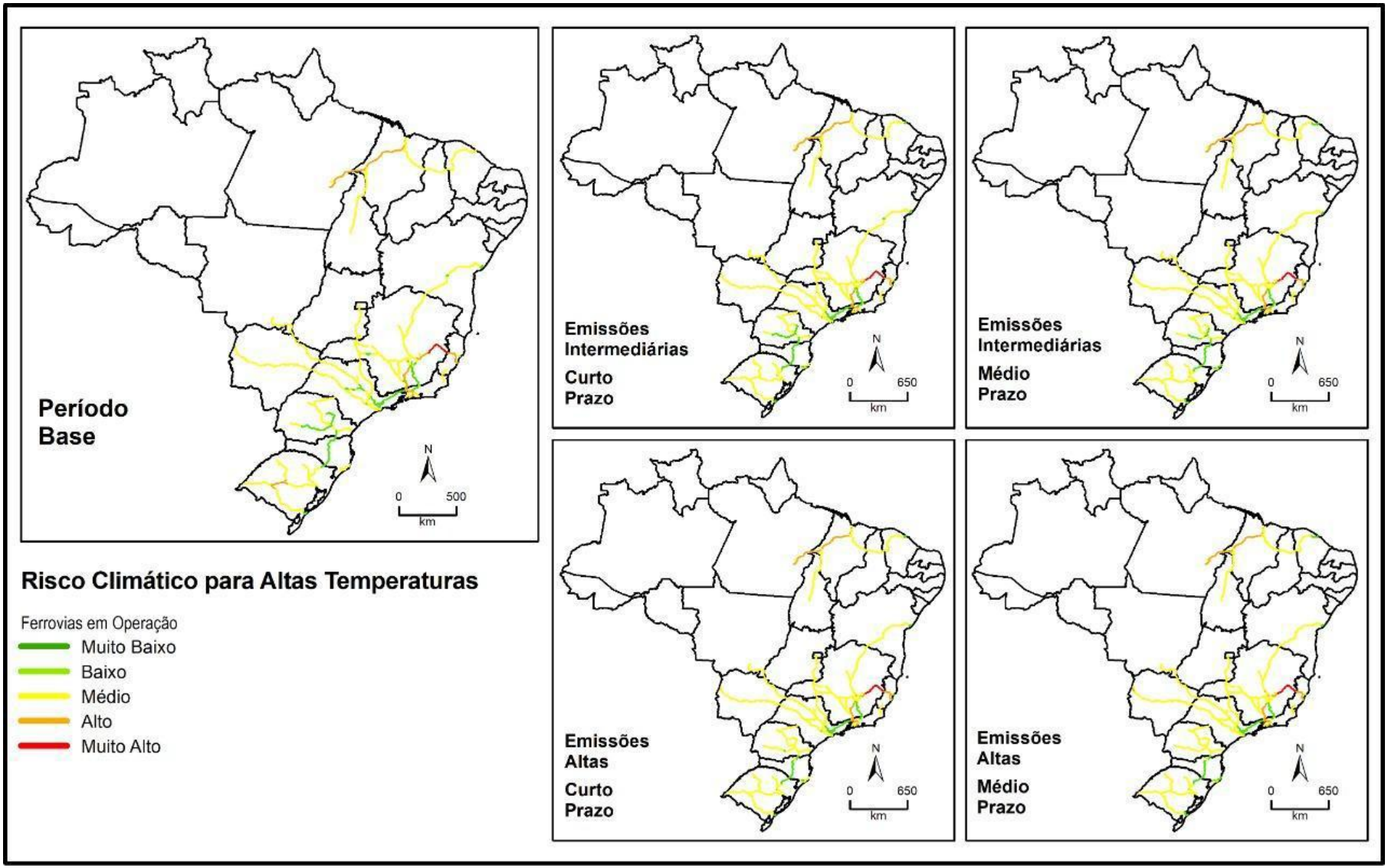
Os trechos ferroviários que apresentaram os maiores IRC devido às altas temperaturas, em todos os cenários e horizontes temporais considerados no presente projeto, foram:

- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A);
- Rio de Janeiro/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Minas x Rio de Janeiro, operada pela MRS Logística); e
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A).

Essas ferrovias se destacam porque apresentam alto volume de veículos ferroviários, indicador que compõe a exposição, e transportam elevados pesos de carga, indicador que compõe a sensibilidade da infraestrutura, a qual, por sua vez, compõe o indicador de vulnerabilidade.

Nesse contexto, é importante destacar as variações verificadas nos mapas de ameaça climática, que representaram uma tendência de aumento no grau desse componente do risco climático, em especial na Região Centro-Oeste brasileira, e em alguns estados localizados nas Regiões Sudeste e Nordeste;: no nordeste do estado de São Paulo (na Estrada de Ferro Noroeste do Brasil), bem como, em partes dos estados de Minas Gerais e da Bahia (na Estrada de Ferro Bahia-Minas FCA 116), como pode ser observado na Figura 26.

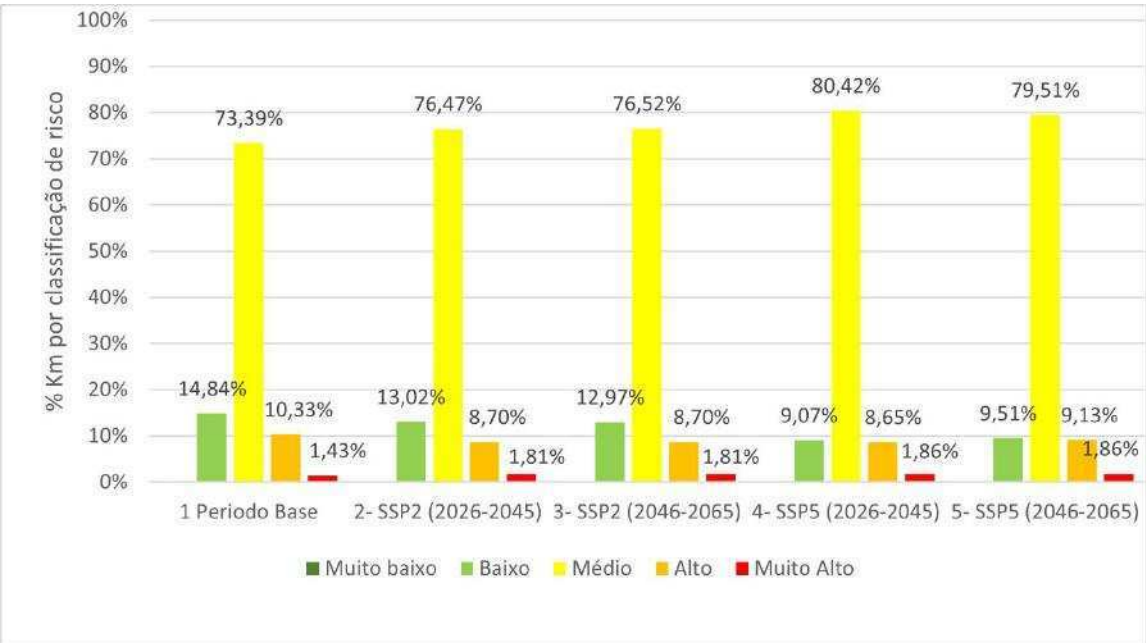
Figura 26 - Síntese: Mapa de Risco Climático de impacto a infraestrutura devido a altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os diferentes cenários e horizontes, temporais, apresenta-se a Figura 27, com a distribuição percentual da quilometragem de ferrovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Figura 27 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 27, notam-se poucas variações entre os graus de risco (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) conforme se modificam os cenários de emissões e os horizontes temporais. Há uma predominância de trechos de ferrovias com médio grau de risco climático. Destacam-se ainda as reduções nos trechos de ferrovias sob grau baixo de risco climático à medida que se aumenta o cenário de emissões e/ou modifica-se o horizonte temporal (havendo uma ampliação apenas diante do cenário de emissões altas considerando-se um horizonte temporal de médio prazo), e os crescimentos para as áreas sob risco médio e muito alto. Os trechos com alto grau de risco climático, apresentam um decréscimo em relação ao período base, embora entre os cenários de emissões intermediárias (SSP2) e alta (SSP5) no horizonte de médio prazo observa-se um comportamento contrário.

Para o **período base**, observa-se uma predominância de trechos de ferrovias sob risco climático médio de impacto direto em sua infraestrutura, correspondendo a 73,39% do total. Os trechos sob baixo risco climático correspondem a 14,84% das ferrovias, e aqueles sob risco alto ou muito alto somam 11,76%.

Ainda perante a Figura 27, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 2026-2045)**, o IRC de impacto direto devido a altas temperaturas continua sendo predominantemente médio nas ferrovias brasileiras, correspondendo a 76,47% do total. Nota-se um pequeno decréscimo dos trechos com graus baixo (13,02%) e alto (8,7%), em relação ao período base. Contudo, há um pequeno aumento dos trechos com grau muito alto, o qual se mantém abaixo de 2%.

Mantendo-se o cenário de emissões e modificando-se o **horizonte temporal** para **médio prazo (SSP2 2046-2065)**, mudanças sutis podem ser verificadas: os trechos sob médio risco aumentaram de 76,47% para 76,52%, com consequente redução dos trechos sob baixo risco de 13,02% para 12,97%. Os demais trechos mantiveram-se constantes.

No **cenário de altas emissões e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 2026-2045)**, de acordo com a Figura 27, os trechos ferroviários com risco médio representam 80,42%, enquanto os trechos com baixo risco somam 9,07% - uma variação de cerca de 4% em relação ao período base e aproximadamente 3% para o cenário intermediário. As categorias do gráfico apresentado na Figura 27 representativas dos demais graus de risco climático apresentaram pequenas variações em relação aos cenários de emissões intermediárias. Esse mesmo padrão foi observado para o **horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065)**.

De forma geral, cerca de 10% da malha ferroviária federal brasileira apresentou graus alto e muito alto de risco climático de impacto direto devido a altas temperaturas. Observou-se um aumento nos trechos com risco climático médio de 73% da malha no período base, para 79% no cenário pessimista considerando-se o horizonte de médio prazo. Essa variação decorre principalmente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 6 apresenta o percentual dos trechos, por grau de ameaça climática, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 6 - Quilometragem (em %) de ferrovias, por graus de ameaças climáticas, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Cenários	Ameaça Climática (Altas temperaturas) (% por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,07%	20,52%	38,39%	32,33%	8,68%
SSP2 (2026-2045)	0,13%	16,34%	42,27%	35,58%	5,67%
SSP2 (2046-2065)	0,13%	15,54%	40,82%	35,78%	7,73%
SSP5 (2026-2045)	0,13%	8,42%	37,71%	39,55%	14,19%
SSP5 (2046-2065)	0,13%	5,81%	41,50%	37,02%	15,53%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 6, para o componente “ameaça climática”, os trechos com grau de risco baixo caíram de 20,52% (período base) para 5,81% (no cenário de altas emissões e médio horizonte temporal - SSP5 2046-2065). Também se observa aumento dos trechos de ferrovias nas categorias de risco climático: médio (38,39% no período base para 41,5%); alto (de 32,33% para 37,02%); e muito alto (de 8,68% para 15,53%, um aumento de quase 100%).

A Tabela 7 apresenta a distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos direto na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Tabela 7 - Distribuição da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido a altas temperaturas em cada um dos cenários analisados.

Cenários	Risco climático (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0	2.658,57	13.143,38	1.850,40	256,81
SSP2 (2026-2045)	0	2.322,28	13.644,89	1.551,73	323,40
SSP2 (2046-2065)	0	2.313,79	13.653,38	1.551,73	323,40
SSP5 (2026-2045)	0	1.617,61	14.349,56	1.543,50	331,63
SSP5 (2046-2065)	0	1.696,00	14.185,68	1.628,98	331,63

Fonte: Elaboração própria (2022).

A partir da observação da Tabela 7, é possível notar uma tendência de aumento dos trechos ferroviários com graus de risco climático médio, alto e muito alto, e uma consequente diminuição dos trechos com baixo risco. Caminhando-se do período base em direção ao cenário pessimista (emissões altas) em um horizonte temporal de médio prazo (SSP5 2046-2065), os trechos com grau muito alto de risco climático aumentam cerca de 30%, passando de 256,81 km para 331,63 km. Por outro lado, as áreas com baixo risco climático reduzem de 2.658,57 km para 1.696,00 km (redução de aproximadamente 36%).

4. Conclusão - Modo Ferroviário

Na malha ferroviária federal brasileira, os trechos de alto e muito alto risco representam 10% a 12% da malha para os três impactos (deslizamento, erosão e altas temperaturas) e em todos os cenários analisados (período base e as quatro projeções realizadas). Desse modo, cerca de 2.000 km de ferrovias no Brasil se encontram com alto e muito alto grau de risco. Cabe aqui reforçar que risco alto e muito alto não significam necessariamente que o nível de criticidade é alto pois esta é uma avaliação relativa e não absoluta. Os trechos de alto e muito alto risco que se repetem em todos os cenários e projeções são:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas x Rio de Janeiro, operada pela MRS Logística);
- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas Gerais, operada pela Vale S.A); e
- Pará/Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Isso se deve ao fato de os componentes **exposição** e **vulnerabilidade** (mais especificamente o subíndice de **sensibilidade da infraestrutura**) ser o mesmo em todos os impactos e cenários.

No que tange ao **risco climático de impactos na infraestrutura ferroviária devido ao deslizamento**, os trechos com graus de risco alto e muito alto estão concentrados no Sul/Sudeste brasileiro (Serra do Mar e Serra Geral). Essas áreas se mantiveram com alto grau de risco ao longo da análise, sendo a evolução de trechos de grau baixo de risco para médio a principal tendência observada entre os cenários e os horizontes temporais. Diferente dos outros impactos, foi observada uma concentração

dos trechos de risco alto e médio, e percentual considerável de áreas com baixo grau de risco, variando de cerca de 30% no período base para 20% no cenário pessimista de médio prazo (SSP5 2046-2065). Essa tendência acompanha o componente de **ameaça climática,** que tem menos de 1% de áreas de alto risco, tanto no período base, quanto nas projeções, mas com uma inversão entre baixo e médio risco climático para o período base, com 74,8% de ferrovias com baixa ameaça e 24,1% com altas, enquanto no cenário pessimista e médio prazo esses valores chegam a 28,5% e 70,65%, respectivamente.

Já para a análise do **risco climático de impactos na infraestrutura ferroviária devido à erosão,** observa-se uma distribuição mais homogênea do IRC pelo país, com quase toda a malha apresentando grau médio de risco (54% no período base e 81% nas projeções). Desse modo, é importante compreender a erosão como uma ameaça que deve ser tratada de forma sistêmica no planejamento e na operação ferroviária. As áreas de alto risco se concentram nas ferrovias com maior volume e peso de carga transportados, totalizando 10% da malha com risco alto; contudo, não apresenta trechos com risco muito alto. Nessa análise, foram verificadas alterações marginais entre as projeções, com variações substanciais entre essas e o período base, havendo trechos com baixo risco variando de 35% para apenas 8% nas projeções. Essa diferença é ainda mais acentuada no componente **ameaça climática**, que, no período base, apresenta 98% da malha com baixo grau de ameaça e, nas projeções, apenas 28%. Para esse componente do risco climático, menos de 1% das áreas tem alto ou muito alto grau de ameaça climática.

A análise de **risco climático de impacto direto na infraestrutura ferroviária devido a altas temperaturas** resultou em cerca de 73% da malha com risco médio ou alto no período base, que se eleva para cerca de 80% no cenário de altas emissões (SSP5). Diferente do risco de impacto devido ao deslizamento, aqui os trechos com baixo risco a altas temperaturas se concentram no litoral e nas Estradas de Ferro Vitória x Minas Gerais e Carajás.

Outra diferença importante observada no impacto devido a altas temperaturas foi a variação na ameaça climática ao longo dos cenários e a participação dos trechos com alto e muito alto risco desde o período base até o SSP5 (2046-2065). No período base, esses trechos representam, respectivamente, 32% e 8% da malha ferroviária; já no cenário pessimista de médio prazo, estes percentuais chegam a 37% e 15% respectivamente. Esse avanço acontece especialmente nas ferrovias do Centro-Oeste e do Oeste Paulista, onde observa-se, ao longo da evolução dos mapas, o incremento da ameaça climática do centro do Brasil em direção ao litoral.

Ainda na análise de altas temperaturas, as áreas com risco climático médio são dispersas, e as áreas de alto e muito alto risco se distribuem nas regiões mais interioranas, apresentando um gradiente que decresce no sentido do litoral (do Centro-Oeste para o litoral). A partir da análise foi possível notar um aumento nos trechos com alto grau de **ameaça climática** de 8% para 15% entre o período base e o cenário de altas emissões de médio prazo (SSP5 2046-2065). Mesmo sendo um percentual relativamente baixo, esse resultado traz à luz novos trechos ferroviários que estão sob alto grau de ameaça climática a altas temperaturas.

Em relação à **exposição da infraestrutura**, cujo principal indicador é o peso da carga, observa-se que apenas quatro estradas de ferro foram consideradas com exposição muito alta da infraestrutura, são elas:

- Minas Gerais/ Rio de Janeiro (Estrada de Ferro Minas Gerais x Rio, operada pela MRS Logística);

- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale S.A);
- São Paulo (Estrada de ferro do litoral, operada pela MRS Logística); e
- Pará/ Maranhão (Estrada de Ferro Carajás, operada pela Vale S.A).

Tais ferrovias são responsáveis pelo escoamento de minérios para os portos exportadores e apresentam alto tráfego de composições. Desse modo, trata-se de áreas de importância estratégica para a economia brasileira.

O componente **vulnerabilidade** é composto por dois subíndices, a sensibilidade biofísica e a sensibilidade da infraestrutura. O subíndice de **sensibilidade biofísica** foi calculado a partir de bases específicas para os impactos devido ao deslizamento e à erosão, exceto para altas temperaturas, que, por se tratar de um impacto direto na infraestrutura, não considerou esse subíndice em seus cálculos. Já a **sensibilidade da infraestrutura** se mantém a mesma para todos os cenários. Logo, tem-se em parte uma sobreposição de tais áreas, mas também algumas áreas/*hotspots* específicos. Assim, observam-se áreas comuns de alta vulnerabilidade:

- Espírito Santo/ Minas Gerais (Estrada de Ferro Vitória a Minas, operada pela Vale SA); e
- Trecho final da Ferrovia Minas Gerais - Santos.

Apesar desta confluência observada para o impacto intermediário de erosão, a Estrada de Ferro Vitória a Minas passa para muito alto risco climático, e a Estrada de Ferro Carajás entra no rol das áreas de alta vulnerabilidade. Já para o deslizamento, as áreas de alto e muito alto risco são distribuídas nas regiões Sul e Sudeste, em especial em áreas de relevo acidentado, acompanhando a Serra Geral no Sul do Brasil e a Serra do Mar. Outro ponto relevante na análise é que, para o impacto devido à erosão, não existem pontos de baixa vulnerabilidade, mostrando que essa é uma questão que está além das regionalidades; já o deslizamento, apresenta áreas de muito alto e baixo risco.

No levantamento e mapeamento de vulnerabilidades e riscos climáticos é importante validar os resultados (de SHREBININ *et al.*, 2019). No entanto, não foi possível realizar a validação no âmbito do projeto AdaptaVias devido à falta de dados de registros de impactos nas rodovias e ferrovias. Futuramente uma validação dos resultados pode ser realizada comparando os IRC do período base com os registros de impacto das concessionárias, DNIT e outros.

Diante do apresentado, sugere-se que estudos futuros sobre o risco climático das ferrovias brasileiras sejam desenvolvidos, com análises específicas de risco climático sobre as ferrovias que ainda encontram-se em fase de planejamento (ou seja, não construídas) e que a análise de risco climático se dê de forma mais específica para determinados *hotspots*, que seriam aquelas áreas de ferrovias que nesse estudo foram identificadas, já no período base, com risco alto ou muito alto, ou cujo risco aumente considerando-se os diferentes cenários e horizontes temporais. Ao focar em ferrovias específicas, futuros estudos podem incluir bases mais robustas sobre a infraestrutura existente, permitindo uma análise mais aprofundada dos riscos.

5. Modo Rodoviário

O modo de transporte rodoviário é o responsável pela maior movimentação de cargas no Brasil (MInfra, 2021). Para avaliar o risco climático da infraestrutura rodoviária foram considerados os **cinco impactos** da mudança do clima mencionados anteriormente. Para cada um dos impactos intermediários, foram elaborados Índices de Risco Climático considerando-se **três cenários**: (a) período base (1981-2000); (b) cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5); e (c) cenário emissões altas (SSP5-8.5). Cada cenário, com exceção do período base, foi calculado para **dois horizontes temporais**: (i) curto prazo (2026-2045) e (ii) médio prazo (2046-2065).

Para compreender os mapas dos IRC (Nível 1), é necessário observar os mapas relacionados à ameaça climática, à exposição e à vulnerabilidade da rede rodoviária federal (Nível 2 da estrutura hierárquica), já que o risco é o resultado da combinação destes componentes. O componente de vulnerabilidade foi calculado apenas com informações sobre sensibilidade (Nível 3), uma vez que os dados disponíveis para capacidade adaptativa não puderam ser incorporados na análise - não atendiam aos critérios de abrangência e formato.

A exposição é principalmente a presença de elementos (infraestrutura, sistemas etc.) em lugares que podem ser adversamente afetados por impactos da mudança do clima. Além da localização geográfica, a exposição também pode considerar a importância dos elementos expostos. No caso da infraestrutura rodoviária, os indicadores utilizados para exposição foram: o volume médio diário anual (VMDA) e o trecho rodoviário. A heterogeneidade do VMDA na malha analisada e alta concentração de veículos em trechos específicos ficou representada nos mapas de exposição. A metodologia adotada priorizou utilizar o máximo de dados existentes, cabendo em estudos futuros adicionar novos indicadores para compor a exposição de forma que o resultado representa ainda melhor a exposição na malha rodoviária brasileira.

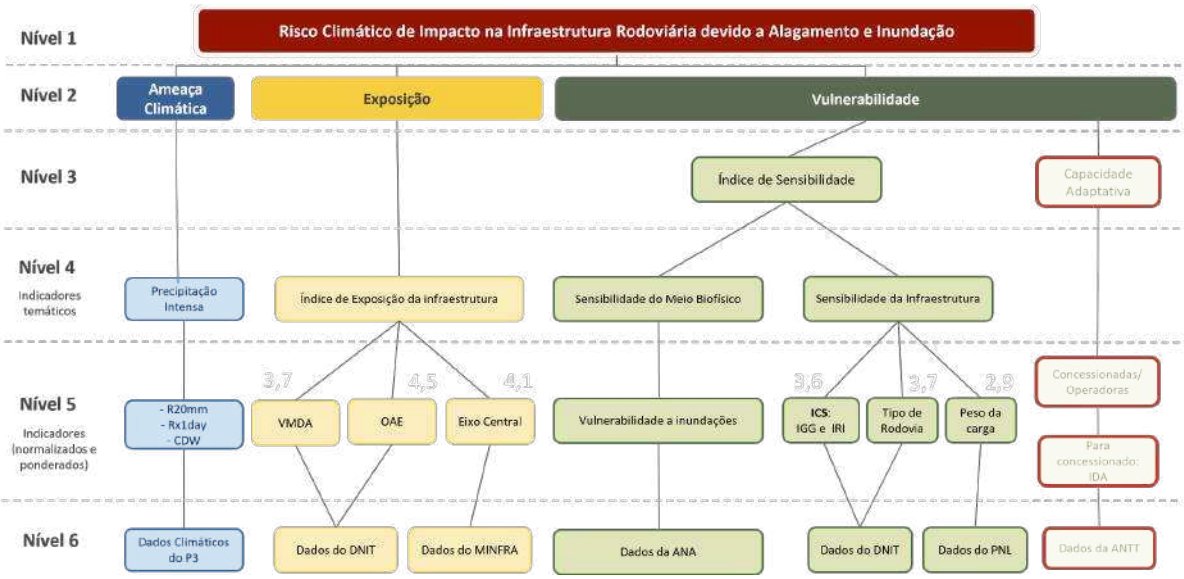
Outra observação relevante é em relação às diferenças entre os segmentos apresentados nos mapas de índice de risco climático, ameaças climáticas, exposição e vulnerabilidade. A ameaça consegue compreender áreas em que não foi possível obter os dados de vulnerabilidade e exposição, e por conseguinte, gerar os resultados de índice de risco climático. Desse modo, ficou decidido manter a ameaça mais ampla para não perder essa perspectiva nacional. Faz-se necessário salientar que diferenças nos valores totais e parciais de extensão dos trechos rodoviários podem e devem ocorrer. Isso é devido ao processo topológico de conversão de polígono (área) para linha. Essa transformação pode acarretar pequenas diferenças (alguns metros por trecho), os quais, uma vez somados, resultam em extensões de quilômetros de diferença. Ainda assim, tais diferenças são irrelevantes quando contextualizadas em um cenário nacional.

A seguir são apresentados os principais resultados, por impacto intermediário, obtidos para a infraestrutura rodoviária nacional. Para cada mapa de risco climático, são apresentados os mapas dos seus componentes. Por fim, é feita uma análise comparativa dos riscos climáticos por cenários e horizontes.

5.1. Índice de Risco Climático devido ao impacto de alagamento/inundação

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de alagamento/inundação foi calculado a partir dos dados, dos indicadores e dos subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 28.

Figura 28 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 28, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou superior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico:

- Mapa de vulnerabilidade a inundações da Agência Nacional de Águas (ANA); e
- Sensibilidade da infraestrutura, calculada a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL).

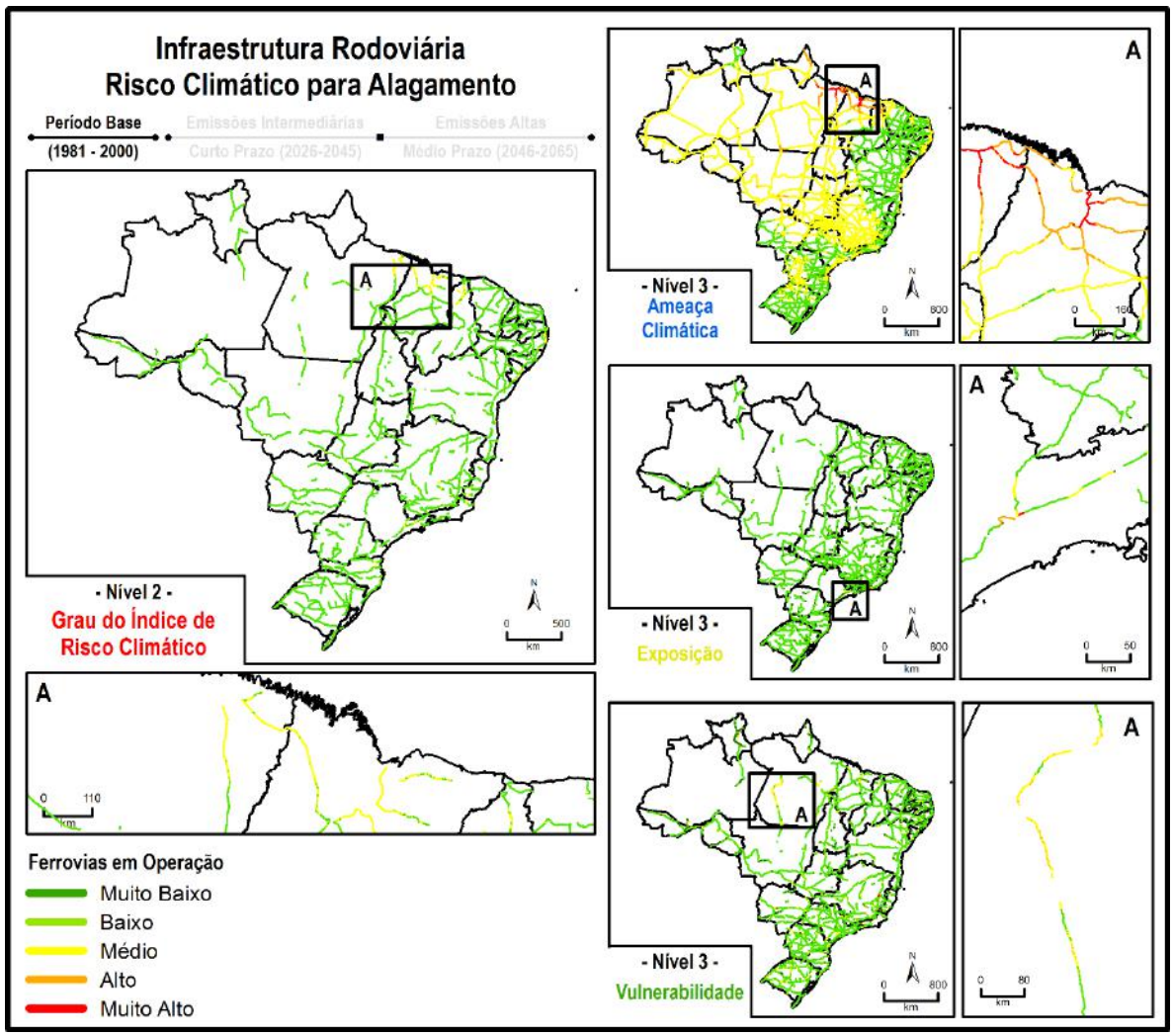
A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final (5.1.4) consolidando a análise de risco devido ao impacto de alagamento/inundação.

5.1.1 Período base | Impacto devido a alagamento/inundação

Quanto ao **Índice de Risco Climático** de impacto devido a alagamento/inundação (Nível 1), para o período base, composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade, verifica-se que os trechos com maior grau de risco climático são trechos de rodovias no Pará e Maranhão, além de alguns trechos de rodovias nos Estados do Nordeste, em especial perto do litoral (BR-101). As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau alto ou muito alto de risco climático de impacto devido a alagamentos/inundação (Figura 29).

A Figura 29 apresenta também os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2).

Figura 29 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias nos Estados do Pará e Maranhão se encontram com grau alto e muito alto de **ameaça climática**. Além destes, destacam-se muitos trechos com ameaças médias em quase toda a região

Norte e Centro-Oeste, bem como, em Minas Gerais, além de trechos no litoral do Nordeste, no interior da região Sul e em São Paulo.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a alagamento e inundação, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, a única rodovia com grau de ameaça climática médio e alto é a BR-163, que obteve baixo valor do ICS atestado nestes trechos rodoviários. Todas as demais rodovias têm grau baixo ou muito baixo.

A única rodovia com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** é a Rodovia Presidente Dutra (BR-116), em função do elevado volume de veículos que transitam por ela diariamente. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

Os mapas de vulnerabilidade e de exposição, para cada impacto analisado, se manterão os mesmos observados para o período base, repetindo-se em todos os cenários (emissões intermediárias e altas) e horizontes temporais considerados (curto prazo e médio prazo), já que a vulnerabilidade é determinada pela sensibilidade do meio físico e a sensibilidade da infraestrutura, e a exposição relaciona-se principalmente com VMDA de veículos que trafegam na rodovia. Neste estudo, não foram feitas modelagem acerca das possíveis variações de infraestrutura e/ou fluxo de veículos. Assim, não serão analisados e discutidos nas análises dos cenários/ horizontes temporais, sendo apresentados apenas para os períodos-base, a fim de evitar repetição textual e exaustão ao leitor, sendo que em anexo são apresentados os mapas completos.

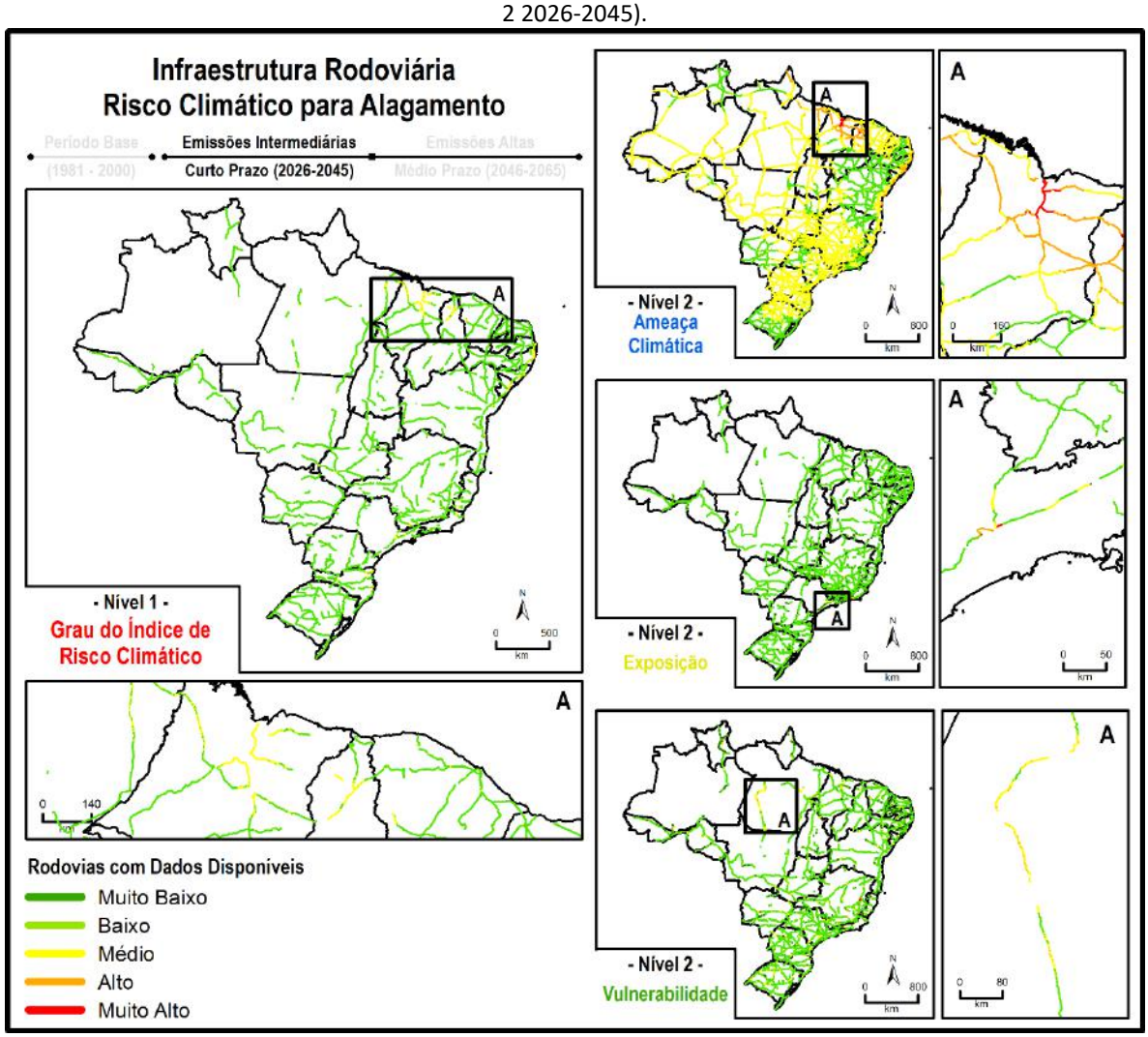
5.1.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de alagamento e inundação, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

5.1.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 30 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 30- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



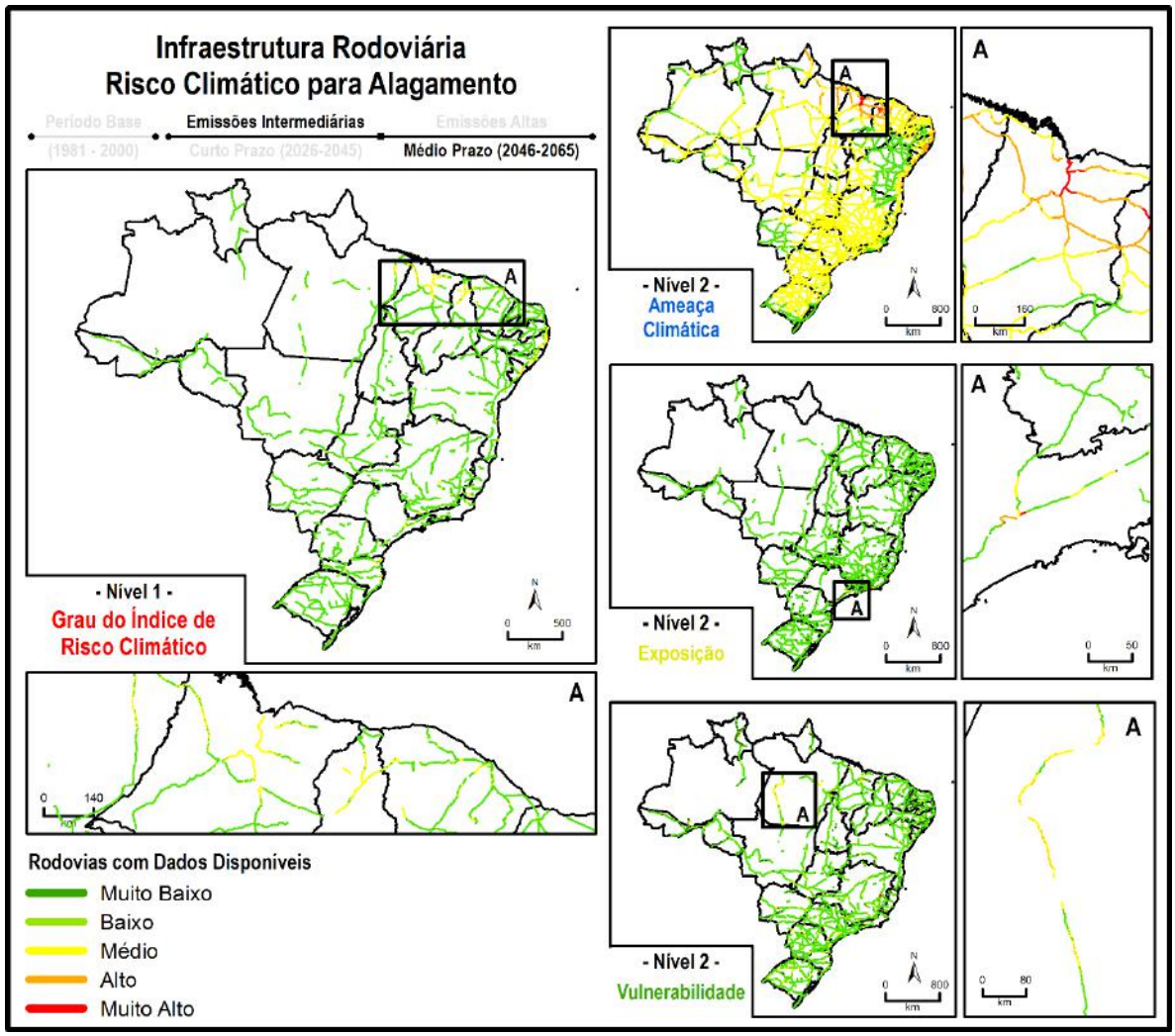
Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se praticamente o mesmo resultado do período base: todas as rodovias têm grau de IRC muito baixo ou baixo, com exceção de alguns trechos no Pará e no Maranhão, além de partes de rodovias no litoral do Nordeste, as quais têm grau de risco climático médio. A única diferença em relação ao período base são alguns trechos de rodovias no Piauí e nas regiões Sul e Sudeste, que passaram para o grau médio de risco climático. Cabe ainda ressaltar que quando se realiza uma análise em relação à ameaça climática nota-se que houve um aumento de regiões que passam de grau baixo, no período base, para médio, no SSP2-4.5 de curto prazo, com destaque para os estados de São Paulo e Paraná.

5.1.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 31.

Figura 31- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O mapa mostra praticamente o mesmo resultado do horizonte temporal de curto prazo: alguns trechos no Pará, Maranhão e Piauí, além de trechos pontuais nas regiões Sul e Sudeste, têm grau de risco climático médio, enquanto as demais rodovias têm risco baixo e muito baixo de sofrer impactos devido a alagamentos e inundações no futuro, considerando-se o cenário de emissões intermediário. Destaca-se ainda que, em relação às ameaças climáticas, identifica-se um maior acréscimo de áreas com grau médio no SSP2-4.5 de médio prazo em relação ao SSP2-4.5 de curto prazo, com destaque para as rodovias dos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul.

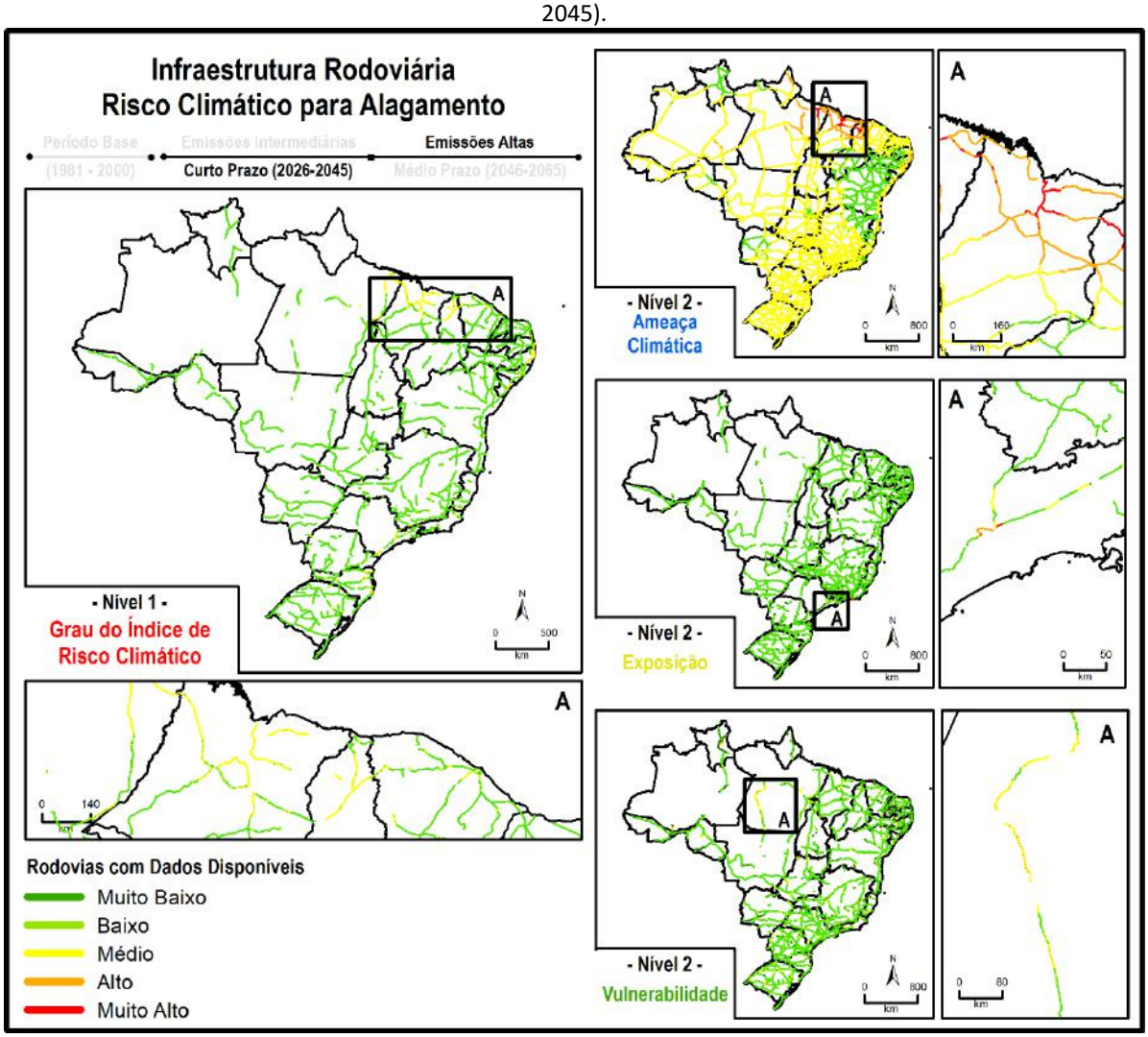
5.1.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

São apresentados a seguir os resultados do IRC devido ao impacto de alagamento e inundação para o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.1.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 32 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 32- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



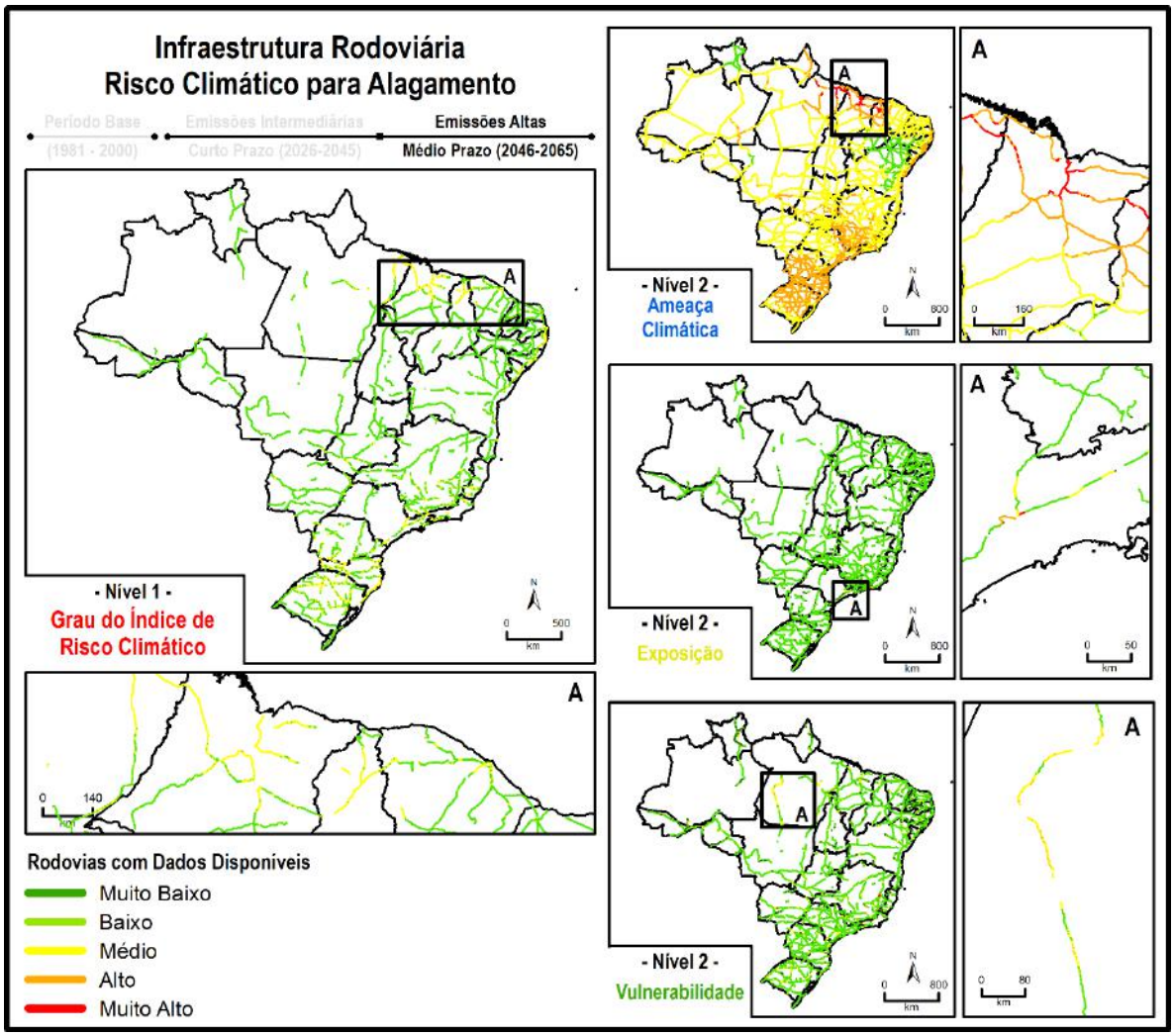
Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se resultados semelhantes aos obtidos para o cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de médio prazo: alguns trechos no Pará, Maranhão e Piauí, além de trechos pontuais nas regiões Sul e Sudeste, têm grau de risco climático médio, e as demais rodovias têm risco baixo e muito baixo de sofrer impactos devido a alagamentos e inundações no futuro, considerando-se o cenário de emissões altas e curto prazo. Isso advém do aumento de trechos rodoviários com grau médio neste cenário em relação ao período base com destaque para os estados das regiões Sul, Centro-Oeste e Sudeste.

5.1.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 33 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de alagamento/inundação (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 33- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Além dos trechos com grau médio de risco climático observado no horizonte temporal de curto prazo, nota-se a tendência de aumento do grau de risco para o nível médio em várias rodovias nas regiões Sul e Sudeste do país. Em relação ao SSP5 de curto prazo, nota-se que o mapa de ameaça climática do SSP5 de médio prazo apresenta uma grande quantidade de trechos com grau alto de risco de impacto, com destaque para os estados da Região Sul e Sudeste e o litoral do Nordeste.

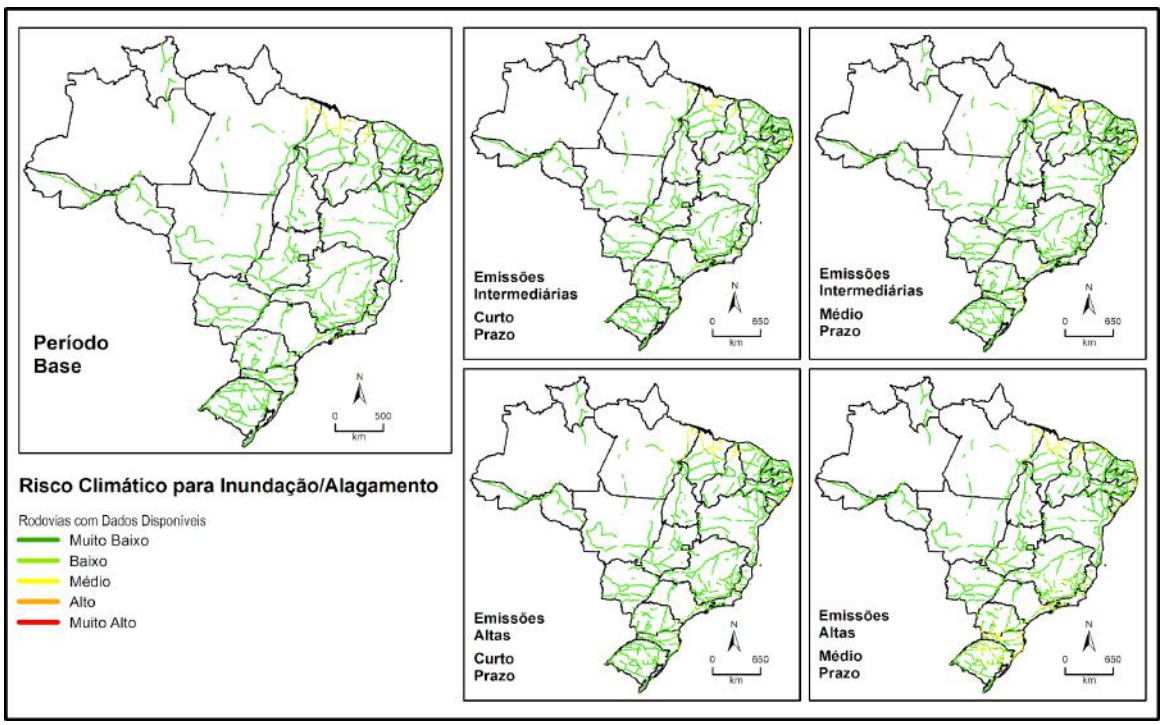
5.1.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto a alagamento/inundação

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de alagamento e inundação em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo estão nas partes litorâneas dos estados Maranhão, Piauí, Pernambuco, Alagoas e Sergipe. Nos cenários de emissões altas, ainda aparecem rodovias em estados do Sul e Sudeste, como Rio de Janeiro, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, mas, no entanto, em nenhum cenário, atingiram o grau alto do risco climático.

Estas rodovias se destacam porque apresentam os maiores graus de ameaça climática, e a exposição e vulnerabilidade não variam muito entre as rodovias. Como os componentes vulnerabilidade e exposição foram mantidos ao longo da análise, o fator de variação do risco climático de impacto devido a alagamentos/inundação por cenário e horizonte temporal é a ameaça climática.

Conforme pode ser observado na Figura 34, que sintetiza o risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação sobre a infraestrutura federal de transporte rodoviário brasileira, o cenário de emissões intermediárias não apresenta variações significativas entre os horizontes temporais decorrentes do componente da ameaça climática. Porém, no cenário de emissões altas, nota-se um aumento do número de rodovias com grau de risco climático médio, em especial nas regiões Sul e Sudeste.

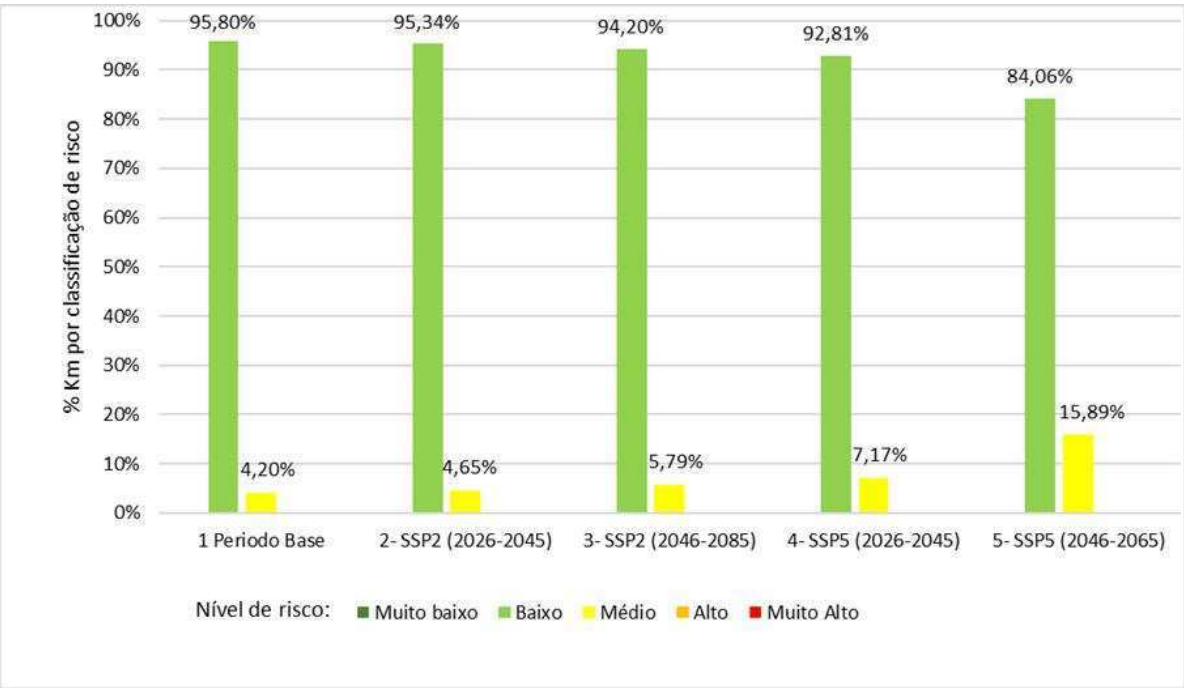
Figura 34 - Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de alagamento/inundação.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e os horizontes temporais, é apresentado, na Figura 35, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 35 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a alagamento/inundação para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

No cenário de emissões altas (SSP5), 84,06% da infraestrutura rodoviária brasileira analisada se mantêm em grau baixo; contudo, observa-se uma tendência de aumento dos trechos com grau médio, em especial no cenário de emissões altas no horizonte temporal de médio prazo.

A Tabela 8 apresenta o percentual dos trechos rodoviários, por grau de **ameaça climática,** para impactos devido a alagamento/ inundação em cada um dos cenários analisados e o período base.

Tabela 8 - Quilometragem (em %) de rodovias, por graus de ameaças climáticas, para cada um dos cenários analisados para alagamento/inundação.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,01%	40,57%	55,92%	2,84%	0,65%
SSP-2 (2026-2045)	0,03%	29,48%	66,25%	3,97%	0,28%
SSP-2 (2046-2065)	0,02%	21,46%	73,35%	4,78%	0,39%
SSP-5 (2026-2045)	0,00%	17,83%	76,46%	4,83%	0,87%
SSP-5 (2046-2065)	0,01%	7,60%	61,75%	29,50%	1,14%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Tabela 8, verifica-se que, no **período base**, predominam trechos com ameaça climática baixa (40,57%) e média (55,92%), sendo os trechos sob muito baixa ameaça praticamente

imperceptíveis (0,01%), e os trechos rodoviários com ameaça alta e muito alta, somados, equivalentes a 3,49%. Ao se modificar o cenário - **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) -, no horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)**, ocorre um ligeiro aumento de trechos sob alta ou muito alta ameaça para alagamento/inundação - de 4,25%, bem como, um aumento de 10,33% em comparação ao período base de áreas sob ameaça média, atingindo o valor de 66,25%, e um aumento discreto de trechos sob ameaça muito baixa (0,03%), sendo este último pouco representativo no panorama nacional. Há, por sua vez, uma redução de 11,09% de trechos sob ameaça climática baixa para alagamento/ inundação.

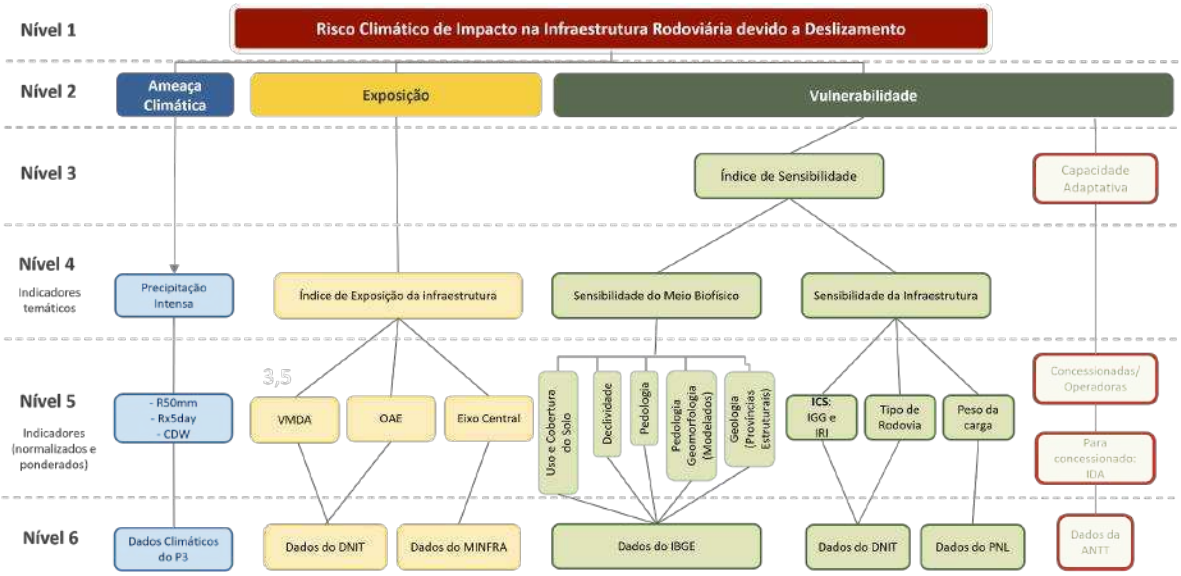
No cenário de emissões intermediárias (SSP-2), a **longo prazo (2046-2065)**, os trechos sob ameaça climática muito baixa permanecem praticamente desprezíveis (0,02%), e se observa, tal como no horizonte temporal de curto prazo, redução de trechos sob ameaça climática baixa (atingindo 21,46%), com um aumento dos trechos sob ameaça climática média (73,35%), alta (4,78%) e muito alta (0,39%).

No **cenário de emissões altas (SSP-5), a curto prazo (2046-2065),** não são encontrados trechos sob ameaça climática muito baixa, e permanece o padrão verificado no cenário SSP-2 (2016-2065): redução de trechos de rodovias sob baixa ameaça a alagamentos/ inundações (atingindo 17,83%) e aumento de trechos sob ameaça média (76,46%, maior percentual atingido para esse grau de ameaça) ou alta/muito alta (que, somadas, correspondem a 5,7% da infraestrutura rodoviária federal). A longo prazo, tornam a surgir, ainda sem relevância, trechos sob ameaça muito baixa (0,01%), permanecendo o padrão de redução de trechos sob ameaça baixa (atingindo 7,60%). Mas, diferentemente do que ocorre nos cenários anteriormente analisados, verifica-se neste cenário e horizonte temporal médio (2046-2065) uma redução de trechos sob ameaça média (61,75%), com um aumento acentuado do percentual de trechos rodoviários sob alto grau de ameaça, que atinge 29,50%, e muito alta, de 1,14%, sendo esse o cenário e período temporal onde a ameaça climática devido ao impacto de alagamentos/ inundações será mais crítico.

5.2. Índice de Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de deslizamento foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 36.

Figura 36 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 36, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R50mm: número de dias com chuva igual ou maior a 50 mm;
- Rx5day: chuva máxima acumulada em 5 (cinco) dias; e
- CWD: número máximo de dias consecutivos com chuva.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

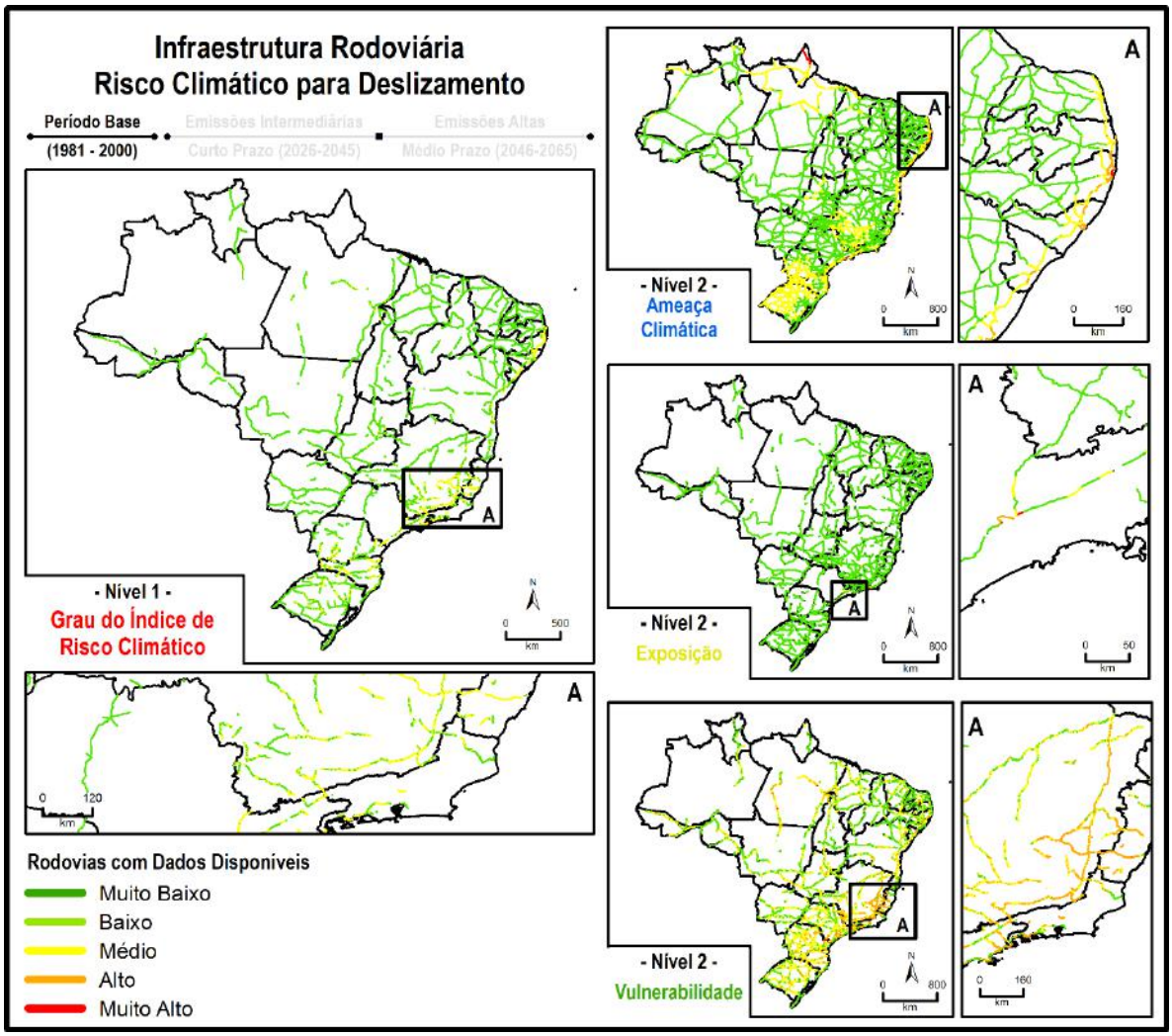
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador temático calculado a partir de mapa de uso e cobertura do solo, mapa de declividade, mapa de pedologia, mapa de pedologia e geomorfologia modelados, e mapa de geologia – estruturas geológicas (dados do IBGE).
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador temático calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de deslizamento.

5.2.1 Período base | Impacto devido ao deslizamento

A Figura 37 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido ao deslizamento (Nível 1), para o período base.

Figura 37 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático** - composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade - para deslizamento é muito influenciado pelo relevo acidentado, sendo os trechos rodoviários com grau médio de risco climático os localizados no Sudeste, especialmente na Serra do Mar, na Serra Geral (em Santa Catarina), no litoral de Pernambuco e Alagoas. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau alto ou muito alto de risco climático de impacto devido a deslizamento (Figura 37).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias no Estados do Amapá e litoral do Nordeste se encontram com alto e muito alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos com ameaças médias em quase todo o

norte do Pará e sul de Minas Gerais, assim como a região da Serra do Mar, além de trechos no litoral do Nordeste e São Paulo e na região Sul, principalmente no interior.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** ao deslizamento, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, os trechos rodoviários com grau médio e alto concentram-se na região Sudeste e Sul. Todas as demais rodovias têm grau médio ou baixo, com pequenos trechos com grau alto ou muito alto, principalmente no norte do estado do Paraná e do Pará.

As únicas rodovias que apresentam trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** são a BR-116 e a BR-381, localizadas em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

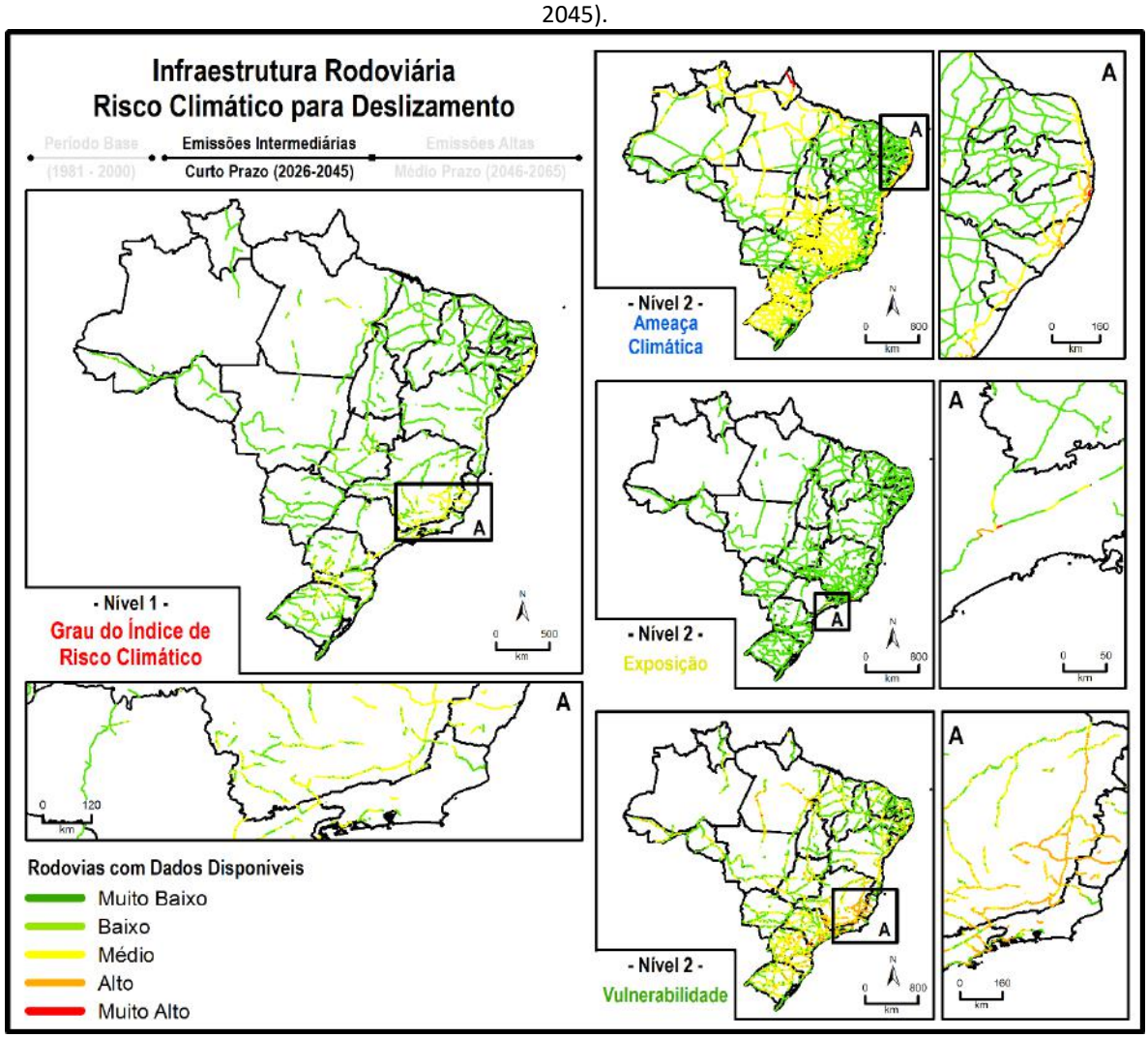
5.2.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto de deslizamento, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto prazo e médio prazo.

5.2.2.1 Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 38 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 38 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



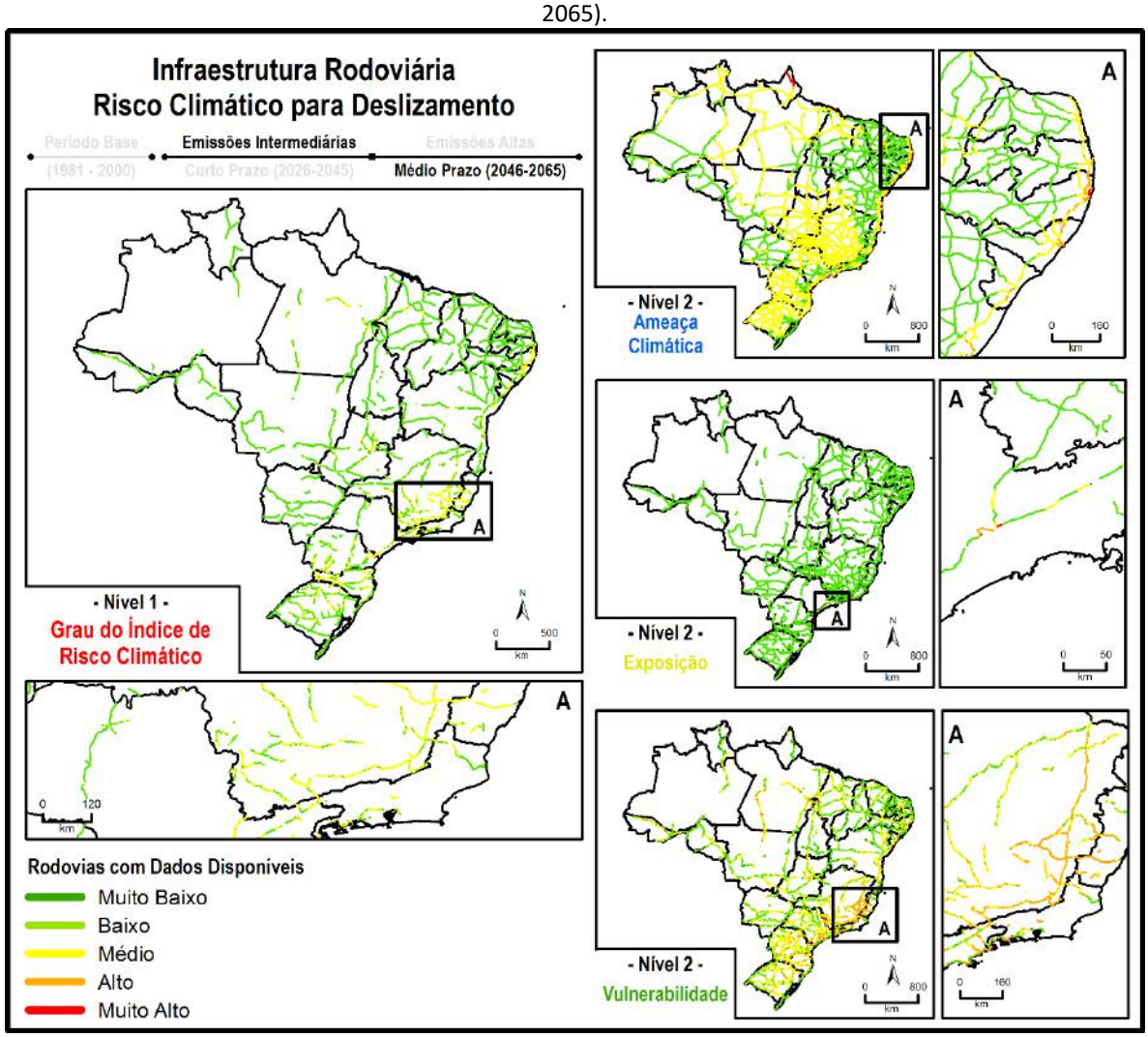
Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos de rodovias com IRC que se destacam na Figura 38 estão concentrados na Região Sudeste e em algumas rodovias na região Sul que apresentam risco médio, principalmente pelo relevo acidentado da região devido a presença da Serra do Mar e Serra Geral, respectivamente. Essas serras são cadeias de montanhas com pontos que estão acima de 1.500 metros de altitude. O litoral do Nordeste também chama a atenção, com a concentração de risco médio no litoral, mais especificamente na BR-101. Quanto ao mapa de ameaça climática, identifica-se que há um aumento de trechos com grau médio, em relação ao período base, com destaque para as rodovias dos estados da Região Sul, Sudeste e Centro- Oeste.

5.2.2.2 Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1) em trechos rodoviários, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 39.

Figura 39 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os maiores graus de risco climático devido ao impacto do deslizamento estão concentrados na Região Sudeste, Sul e no litoral do nordeste, principalmente na BR-101, com o IRC predominantemente médio, e alguns trechos de IRC alto nessas regiões. Percebem-se poucas mudanças do período curto para médio prazo, conforme apresentado na Figura 39. Isso advém do fato de que os mapas de ameaça climática dos períodos de curto e médio prazos do SSP2 são praticamente iguais, não havendo grande variação nos graus dos trechos das rodovias.

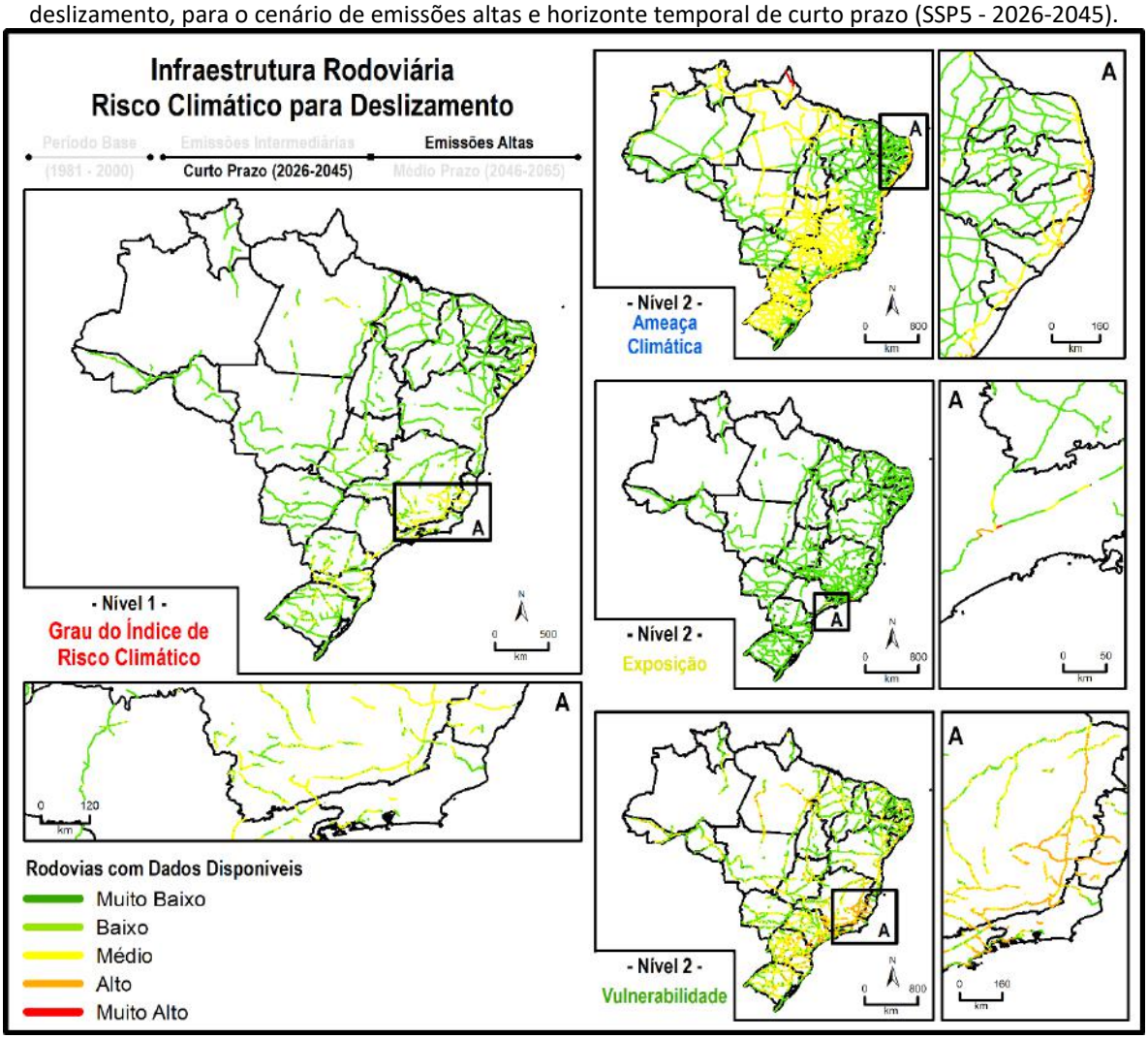
5.2.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de deslizamento para a infraestrutura rodoviária brasileira, considerando o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.2.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 40 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 40 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

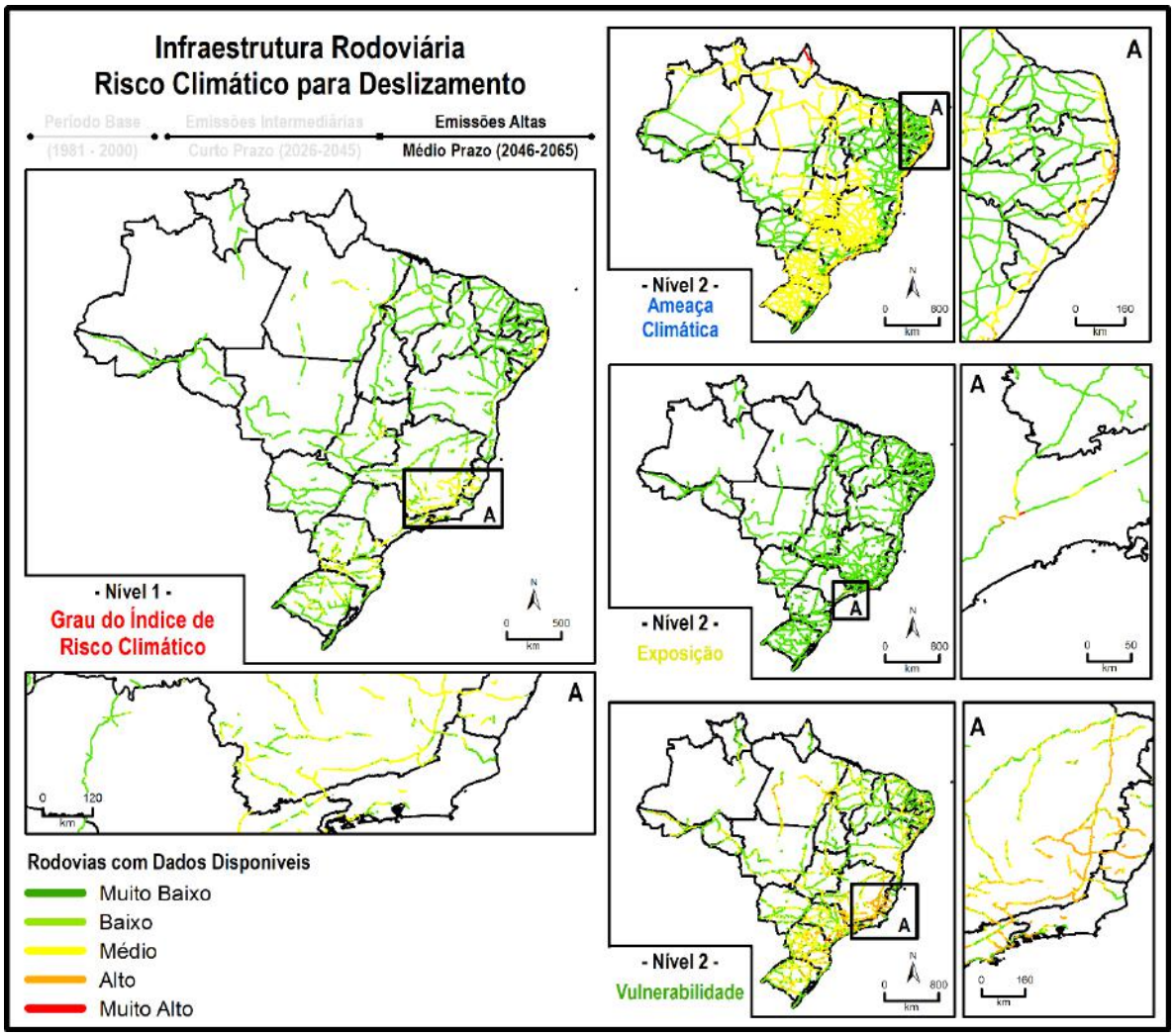
Pela análise da Figura 40, observa-se que os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamento no cenário de emissões altas ao curto prazo também se concentram nas regiões Sudeste, Sul e litoral do Nordeste, principalmente na BR-101. As mudanças entre os cenários anteriores são pouco perceptíveis; contudo, há uma tendência de permanência da ameaça climática de grau médio nas regiões Sul, Sudeste e litoral do Nordeste, além da BR-230, no Pará.

5.2.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 41 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de deslizamento (Nível 1), para o

cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5-2046-2065) na infraestrutura de transporte rodoviária brasileira.

Figura 41- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 41, considerando-se o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo, observa-se que alterações do grau de risco climático devido ao impacto de deslizamento não são visíveis entre os horizontes temporais. As regiões Sudeste, Sul e o litoral do Nordeste, principalmente na BR-101, concentram o IRC médio, que equivale ao maior IRC encontrado. Além disso, há uma tendência de permanência da ameaça climática de grau médio nas regiões Sul, Sudeste e litoral do Nordeste, além do Pará.

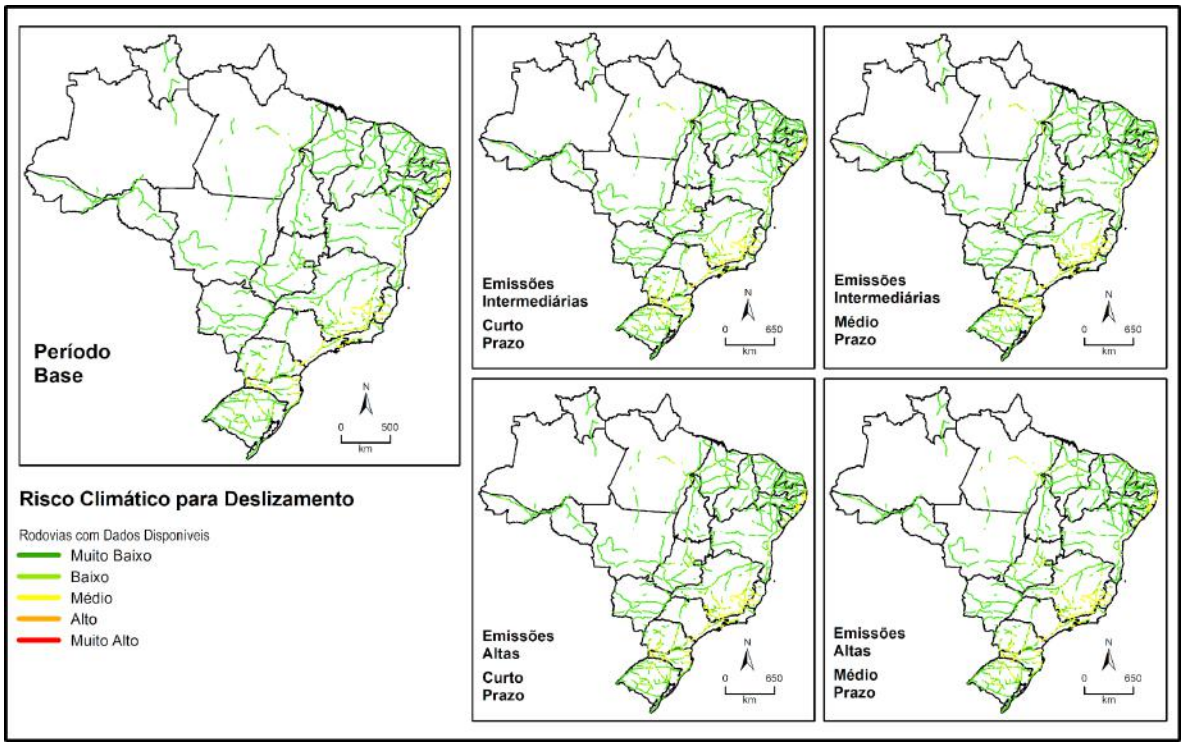
5.2.4. Análise do Risco Climático devido ao impacto de deslizamento

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de deslizamento, em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo, estão nas regiões Sul, Sudeste, litoral do Nordeste, e, no Norte, apenas a BR-230, no Pará.

As regiões Sudeste e Sul se destacam pelos altos graus de sensibilidade do meio biofísico (susceptibilidade a deslizamento), principalmente pela presença da Serra do Mar e Serra Geral (as quais apresentam altas declividades), assim como é nesses locais em que podem ser encontrados graus medianos e altos para erodibilidade e para uso e cobertura do solo profundamente antropizados, o que demonstra a falta da vegetação natural.

Notou-se que tanto o cenário de emissões intermediárias quanto o de emissões altas apresentaram variações pouco visíveis nos mapas decorrentes do componente da ameaça climática, porém é importante ressaltar que há uma propensão de permanência da ameaça climática de grau médio e uma mudança de grau baixo para médio na BR-230 no Pará, conforme pode ser observado na Figura 42, que sintetiza o risco climático devido ao impacto do deslizamento sobre a infraestrutura federal de transporte rodoviário brasileira.

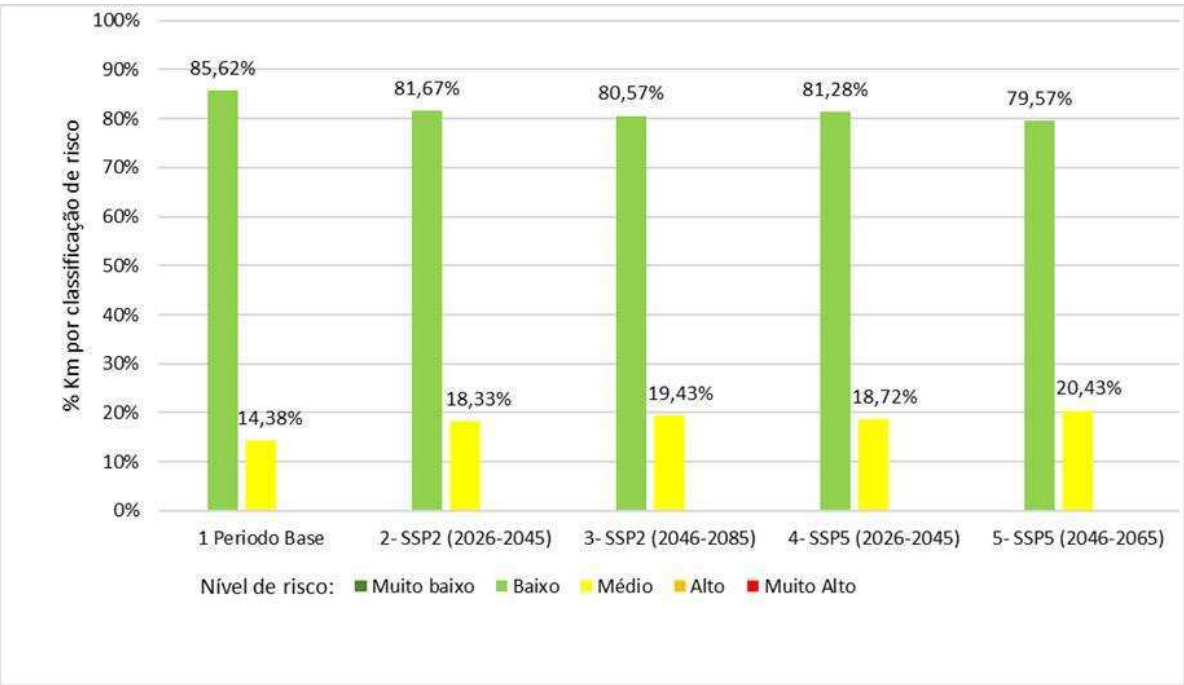
Figura 42- Síntese: mapa de risco climático devido ao impacto de deslizamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e horizontes temporais, é apresentada, na Figura 43, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido ao deslizamento.

Figura 43 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido ao deslizamento, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 43, para o **período base**, 85,62% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de deslizamento e 14,38% sob risco médio. Os trechos com graus alto, muito alto e muito baixo de ameaça não aparecem nessa visualização devido a escala das barras.

Ainda de acordo com a Figura 43, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045)**, o IRC devido ao impacto de deslizamento é baixo em 81,67% das rodovias, médio em 18,33%. Considerando o mesmo cenário, mas com **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se que 80,57% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto do deslizamento e 19,43% encontram-se sob médio risco. Nesse cenário, a maior diferença em relação ao período base é o aumento da quilometragem de nível médio de risco em 5,05% (de 14,38% para 19,43%) e, por sua vez, as quilometragens de baixo risco sofrem redução de 3,95% (85,62% para 81,67%).

Em um **cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 81,28% das rodovias encontram-se sob risco climático baixo devido ao impacto por deslizamento e 18,72% sob risco médio. Conforme aumenta-se o cenário de emissões, em um mesmo horizonte temporal (curto prazo), ocorre uma redução de 0,39% da quilometragem de rodovias sob baixo risco, enquanto as áreas sob médio risco aumentam na mesma proporção. Considerando-se o **cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065)**, 79,57% da quilometragem de rodovias se encontrará sob risco climático baixo e 20,43% sob risco climático médio de impacto devido ao deslizamento.

De forma geral, observa-se na Figura 43 um padrão de pequena redução das extensões de rodovias sob baixo risco climático ao impacto de deslizamento, e um aumento de tais extensões sob risco médio, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal. Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 9 apresenta o percentual dos

trechos de quilometragem de rodovias por grau de ameaça climática para impactos devido ao deslizamento em cada um dos cenários analisados.

Tabela 9 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas em cada um dos cenários analisados para deslizamento.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,02%	75,36%	23,45%	0,82%	0,35%
SSP2 (2026-2045)	0,02%	48,55%	50,12%	0,95%	0,36%
SSP2 (2046-2065)	0,02%	40,35%	58,35%	0,91%	0,37%
SSP5 (2026-2045)	0,02%	45,08%	53,70%	0,85%	0,35%
SSP5 (2046-2065)	0,02%	39,20%	59,52%	0,91%	0,35%

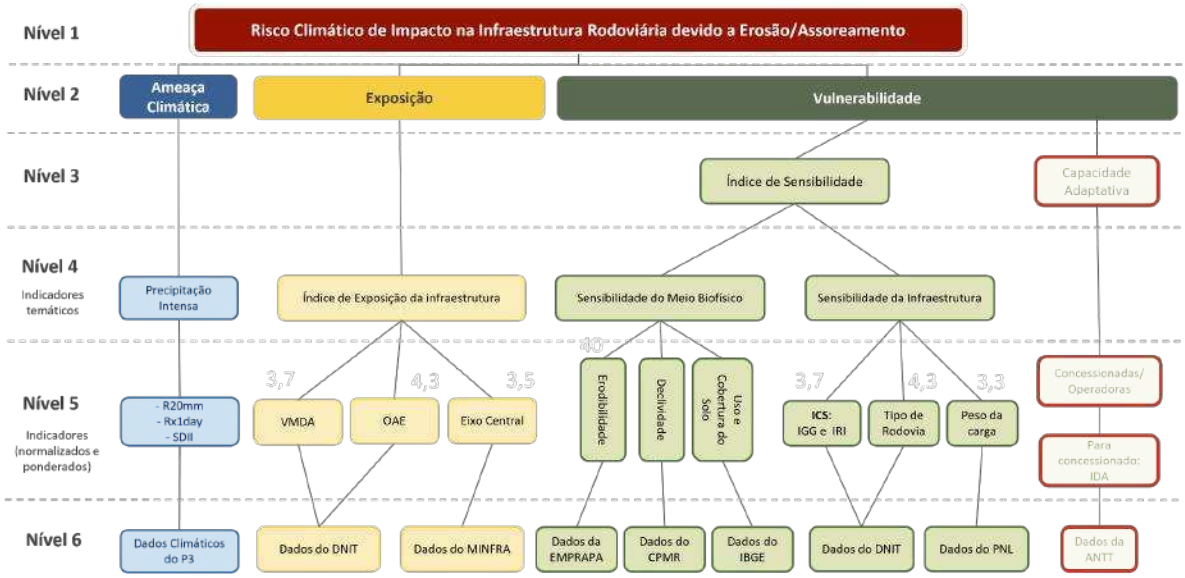
Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o componente de ameaça climática, único que varia entre os cenários de emissões, a quilometragem classificada como baixo risco caiu de 75,36% (período base) para 48,55% (SSP2 – 2026-2045). Mantendo-se o horizonte temporal, mas alterando-se o cenário para SSP5, verifica-se que esse valor cai para 45,08%. Essa redução se dá porque os trechos passam para o grau médio de ameaça climática. Observa-se um aumento no grau médio de ameaça climática de 23,45% (período base) para 50,12% (SSP2 – 2026-2045) e para 53,70 (SSP5 – 2026-2045), e as classes de risco alto e muito alto se mantiveram em menos de 1%.

5.3. Índice de Risco Climático devido ao impacto de erosão

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de erosão/assoreamento foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 44.

Figura 44 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a erosão/assoreamento.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 44, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de precipitação intensa), foram considerados os dados de:

- R20mm: número de dias com chuva igual ou maior a 20 mm;
- Rx1day: chuva máxima acumulada em 1 (um) dia; e
- SDII - índice de intensidade de precipitação simples: indica intensidade de extremos de chuva.

O subíndice de exposição considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

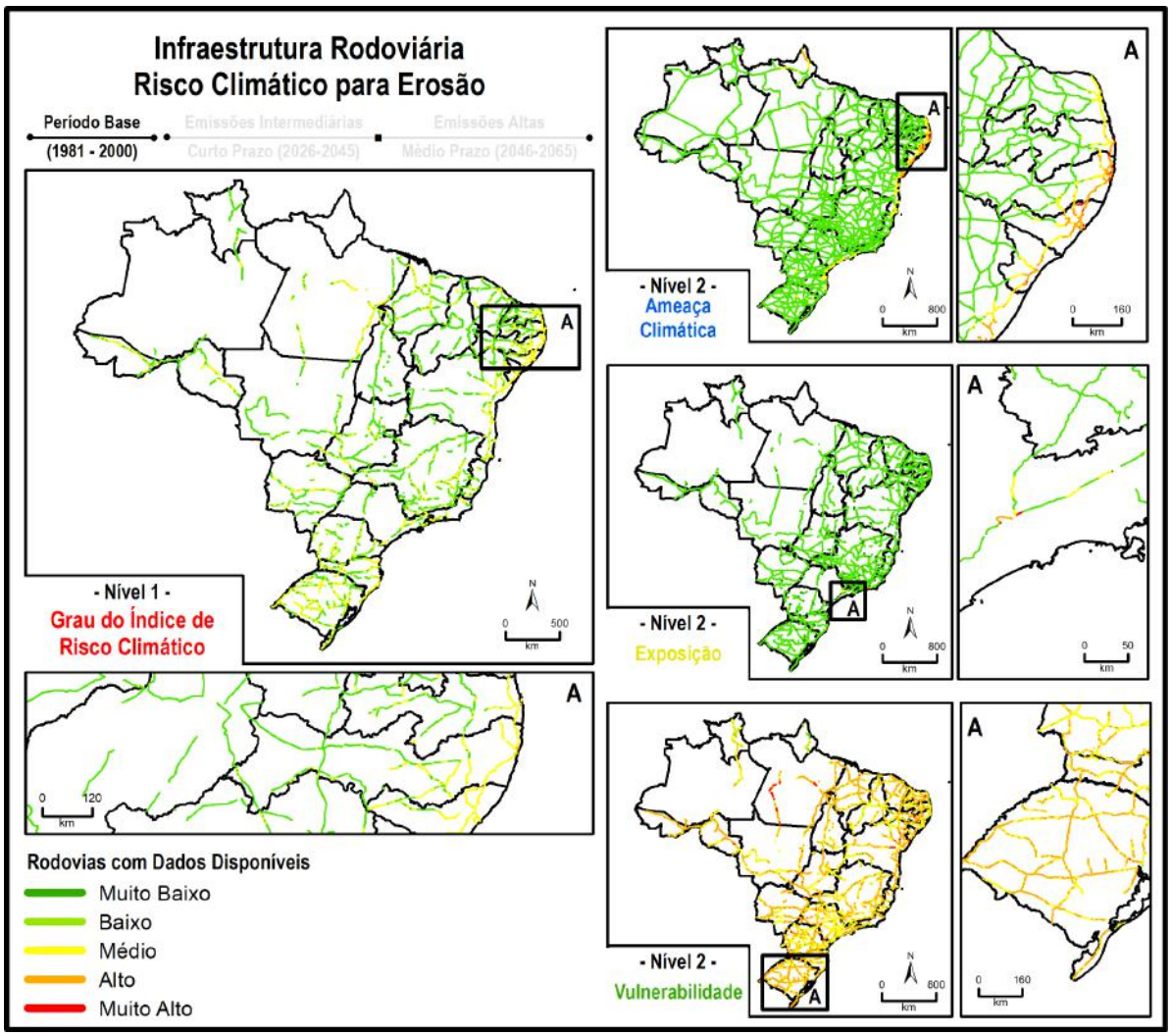
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador calculado a partir do mapa de erodibilidade da EMBRAPA, mapa de declividade do CPRM e mapa de uso e cobertura do solo do IBGE; e
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de erosão/assoreamento.

5.3.1 Período base | Erosão

A Figura 45 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à erosão (Nível 1), para o período base.

Figura 45 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De acordo com a Figura 45, o IRC é maior em trechos de rodovias no Pará, em rodovias localizadas em estados do Sul e em trechos rodoviários dos Estados do Nordeste, em especial no litoral (BR-101). As demais rodovias têm grau de risco climático baixo; não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido à erosão alto ou muito alto.

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verifica-se que apenas trechos de rodovias nos Estados de Amapá e no litoral de estados da região Nordeste encontram-se com alto e muito alto grau de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos com ameaças médias no litoral de São Paulo, Paraná e Santa Catarina.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** à erosão, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, quase todas as rodovias apresentam grau de ameaça climática médio e alto. A BR-163, no Pará, chama a atenção por acomodar muitos trechos com grau alto e muito alto de vulnerabilidade à erosão. Além disso, o estado do Rio Grande do Sul concentra trechos de rodovias com grau alto.

As únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** estão na BR-116 e BR-381 em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

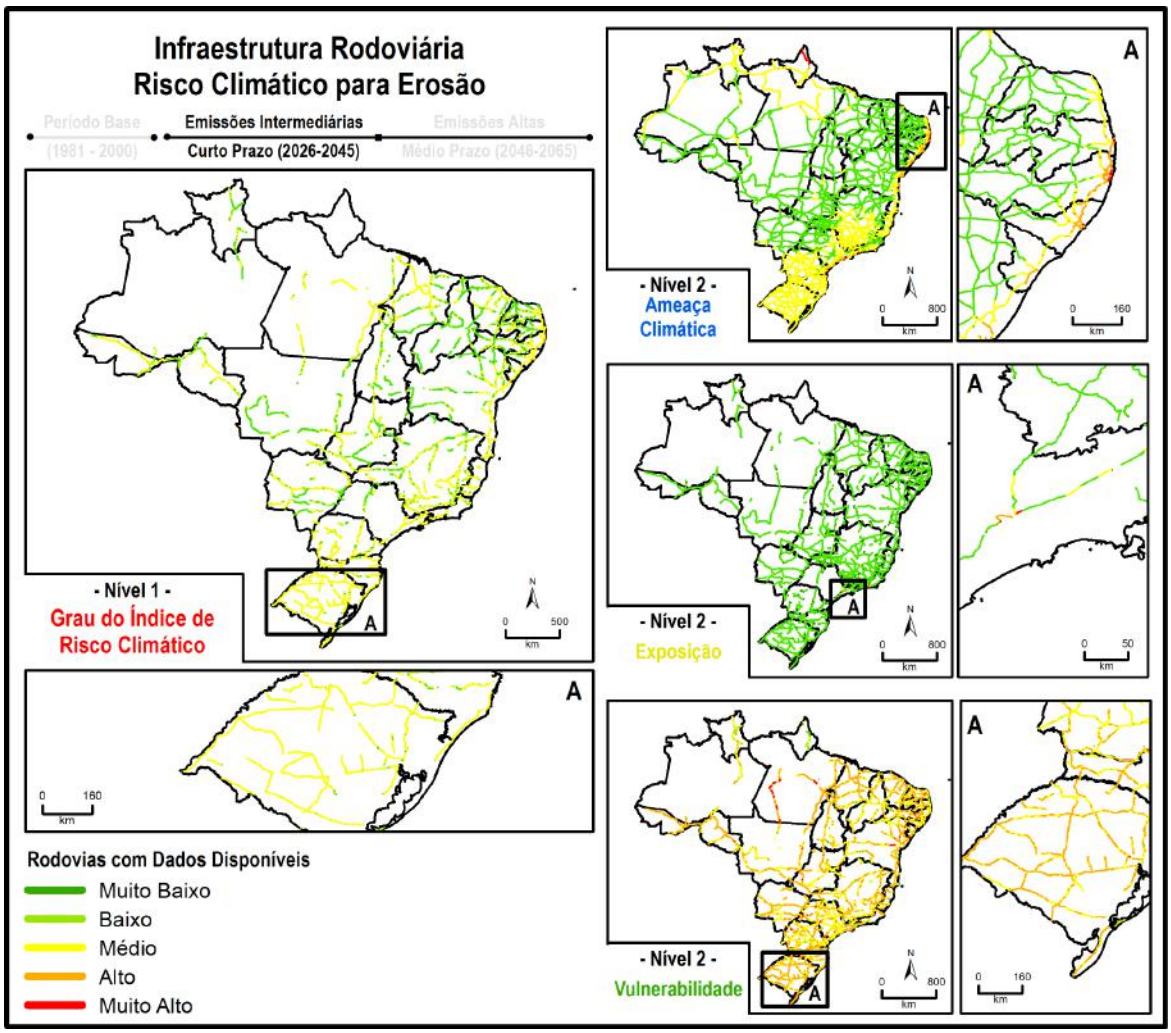
5.3.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

A seguir será apresentado o IRC devido ao impacto da erosão na infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) para os horizontes temporais de curto e médio prazo.

5.3.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 46 apresenta os mapas resultantes das análises, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão (Nível 1) para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 46. Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Além disso, pode ser observado o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro, quando comparado com o período-base. Existem também outros trechos de concentrações do IRC médio que podem ser encontrados no litoral da Região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

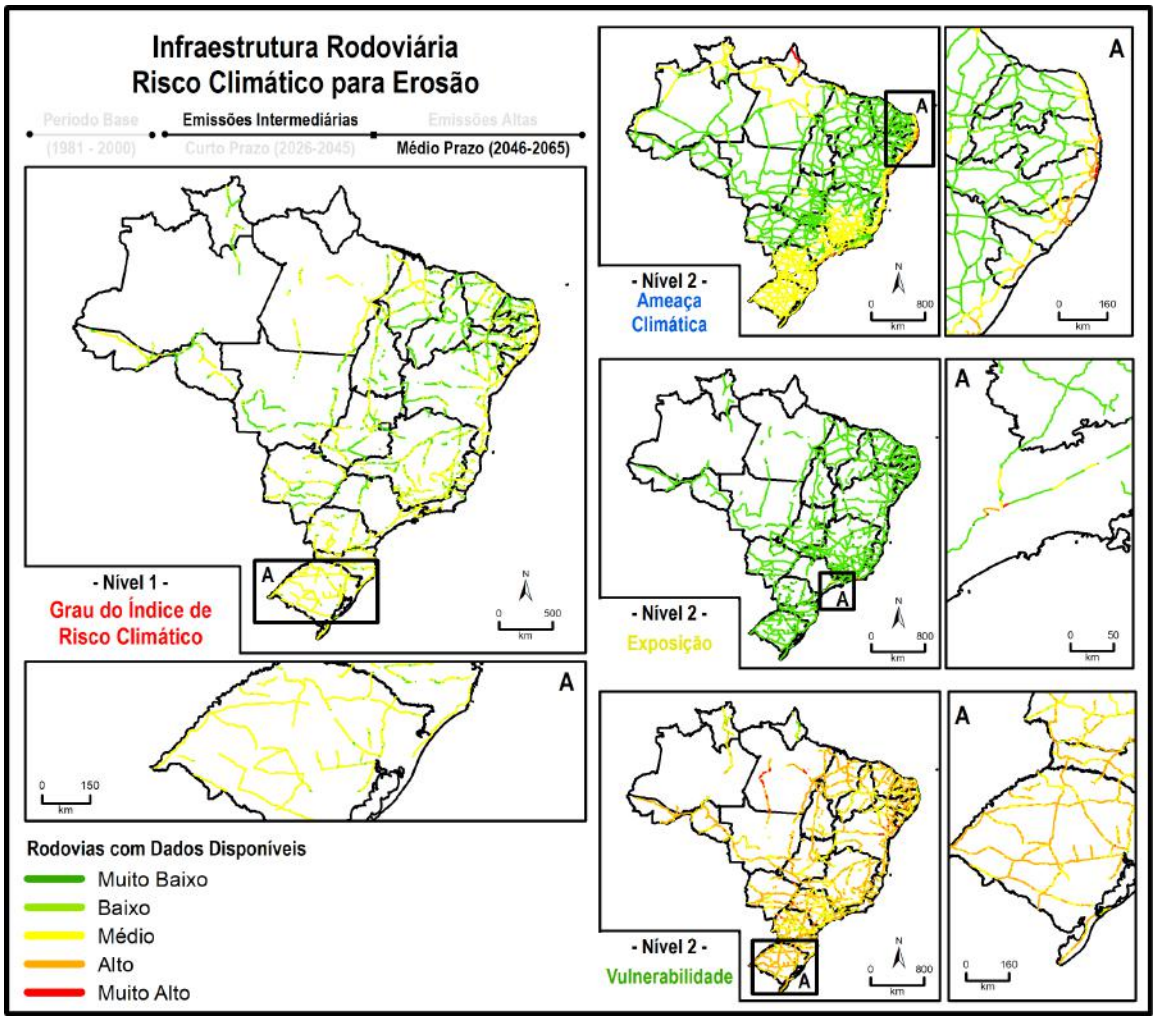
Considerando especificamente o Nível 2, nota-se que embora os mapas de exposição e vulnerabilidade sejam os mesmos para todos os cenários, para ameaça climática, os estados que compõem a Região Sul (principalmente) e Sudeste do Brasil passam de grau baixo, no cenário base, para grau médio, no cenário intermediário de curto prazo.

5.3.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão (Nível 1) para o

cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 47.

Figura 47- Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos se concentram na região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Observa-se ainda o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro quando comparado com o período base; contudo, quando comparado ao período de curto prazo, as mudanças não são perceptíveis. Existem também outros trechos de concentrações do IRC médio que podem ser encontrados no litoral da região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Nos mapas de Nível 2, nota-se que as mudanças são imperceptíveis quando comparado ao cenário de emissões intermediárias de curto prazo; contudo, quando comparado ao período base, existe um aumento de risco de baixo para médio de ameaça climática nos estados do Sul e Sudeste brasileiro.

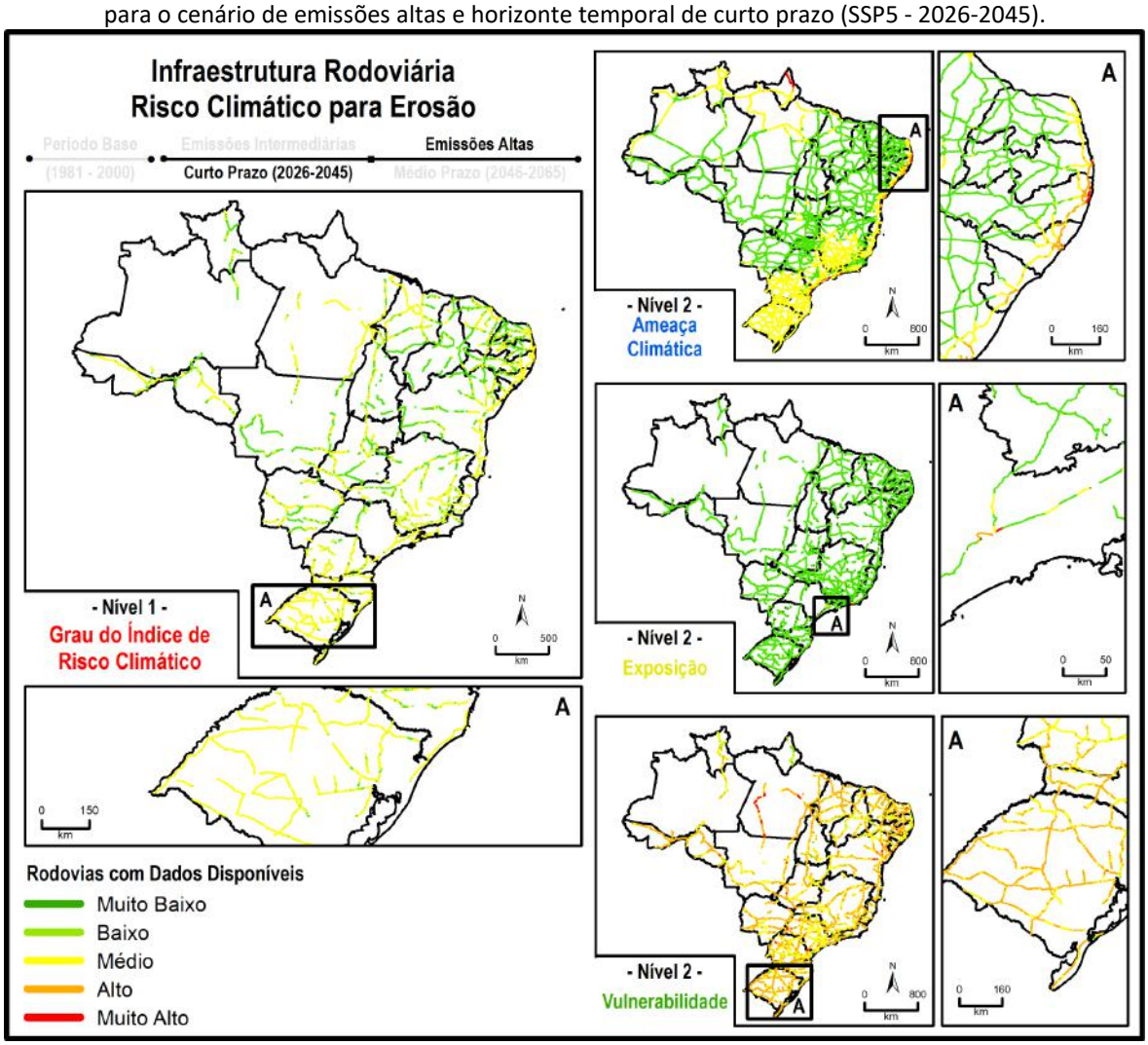
5.3.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Esta subseção tem como propósito apresentar os resultados do IRC devido ao impacto de erosão na infraestrutura rodoviária considerando-se um cenário de emissões altas (SSP5-8.5) para os horizontes temporais de curto prazo (2026-2045) e médio prazo (2046-2065).

5.3.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 48 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045).

Figura 48 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

De acordo com a Figura 48, os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Assim como ocorre no IRC de emissões intermediárias, as mudanças não são perceptíveis nos mapas. A concentração dos trechos de IRC

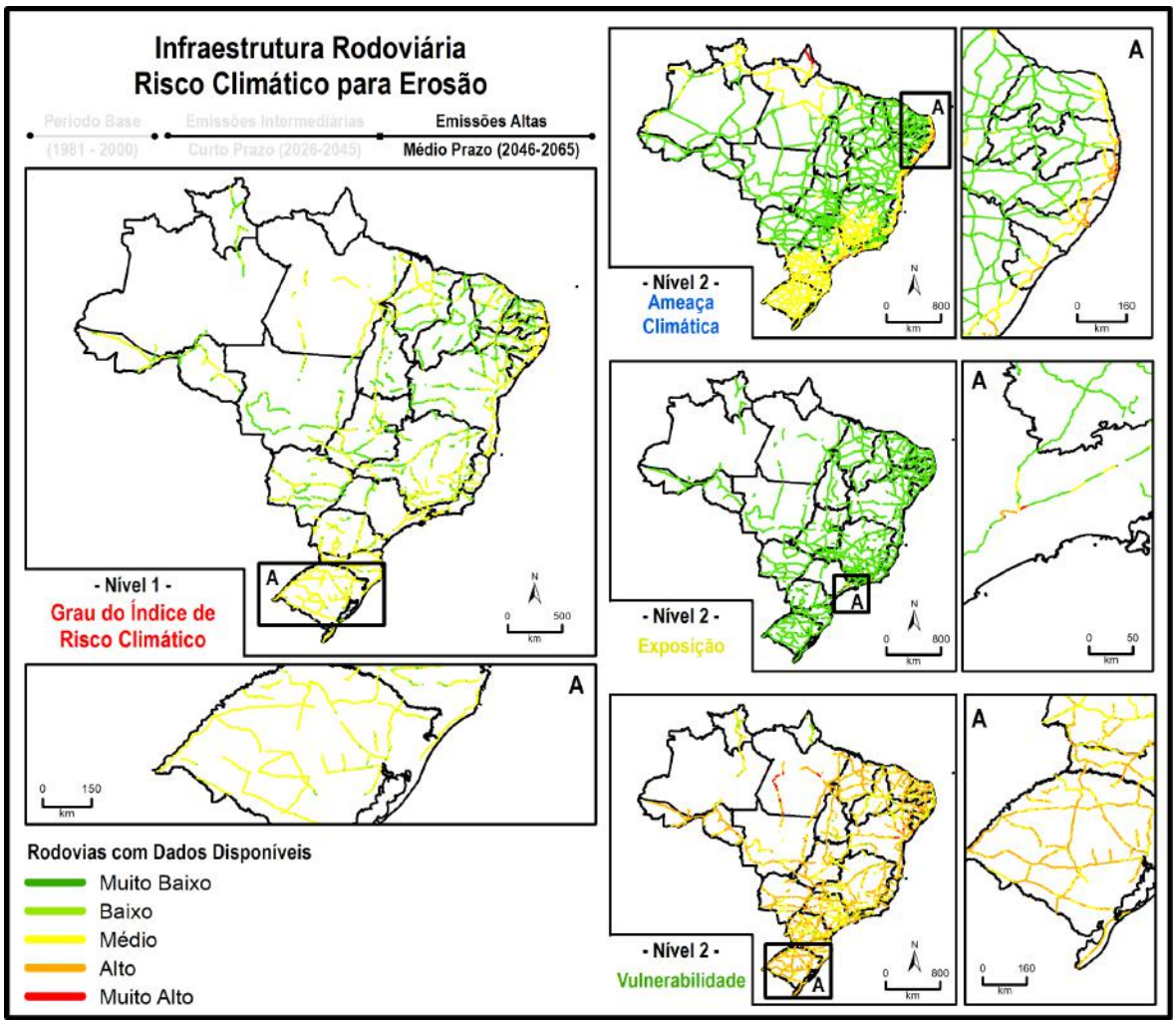
médio pode ser encontrada também no litoral das Regiões Nordeste e Sudeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Cabe ainda destacar que mudanças nos mapas do Nível 2 (ameaça climática, exposição e vulnerabilidade) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo são imperceptíveis quando comparadas com o Nível 2 das emissões intermediárias de curto prazo.

5.3.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 49 apresenta os mapas resultantes para os subíndices de ameaça climática, de exposição e de vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto de erosão (Nível 1) na infraestrutura rodoviária para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065).

Figura 49 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com IRC mais significativos continuam se concentrando na Região Sul, principalmente no estado do Rio Grande do Sul, que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária em quase todo o estado. Assim como no IRC de emissões intermediárias e emissões altas de curto prazo,

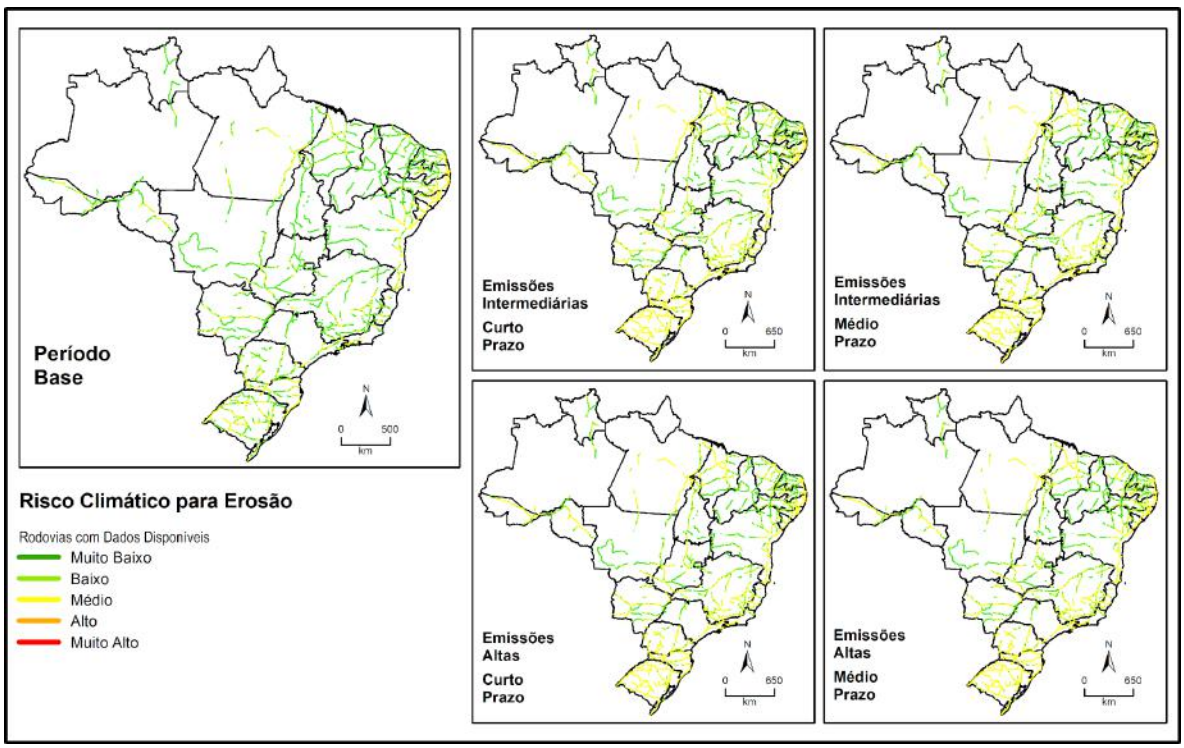
as mudanças não são perceptíveis. A concentração dos trechos de IRC médio pode ser encontrada também no litoral das Regiões Nordeste e Sudeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

Destaca-se ainda que, mais uma vez, as mudanças nos mapas do Nível 2 (ameaça climática, exposição e vulnerabilidade) são imperceptíveis quando comparadas com o nível 2 das emissões intermediárias de curto e médio prazos e emissões altas de curto prazo.

5.3.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a erosão

A Figura 50 sintetiza os mapas de risco climático da infraestrutura rodoviária federal brasileira devido ao impacto direto da erosão. Nela, nota-se que as maiores variações de nível de risco climático encontram-se quando o cenário base é comparado aos demais cenários. Entretanto, quando se compara os horizontes temporais para os cenários de emissões intermediárias e altas, essas variações são praticamente imperceptíveis nos mapas.

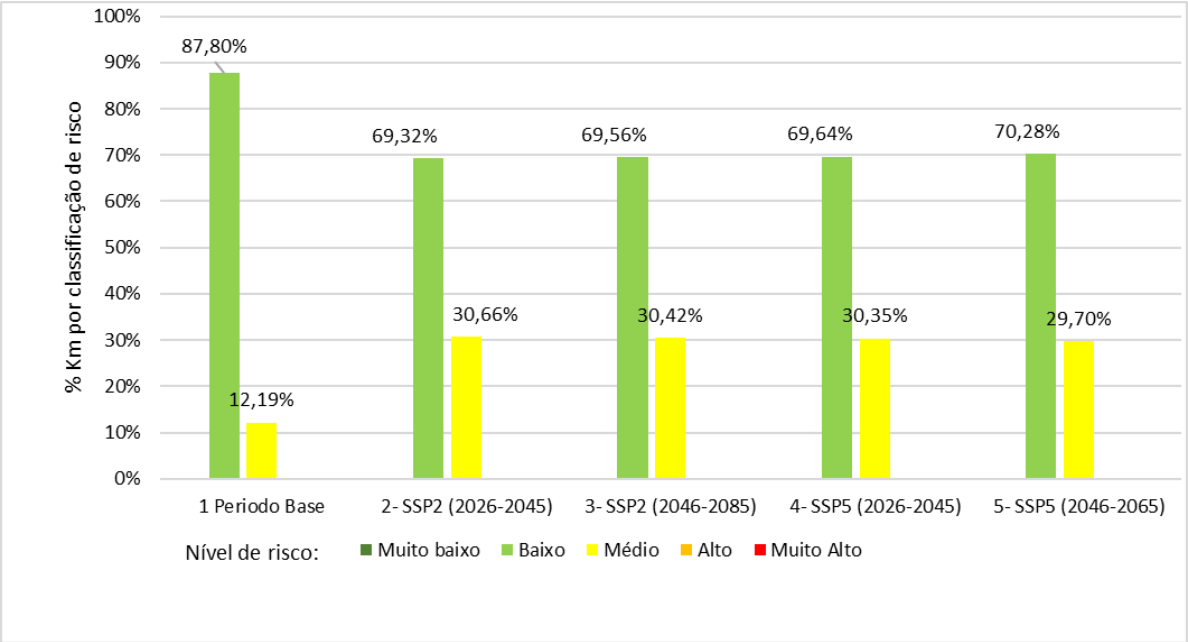
Figura 50 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de erosão.



Fonte: Elaboração própria (2022).

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os cenários e os horizontes temporais, é apresentada, na Figura 51, a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido à erosão.

Figura 51. Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido à erosão, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Para o **período base**, conforme exposto na Figura 51, 87,80% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão e 12,19% sob risco médio. Ainda de acordo com a Figura 51, para o **cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo** (SSP2 - 2026-2045), o IRC devido ao impacto de erosão é baixo em 69,32% das rodovias, médio em 30,66%. Isso mostra que quando comparado ao período base, aumentou-se o percentual de trechos com grau médio de risco e diminuiu-se o percentual de trechos com grau baixo.

Considerando ainda o cenário intermediário, mas com **horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065)**, verifica-se que 69,56% das rodovias encontram-se sob baixo risco climático devido ao impacto de erosão e 30,42% encontram-se sob médio risco. Com isso, mostra-se que pouca variação é apresentada entre os horizontes temporais para o cenário de emissões intermediárias.

Em um **cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045)**, 69,64% das rodovias encontram-se sob risco climático baixo devido ao impacto de erosão e 30,35% sob risco médio. Já, considerando-se o **cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (2046 - 2065)**, 70,28% da quilometragem de rodovias se encontrará sob risco climático baixo e 29,70% sob risco climático médio de impacto devido ao deslizamento.

De modo a realizar uma análise mais precisa dos resultados, a Tabela 10 apresenta o percentual dos trechos rodoviários, por grau de ameaça climática, para impactos devido à erosão em cada um dos cenários analisados e o período base.

Tabela 10 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para erosão.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,00%	94,71%	3,84%	1,31%	0,14%
SSP2 (2026-2045)	0,01%	60,31%	37,92%	1,35%	0,42%
SSP2 (2046-2065)	0,01%	60,92%	37,38%	1,28%	0,41%
SSP5 (2026-2045)	0,01%	60,92%	37,38%	1,28%	0,41%
SSP5 (2046-2065)	0,01%	62,48%	35,80%	1,32%	0,40%

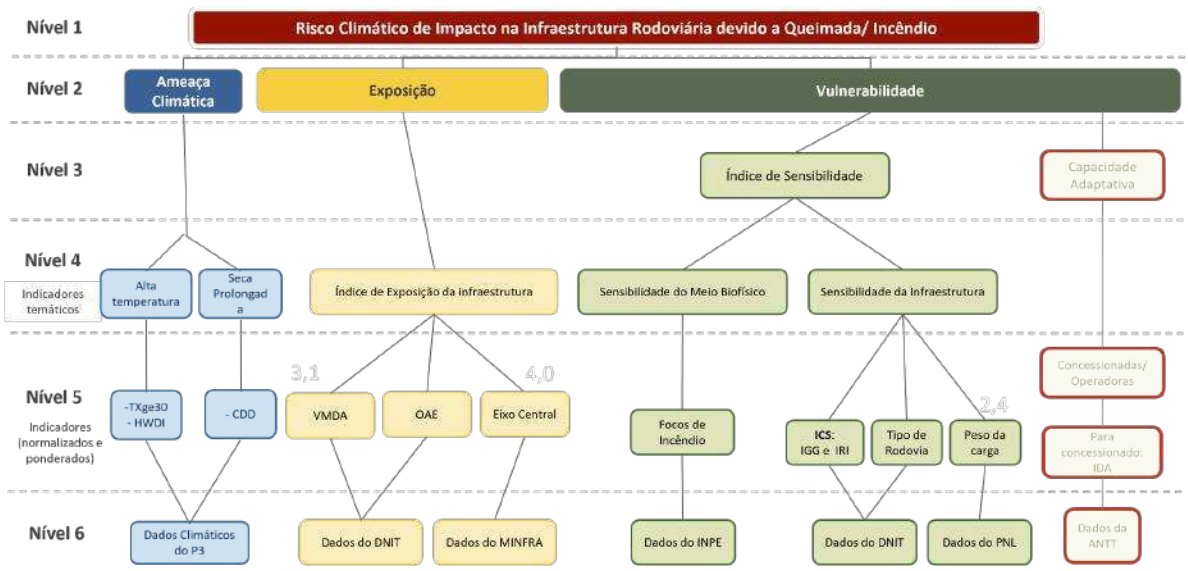
Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela observação da Tabela 10, nota-se que há um expressivo aumento dos trechos rodoviários sob grau de ameaça médio e consequente redução dos trechos sob grau de ameaça baixo em todos os cenários considerados, em comparação ao período base, mas não há alterações significativas entre os cenários.

5.4. Índice de Risco Climático devido ao impacto de queimada/ incêndio

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de queimada/incêndio foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 52.

Figura 52 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada/ incêndio.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 52, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de altas temperaturas e seca prolongada), foram considerados os dados de:

- TXge30: número de dias com temperatura máxima acima de 30°C, que indica a frequência de temperaturas altas;
- HWDI - *Heat Wave Duration Index* (Índice de duração de ondas de calor):período máximo em cada ano de pelo menos 5 dias consecutivos onde a temperatura máxima é de pelo menos 5 graus C mais quente do que a climatologia diária do período base (indica a persistência de temperaturas altas); e
- CDD: número máximo de dias secos consecutivos, que indica persistência de seca.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade do meio biofísico e sensibilidade da infraestrutura:

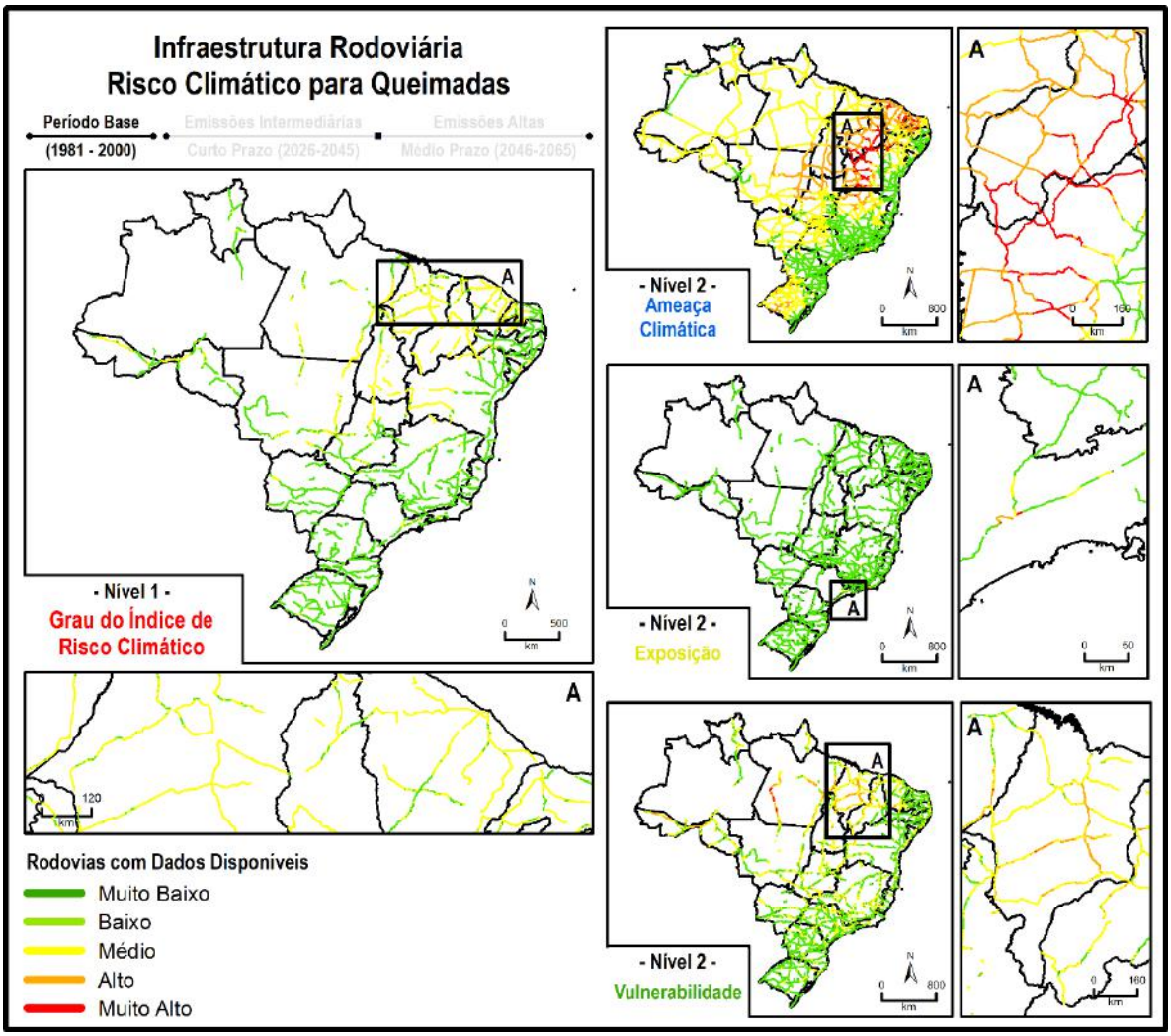
- Sensibilidade do meio biofísico: indicador calculado a partir do mapa de incêndio do INPE; e
- Sensibilidade da infraestrutura: indicador calculado a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de queimada/incêndio.

5.4.1 Período base | Queimada

A Figura 53 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido a queimada/incêndio (Nível 1), para o período base.

Figura 53 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido à queimada, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático** - composto pela relação entre ameaça climática, exposição e vulnerabilidade - devido ao impacto de queimadas/incêndios na infraestrutura rodoviária federal brasileira indica que existem trechos com risco climático médio (o maior grau encontrado) no Maranhão, Piauí, Ceará, Tocantins e o interior do Rio Grande do Norte e Paraíba, além de alguns trechos em rodovias no interior da Bahia e em estados da região Centro-Oeste. O estado do Acre chama a atenção com a BR-364, com grau médio. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo e não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a queimadas alto ou muito alto (Figura 53).

Apenas trechos de rodovias nos Estados de Maranhão, Piauí e interior da Bahia apresentam-se com grau muito alto de **ameaça climática**. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas e médias no estado do Rio Grande do Sul, na região Centro-Oeste, norte de Minas Gerais e no interior da região Nordeste, além de praticamente toda região Norte com grau médio.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a queimadas/incêndios, composta pela sensibilidade da infraestrutura e sensibilidade do meio biofísico, as rodovias com grau de ameaça climática muito alto

e/ou alto concentram-se nos estados do Maranhão, Piauí e Pará. O estado do Acre e outros estados inseridos na região Centro-Oeste destacam-se por apresentarem trechos rodoviários com grau de ameaça climática altos e médios. Todas as demais rodovias têm grau baixo e médio.

As únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto de **exposição** estão na BR-116 e BR-381 em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

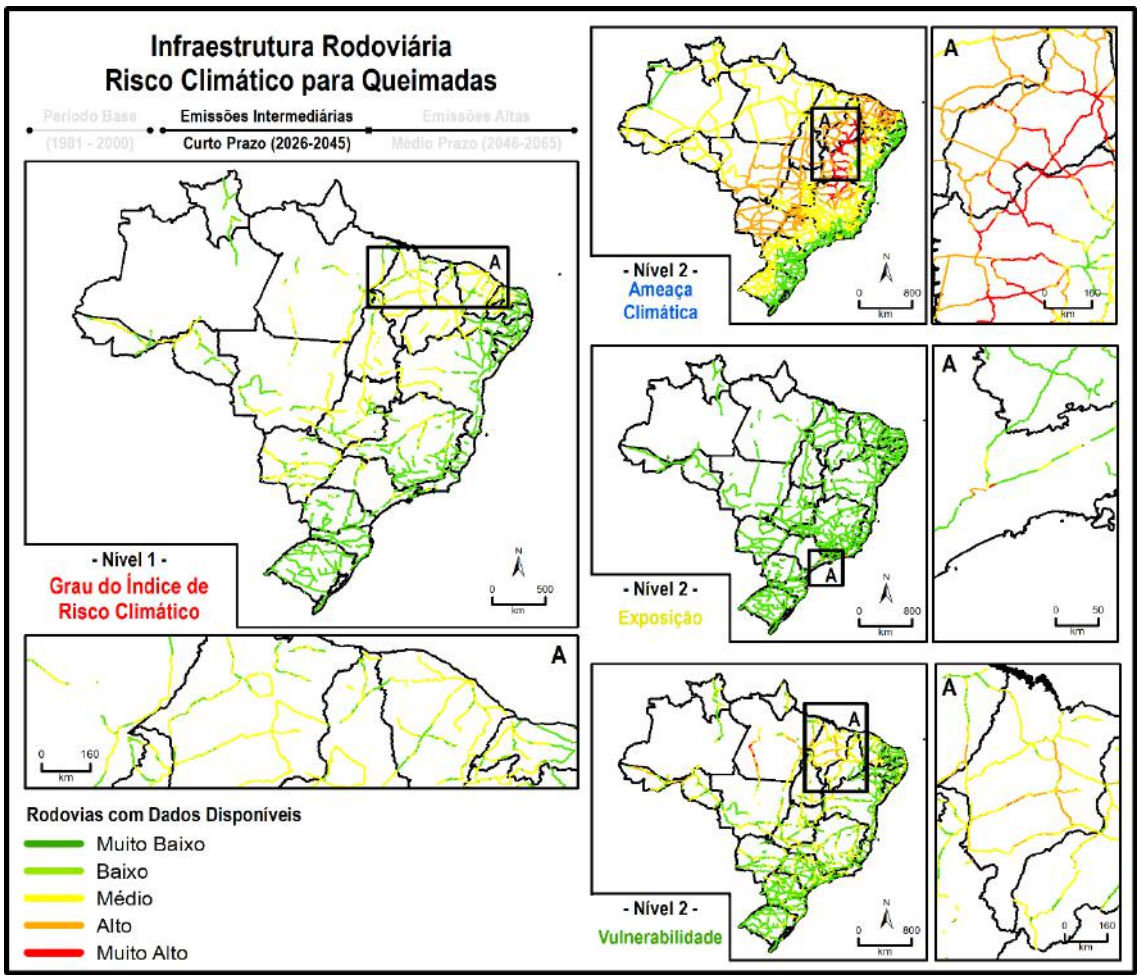
5.4.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção são apresentados os resultados do IRC de impacto devido a queimadas/incêndios sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

5.4.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 54 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo.

Figura 54 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos com maiores graus de IRC se concentram no interior da região Nordeste (estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte), em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás) e interior do Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 54, que apresentam risco climático médio de impacto devido a queimadas/ incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 54).

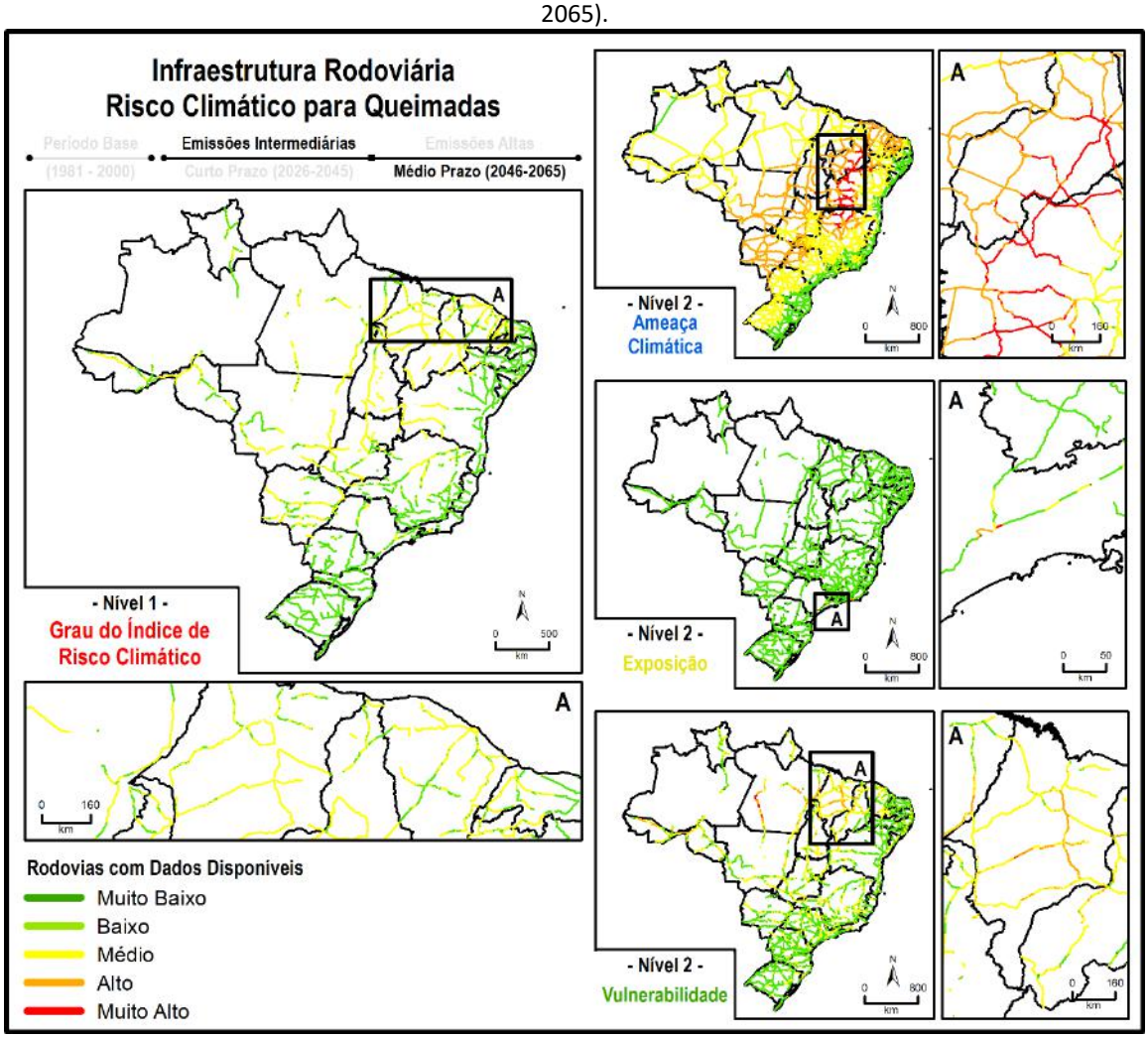
Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no aumento de trechos rodoviários sob risco climático médio, especialmente no estado do Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais.

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta e alta, continuam se concentrando no Nordeste, principalmente nas rodovias que atravessam o interior da Bahia em direção ao estado do Piauí, e na região Centro-Oeste. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste, e médias em todo o interior das regiões Sul, Sudeste e Norte.

5.4.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 55 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo.

Figura 55 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O **Índice de Risco Climático (IRC)** para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo, tal como ocorre no horizonte temporal de curto prazo, se concentram na região Nordeste (estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, e interior da Bahia), em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás) e interior do Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 55, que apresentam risco climático médio de impacto devido à queimadas/ incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 55).

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta continuam se concentrando no Nordeste, tal como apresentado para o período base e cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo, principalmente nas rodovias que atravessam o interior da Bahia em direção ao estado do Piauí e de Minas Gerais. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste e Centro-Oeste, e médias em toda a região Norte, bem como, interior das regiões Sul e Sudeste do país. As rodovias localizadas no litoral do País (do Rio Grande do Sul ao Rio Grande do Norte) encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 55).

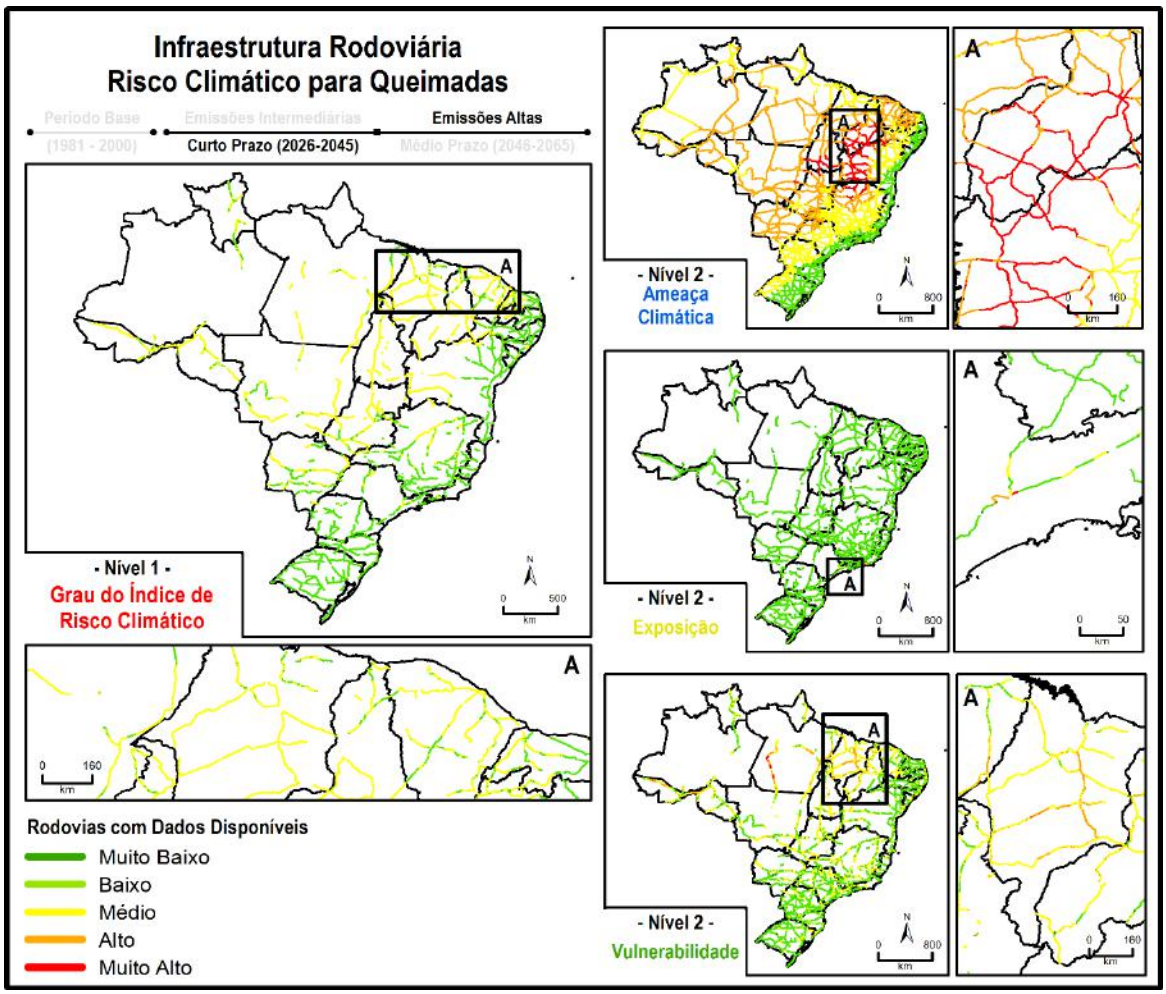
5.4.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto devido a queimadas/incêndios sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio (2046-2065) prazos.

5.4.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 56 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo.

Figura 56 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

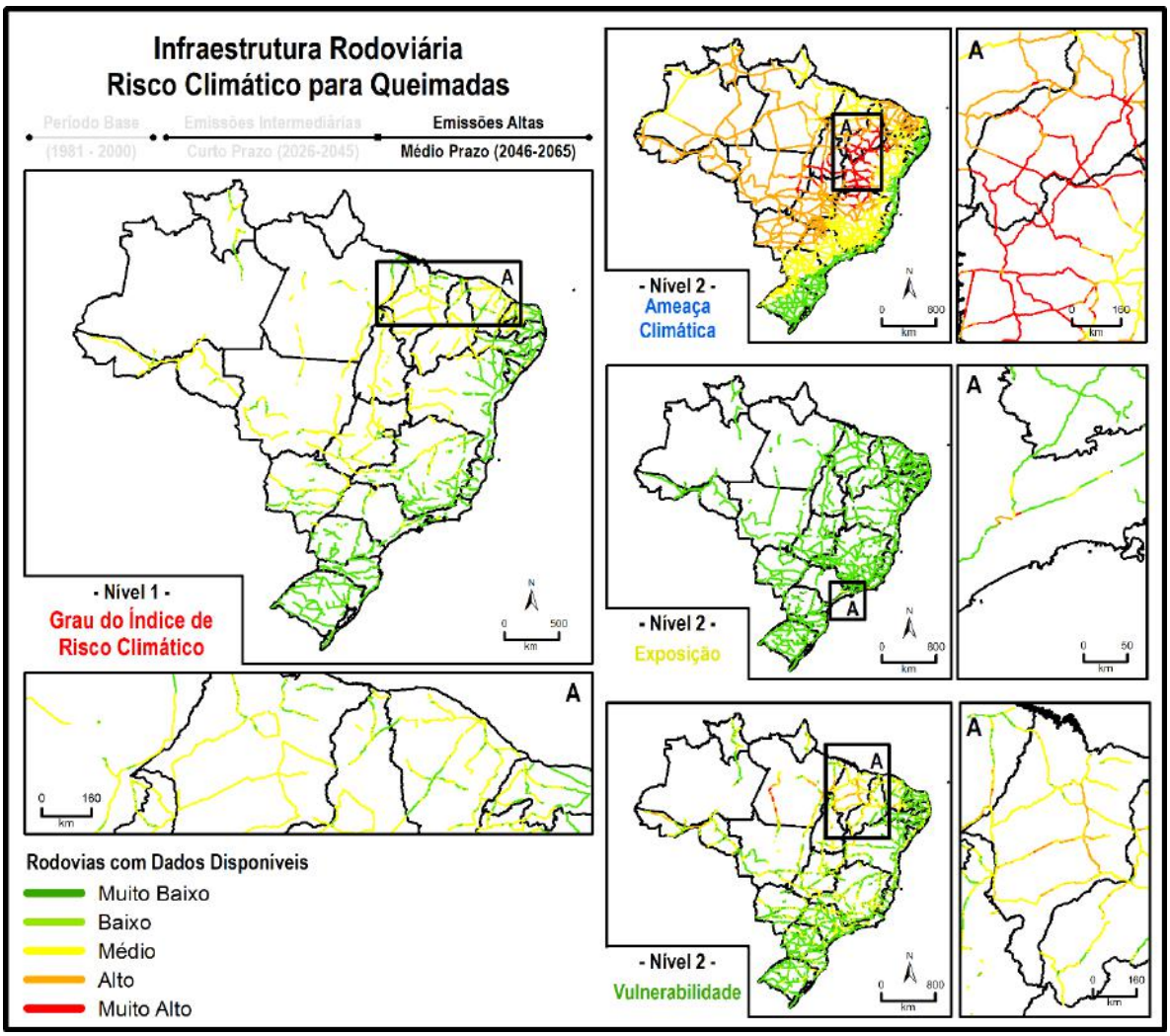
O **Índice de Risco Climático (IRC)** para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo, tal como ocorre no cenário de emissões intermediárias para ambos os horizontes temporais analisados, se concentra na região Nordeste, em parte da região Centro-Oeste e Norte e interior do Sudeste (Figura 56), que apresentam risco climático médio de impacto devido à queimada/ao incêndio. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo (Figura 56).

Para o componente de **ameaça climática**, os trechos sob ameaça muito alta continuam se concentrando no Nordeste, especialmente no interior da Bahia e Piauí, bem como, ao norte do Estado de Minas Gerais. Além desses, destacam-se muitos trechos com ameaças altas no interior de outros estados do Nordeste, Norte e em todo o Centro-Oeste, e médias no interior das regiões Sul, Sudeste, parte da região Nordeste e extremo norte do Brasil (estados do Amazonas, Acre, Amapá e Roraima). As rodovias localizadas no litoral do país (do Rio Grande do Sul ao Rio Grande do Norte) encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 56).

5.4.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 57 apresenta os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo.

Figura 57 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 5-2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

O Índice de Risco Climático (IRC) para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo não sofre mudanças sensíveis se comparado ao observado nos cenários anteriores (Figura 57),

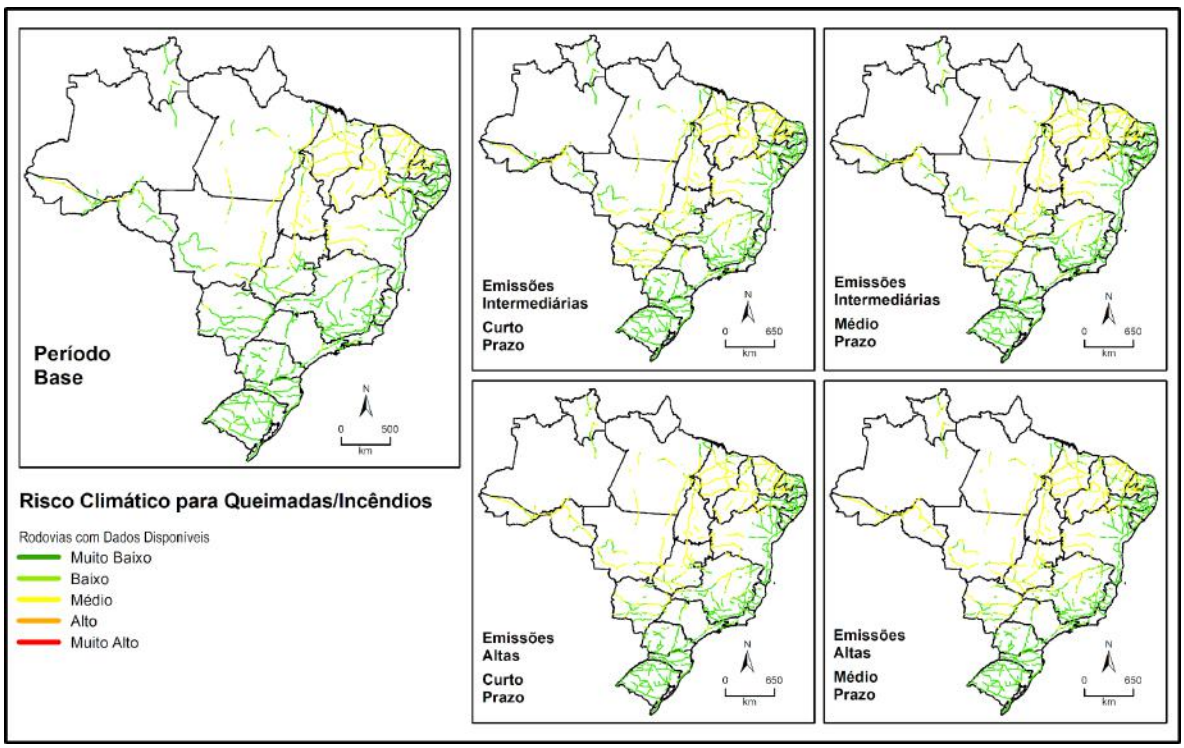
predominando trechos rodoviários com risco climático médio de impacto devido a queimadas/ incêndio por todo o interior do país, nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste, e as demais rodovias localizadas no litoral brasileiro e na região Sul apresentando grau de risco climático baixo (Figura 57).

A **ameaça climática** permanece muito alta no Nordeste (interior da Bahia e Piauí), bem como, ao norte do Estado de Minas Gerais. Além desses, predominam trechos com ameaças altas por todo o país, e médias no interior das regiões Sul, Sudeste, parte da região Nordeste e extremo Norte do Brasil. As rodovias localizadas no litoral do país encontram-se sob baixa ameaça de impactos devido às queimadas (Figura 57).

5.4.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto a queimada

A Figura 58 apresenta a síntese dos mapas do IRC de impacto devido à queimada/ao incêndio para o período base e os cenários de emissões intermediárias e altas, em ambos os horizontes temporais.

Figura 58 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto de queimada.

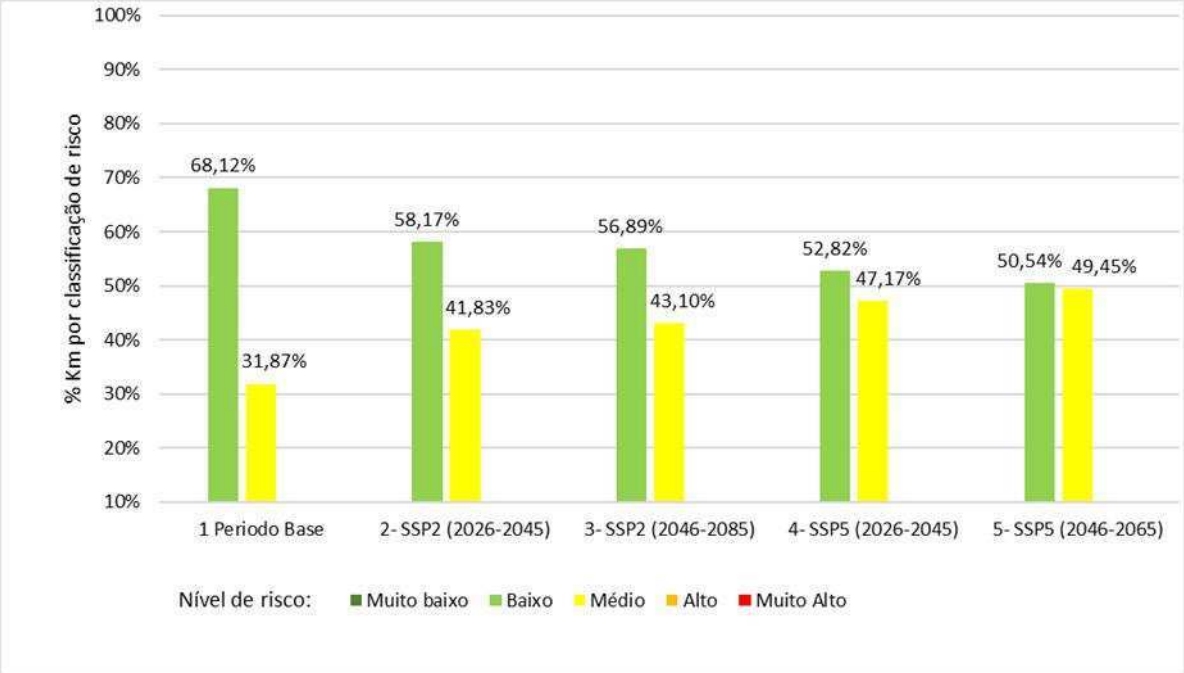


Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 58, observa-se que o **risco climático** devido ao impacto de queimada/incêndio para o período base é predominantemente baixo para todo o território brasileiro, com algumas áreas com risco médio no interior do Nordeste brasileiro e parte do Centro-Oeste e Norte. Conforme modifica-se o cenário para emissões intermediárias, os trechos de rodovias sob baixo risco diminuem, se considerado o horizonte temporal de curto prazo, reduzindo progressivamente para o horizonte temporal de médio prazo, e para o cenário de emissões altas, de curto e longo prazos. Enquanto isso, ocorre um aumento dos trechos de rodovias sob médio risco, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil.

De modo a facilitar a visualização do crescimento de trechos rodoviários com risco médio na infraestrutura de transportes federal, e as diferenças entre os diferentes cenários e horizontes temporais, apresenta-se a Figura 59, com a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a queimadas/incêndios.

Figura 59 - Distribuição percentual da quilometragem por nível de risco climático de impactos na infraestrutura rodoviária devido a queimada, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Pela análise da Figura 59, percebe-se que, no **período base**, 68,13% das rodovias federais encontram-se sob baixo risco devido ao impacto de queimadas/incêndios, e 31,87% encontram-se sob médio risco. Em um **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) e horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)**, verifica-se uma redução de 9,95% dos trechos sob baixo risco, passando a 58,17%, e um crescimento equivalente de trechos sob médio risco, passando a 41,83%. Modificando-se o horizonte temporal para **médio prazo (2046-2065)**, observa-se a redução de trechos sob baixo risco, bem como, o aumento de trechos sob médio risco, sendo aproximadamente 1,28% para ambos os graus de risco. Por fim, em um **cenário de emissões altas (SSP-5)**, ocorre novamente um aumento do grau de risco de trechos de rodovias federais: 52,82% de trechos sob baixo risco no horizonte temporal de **curto prazo (2026-2045)**, e 50,54%, no de **médio prazo (2046-2065)**; e 47,17% de trechos sob médio risco em curto prazo, e 49,45%, em médio prazo. Portanto, no pior cenário (emissões altas e horizonte temporal de médio prazo), quase metade das rodovias federais brasileiras encontrar-se-ão sob médio risco devido ao impacto de queimada/incêndio.

Essa variação decorre unicamente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A **ameaça climática** é muito alta, especialmente nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará e Pará, com trechos de ameaça alta e média em todo o interior dos demais estados do Norte, Nordeste e Centro-Oeste e parte norte de Minas Gerais, e baixa ao longo de rodovias localizadas no litoral brasileiro (Figura 58). Por sua vez, a **exposição** não sofre alterações ao longo dos cenários, permanecendo a mesma, com as únicas rodovias com trechos de grau médio, alto e muito alto sendo a BR-116 e BR-

381, ambas em São Paulo, e as demais rodovias com exposição baixa ou muito baixa. A ameaça média contribui especialmente na região Sul para os valores dos IRCs mais altos. O mesmo ocorre com a **vulnerabilidade**, que em todos os cenários, bem como, no período base, permanece com diversos trechos de rodovias no país apresentando vulnerabilidade baixa e média, com exceção de trechos no Pará, que possuem vulnerabilidade alta ou muito alta.

A Tabela 11 apresenta o percentual dos trechos, por grau de ameaça climática, para impactos devido a queimadas/incêndios em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 11 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para queimada/ incêndios.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,16%	34,42%	46,20%	15,89%	3,33%
SSP2 (2026-2045)	0,03%	20,59%	48,20%	26,89%	4,29%
SSP2 (2046-2065)	0,03%	17,41%	50,58%	28,27%	3,71%
SSP5 (2026-2045)	0,03%	19,76%	37,21%	36,50%	6,50%
SSP5 (2046-2065)	0,03%	17,40%	34,24%	41,12%	7,21%

Fonte: Elaboração própria (2022).

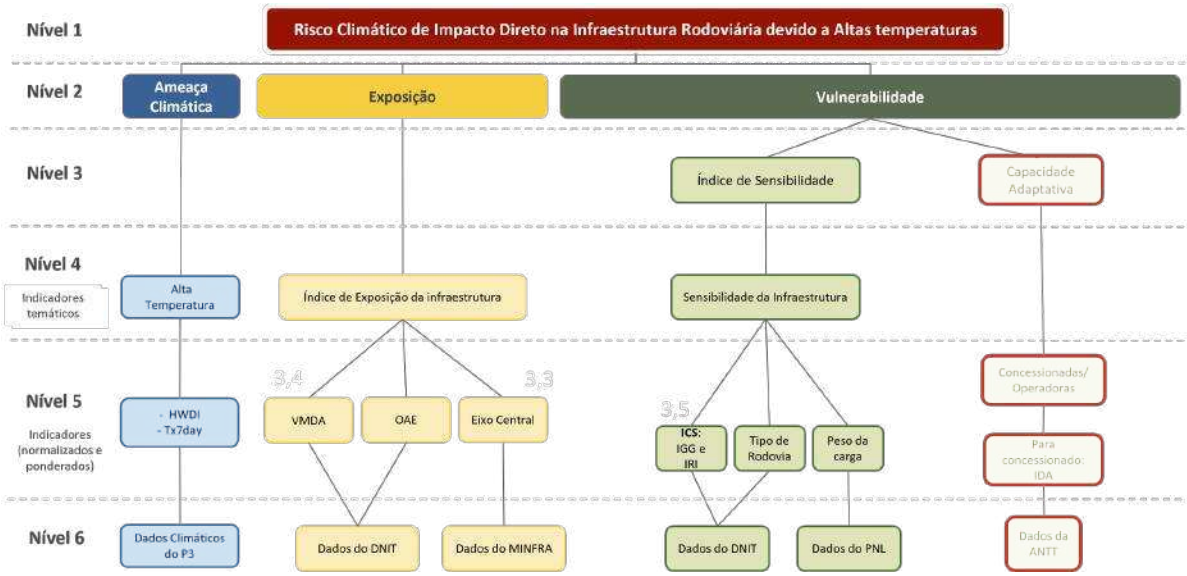
Conforme se observa na Tabela 11, no **período base**, predominam no país trechos sob baixo e médio grau de ameaça climática (34,42% e 46,21%, respectivamente). Os trechos sob muito baixa ameaça são poucos (0,16%), e aqueles sob risco alto ou muito alto, somados, equivalem a 19,22%. Com a mudança dos cenários analisados e horizontes temporais considerados, verifica-se um aumento progressivo de trechos sob risco muito alto e alto - 31,18% para emissões intermediárias e curto prazo, 32,56% para o mesmo cenário de emissões, mas o período de médio prazo, 43% para cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo, e 48,33% para o mesmo cenário de emissões a médio prazo. Portanto, verifica-se que, entre ⅓ e quase ½ da infraestrutura rodoviária federal brasileira está sob ameaça climática alta ou muito alta de impactos devido a queimadas/ incêndios.

Os trechos sob risco médio aumentam do período-base ao SSP-2 (2026-2045) - de 46,21% a 48,20% (curto prazo) e 50,58% (médio prazo) (Tabela 11) -, diminuindo no cenário SSP-5 - 37,20% (curto prazo) e 34,24% (médio prazo). Isso se deve à mudança do grau de ameaça de trechos que, antes categorizados como média, passaram a alta ou muito alta. Por sua vez, os trechos sob ameaça muito baixa e baixa sofrem redução, considerando os diferentes cenários e horizontes temporais.

5.5. Índice de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

O IRC para a infraestrutura rodoviária devido ao impacto de altas temperaturas foi calculado a partir de dados, indicadores e subíndices, sintetizados na estrutura hierárquica apresentada na Figura 60.

Figura 60 - Estrutura hierárquica relacional para a construção do Índice de Risco Climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme apresentado na Figura 60, para compor o subíndice de ameaça climática (indicador temático de altas temperaturas), foram considerados os dados de:

- HWDI (*Heat Wave Duration Index*) - índice de duração de ondas de calor: período máximo em cada ano de, pelo menos, 5 dias consecutivos onde a temperatura máxima é de pelo menos 5 graus C mais quente do que a climatologia diária do período base (indica a persistência de temperaturas altas); e
- Tx7day - média dos 7 (sete) dias consecutivos mais quentes do ano: indica a persistência de temperaturas altas.

O subíndice de exposição, especificamente, considerou os indicadores de:

- Localização do eixo central da rodovia (dados do MInfra);
- Volume Médio Diário Anual - VMDA (dados do DNIT); e
- Localização das Obras de Arte Especiais - OAE (dados do DNIT).

Portanto, a exposição advém principalmente do VMDA de veículos que trafegam na rodovia.

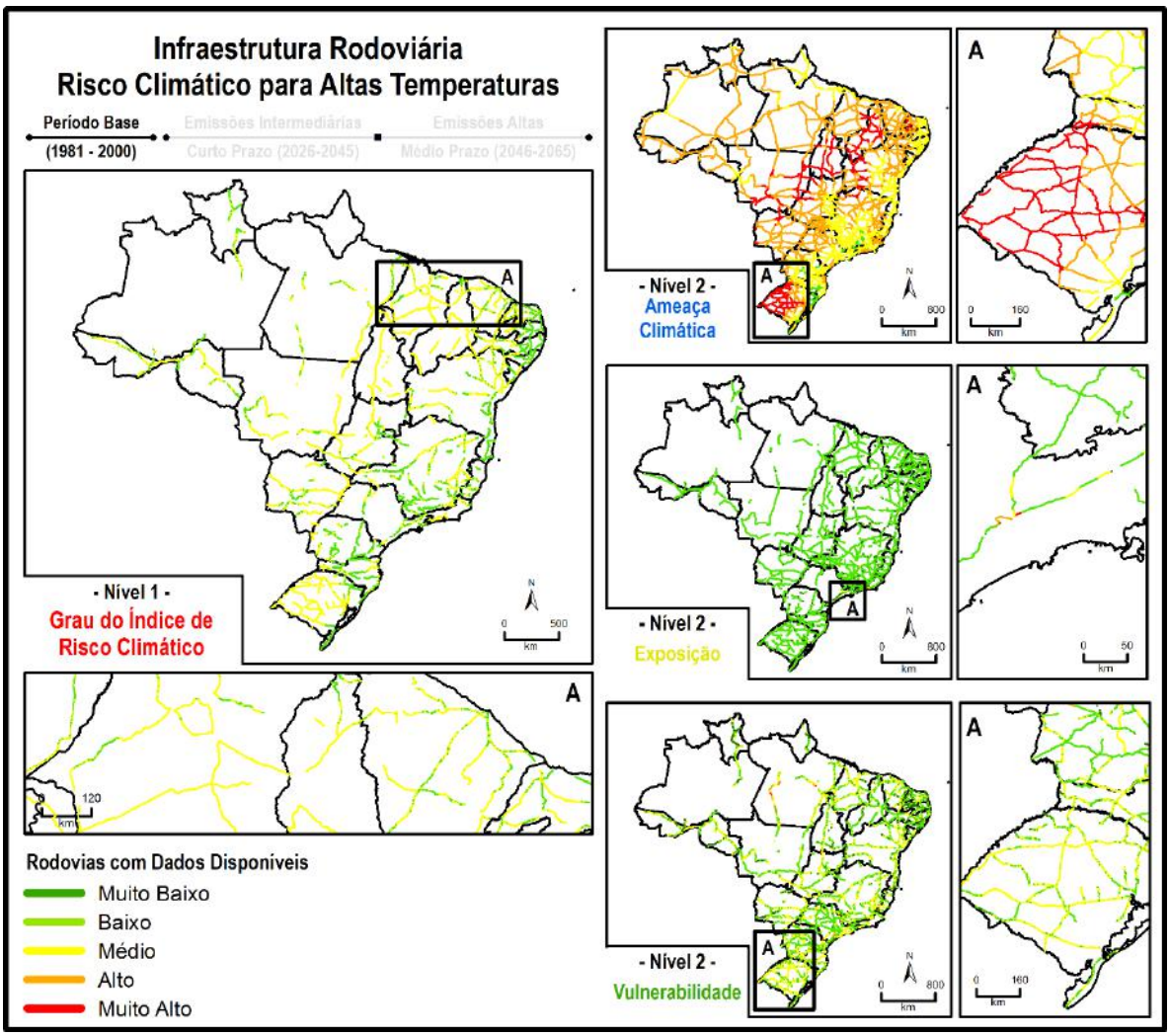
Por fim, para compor o subíndice de vulnerabilidade, foram considerados os indicadores temáticos de sensibilidade da infraestrutura, calculados a partir de dados do Índice de Condição de Superfície - ICS (dados do DNIT), tipo de rodovias (dados do DNIT) e peso da carga transportada (dados do PNL-2035).

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os 5 (cinco) cenários analisados, e um capítulo final consolidando a análise de risco devido ao impacto de altas temperaturas.

5.5.1 Período base | Impacto direto de altas temperaturas

A Figura 61 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto devido às altas temperaturas (Nível 1), para o período base.

Figura 61 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o período base.



Fonte: Elaboração própria (2022).

O maior IRC, grau médio de risco climático médio, foi verificado em trechos de rodovias nos estados do Maranhão, Piauí e Ceará, além de quase todos os trechos de rodovias nos Estados do Rio Grande do Sul e Tocantins. Cabe destacar ainda rodovias que têm grau de risco climático baixo como, por exemplo, as pertencentes aos estados do Paraná e Santa Catarina no Sul e do litoral do Nordeste brasileiro. Além disso, ressalta-se que não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a altas temperaturas com grau alto ou muito alto (Figura 61).

Analisando cada um dos subíndices de forma individualizada, verificam-se trechos de rodovias localizadas nos Estados do Piauí, Tocantins, no interior da Bahia, no Mato Grosso e principalmente no Rio Grande do Sul com grau muito alto de **ameaça climática**. Além deste, destacam-se muitos trechos de rodovias com grau alto em quase toda a região Norte, Centro-Oeste, interior da região

Nordeste, e nos estados de Minas Gerais e São Paulo. Os estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo, Santa Catarina, bem como, trechos localizados nos litorais do estado de São Paulo e da região Nordeste encontram-se com grau médio e alto.

No que diz respeito à **vulnerabilidade** a altas temperaturas, composta apenas pela sensibilidade da infraestrutura já que não existe sensibilidade do meio biofísico para esse impacto, destacam-se os Estados do Rio Grande do Sul, com grau de ameaça climática médio em muitos trechos, e do Pará, com trechos rodoviários com grau alto e muito alto. Todas as demais rodovias têm grau médio e baixo de ameaça climática devido a altas temperaturas, com alguns pontos apresentando grau muito baixo.

As únicas rodovias que apresentam trechos de rodovias com grau médio, alto e muito alto de **exposição** localizam-se na BR-116 e BR-381, em São Paulo. Todas as demais rodovias têm grau de exposição baixo ou muito baixo.

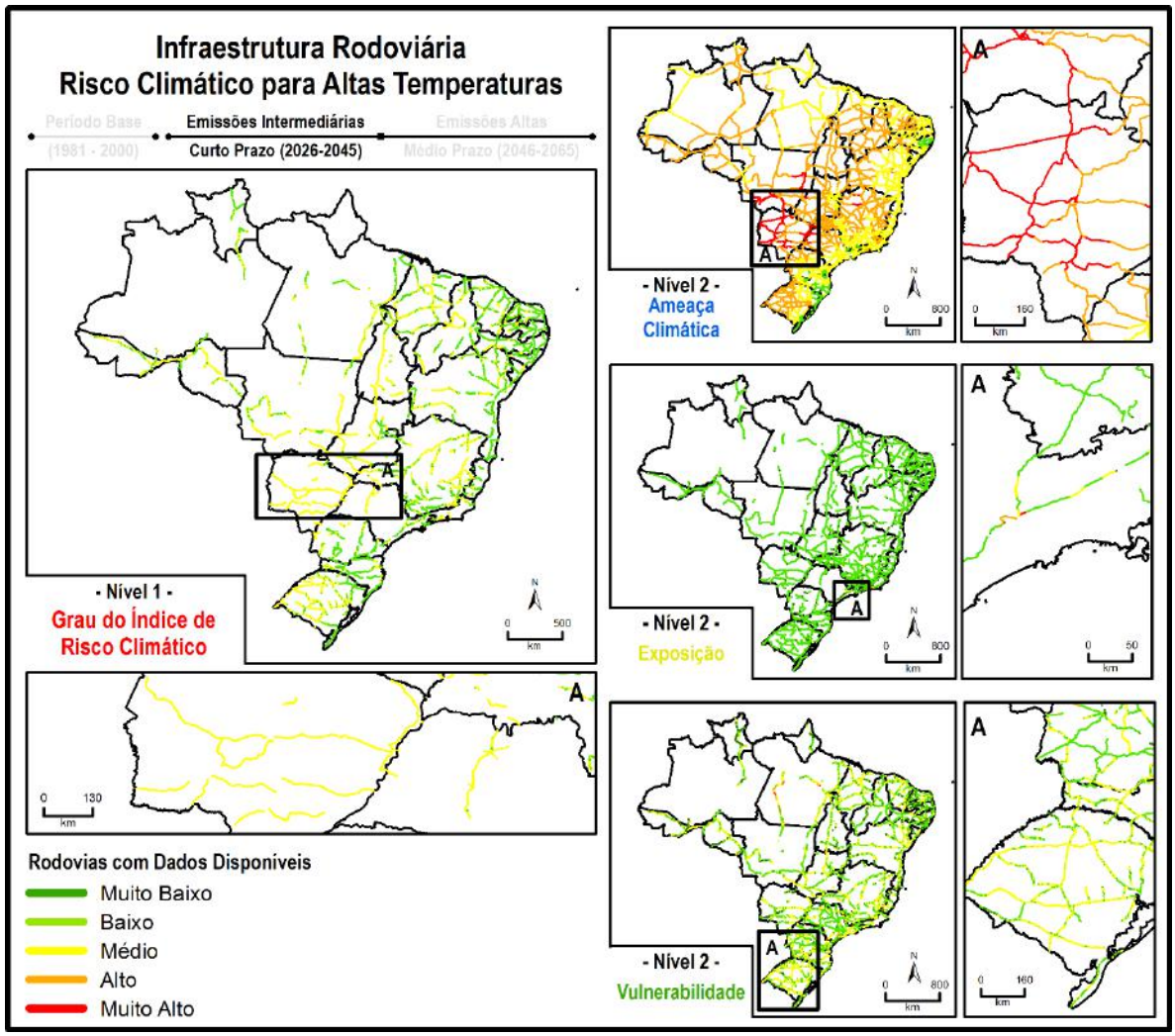
5.5.2. Cenário de emissões intermediárias (SSP2-4.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões intermediárias nos horizontes temporais de curto (2026 - 2045) e médio (2046 - 2065) prazos.

5.5.2.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 62 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026 - 2045).

Figura 62 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

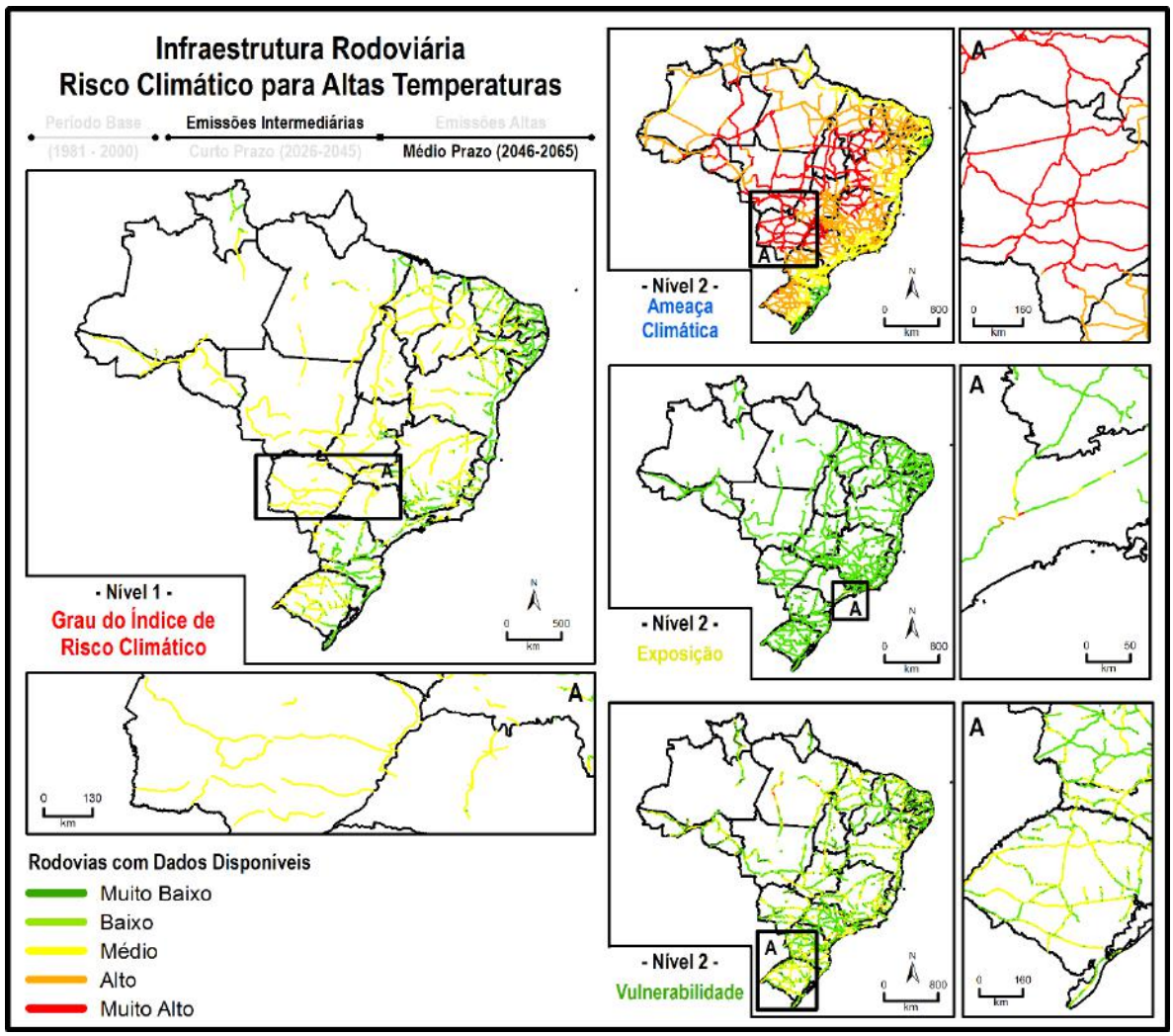
Os trechos com maiores graus de IRC se concentram em parte da região Centro-Oeste (estados de Mato Grosso do Sul e Goiás) e Sudeste (estados de São Paulo e Minas Gerais), conforme apresentado na Figura 62, que apresentam risco climático médio devido ao impacto direto de altas temperaturas. As demais rodovias apresentam grau de risco climático baixo e muito baixo (Figura 62).

Em comparação ao período base, observa-se que a principal diferença está no componente de **ameaça climática**, em que os trechos sob ameaça muito alta e alta, antes concentrados na região Sul do país - especificamente no Estado do Rio Grande do Sul, onde passam ao grau de ameaça alto e médio no interior desse estado, indo ao grau baixo no litoral -, passam se concentrar nos estados da Região Centro-Oeste (MS e MT), apesar de estarem presentes em rodovias distribuídas por todo o interior do país. Excetuam-se parte da região Norte, onde se verificam trechos de rodovias com grau de ameaça climática médio devido a altas temperaturas, e por todo o litoral brasileiro, onde há trechos sob risco médio e baixo.

5.5.2.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

Os mapas resultantes, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP2 - 2046-2065) são apresentados na Figura 63.

Figura 63 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observa-se a manutenção das rodovias sob risco de impacto direto devido a altas temperaturas, se comparado ao cenário de emissões intermediárias no horizonte temporal de curto prazo (SSP2 - 2026-2045). A principal diferença está no aumento da ameaça climática nas rodovias da região Centro-Oeste e no interior do Nordeste brasileiro, bem como, no norte do Estado de Minas Gerais.

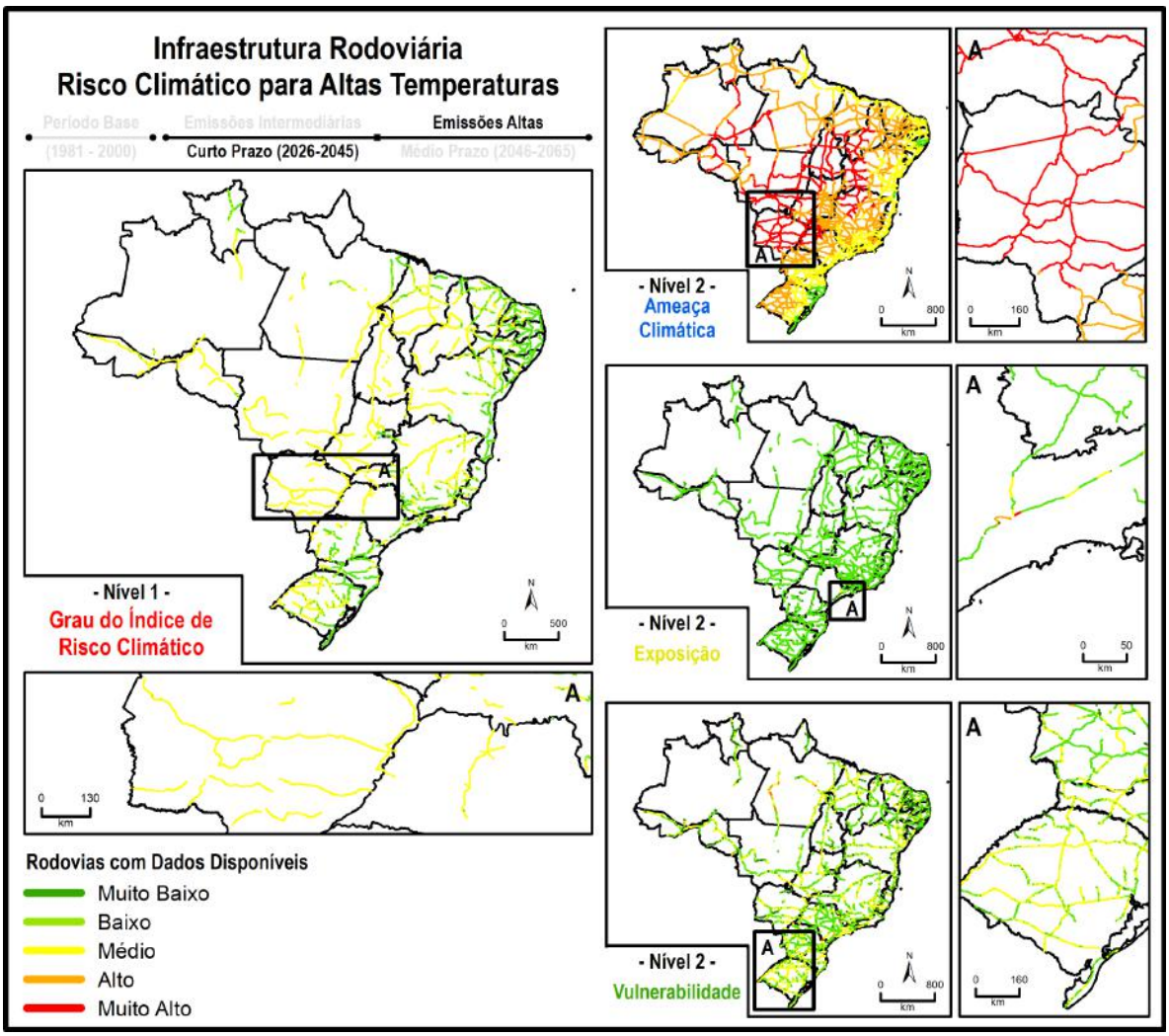
5.5.3. Cenário de emissões altas (SSP5-8.5)

Nesta subseção, são apresentados os resultados do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas sobre a infraestrutura rodoviária federal brasileira, considerando-se o cenário de emissões altas (SSP5-8.5) nos horizontes temporais de curto (2026-2045) e médio prazos (2046-2065).

5.5.3.1. Horizonte temporal de curto prazo (2026-2045)

A Figura 64 apresenta os mapas resultantes para a infraestrutura rodoviária, com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP5 - 2026-2045).

Figura 64 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de curto prazo (SSP 2 2026-2045).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Analisando a Figura 64, nota-se as rodovias localizadas ao longo do litoral brasileiro, bem como, nos estados de Santa Catarina e Paraná apresentam nível baixo de risco de impacto devido às altas temperaturas. Já os maiores graus de risco climático médio devido ao impacto direto de altas temperaturas estão na região Centro-Oeste, Norte, interior da região Nordeste e Sudeste, e no Sul concentrados no estado do Rio Grande do Sul.

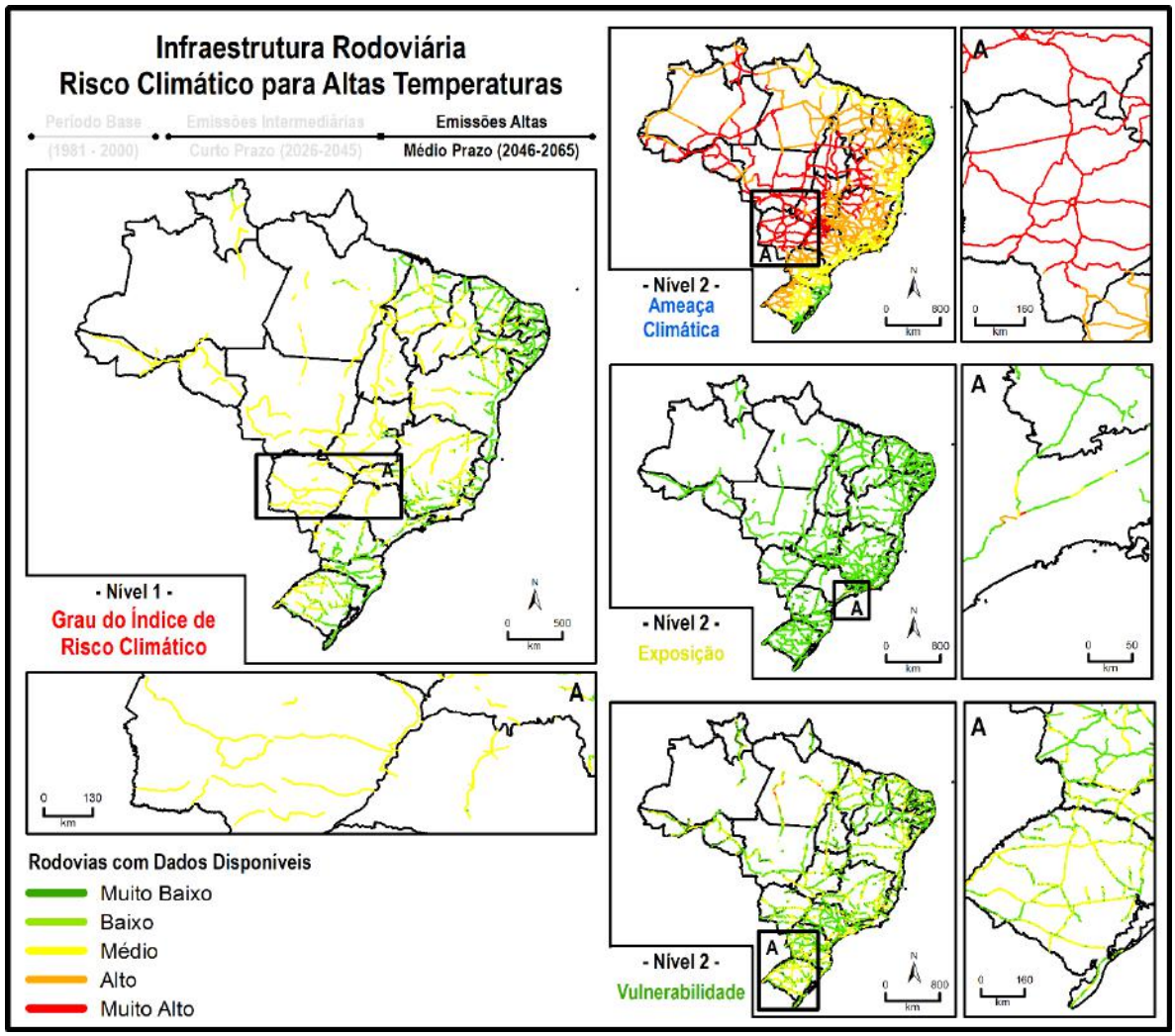
Se comparado ao período base (Figura 61) e ao cenário de emissões intermediárias, mantendo-se o horizonte temporal (curto prazo) (Figura 62), verifica-se uma diminuição dos trechos de rodovias sob baixo risco e um aumento de trechos de rodovias sob médio risco; já se compararmos ao cenário de emissões baixas e horizonte temporal de longo prazo (Figura 63), verifica-se uma redução de trechos rodoviários sob risco médio devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Verifica-se para o Nível 2 o aumento de trechos no Norte, Centro-Oeste e interior do Nordeste do Brasil sob ameaça climática muito alta e alta, com destaque ao estado do Mato Grosso do Sul, onde todas as rodovias analisadas encontram-se sob muito alto grau de ameaça climática; além disso, aumentam também os trechos com ameaça média e baixa (distribuídas ao longo do litoral brasileiro, perpassando as regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Norte), com redução de trechos rodoviários com ameaça climática devido ao impacto direto de altas temperaturas muito baixa.

5.5.3.2. Horizonte temporal de médio prazo (2046-2065)

A Figura 65 apresenta os mapas resultantes com os subíndices de ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (Nível 2), bem como, o grau do IRC de impacto direto devido a altas temperaturas (Nível 1), para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP5 - 2046-2065).

Figura 65 - Resultado da análise do risco climático de impacto na infraestrutura rodoviária devido ao impacto direto de altas temperaturas, para o cenário de emissões altas e horizonte temporal de médio prazo (SSP 2 2046-2065).



Fonte: Elaboração própria (2022).

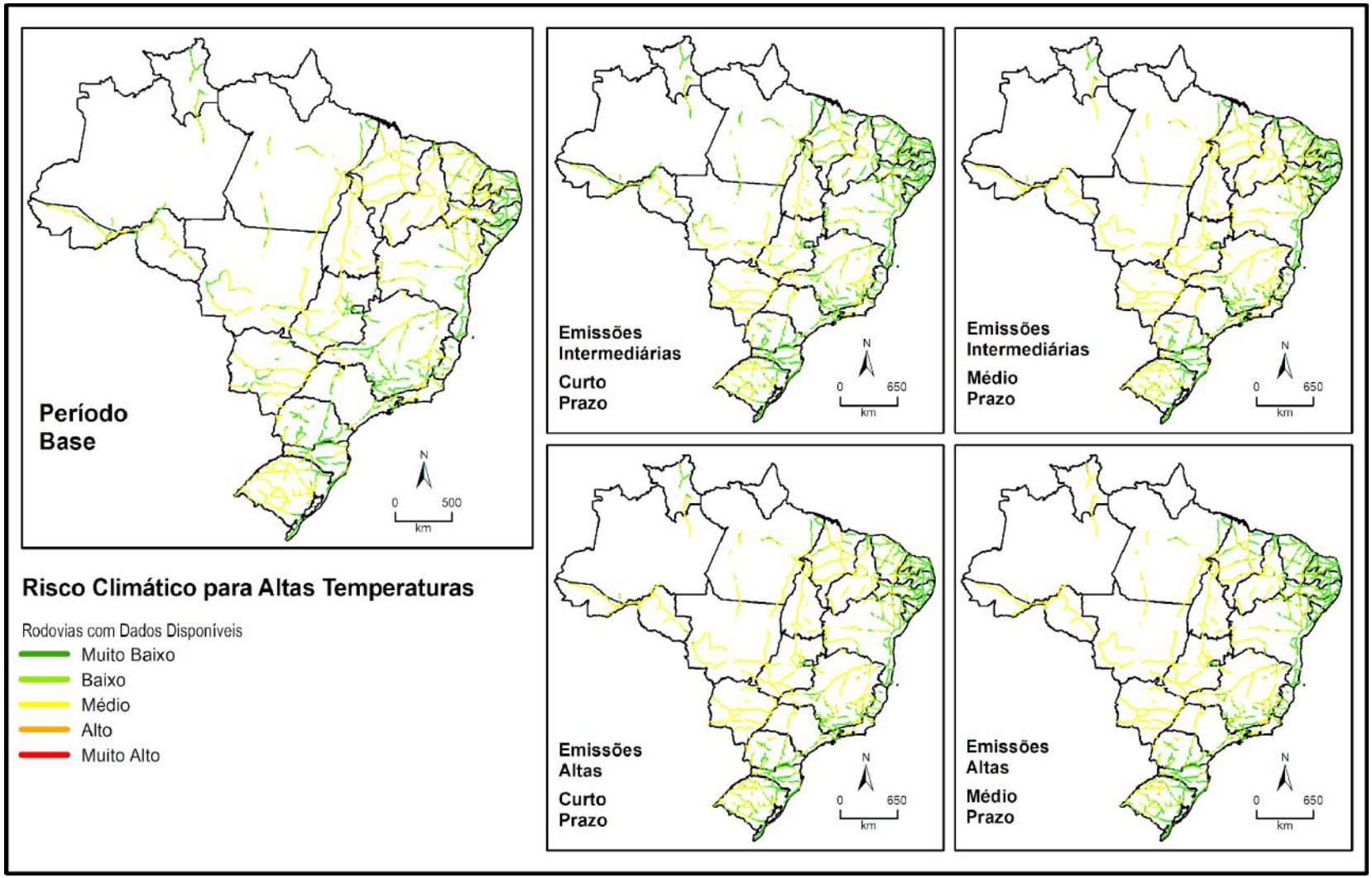
Observa-se uma redução dos trechos sob risco climático médio e um aumento de trechos sob baixo risco climático devido ao impacto direto de altas temperaturas; contudo, elas continuam seguindo o mesmo padrão de distribuição territorial verificado nos cenários e horizontes temporais anteriores (trechos sob médio risco distribuídos no interior do país, enquanto os sob baixo risco localizam-se mais ao litoral).

A ameaça climática, como componente do risco climático, no cenário de altas emissões e horizonte temporal de médio prazo, tem um aumento nas rodovias sob muito alto risco, médio e baixo devido ao impacto direto de altas temperaturas, enquanto ocorre uma redução dos trechos sob risco alto e muito baixo.

5.5.4 Análise do Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas

A Figura 66 abaixo sintetiza os mapas de risco climático da infraestrutura rodoviária federal brasileira devido ao impacto direto de altas temperaturas.

Figura 66 - Síntese: Mapa de Risco Climático devido ao impacto direto de altas temperaturas.



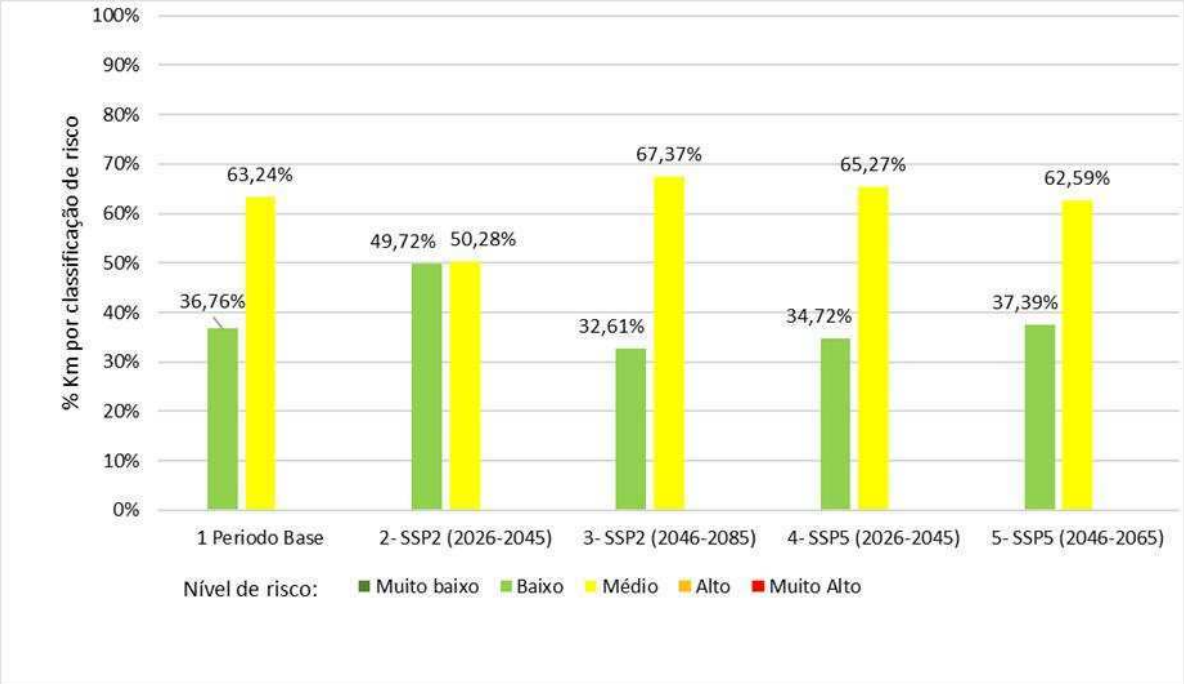
Fonte: Elaboração própria (2022).

Os trechos rodoviários que apresentam os maiores IRCs devido ao impacto direto das altas temperaturas localizam-se no interior do país, distribuídos entre todas as regiões do Brasil, enquanto as rodovias localizadas no litoral do país, para todos os cenários e horizontes temporais considerados, encontram-se sob baixo risco de impacto. Destaque para o estado do Rio Grande do Sul, que tem suas rodovias sob risco médio para todos os cenários considerados.

Esse resultado se dá principalmente pela componente de ameaça climática com as temperaturas mais altas no interior do país e pela vulnerabilidade média que contribui especialmente na região Sul para os valores dos IRCs mais altos.

De modo a facilitar a visualização das diferenças entre os diferentes cenários e horizontes, temporais, apresenta-se a Figura 67, com a distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos diretos na infraestrutura devido a altas temperaturas.

Figura 67 - Distribuição percentual da quilometragem de rodovias por nível de risco climático de impactos na infraestrutura devido às altas temperaturas, para cada um dos cenários analisados.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Observando-se a Figura 67, nota-se que as rodovias brasileiras se encontram sobre baixo e médio risco climático, com poucas variações entre o período base e os diferentes cenários e horizontes temporais, com exceção à variação acentuada entre o período base e o cenário de emissões intermediárias e horizonte temporal de curto prazo. Há uma predominância de trechos de rodovias com médio grau de risco climático.

Para o **período base**, 36,76% das rodovias encontram-se sob baixo risco, e 63,24% sob médio risco. Ao mudar para o **cenário de emissões intermediárias (SSP-2) e horizonte temporal de curto prazo** (2026-2045), ocorre um aumento de trechos de rodovias sob baixo risco (49,72%) e uma redução dos trechos sob médio risco (50,28%). Mantendo-se o cenário de emissões e modificando-se o **horizonte temporal para médio prazo** (2046-2065), verifica-se um aumento dos trechos sob médio

risco (67,37%) e uma redução de trechos sob baixo risco (32,61%), sendo este o cenário onde se verificam os maiores percentuais de trechos rodoviários sob médio risco de impacto direto devido a altas temperaturas.

Para o **cenário de emissões altas (SSP-5)**, ocorre um decréscimo percentual dos trechos de rodovias sob médio risco (65,27% para o horizonte temporal de curto prazo e 62,59% para o horizonte temporal de médio prazo), e, por conseguinte, um crescimento dos trechos sob baixo risco (34,72% e 37,39%, respectivamente). Essa variação decorre principalmente das mudanças observadas no subíndice de ameaça climática. A Tabela 12 apresenta o percentual dos trechos, por grau de **ameaça climática**, para impactos diretos devido a altas temperaturas em cada um dos cenários e horizontes temporais analisados.

Tabela 12 - Quilometragem (em %) de rodovias por graus de ameaças climáticas para cada um dos cenários analisados para impactos diretos devido às altas temperaturas.

Cenários	Ameaça Climática (km por grau)				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Período Base	0,01%	1,53%	32,70%	52,37%	13,39%
SSP2 (2026-2045)	0,01%	3,41%	40,11%	51,65%	4,82%
SSP2 (2046-2065)	0,01%	2,46%	26,23%	45,17%	26,13%
SSP5 (2026-2045)	0,01%	2,57%	27,65%	46,29%	23,48%
SSP5 (2046-2065)	0,01%	3,80%	28,37%	40,21%	27,61%

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme exposto na Tabela 12, observa-se o aumento da ameaça climática para o cenário SSP-2 2026-2045 em relação ao período base em todos os graus analisados, com exceção do muito baixo, que não sofre alterações entre os cenários. Contudo, o percentual de trechos rodoviários sob ameaça climática baixa, média e alta diminuem no cenário SSP-2 2046-2065, ao passo que os trechos sob grau muito alta aumentam, atingindo 26,13%.

Nos cenários de emissões altas, ocorre um aumento progressivo dos trechos rodoviários sob ameaça baixa e média, com uma ligeira queda (SSP-5 2026-2045) e um novo crescimento (SSP-5 - 2046-2065) de trechos rodoviários sob ameaça alta e muito alta. Essas reduções se dão devido ao aumento no grau de ameaça alto e muito alto no SSP-2 no médio prazo e no SSP-5 nos dois horizontes temporais, ou seja, maior as emissões de Gases de Efeito Estufa e mais distante o horizonte temporal, maior a ameaça climática que chega a 27,61% no SSP5 no médio prazo.

6. Conclusão - Modo Rodoviário

Quanto ao **alagamento/inundação**, no período base, todas as rodovias têm grau de IRC muito baixo ou baixo, com exceção de alguns trechos no Pará e no Maranhão, além de partes de rodovias no litoral do Nordeste, as quais têm grau de risco climático médio. Variações quase imperceptíveis são encontradas nos cenários de emissões intermediárias nos horizontes de curto e médio prazos. Já nos cenários de emissões altas, ainda aparecem rodovias em Estados do Sul e Sudeste brasileiros como Rio de Janeiro,

São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No pior cenário (SSP-5 - 2046-2065), 84,06% se mantêm em grau baixo; contudo, se observa uma tendência de aumento dos trechos com grau médio, em função dos aumentos dos graus de ameaça climática.

As rodovias que apresentaram os maiores graus de risco climático devido ao impacto de **deslizamento**, em todos os cenários e horizontes considerados no presente estudo, estão localizadas nas Regiões Sul e Sudeste (Serra do Mar e Serra Geral), no Litoral do Nordeste e, sendo que na Região Norte, apenas a BR-230 (Altamira-Marabá), no Pará apresenta-se nesta situação. Cabe destacar que o IRC é fortemente afetado pela susceptibilidade ao deslizamento (relevo mais acidentado, entre outros fatores) no Sudeste e Sul (Serra do Mar e Serra Geral) e litoral dos estados de Pernambuco e Alagoas. De forma geral, conforme se modifica o cenário de emissões ou o horizonte temporal, observa-se um padrão de pequena redução das extensões de rodovias sob baixo risco climático ao impacto de deslizamento e um aumento de tais extensões sob risco médio, . Essa variação decorre das mudanças observadas no subíndice de **ameaça climática**. Isso se deve ao aumento das áreas de médio grau de ameaça entre o período base e o cenário de altas emissões (SSP-5) para o horizonte de médio prazo (2046-2065) para praticamente toda a Região Sul e para os estados de Minas Gerais, Mato Grosso e Goiás e litoral, que corresponde a BR-101.

Quanto ao impacto relacionado à **erosão**, que tem forte relação com o uso do solo, os trechos com IRC mais significativos se concentram nas rodovias no Pará, em rodovias localizadas em Estados do Sul e em trechos rodoviários dos Estados do Nordeste, em especial no litoral (BR-101), que apresenta risco médio de impacto na infraestrutura rodoviária. As demais rodovias têm grau de risco climático baixo; não existem rodovias com grau de risco climático de impacto devido a erosão alto ou muito alto. Além disso, pode ser observado o aumento do risco climático médio em todo território brasileiro, em função do aumento do grau de risco de impacto da **ameaça climática**, quando se compara os cenários de intermediárias e altas emissões com o período base. Nesses cenários, outros trechos de IRC médio que podem ser observados no litoral da Região Nordeste, além de parte dos estados do Acre, Rondônia, Pará e Maranhão.

O IRC devido ao impacto de **queimada/incêndio** para o período base é baixo para 68,12% do território brasileiro, com 31,87% das áreas com risco médio no interior do Nordeste brasileiro (Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte e sertão da Bahia) e parte do Norte (Tocantins e Pará). Conforme modifica-se o cenário para emissões intermediárias, os trechos de rodovias sob baixo risco diminuem, se considerado o horizonte temporal de curto prazo, reduzindo progressivamente para o horizonte temporal de médio prazo, e para o cenário de emissões altas, de curto e longo prazos. Assim, os trechos sob risco médio aumentam na mesma proporção.

Esse aumento de trechos rodoviários de grau médio ocorre, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, em que os impactos das **ameaças climáticas** crescem com horizonte temporal e cenários de emissões. Isso faz com que ocorra um equilíbrio entre trechos de baixo e médio graus no SSP-5 (2046-2065) com 50,54% dos trechos com baixo grau de risco e 49,45% com médio grau.

Em relação aos **impactos diretos devido às altas temperaturas**, nota-se que, diferente do que ocorre com os demais impactos analisados, já no período base há um predomínio de trechos com grau médio (63,24%). Isso ocorre porque aproximadamente 60% dos trechos apresentam grau alto ou muito alto de ameaça no período base e nos cenários analisados. Os trechos rodoviários que apresentam os maiores IRCs devido ao impacto direto das altas temperaturas localizam-se no interior do país, distribuídos em todas as Regiões do País, enquanto as rodovias localizadas no litoral do país,

para todos os cenários e horizontes temporais considerados, encontram-se sob baixo risco de impacto. No Sul do país, destaca-se o estado do Rio Grande do Sul, que tem suas rodovias sob médio risco para todos os cenários considerados.

Esse resultado se dá principalmente pela componente de **ameaça climática** com as temperaturas mais altas no interior do País e pela vulnerabilidade média que contribui especialmente na Região Sul para os valores dos IRCs mais altos. Cabe destacar ainda que, considerando o cenário de emissões intermediárias (SSP-2), os trechos com grau médio de risco caem para 50,28% em curto prazo (2026-2045) e sobem para 67,37% em médio prazo (2046-2065) em comparação ao período base. Já para o cenário de altas emissões (SSP-5), os trechos com médio risco representam 65,25% em curto prazo (2026-2045) e 62,59% em médio prazo (2046-2065).

Tudo que foi exposto indica que quando se analisa os impactos da mudança climática na infraestrutura rodoviária, os graus de risco de impacto não se repetem nas regiões e que, no geral, são baixos ou médios. Isso se deve fundamentalmente ao fato de que a **exposição** (Nível 2) apresenta grau baixo em todo o país, exceto em alguns pequenos trechos onde o VMDA de veículos é muito elevado, sendo que este é o indicador que mais interfere nos graus de risco de impacto da exposição.

Outro componente que precisa ser destacado é a vulnerabilidade, composta por dois subíndices, a sensibilidade biofísica e a sensibilidade da infraestrutura. O subíndice de **sensibilidade biofísica** foi calculado a partir de bases específicas para os impactos devido ao alagamento, deslizamento, erosão e queimada/incêndio, exceto para altas temperaturas, que, por se tratar de um impacto direto na infraestrutura, não considerou esse subíndice em seus cálculos. Já a **sensibilidade da infraestrutura** se mantém a mesma para todos os impactos e cenários porque não se conseguiu dados para diferenciar a sensibilidade da infraestrutura entre os vários impactos analisados e porque não foram feitas modelagens para o desenvolvimento futuro da infraestrutura.

Além disso, em termos de **ameaça climática**, o que se destacam são os impactos diretos devido às altas temperaturas, que no pior cenário (SSP-5 – 2046-2065) chega a 27% de trechos com grau muito alto e 40% de grau alto em relação a ameaça climática. Outro ponto de atenção são as queimadas, onde os trechos de alto risco chegam a 41% e de muito alto risco a 7%, conforme pode ser visualizado no mapa de ameaças.

Por fim, recomenda-se que novos estudos sobre o risco climático das rodovias brasileiras sejam desenvolvidos. Por exemplo, pode-se realizar ajustes nos mapas das componentes de risco, principalmente, por meio do tratamento de *outliers* da exposição (fortemente impactada pelo VMDA) e da vulnerabilidade (impactada pelo peso da carga dos veículos que trafegam nas rodovias). Além disso, podem ser realizadas análises específicas de risco climático sobre os trechos rodoviários que ainda se encontram em fase de planejamento (ou seja, não construídas).

Outra oportunidade de estudo futuro consiste na realização de análises mais específicas para determinados *hotspots*, que seriam aquelas áreas de rodovias ou até rodovias específicos que nesse estudo foram identificadas com maiores graus de risco de impacto, já no período base, ou cujo risco aumente considerando-se os diferentes cenários e horizontes temporais. Ao focar em rodovias específicas, futuros estudos podem incluir bases mais robustas sobre a infraestrutura existente, permitindo uma análise mais aprofundada dos riscos. Inclusive possibilitando a inclusão de indicadores de capacidade adaptativa, em falta nesse projeto, em virtude da necessidade de representação de todo o território brasileiro que apresenta dimensões continentais. A identificação

e inclusão de novos indicadores para rodovias específicas pode demandar um aprimoramento e adaptação das cadeias de impacto e da identificação dos fatores de risco climático porque em função dos contextos regionais ou locais podem surgir novos elementos diferenciados que contribuem para o risco climático.

7. Referências Bibliográficas

AZEVEDO, Joel Solon Farias. Técnica Delphi um Guia Passo a Passo. Disponível em: <http://www.joelazevedo.com.br/?p=1900>. Acesso em: 21/ 01/2022.

BARRETO, Naurinete JC et al. Multivariate intraseasonal rainfall index applied to South America. **Meteorological Applications**, v. 26, n. 4, p. 521-527, 2019.

BARRETO, Naurinete JC et al. Maximum covariance analysis to identify intraseasonal oscillations over tropical Brazil**. Climate Dynamics**, v. 49, n. 5, p. 1583-1596, 2017.

BLACKWOOD, L., RENAUD, F. G., GILLESPIE, S.: **Nature-based solutions as climate change adaptation measures for rail infrastructure**. Nature-Based Solutions, p. 100013, 2022.

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. **UK Climate Change Risk Assessment Evidence Report: Chapter 4, Infrastructure**. Report prepared for the Adaptation Sub-Committee of the Committee on Climate Change, London, 2016.

DAWSON, A. Anticipating and Responding to Pavement Performance as Climate Changes. **Green Energy and Technology**, 127–157. 2014.

EVANS, C.; TSOLAKIS, D.; NAUDE, C. **Framework to address the climate change impacts on road infrastructure assets and operations**. ARRB Group: Melbourne, 2009. Disponível em: https://www.australasiantransportresearchforum.org.au/sites/default/files/2009_Evans_Tsolakis_Naude.pdf Acesso em: 05 maio 2021.

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

HEINZ-PETER, B. Risks and consequences of wards on railway infrastructure. **Journal of Polish Safety and Reliability Association**, v. 8(1), p. 1-11, 2017.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B. et al. (eds.)]. Cambridge & New York, 2014.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S.

PILECKA, E., *et al*: **Analysis of a Landslide on a Railway Track Using Laser Scanning and FEM Numerical Modelling. Applied Sciences**, v. 12, n. 15, p. 7574, 2022.

Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844, 2022.

MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z. R. J., LEWIS, J., GIDDEN, M. J., VOGEL, E., FREUND, M., BEYERLE, U., GESSNER, C., NAUELS, A., BAUER, N., CANADELL, J. G., DANIEL, J. S., JOHN, A., KRUMMEL, P. B., LUDERER, G., MEINSHAUSEN, N., MONTZKA, S. A., RAYNER, P. J., REIMANN, S., SMITH, S. J., van den

BERG, M., VELDERS, G. J. M., VOLLMER, M. K., & WANG, R. H. J.: **The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500**, Geosci. Model Dev., 13, 3571–3605, 2020. MInfra. **PNL - Plano Nacional de Logística. 2021**. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf

MInfra. **PNL - Plano Nacional de Logística. 2021**. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/politica-e-planejamento/politica-e-planejamento/RelatorioExecutivoPNL_2035final.pdf

MInfra - Ministério da Infraestrutura. Rodovias Federais - Informações Gerais - Sistema Federal de Viação (atualização: abril. 2021). Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/rodovias-federais/rodovias-federais-informacoes-gerais-sistema-federal-de-viacao. Acesso em: maio. 2021.

MNDAWE, M. B.; NDAMBUKI, J. M.; KUPOLATI, W. K.; BADEJO, A. A.; DUNBAR, R. 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, 2015.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation: Special Report 290. Washington, D.C.: **Transportation Research Board**, 2008.

NEMRY, F.; DEMIREL, H. **Impacts of climate change on transport: a focus on road and rail transport infrastructure**s. Luxembourg: Publications Office, 2012.

PALIN, E. J. *et al.*: **Implications of climate change for railway infrastructure**. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 12, n. 5, p. e728, 2021.

RATTANACHOT, W.; WANG, Y.; CHONG, D.; SUWANSAWAS, S. Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. **Transport Policy**, 41, 159–166, 2015.

SCHUSTER, R. L., HIGHLAND, L.: **Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the western hemisphere**. Denver (CO): US Department of the Interior, US Geological Survey, 2001.

de SHERBININ, A., BUKVIC, A., ROHAT, G., *et al.* **Climate vulnerability mapping: A systematic review and future prospects**. WIREs Climate Change, 2019.

SONG, Y.; WRIGHT, G.; WU, P.; THATCHER, D.; MCHUGH, T.; LI, Q.; WANG, X. Segment-Based Spatial Analysis for Assessing Road Infrastructure Performance Using Monitoring Observations and Remote Sensing Data. **Remote Sensing**, 10(11), 1696, 2018.

WILKS, Daniel S. Comparison of probabilistic statistical forecast and trend adjustment methods for North American seasonal temperatures. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 4, p. 935-949, 2014.

WORLD BANK. **Climate and Disaster Risk Screening - Sector Screening Guidance note Transportation sector [s. l.]**, 2017. Disponível em: https://climatescreeningtools.worldbank.org/sites/default/files/guidance_note/TRANSPORTATION_Guidance_Note.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

8. Referências da Base de Dados Cartográficos

[1] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2021. Base de dados da malha rodoviária federal do Sistema Nacional de Viação (SNV). Formato *shapefile*. Base cedida para uso do presente estudo. Acesso em 2021.

[2] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2020. Base de dados dos Limites das Unidades Federativas do Brasil. Formato *shapefile*. Acesso em abril de 2021. Link de acesso: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html?edicao=30138&t=acesso-ao-produto

[3] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018. Obras de Arte Especiais. Acesso pelo Visualizador de Informações Geográficas (VGEO) em outubro de 2021. Link de acesso: http://servicos.dnit.gov.br/vgeo/

[4] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2020. Volumetria Média Diária Anual. Planilha com dados de 2020 e georreferenciada pelo código SNV de cada trecho rodoviário. Acesso em 2021.

[5] Ministério da Infraestrutura (MINFRA), 2021. Base de dados da malha ferroviária nacional. Formato s*hapefile*. Base cedida para uso do presente estudo. Acesso em 2021.

[6] Empresa de Planejamento e Logística (EPL), 2021. Plano Nacional de Logística 2035. Base de dados em formato *shapefile*. Utilização do cenário base para 2017. Acesso em outubro de 2021. Link de acesso: https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl

[7] Agência Nacional de Águas (ANA), 2014. Atlas de Vulnerabilidade a Inundações. Base de dados em formato *shapefile*. Superintendência de Usos Múltiplos e Eventos Críticos (SUM). Acesso em Outubro de 2021.

[8] Embrapa Solos, 2020. Mapa de Erodibilidade dos Solos à Erosão Hídrica do Brasil. Base de dados em formato *shapefile*. Acesso em outubro de 2021.

[9] Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2010. Mapa de Declividade do Brasil. Base de dados em formato raster (tiff). Acesso em maio de 2021.

[10] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2018. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra. Base de dados em formato *shapefile*. Acesso em maio de 2021. Link de acesso: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=downloads

[11] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2019. Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil. Base de dados em formato *shapefile*. Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil. Acesso em maio de 2021.

[12] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018. Índice de Condição de Superfície. Acesso pelo Visualizador de Informações Geográficas (VGEO) em outubro de 2021. Link de acesso: http://servicos.dnit.gov.br/vgeo/