



# As Mudanças Climáticas no Setor de Saneamento

Como secas, tempestades e ondas de calor  
impactam o consumo de água?

**Instituto Trata Brasil**

VERSÃO 2.0  
Novembro/2024

<b>PROJETO</b>	<b>INSTB24A</b>
<b>ENTREGÁVEL</b>	Relatório de Riscos Climáticos no Setor de Saneamento
<b>AUTORES</b>	<b>WAYCARBON</b> Dener Ghenov; dener.ghenov@waycarbon.com Gregory Pitta; gregory.pitta@waycarbon.com Melina Amoni; melina.amoni@waycarbon.com Otávio Braga; otavio.braga@waycarbon.com
<b>COLABORADORES</b>	<b>INSTITUTO TRATA BRASIL</b> André Machado; andre.machado@tratabrasil.org.br Ivan Rocatelli; imprensa@tratabrasil.org.br Luana Pretto; luana.pretto@tratabrasil.org.br
	<b>GRUPO DE TRABALHO</b> Representantes de SABESP, SANASA, SANEPAR e AEGEA

## HISTÓRICO DO DOCUMENTO

Nome do documento	Data	Natureza da revisão
INSTB24A – Riscos_Climaticos_Saneamento_v1.0	04/11/2024	v1.0 – Primeira versão para comentários
INSTB24A – Riscos_Climaticos_Saneamento_v2.0	11/11/2024	V2.0 – Segunda versão para comentários
INSTB24A – Riscos_Climaticos_Saneamento_v3.0	14/11/2024	V3.0 – Terceira versão

# SUMÁRIO

1. Introdução.....	7
2. Escopo Técnico .....	8
3. Metodologia .....	8
3.1. Modelos Climáticos e Cenários do IPCC .....	10
3.1.1. Limitações e Incertezas .....	11
3.1.2. Seleção dos Modelos e Dados de Reanálise .....	12
3.1.3. Tratamento dos Modelos, Downscaling e Ensemble .....	14
3.1.4. Variáveis Climáticas .....	14
3.2. Exposição e Vulnerabilidade.....	18
3.2.1. Indicadores Seleccionados .....	18
3.3. Identificação de impactos .....	23
3.4. Modelagem do Risco Climático .....	24
4. Resultados e Discussão.....	25
4.1. Identificação de Impactos .....	25
4.1.1 Sistema de Água.....	25
4.1.2 Sistema de Esgoto .....	27
4.2. Modelagem do Risco Climático .....	28
4.2.1. Sistema de Abastecimento de Água.....	28
4.2.2. Sistema de Esgotamento Sanitário .....	45
5. Conclusões .....	57
6. Referências.....	59
ANEXO I – Normalização das variáveis do estudo.....	61
ANEXO II – Identificação de Riscos Climáticos com GT .....	66
ANEXO III – Análise das Variações Climáticas.....	69

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Modelos Climáticos selecionados para o estudo, referências e resolução .....	13
Tabela 2 – Descrição das ameaças climáticas do estudo.....	14
Tabela 3 – Variáveis climáticas utilizadas para representar os efeitos das ameaças climáticas ....	15
Tabela 4 – Indicadores selecionados para exposição e vulnerabilidade dos sistemas .....	18
Tabela 5 - Classificação da modelagem de risco climático.....	24
Tabela 6 – Identificação de impactos climáticos no sistema de Abastecimento de Água.....	25
Tabela 7 - Impactos consolidados sob o sistema de Esgotamento Sanitário.....	27
Tabela 8 – Resultado da modelagem do Risco Climático 1.....	29
Tabela 9 – Distribuição de resultados do Risco Climático 1 por UF.....	30
Tabela 10 - Resultado da modelagem do Risco Climático 2.....	31
Tabela 11 – Distribuição de resultados do Risco Climático 2 por UF .....	32
Tabela 12 – Resultado da modelagem do Risco Climático 3.....	33
Tabela 13 – Distribuição de resultados do Risco Climático 3 por UF.....	34
Tabela 14 – Resultado da modelagem do Risco Climático 4.....	35
Tabela 15 – Distribuição de resultados do Risco Climático 4 por UF.....	36
Tabela 16 – Resultado da modelagem do Risco Climático 5.....	37
Tabela 17 – Distribuição de resultados do Risco Climático 5 por UF.....	38
Tabela 18 – Resultado da modelagem do Risco Climático 6.....	39
Tabela 19 – Distribuição de resultados do Risco Climático 6 por UF.....	40
Tabela 20 – Resultado da modelagem do Risco Climático 7.....	41
Tabela 21 – Distribuição de resultados do Risco Climático 7 por UF.....	42
Tabela 22 – Resultado da modelagem do Risco Climático 8.....	43
Tabela 23 – Distribuição de resultados do Risco Climático 8 por UF.....	44
Tabela 24 - Resultado da modelagem do Risco Climático 9.....	45
Tabela 25 – Distribuição de resultados do Risco Climático 9 por UF.....	46
Tabela 26 - Resultado da modelagem do Risco Climático 10.....	47

Tabela 27 – Distribuição de resultados do Risco Climático 10 por UF .....	48
Tabela 28 - Resultado da modelagem do Risco Climático 11 .....	49
Tabela 29 – Distribuição de resultados do Risco Climático 11 por UF .....	50
Tabela 30 - Resultado da modelagem do Risco Climático 12.....	51
Tabela 31 – Distribuição de resultados do Risco Climático 12 por UF .....	52
Tabela 32 - Resultado da modelagem do Risco Climático 13.....	53
Tabela 33 – Distribuição de resultados do Risco Climático 13 por UF .....	54
Tabela 34 - Resultado da modelagem do Risco Climático 14.....	55
Tabela 35 – Distribuição de resultados do Risco Climático 14 por UF .....	56
Tabela 36 - Classificação Intervalos Índice de Atendimento de Abastecimento de Água .....	61
Tabela 37 – Classificação ISHU .....	61
Tabela 38 - Classificação da quantidade de ETAs.....	61
Tabela 39 - Classificação do manancial de abastecimento para afloramento de cianobactérias ...	62
Tabela 40 - Classificação do manancial de abastecimento para outros impactos.....	62
Tabela 41 - Classificação da densidade demográfica.....	62
Tabela 42 - Classificação de carga de esgoto lançada.....	63
Tabela 43 - Classificação de carga de esgoto gerada .....	63
Tabela 44 - Classificação do balanço qualitativo da ANA .....	63
Tabela 45 - Classificação do balanço quantitativo da ANA .....	64
Tabela 46 - Classificação do índice de coleta de esgoto .....	64
Tabela 47 - Classificação da população .....	64
Tabela 48 - Classificação da quantidade de estações de tratamento de efluentes .....	65
Tabela 49 - Classificação do índice de atendimento por solução individual.....	65
Tabela 50 – Resultado de discussão com o GT no levantamento de riscos climáticos - Água .....	66
Tabela 51 – Resultado de discussão com o GT no levantamento de riscos climáticos - Esgoto....	68

## Índice de Figuras

Figura 1 - Escopo da avaliação de riscos climáticos no setor de saneamento .....	8
Figura 2 - Ilustração dos principais conceitos associados a riscos climáticos (AR6 IPCC).....	9
Figura 3 – Cenários Climáticos SSPs do IPCC .....	10
Figura 4 - Ensemble do CMIP6 - precipitação - 2041 a 2060 - Cenário SSP5-8.5.....	12
Figura 5 – Rx1day e Rx5day - Precipitação máxima em um dia e em cinco dias no horizonte de 2050 e cenário SSP3-7.0 .....	15
Figura 6 – HW.N e EVAP - Número de ondas de calor e evapotranspiração no horizonte de 2050 e cenário SSP3-7.0.....	16
Figura 7 – CDD - Dias consecutivos sem chuva no horizonte de 2050 e cenário SSP3-7.0.....	17
Figura 8 - Representação gráfica variáveis suporte .....	20
Figura 9 - Principais ameaças climáticas para o setor de saneamento por região do Brasil .....	57
Figura 10 - Variação de RX1day entre o período histórico e 2050 .....	69
Figura 11 - Variação de RX5dayentre o período histórico e 2050.....	70
Figura 12 - Variação de HW.N entre o período histórico e 2050.....	72
Figura 13 - Variação de CDD entre o período histórico e 2050 .....	73

## 1. Introdução

As mudanças climáticas representam uma crescente ameaça para o setor de saneamento no Brasil, intensificando desafios já existentes e criando riscos para a operação de sistemas de água e esgoto. Fenômenos climáticos como ondas de calor, tempestades intensas e períodos prolongados de seca têm impactos diretos na capacidade das empresas de saneamento de garantir o fornecimento adequado de água potável e a correta gestão de efluentes, e consequentemente, impactam na qualidade de vida da população e na segurança hídrica das comunidades.



Os efeitos podem ser observados nas ondas de calor que exacerbam a demanda por água, pressionando sistemas que já operam no limite de sua capacidade. Em paralelo, secas severas afetam o abastecimento de mananciais, reduzindo a disponibilidade de água e levando à necessidade de racionamento, ou ao uso de fontes alternativas, muitas vezes de menor qualidade. As secas afetam diretamente a população, pois a falta de água limita o acesso aos serviços de saneamento básico e aumenta o risco de transmissão de doenças.

Ainda, as tempestades e chuvas intensas sobrecarregam os sistemas de drenagem e tratamento de esgoto, provocando alagamentos, rompimento de tubulações e contaminação de fontes de água potável. Estes eventos podem levar a inundações e contaminação de áreas residenciais, expondo certas áreas a efluentes não tratados e riscos sanitários.

Essas variações climáticas não apenas afetam a infraestrutura física das companhias de abastecimento, mas também evidenciam a necessidade de planejamento estratégico baseado em cenários climáticos futuros. Para a população, estes riscos climáticos intensificam a desigualdade no acesso a serviços de saneamento básico de qualidade, especialmente em áreas urbanas periféricas e rurais, já que enfrentam dificuldades de infraestrutura. Este contexto reforça a necessidade de políticas de adaptação que assegurem o acesso à água e saneamento em cenários climáticos extremos, promovendo a resiliência das comunidades mais afetadas.

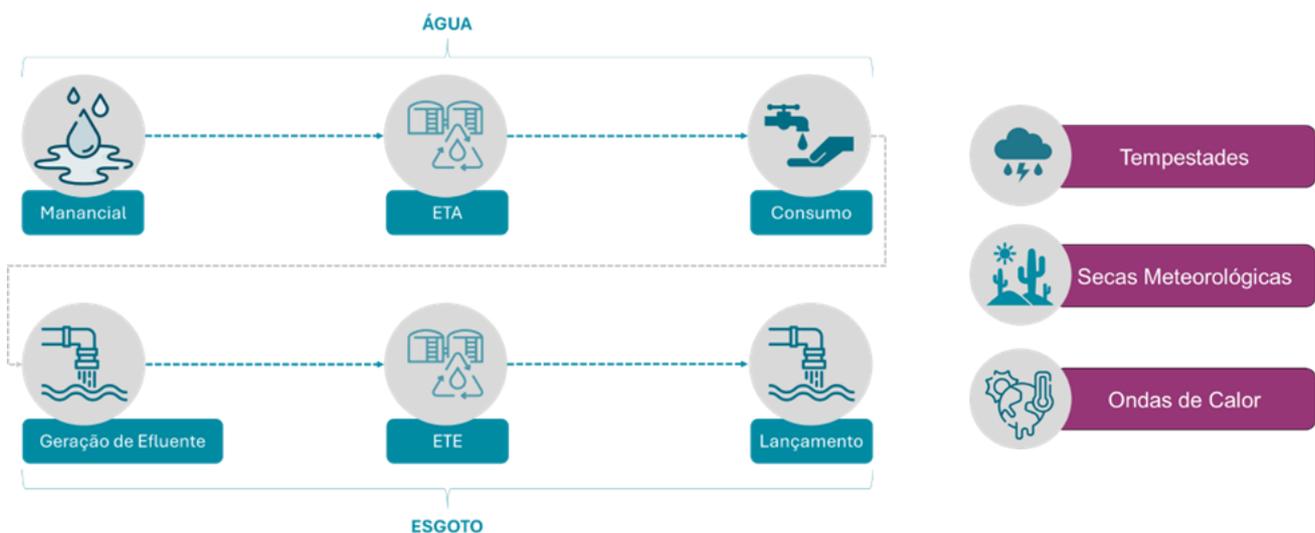
As tendências de agravamento dos eventos climáticos e seus impactos no setor de saneamento no Brasil podem ser avaliados através dos cenários desenvolvidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Estes cenários projetam diferentes trajetórias de aquecimento global e variações climáticas que, no longo prazo, podem intensificar eventos extremos, como as secas severas e as tempestades mais frequentes.

## 2. Escopo Técnico

A avaliação de riscos climáticos para o setor de saneamento no Brasil contempla os sistemas de água e esgoto, cada um definido a partir de três etapas principais. O sistema de água é composto pelos mananciais, as ETA's (Estações de Tratamento de Água) e os pontos de consumo. O sistema de esgoto é composto pelos pontos de geração de efluente, as ETE's (Estações de Tratamento de Esgoto) e pelo lançamento final de efluente tratado ou não tratado no meio ambiente. As ameaças climáticas avaliadas através dos cenários futuros consideram os efeitos de tempestades, secas meteorológicas e ondas de calor.

A figura 1 apresenta um resumo do escopo da avaliação de riscos climáticos para o setor de saneamento no Brasil.

Figura 1 - Escopo da avaliação de riscos climáticos no setor de saneamento

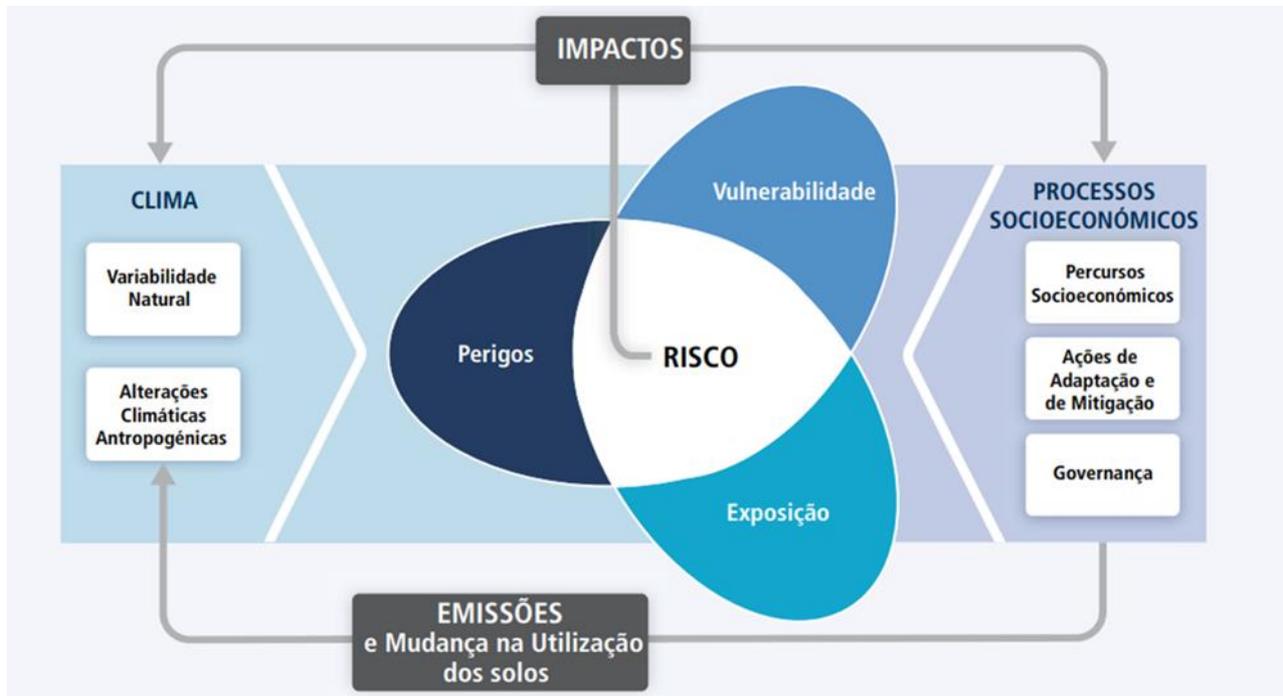


## 3. Metodologia

O risco de impactos relacionados ao clima resulta da interação das ameaças climáticas (ou perigo), como ondas de calor e secas meteorológicas com a vulnerabilidade e exposição dos sistemas humanos e naturais.

O projeto baseia-se nos principais conceitos associados a riscos climáticos, de acordo com o IPCC, ilustrado na figura 2. As alterações tanto no sistema climático (esquerda) como nos processos socioeconômicos, incluindo adaptação e mitigação (direita), são impulsores das ameaças climáticas, da exposição e vulnerabilidade (IPCC).

Figura 2 - Ilustração dos principais conceitos associados a riscos climáticos (AR6 IPCC).



Os conceitos envolvidos são apresentados a seguir:

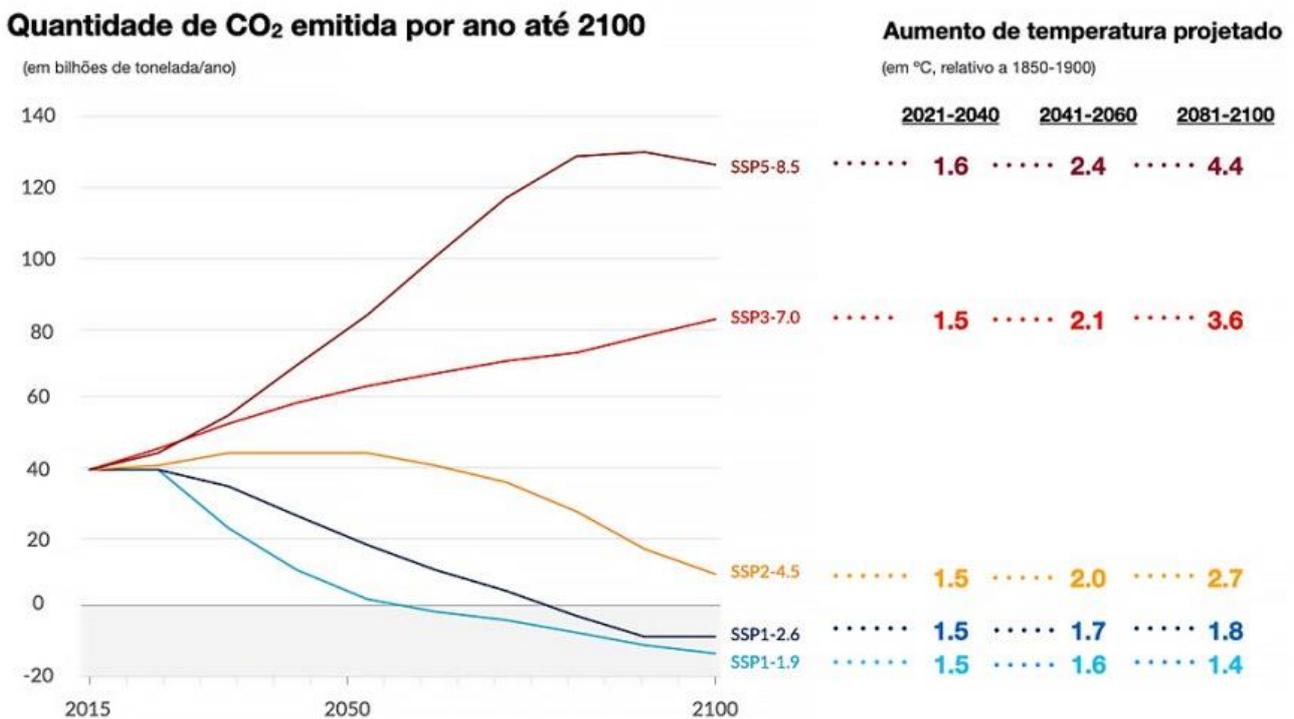
- **Ameaça Climática/Perigo:** A potencial tendência de ocorrência ou efetiva concretização de um evento natural que possa causar danos ou impactos sobre a saúde, as infraestruturas, a provisão de serviços públicos e privados, ecossistemas e recursos naturais. No contexto do estudo, refere-se às tendências futuras de ocorrências de impactos associados às mudanças climáticas e que podem impactar os serviços de saneamento e a população.
- **Exposição:** A presença de pessoas, ecossistemas, funções ambientais, infraestruturas do setor de saneamento que poderiam ser afetados adversamente. Os indicadores usados para representar a exposição são baseados no sistema principal em análise, que nesse caso é o setor de saneamento. Neste sentido, foram consideradas informações como as Estações de Tratamento de Água (ETA) e de Esgoto (ETE) e pontos de lançamento de efluentes.
- **Vulnerabilidade:** Propensão ou pré-disposição a ser adversamente afetado pelos impactos das mudanças do clima. Vulnerabilidade engloba uma variedade de conceitos e elementos, incluindo a sensibilidade ou susceptibilidade a danos e a falta de capacidade de resposta ou de adaptação. A sensibilidade corresponde ao nível em que o sistema avaliado é afetado pelos impactos da mudança do clima. Por exemplo, regiões que possuem um balanço hídrico qualitativo são mais sensíveis e estariam mais vulneráveis aos efeitos das secas.

### 3.1. Modelos Climáticos e Cenários do IPCC

Os modelos climáticos são ferramentas essenciais para projetar as mudanças climáticas e seus potenciais impactos. Esses modelos consideram uma ampla gama de fatores, incluindo a circulação atmosférica e oceânica, a cobertura de gelo e o ciclo do carbono (EYRING et al., 2019) entre muitos outros específicos de cada modelo climático. Os esforços para compreender e representar o clima estão centralizados no CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*) (STOTT; FOREST, 2007). O CMIP é um projeto do Programa Mundial de Pesquisa Climática (WCRP) que utiliza diferentes modelos globais para analisar mudanças climáticas, e atualmente, está em sua sexta fase (CMIP6).

O CMIP 6 é utilizado como referência para os cenários climáticos apresentados do Relatório de Avaliação 6 do IPCC (AR6), o qual introduz os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (*Shared Socioeconomic Pathways – SSPs*). A figura 3 apresenta os cenários SSPs disponibilizados pelo IPCC, que relacionam as emissões de GEE com o respectivo aumento de temperatura.

Figura 3 – Cenários Climáticos SSPs do IPCC



Estes cenários consideram tanto as trajetórias de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) quanto variações em fatores socioeconômicos, criando projeções com diferentes intensidades de aquecimento até o final do século XXI.

Para o estudo de riscos climáticos no setor de saneamento, foi selecionado o cenário SSP3-7.0, devido a sua proximidade com as tendências observadas atualmente nas emissões globais de GEE. Este cenário representa uma trajetória intermediária-alta, em que as emissões aumentam consideravelmente até o fim do século, refletindo uma falta de coordenação global para mitigação e uma dependência elevada de combustíveis fósseis, acarretando um aquecimento global entre 3°C e 4°C. Esta trajetória de emissões, observada em diversos países com políticas climáticas ainda consideradas ineficientes, torna o cenário escolhido adequado para modelar os riscos climáticos físicos no setor de saneamento

Em relação aos horizontes de análise, define-se o período de referência (1895-1994), que tem o propósito de entender as condições históricas consideradas normais na região e, a partir desse comportamento climático, descrever como se comporta o cenário histórico recente (1995-2014), já com os efeitos da mudança do clima, e as projeções climáticas para o período de 2030 (2021-2040) e 2050 (2041-2060).

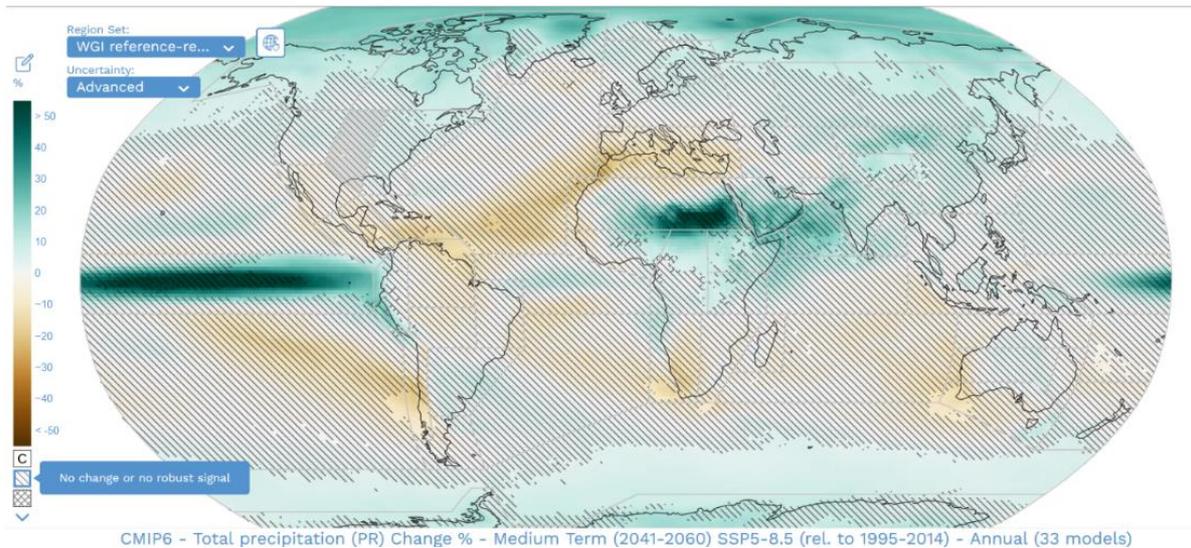
### 3.1.1. Limitações e Incertezas

Embora os modelos climáticos do CMIP tenham avançado significativamente, ainda existem incertezas inerentes nas projeções, especialmente em nível regional. A precisão das projeções é limitada pela complexidade dos processos atmosféricos e pela resolução espacial dos modelos, o que dificulta a representação detalhada de fenômenos locais e regionais.

A divergência entre modelos é tradicionalmente considerada na análise dos resultados, enfatizando a incerteza das projeções e a importância de utilizar conjuntos de modelos (ensembles) em vez de uma única projeção para apoiar decisões políticas e econômicas (STAINFORTH et al., 2007). Os membros de um ensemble são, em geral, diferentes modelos que compartilham parâmetros de entrada semelhantes. A comparação dos resultados permite entender a gama de possibilidades e incertezas de um modelo ou conjunto de suposições específico.

As projeções climáticas são então apresentadas sob a forma de ensembles, que consistem em várias simulações do sistema climático da Terra. Por exemplo, a figura 4 ilustra as áreas de incerteza, destacadas em hachuras, a partir do ensemble médio de 33 modelos do CMIP6 para a precipitação entre 2041 e 2060, tendo como referência o período de 1995 a 2014 e considerando o cenário pessimista do IPCC (SSP5-8.5).

Figura 4 - Representação do Ensemble do CMIP6 para a precipitação no período de 2041 a 2060, no cenário SSP5-8.5.



Fonte: IPCC-WGI Interactive Atlas: Regional information, 2021.

Destaca-se que, para grande parte da região de análise do estudo, no Brasil, não há concordância entre todos os modelos. Por isso, técnicas para selecionar modelos que melhor representem o clima em uma região específica ou para projeções mais concisas são essenciais para fundamentar as decisões. Discussões nesse sentido são recorrentes na literatura (HERGER et al., 2018; STOTT; FOREST, 2007) e enfatizam a construção de ensembles em estudos regionais.

### 3.1.2. Seleção dos Modelos e Dados de Reanálise

No processo de construção do ensemble, o objetivo principal é reduzir a incerteza associada às premissas de cada modelo e auxiliar a gestão de riscos, fornecendo base teórica para nortear a tomada de decisão do poder público e/ou privado, seja na formulação de políticas amplas ou no direcionamento de investimentos privados. Para isso, é essencial utilizar as melhores informações disponíveis de forma ponderada e assertiva, equilibrando custos de processamento e a necessidade de minimização de riscos de exposição a eventos climáticos.

O produto da construção de um ensemble assertivo não é um fim em si, mas uma etapa intermediária no processo de avaliação de projeções climáticas. Nesse contexto, foram utilizados resultados diretos do conjunto de dados do CMIP6 (STOTT; FOREST, 2007), compilado e disponibilizado pelo ESGF (Earth System Grid Federation). O conjunto completo de dados e variáveis climáticas é extenso (acima de 30 terabytes (THRASHER et al., 2022)), e, por isso, foi necessária uma pré-seleção de modelos a serem avaliados. Os modelos considerados no presente estudo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos Climáticos selecionados para o estudo, referências e resolução

Modelos e referências	Centro de Pesquisa	Resolução (LAT x LON)
<b>ACCESS-ESM1-5</b> (ZIEHN et al., 2020)	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Austrália)	1.25° x 1.25°
<b>GFDL-ESM4</b> (DUNNE et al., 2020)	National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)	1.11° x 1.11°
<b>IPSL-CM6A-LR</b> (BOUCHER et al., 2020)	Institut Pierre Simon Laplace (França)	1.3° x 2.5°
<b>MIROC6</b> (TATEBE et al., 2019)	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Japão)	1.4° x 1.4°
<b>MRI-ESM2-0</b> (YUKIMOTO et al., 2019)	Meteorological Research Institute (Japão)	1.1° x 1.1°
<b>NorESM2-MM</b> (SELAND et al., 2020)	Bjerknes Centre for Climate Research (Noruega)	1.1° x 1.1°

Fonte: Adaptado de MORADIAN; AKBARI; IGLESIAS, 2022

Outra ferramenta útil para validação e calibração das análises de projeções são os modelos de reanálise, como o CHIRPS (Climate Hazards group InfraRed Precipitation with Station data) e o ERA5 do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF). Estes modelos integram dados históricos com as simulações climáticas, complementando os dados dos modelos climáticos e auxiliando na calibração das projeções consideradas neste estudo.

O CHIRPS compõe um conjunto de dados de precipitação que combina medições baseadas em satélite com dados de estações *in situ* para fornecer um registro de longo prazo de precipitação em regiões ao redor do mundo onde os dados coletados localmente são escassos. Este conjunto de dados é produzido pelo Climate Hazards Group da Universidade da Califórnia em Santa Bárbara e é considerado uma das melhores representações da realidade observada em relação à precipitação (PAREDES-TREJO; BARBOSA; KUMAR, 2017).

O ERA5, produzido pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo, fornece dados climáticos de alta resolução, combinando observações de satélite com modelagem numérica para

oferecer um registro detalhado de variáveis meteorológicas, como a precipitação, temperatura, vento e pressão atmosférica. Este conjunto de dados cobre o período de 1950 até o presente e é amplamente utilizado na pesquisa climática e meteorológica devido à sua abrangência e precisão. O ERA5 é considerado uma das melhores fontes de dados para o estudo do clima e fenômenos atmosféricos, sendo frequentemente utilizado para validar modelos climáticos e estudar eventos extremos (HERSBACH et al., 2020).

### 3.1.3. Tratamento dos Modelos, Downscaling e Ensemble

Com base no conjunto de modelos disponíveis, torna-se necessário avaliar a performance desses modelos de projeção em relação à realidade observada nos modelos de reanálise (MCAVANEY et al., 2001) com o objetivo de combinar informações daqueles mais bem ajustados e refinar a resolução dos modelos climáticos a partir dos dados de reanálise (downscaling) (BRANDS et al., 2011).

Inicialmente, todos os modelos foram reprojatados, utilizando o modelo de extrapolação bilinear (HOSSAIN et al., 2021), para uma grade de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (Latitude x longitude). Nesse processo, não há ganho de representatividade ou redução de erro, somente um retorno a resolução original do modelo de reanálise de dados (PAREDES-TREJO; BARBOSA; KUMAR, 2017), o qual foi utilizado como referência para avaliar os modelos listados na tabela 3 e construir o ensemble.

### 3.1.4. Variáveis Climáticas

No presente estudo, foram analisadas três ameaças climáticas que estão relacionados aos riscos materiais para o setor de saneamento, e são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição das ameaças climáticas do estudo

Ameaça Climática	Descrição
<b>Tempestade</b>	Fenômeno meteorológico caracterizado por condições atmosféricas intensas, como ventos fortes, chuvas intensas, e, em alguns casos, granizo. Podem variar em intensidade e duração, desde tempestades locais de curta duração até ciclones tropicais de grande escala e são influenciadas por diversos fatores climáticos (IPCC, 2021).
<b>Onda de Calor</b>	Definida como um período prolongado de calor extremo e anormal, geralmente durando de vários dias a semanas. (IPCC, 2021).
<b>Seca Meteorológica</b>	Definida como períodos prolongados de precipitação insuficiente, levando a um déficit hídrico significativo a depender da intensidade e duração (IPCC, 2021).

Para avaliar a incidência de tempestades foram consideradas duas variáveis climáticas: precipitação máxima em um dia e precipitação máxima em cinco dias consecutivos. Para avaliar a incidência de ondas de calor, também foram consideradas duas variáveis climáticas: número de ondas de calor e evapotranspiração. E, para avaliar a incidência das secas meteorológicas, foi considerada a variável climática de dias consecutivos sem chuva. A Tabela 3 apresenta os indicadores climáticos avaliados para representar cada ameaça climática no estudo de riscos climáticos para o setor de saneamento.

Tabela 3 – Variáveis climáticas utilizadas para representar os efeitos das ameaças climáticas

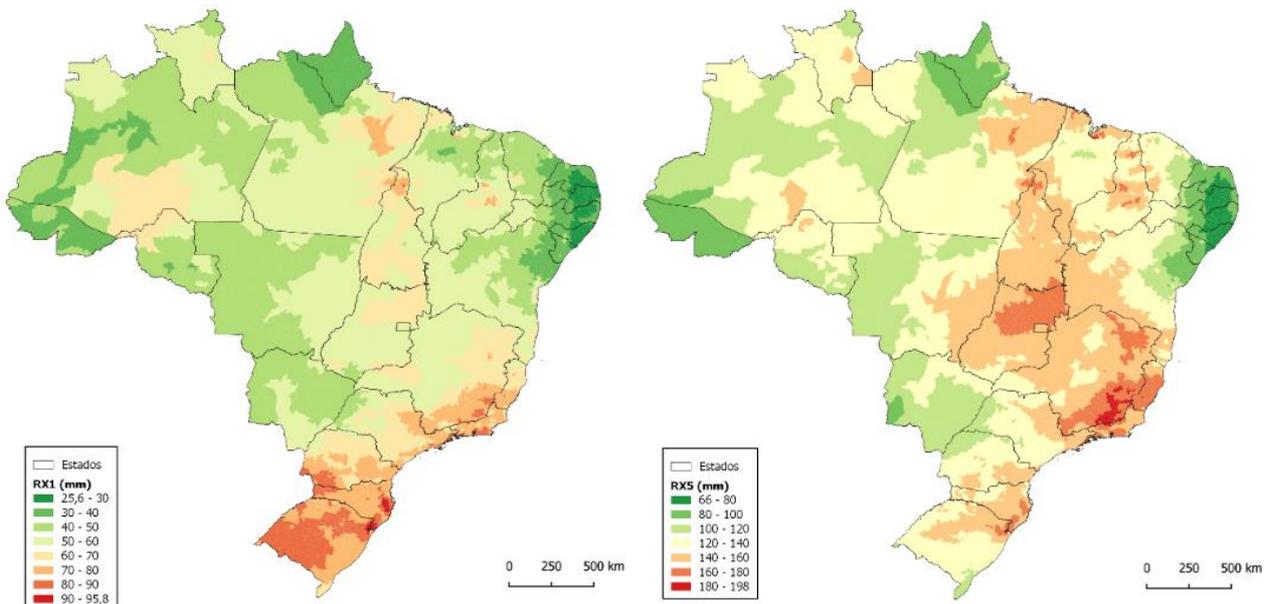
Ameaça Climática	Indicador Climático Avaliado	Referência
Ondas de Calor	<b>HW.N</b> = Número de ondas de calor registradas no ano	AR6 - IPCC (2021)
	<b>EVAP</b> = Evaporação potencial máxima no ano	
Secas Meteorológicas	<b>CDD</b> = Sequência máxima de dias secos	
Tempestades	<b>Rx1day</b> = Máximo de precipitação em um dia	
	<b>Rx5day</b> = Máximo de precipitação acumulada em 5 dias consecutivos	

Fonte: WayCarbon

A seguir, as figuras de 5 a 7 apresentam a espacialização de cada variável climática analisada no horizonte de 2050 e cenário SSP3-7.0.

### 3.1.4.1. Tempestades

Figura 5 – Rx1day e Rx5day - Precipitação máxima em um dia e em cinco dias no horizonte de 2050 e cenário SSP3-7.0

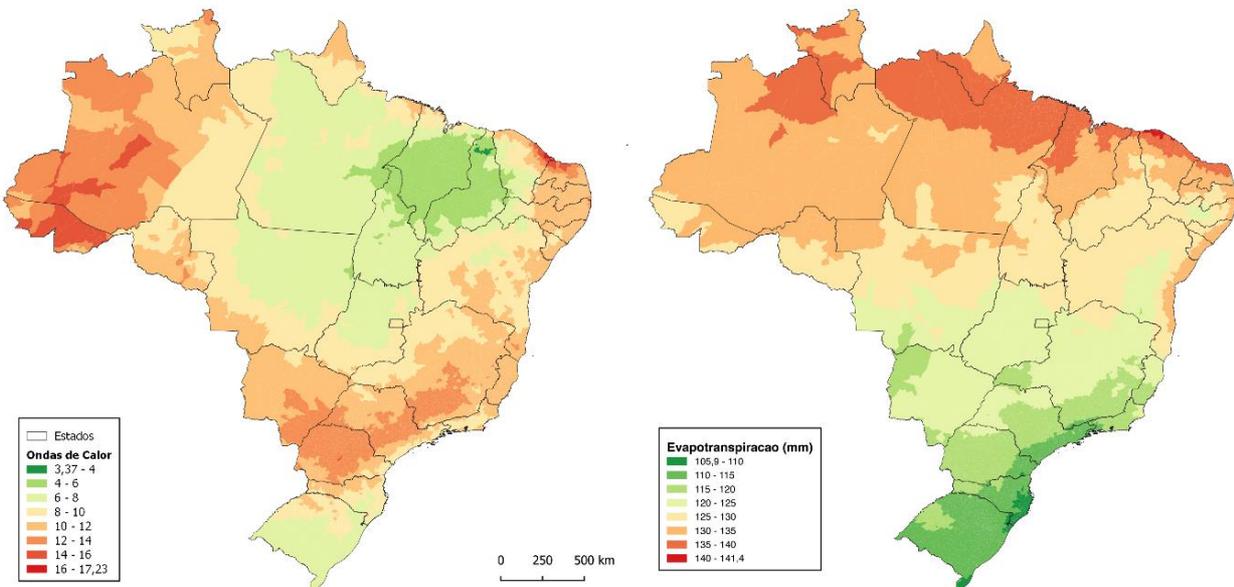


**Elaboração: WayCarbon a partir de modelos climáticos do CMIP6**

Os resultados destacam áreas do Brasil com maior probabilidade de agravamento, em termos de frequência e intensidade, de eventos de precipitação intensa. A variável RX1day, que projeta a precipitação máxima em um único dia, apresenta valores mais altos no Sul, especialmente no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e oeste do Paraná. No Sudeste, os maiores valores de RX1day ocorrem principalmente no litoral de São Paulo, Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo. A variável RX5day, que considera o acumulado de chuva em cinco dias consecutivos, mostra padrões de precipitação prolongada especialmente na região Sudeste, com maiores valores no sul de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro. Em contraste, o Nordeste do Brasil apresenta os menores para ambas as variáveis, refletindo o clima mais seco da região.

**3.1.4.2. Ondas de calor**

Figura 6 – HW.N e EVAP - Número de ondas de calor e evapotranspiração no horizonte de 2050 e cenário SSP3-7.0

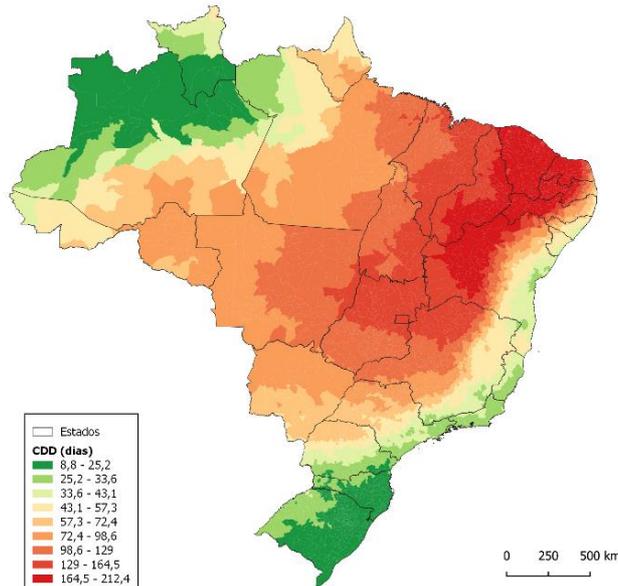
**Elaboração: WayCarbon a partir de modelos climáticos do CMIP6**

Os resultados revelam padrões de temperatura e umidade que refletem as características climáticas distintas do Brasil. O número de ondas de calor (HW.N) apresenta os maiores valores projetados para o Acre, oeste do Amazonas e parte do Nordeste, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Estas regiões, além de já estarem sujeitas a altas temperaturas, também devem ter aumento na quantidade de ocorrências de ondas de calor. Outras regiões como o sul de Mato Grosso do Sul, Paraná, e certas regiões de São Paulo e Minas Gerais apresentam valores intermediários a altos, indicando alta frequência de ocorrência das ondas de calor.

A variável EVAP, que reflete a evapotranspiração, apresenta os maiores valores na região Norte, especialmente nos estados do Amazonas e Roraima, norte do Pará e sul do Amapá. No Nordeste, o fenômeno é mais acentuado nos estados de Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte.

### 3.1.4.3. Secas Meteorológicas

Figura 7 – CDD - Dias consecutivos sem chuva no horizonte de 2050 e cenário SSP3-7.0



Elaboração: WayCarbon a partir de modelos climáticos do CMIP6

Os resultados da variável CDD refletem características climáticas do Brasil, com destaque para o sertão e o agreste nordestino, onde os maiores valores projetados são identificados, especialmente nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Bahia. Regiões de Tocantins, Goiás e Minas Gerais também apresentam valores elevados. O efeito é reduzido na região da Zona da Mata, próxima ao litoral, devido à influência da umidade oceânica.

## 3.2. Exposição e Vulnerabilidade

Para avaliar os riscos climáticos, também se considera a análise de indicadores que descrevem a exposição e a vulnerabilidade das regiões afetadas e sistemas envolvidos. Estes indicadores são utilizados para compreender o grau de susceptibilidade dos municípios aos eventos climáticos extremos e a capacidade de adaptação da infraestrutura de saneamento.



Por exemplo, em relação a exposição, pode-se considerar fatores como a densidade demográfica, pois locais com alta densidade populacional têm maior quantidade de pessoas dependentes de serviços de saneamento, e portanto, mais expostos à interrupções ou falhas do sistema devido à eventos climáticos. Ainda, a quantidade e distribuição das ETAs e ETEs nos municípios permitem identificar aquelas mais expostas aos eventos de secas e tempestades.

A vulnerabilidade, por sua vez, abrange fatores que influenciam a sensibilidade dos sistemas avaliados. O balanço hídrico, tanto quantitativo quanto qualitativo, é um fator importante, pois permite avaliar a quantidade e qualidade dos recursos hídricos disponíveis, especialmente em contextos de estresse hídrico, como em eventos de secas prolongadas ou devido as contaminações por chuvas intensas.

Ainda, o índice de abastecimento de água apresenta a cobertura do acesso à água potável nas diferentes regiões do país, enquanto o índice de coleta e tratamento de esgoto reflete a vulnerabilidade ambiental das regiões. Municípios com baixos índices de coleta de esgoto, por exemplo, podem enfrentar maiores riscos de contaminação hídrica durante eventos de tempestades, aumentando os desafios sanitários em áreas mais sensíveis.

### 3.2.1. Indicadores Selecionados

A lista de indicadores utilizados para representar os parâmetros de exposição e vulnerabilidade dos sistemas de saneamento na modelagem de risco climático são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Indicadores selecionados para representar exposição e vulnerabilidade dos sistemas de saneamento

Variável	Descrição	Referência
Densidade demográfica	Número de habitantes por unidade de área (hab./km <sup>2</sup> )	IBGE (2022)

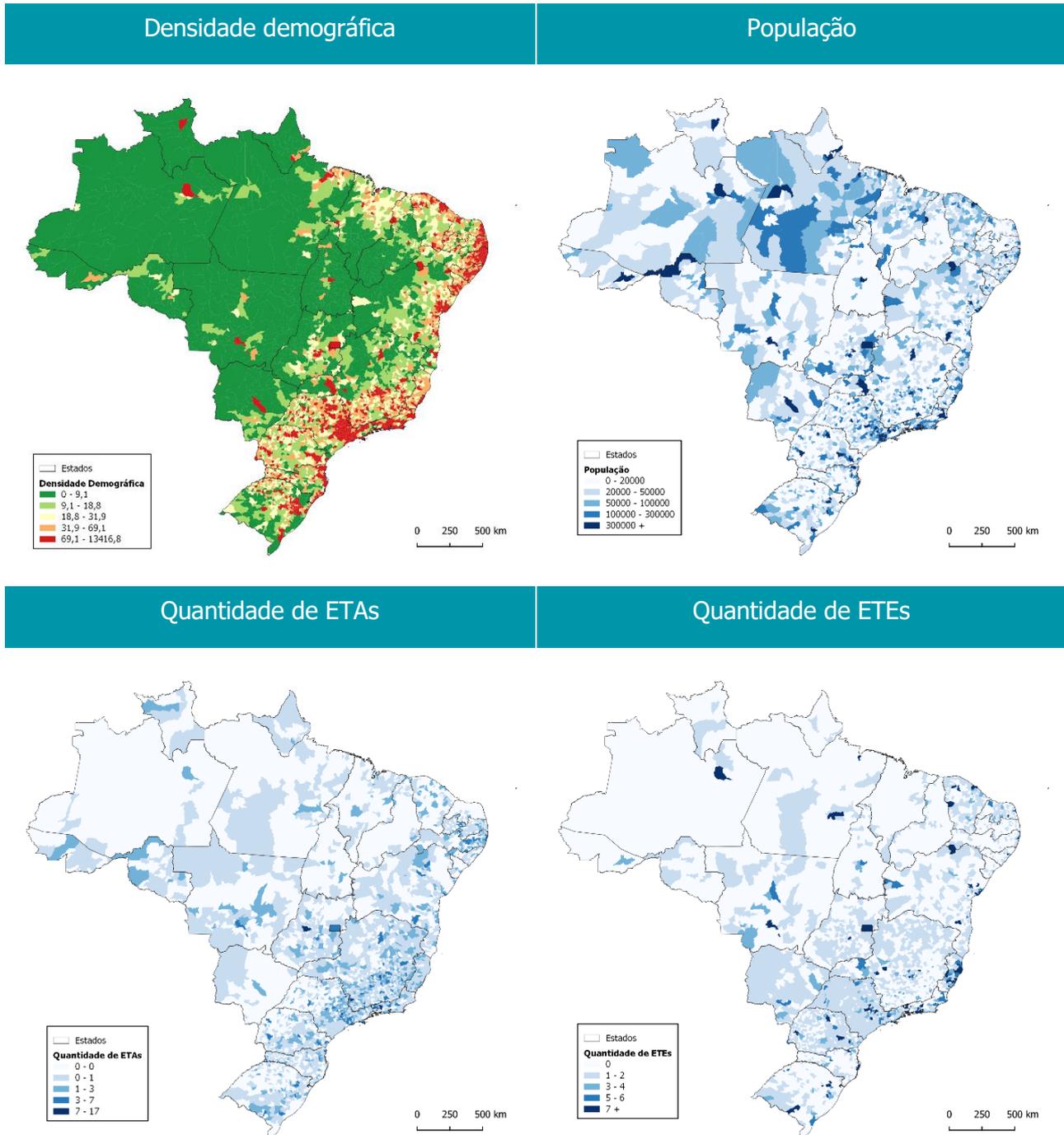
População	Número absoluto de habitantes (hab.)	IBGE (2022)
Quantidade de ETAs	Quantidade de ETAs (Estações de Tratamento de Água) com tratamento convencional que abastecem o município	Atlas Águas (2021)
Quantidade de ETEs	Quantidade de ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto) que tratam o esgoto dos municípios	Atlas Esgotos (2020)
Balanço Hídrico Qualitativo	Estima a capacidade atual de autodepuração dos rios, considerando a vazão e a carga recebida. A escala de valores corresponde à seguinte relação: 0-0,5 (ótima), 0,5-1,0 (boa), 1,0-5,0 (razoável), 5,0-20,0 (ruim) e >20 (péssima).	ANA (2016)
Balanço Hídrico Quantitativo	Estima o comprometimento de vazão do rio considerando os diversos usos. Classifica o nível de comprometimento hídrico dos trechos em: baixo (abaixo de 5%), mediano (5% a 30%), alto (30% a 70%), muito alto (70% a 100%), crítico (acima de 100%) e intermitente (oferta nula).	ANA (2016)
Índice de coleta de esgoto	Percentual da população abastecida com coleta de esgoto (%)	Atlas Esgotos (2013)
Índice de abastecimento de água	Percentual da população abastecida com água tratada (%)	Atlas Águas (2021)
Tipo de manancial de abastecimento	Tipo de manancial que abastece o município (subterrâneo, superficial ou misto)	Atlas Águas (2021)
Carga de esgoto gerada	Carga de esgoto gerada no município (kg DBO/dia)	Atlas Esgotos (2013)
Carga de esgoto destinada a ETE	Carga de esgoto direcionada para ETE (kg DBO/dia)	Atlas Esgotos (2013)
Carga de esgoto lançada	Carga de esgoto lançada no município (kg DBO/dia)	Atlas Esgotos (2013)
Índice de atendimento por solução individual	Percentual da população abastecida por soluções individuais de tratamento de esgoto (%)	Atlas Esgotos (2013)
Índice de Segurança Hídrica Urbana	O Índice de Segurança Hídrica Urbano (ISH-U) é calculado a partir da eficiência da produção de água e da eficiência da distribuição de água (mínimo, baixo, médio, alto, máximo)	ANA (2021)

Elaboração: WayCarbon

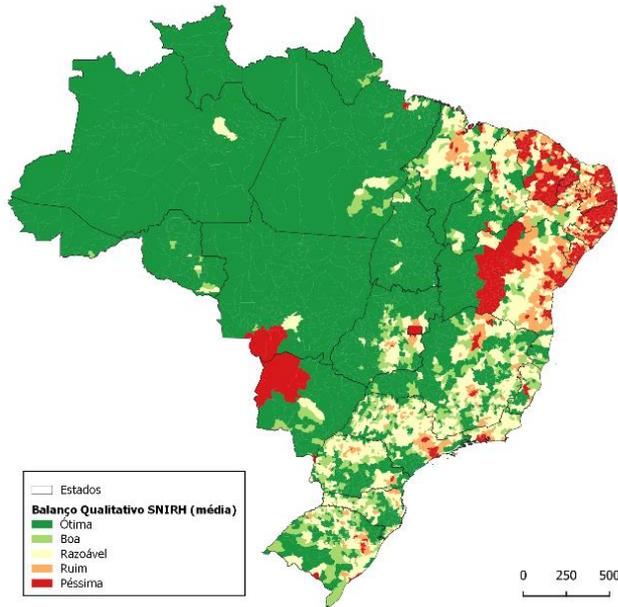
Alguns indicadores são disponibilizados a nível municipal, como a densidade demográfica e quantidade de ETAs e ETES, e outros, como o balanço hídrico quantitativo e qualitativo, são disponibilizados em nível de bacias hidrográficas, o que exige uma adaptação para uso. Para garantir a consistência e aplicabilidade dos indicadores selecionados, toda a base de dados foi devidamente tratada e consolidada nível municipal.

A Figura 8 apresenta os mapas com a espacialização de cada indicador da Tabela 4.

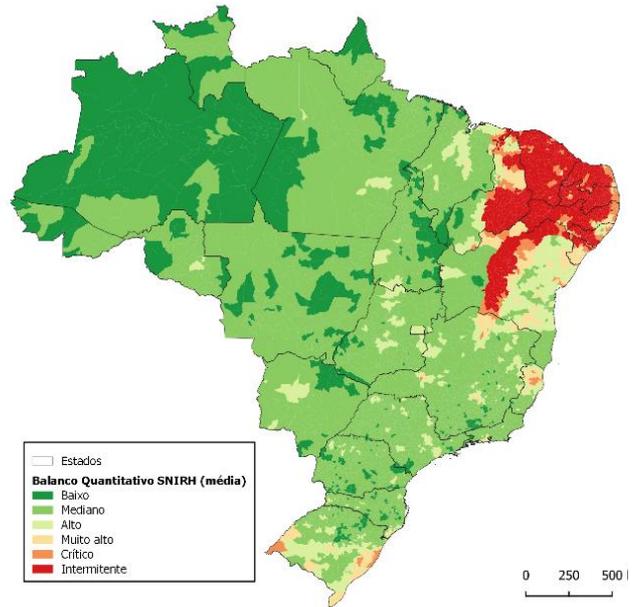
Figura 8 - Representação gráfica variáveis suporte



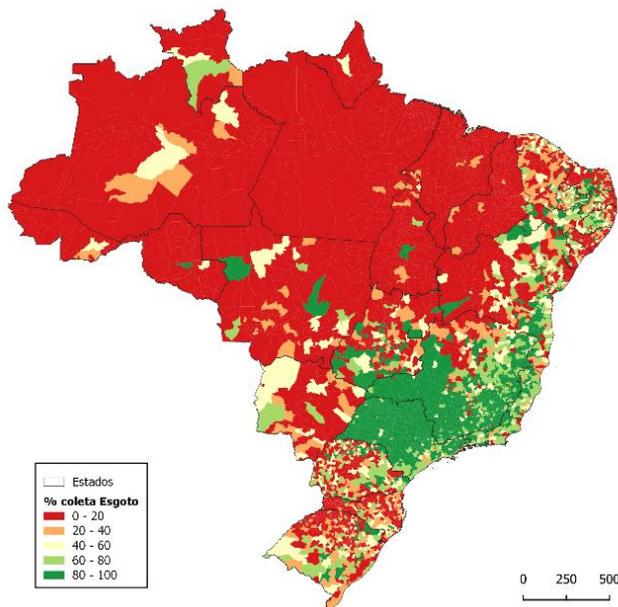
Balanco Qualitativo ANA



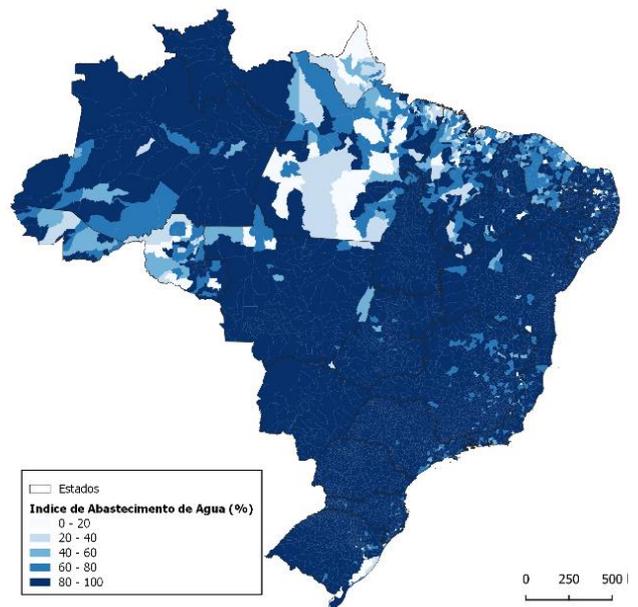
Balanco Quantitativo ANA



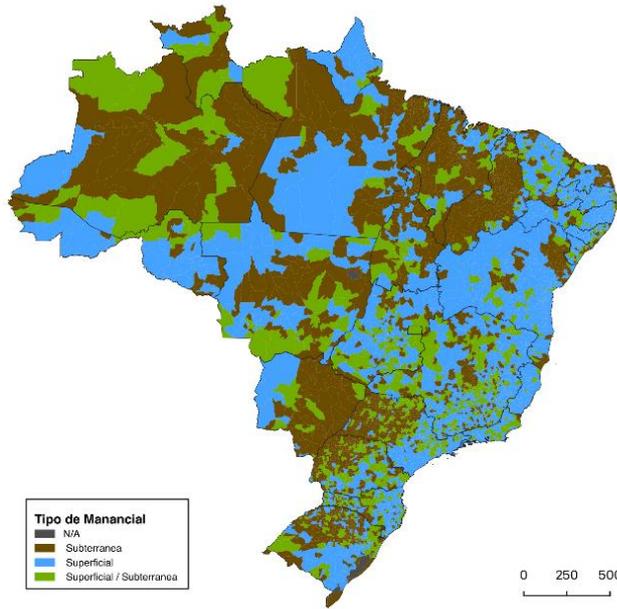
Índice de coleta de esgoto



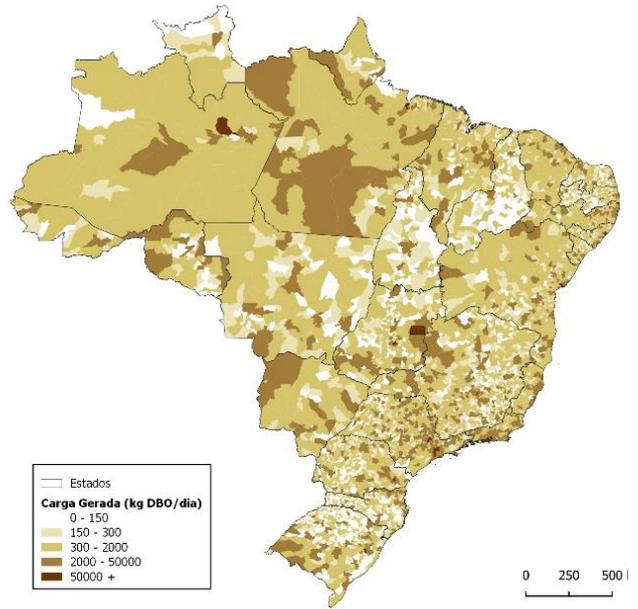
Índice de abastecimento de água



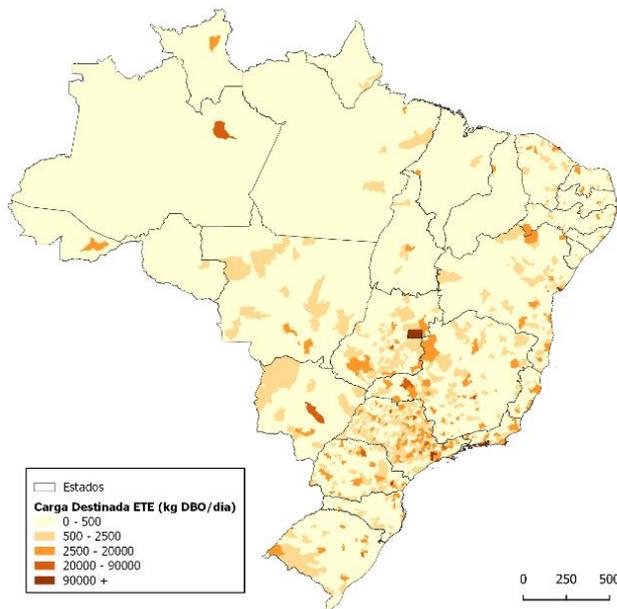
Tipo de manancial de abastecimento



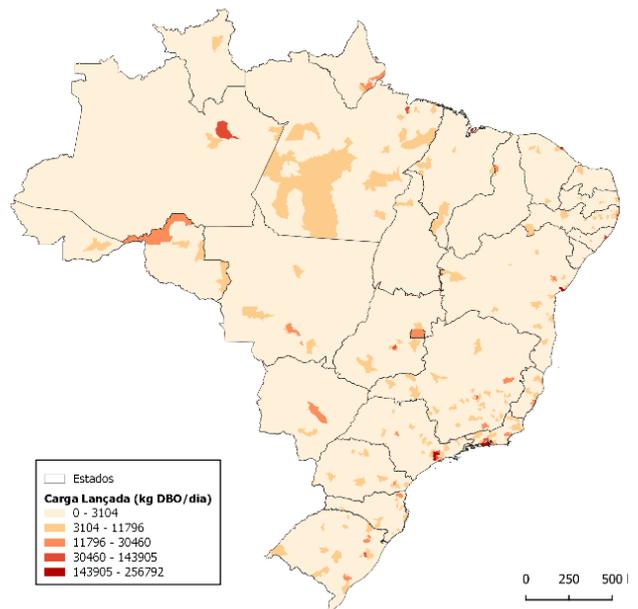
Carga de esgoto gerada



Carga de esgoto destinada a ETE

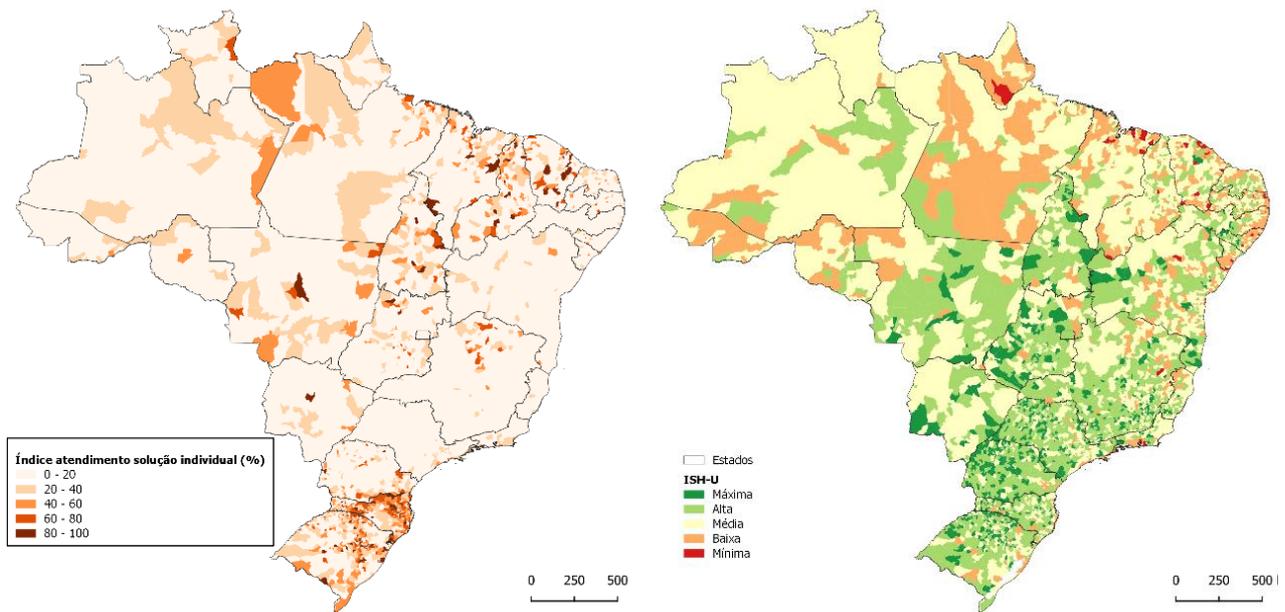


Carga de esgoto lançada



## Índice de atendimento por solução individual

## Índice de segurança hídrica urbana



Elaboração: WayCarbon adaptado das referências

### 3.3. Identificação de impactos

O objetivo desta etapa foi identificar as principais consequências das ameaças climáticas para o setor de saneamento, compreendendo os efeitos potenciais dos eventos climáticos extremos avaliados, como as secas, as tempestades e as ondas de calor, que afetam direta e indiretamente os sistemas de água e esgoto.

A identificação de impactos foi conduzida através de estudos já realizados no setor e pesquisa em bibliografias, nacionais e internacionais, com as palavras chaves: mudanças climáticas, saneamento, tratamento de água, tratamento de efluentes, tempestades, secas, ondas de calor, abastecimento de água, esgotamento sanitário. Após revisão e validação do levantamento de impactos, estes foram consolidados com base na disponibilidade de dados e informações relevantes para modelagem de cada risco climático identificado.

A lista completa de impactos mapeados para cada ameaça climática, nos sistemas de água e esgoto, é apresentada no [ANEXO II – Identificação de Riscos Climáticos com GT](#).

### 3.4. Modelagem do Risco Climático

A modelagem do risco climático combinou as projeções das variáveis climáticas do cenário SSP3-7.0, do IPCC, com os indicadores de exposição e vulnerabilidade previamente selecionados e tratados. A base de dados tratada é em nível de municípios.

Para garantir uma análise coerente entre os parâmetros considerados, estes foram normalizados, de modo que apresentassem intervalos comparáveis. Este processo de normalização é importante para que os diferentes indicadores possam ser combinados sem distorções, facilitando a interpretação dos resultados. A normalização permite que variáveis com unidades e escalas distintas, como densidade demográfica, índices de coleta de esgoto e variações projetadas de precipitação, sejam ajustadas a uma mesma escala relativa, variando de 0 a 1, considerando os extremos no território nacional. Esta abordagem assegura que cada parâmetro contribua de forma equilibrada na composição do risco.

Sendo assim, o índice de risco foi calculado conforme a equação abaixo:

$$Risco\ Climático = (AC_1 \cdot IS_1 \cdot IS_2 \dots IS_n)^{\frac{1}{(n+1)}}$$

Onde:

- $AC_1$ : Variável da ameaça climática normalizada;
- $IS_{1,2,\dots,n}$ : Variável suporte normalizada;
- $n$ : Número de indicadores suporte utilizados na modelagem

Como resultado dessa relação, obteve-se um valor de risco climático variando de 0 a 1, que foi classificado em 5 níveis de risco, de muito baixo a muito alto, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação da modelagem de risco climático

Nível de Risco	Intervalo
Muito baixo	0 – 0,2
Baixo	0,2 – 0,4
Intermediário	0,4 – 0,6
Alto	0,6 – 0,8
Muito alto	0,8 – 1,0

Fonte: Autores

Os intervalos definidos para cada variável utilizada no estudo são apresentadas em [ANEXO I – Normalização das variáveis do estudo](#).

## 4. Resultados e Discussão

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos durante o processo de identificação de riscos e impactos climáticos para o setor de saneamento, além da modelagem de risco climático desenvolvida conforme a metodologia descrita anteriormente.

### 4.1. Identificação de Impactos

Esta seção apresenta os resultados da identificação de impactos associados a cada ameaça climática avaliada, e seus efeitos sobre os sistemas de água e esgoto.

#### 4.1.1 Sistema de Água

Para o sistema de abastecimento de água, foram identificados 16 impactos principais, sendo 6 para a ameaça de ondas de calor, 6 para secas meteorológicas e 4 para tempestades. Os resultados são apresentados de acordo com a etapa do sistema onde ocorre o impacto (Tabela 6).

Tabela 6 – Identificação de impactos climáticos no sistema de Abastecimento de Água

Ameaça	Etapa	Impacto	Esfera de impacto
Ondas de Calor	Manancial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Redução do volume de água e aumento na concentração de poluentes:</b> Ondas de calor aumentam a evaporação em reservatórios reduzindo o volume armazenado e aumentando a concentração de poluentes, podendo dificultar o tratamento e a disponibilidade de abastecimento</li> <li>• <b>Afloramento de cianobactérias:</b> Aumento das temperaturas provoca florescimento de cianobactérias em mananciais, comprometendo a qualidade da água e exigindo tratamentos mais complexos</li> </ul>	Infraestrutura de saneamento / População
Ondas de Calor	Estação de Tratamento de Água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Danos na infraestrutura e sobrecarga de equipamentos:</b> O calor extremo acelera a deterioração de componentes da ETA, como tubulações e bombas, e a utilização intensificada de equipamentos aumenta a sobrecarga, levando a falhas mecânicas e necessidade de substituição prematura.</li> <li>• <b>Aumento da demanda por energia:</b> Durante ondas de calor, o aumento do uso de sistemas de bombeamento pode sobrecarregar o sistema energético, causando falhas no fornecimento de água</li> </ul>	Infraestrutura de Saneamento

Ondas de Calor	Consumo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Contaminação e propagação de doenças:</b> Altas temperaturas favorecem a sobrevivência e proliferação de patógenos no sistema de abastecimento, aumentando risco de contaminações.</li> <li>• <b>Aumento da demanda por água:</b> O consumo de água cresce significativamente em períodos de calor extremo, o que pode ultrapassar a capacidade dos sistemas de abastecimento e causar escassez temporária.</li> </ul>	População
Secas	Manancial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aumento na concentração de poluentes:</b> A redução da vazão em rios e mananciais concentra poluentes, comprometendo a qualidade da água direcionada para as ETA's.</li> <li>• <b>Aumento da demanda por águas subterrâneas:</b> A redução da disponibilidade de água superficial pode aumentar a dependência por águas subterrâneas.</li> <li>• <b>Conflito de uso dos recursos hídricos:</b> Em regiões afetadas pela seca, a competição pelo uso da água se intensifica.</li> </ul>	Infraestrutura de saneamento / População
Secas	Estação de Tratamento de Água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aumento de custos operacionais:</b> O uso de fontes alternativas de água durante secas, como perfuração de poços ou transporte de água, eleva os custos de operação das empresas de saneamento.</li> <li>• <b>Redução da eficiência de tratamento:</b> A baixa vazão de água em períodos de seca compromete a eficiência das ETA's, operando abaixo de sua capacidade projetada e prejudicando o tratamento.</li> </ul>	Infraestrutura de saneamento / População
Secas	Consumo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Racionamento e uso de fontes alternativas:</b> O racionamento pode levar a população a buscar fontes alternativas e, por vezes, inadequadas, aumentando o risco de contaminação e proliferação de doenças.</li> </ul>	Infraestrutura de Saneamento / População
Tempestades	Manancial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aumento do acúmulo de sedimentos:</b> As tempestades intensas e prolongadas podem aumentar a quantidade de sedimentos carregados para mananciais e reservatórios, reduzindo a capacidade de armazenamento e dificultando o tratamento de água.</li> </ul>	Infraestrutura de saneamento

Tempestades	Estação de Tratamento de Água	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Danos físicos às estruturas e impedimento do transporte de água:</b> Tempestades podem causar danos significativos em ETA's, estruturas de pressurização, e afetar o transporte de água.</li> <li>• <b>Redução da eficiência do tratamento:</b> As ETA's podem receber fluxos de água acima da capacidade projetada durante tempestades, comprometendo a eficiência do tratamento.</li> <li>• <b>Interrupções de energia:</b> Tempestades podem gerar interrupções, afetando o funcionamento das ETA's.</li> </ul>	Infraestrutura de saneamento / População
-------------	-------------------------------	--	--

Fonte: Autores com base na revisão bibliográfica e discussões do grupo de trabalho.

#### 4.1.2 Sistema de Esgoto

Considerando o sistema de esgotamento sanitário, foram identificados 9 impactos principais, sendo 3 decorrentes de ondas de calor, 2 de secas meteorológicas e 4 de tempestades. Os impactos foram posteriormente consolidados de acordo com os riscos modelados e a etapa do sistema onde ocorre o impacto (Tabela 7).

Tabela 7 - Impactos consolidados sob o sistema de Esgotamento Sanitário

Ameaça	Etapa	Impacto	Esfera de impacto
Ondas de Calor	Geração do efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Aumento da geração de odores:</b> As altas temperaturas intensificam a decomposição da matéria orgânica e a alta concentração de esgoto nas redes podem elevar a geração de odores, impactando a população do entorno.</li> </ul>	População
Ondas de calor	Estação de tratamento de efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Redução da eficiência de tratamento e sobrecarga das infraestruturas:</b> As ondas de calor podem afetar o funcionamento das unidades de tratamento biológico, que dependem de temperaturas específicas, e com o maior consumo de água, elevar o recebimento de efluente, sobrecarregando a capacidade projetada das ETE's.</li> <li>• <b>Danos físicos às infraestruturas:</b> Altas temperaturas aceleram a deterioração de tubulações e equipamentos de bombeamento, aumentando os custos de manutenção e operação das ETE's.</li> </ul>	Infraestrutura de Saneamento

Secas	Estação de tratamento de efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Redução da eficiência de tratamento:</b> A diminuição da vazão de entrada nas ETE's durante períodos de seca prejudica o equilíbrio dos processos de tratamento.</li> </ul>	Infraestrutura de Saneamento
Secas	Lançamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Contaminação de águas superficiais:</b> Corpos receptores terão menor capacidade de diluição.</li> </ul>	Infraestrutura de Saneamento
Tempestades	Geração do efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Contaminação de águas superficiais:</b> As tempestades intensas podem causar transbordo de canais sem redes de coleta e tratamento de esgoto, e consequente liberação de efluentes não tratados diretamente nos corpos hídricos.</li> </ul>	Infraestrutura de Saneamento / População
Tempestades	Estação de tratamento de efluente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Danos físicos às estruturas e impedimento do transporte de esgoto:</b> Tempestades podem causar danos significativos em ETE's, elevatórias e linhas de recalque, dificultando o transporte de esgoto.</li> <li>• <b>Redução da eficiência do tratamento:</b> As ETE's podem receber fluxos de água acima da capacidade projetada durante tempestades, comprometendo a eficiência do tratamento.</li> <li>• <b>Interrupções de energia:</b> Tempestades podem gerar interrupções, afetando o funcionamento de bombas e outros equipamentos das ETE's.</li> </ul>	Infraestrutura de Saneamento

Fonte: Autores com base na revisão bibliográfica e discussões com grupo de trabalho.

## 4.2. Modelagem do Risco Climático

Esta seção apresenta os resultados da modelagem climática, nos sistemas de água e esgoto, para cada uma das ameaças climáticas avaliadas. Os riscos são apresentados nas fichas climáticas, seguidos pelas tabelas com a distribuição dos municípios de cada estado, de acordo com o nível de risco climático modelado.

### 4.2.1. Sistema de Abastecimento de Água

#### 4.2.1.1. Tempestades

Os riscos climáticos de tempestades em sistemas de abastecimento de água são apresentados nas tabelas 8 a 11.

Tabela 8 – Resultado da modelagem do Risco Climático 1

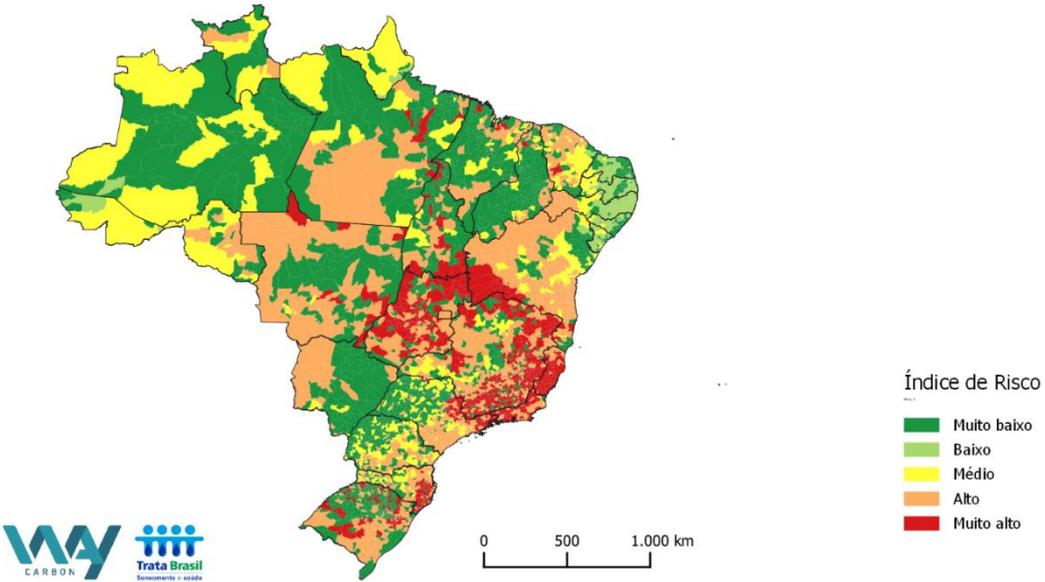
<b>Ameaça Climática</b>	Tempestades
<b>Sistema</b>	Abastecimento de Água
<b>Etapa do sistema</b>	Manancial
<b>Impactos no sistema</b>	Aumento do acúmulo de sedimentos
<b>Esfera de Impacto</b>	Infraestrutura de Saneamento
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>RX5day</b> - Precipitação máxima em 5 dias
<b>Variável Suporte</b>	Tipo de manancial (subterrâneo, superficial ou misto)
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>O Brasil, com sua grande diversidade climática e geográfica, enfrenta desafios crescentes em relação às tempestades intensas, especialmente com o agravamento das mudanças climáticas. O acúmulo de sedimentos proveniente das precipitações intensas pode comprometer a capacidade de armazenamento e a filtragem da água, afetando a continuidade e a qualidade dos serviços de saneamento.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles que possuem abastecimento por manancial exclusivamente superficial, expostos ao efeito de acúmulo de sedimentos, e que se localizam em regiões com tendência de agravamento de precipitação máxima em 5 dias nos cenários climáticos futuros. É possível observar os maiores índices de risco no Espírito Santo, Rio de Janeiro e Goiás. Além desses estados, a região sul e sudeste de Minas Gerais, sudoeste da Bahia e a região litorânea de Santa Catarina também apresentam valores de risco elevados.</p>	

Tabela 9 – Distribuição de resultados do Risco Climático 1 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
ES	78	0,84	0%	0%	0%	22%	78%
RJ	92	0,66	1%	0%	1%	27%	71%
GO	246	0,64	24%	0%	0%	24%	52%
MG	853	0,60	25%	0%	3%	35%	37%
TO	139	0,26	61%	0%	4%	16%	19%
SC	295	0,51	26%	0%	18%	39%	17%
RS	499	0,28	63%	0%	0%	24%	14%
SP	645	0,32	52%	0%	15%	26%	8%
MT	141	0,40	44%	0%	3%	46%	7%
PA	144	0,19	74%	0%	10%	10%	6%
MA	217	0,18	74%	0%	6%	18%	2%
BA	417	0,53	18%	1%	25%	53%	2%
PI	224	0,17	78%	0%	4%	17%	0%
DF	1	0,75	0%	0%	0%	100%	0%
MS	79	0,15	80%	0%	4%	16%	0%
AL	102	0,23	35%	57%	8%	0%	0%
CE	184	0,43	29%	2%	32%	38%	0%
PB	223	0,29	25%	50%	24%	0%	0%
PE	184	0,34	7%	71%	9%	13%	0%
RN	167	0,22	44%	35%	21%	0%	0%
SE	75	0,26	27%	63%	11%	0%	0%
AC	22	0,22	18%	14%	68%	0%	0%
AM	62	0,21	71%	2%	27%	0%	0%
AP	16	0,34	19%	19%	63%	0%	0%
RO	52	0,42	19%	0%	37%	44%	0%
RR	15	0,27	33%	0%	47%	20%	0%
PR	399	0,26	61%	0%	21%	19%	0%

Tabela 10 - Resultado da modelagem do Risco Climático 2

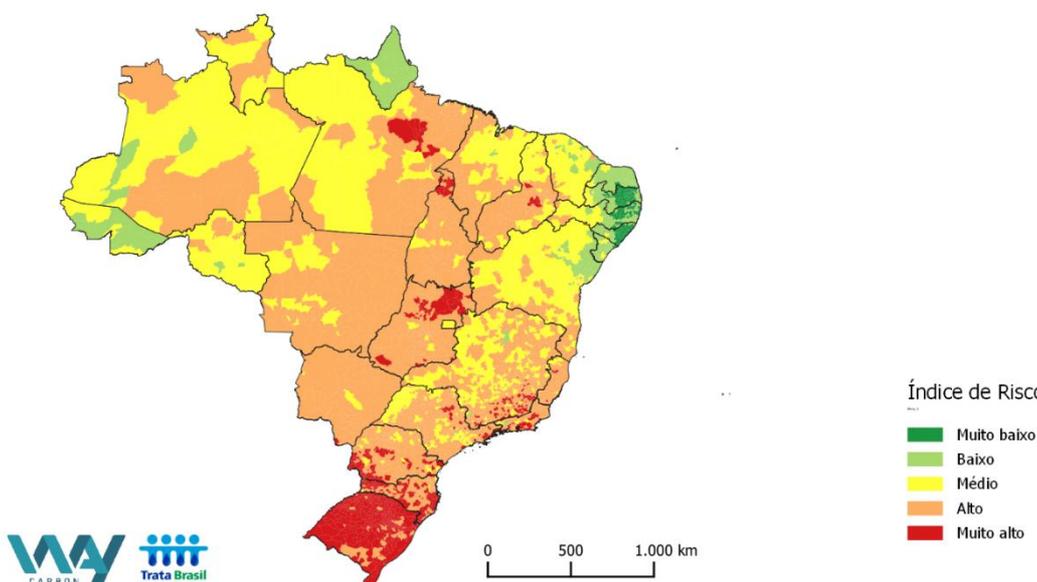
<b>Ameaça Climática</b>	Tempestades
<b>Sistema</b>	Abastecimento de Água
<b>Etapa do sistema</b>	Estações de Tratamento de Água (ETA)
<b>Impactos no sistema</b>	Danos físicos às estruturas e impedimento do transporte de água; Redução da eficiência do tratamento; Interrupções de energia
<b>Esfera de Impacto</b>	Infraestrutura de Saneamento
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>RX1day</b> - Precipitação máxima em 1 dia
<b>Variável Suporte</b>	Quantidade de ETA's
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>O Brasil apresenta uma crescente ameaça de tempestades intensas com impactos em infraestrutura, dado o agravamento das mudanças climáticas. As tempestades podem causar danos físicos relevantes nas infraestruturas das ETAs, além de efeitos sobre a operação, como redução da eficiência no tratamento de água, especialmente por danos nas instalações ou interrupção no fornecimento de energia elétrica.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são os que se localizam em regiões com projeções de grande volume de precipitação máxima em 1 dia, e com menor quantidade de ETAs para garantir a distribuição e o tratamento adequado da água, a população estaria mais exposta a riscos de desabastecimento e perda da qualidade da água fornecida. É notável uma predominância de risco muito alto em todo o estado do Rio Grande do Sul, onde em maio de 2024, as chuvas intensas danificaram duas das seis ETAs de Porto Alegre, forçando-as a paralisação. Ainda, Santa Catarina, Paraná, Rio de Janeiro, Goiás e Pará também apresentaram regiões com índice de risco elevado.</p>	

Tabela 11 – Distribuição de resultados do Risco Climático 2 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
RS	499	0,88	0%	0%	0%	8%	92%
SC	295	0,81	0%	0%	2%	49%	49%
RJ	92	0,72	0%	2%	4%	72%	22%
PR	399	0,74	0%	0%	5%	76%	19%
GO	246	0,73	0%	0%	2%	89%	10%
MG	853	0,67	0%	0%	21%	69%	9%
TO	139	0,69	0%	0%	5%	86%	9%
PA	144	0,64	0%	0%	19%	76%	5%
PI	224	0,62	0%	0%	42%	55%	3%
SP	645	0,66	0%	0%	25%	72%	2%
ES	78	0,70	0%	0%	6%	92%	1%
DF	1	0,58	0%	0%	100%	0%	0%
MS	79	0,70	0%	0%	3%	97%	0%
MT	141	0,66	0%	0%	12%	88%	0%
AL	102	0,21	54%	41%	5%	0%	0%
BA	417	0,51	0%	20%	60%	19%	0%
CE	184	0,49	0%	12%	81%	7%	0%
MA	217	0,58	0%	0%	58%	42%	0%
PB	223	0,24	47%	37%	16%	0%	0%
PE	184	0,28	31%	47%	19%	3%	0%
RN	167	0,29	5%	80%	15%	0%	0%
SE	75	0,32	4%	85%	11%	0%	0%
AC	22	0,46	0%	64%	36%	0%	0%
AM	62	0,55	0%	10%	69%	21%	0%
AP	16	0,69	0%	94%	6%	0%	0%
RO	52	0,49	0%	4%	83%	13%	0%
RR	15	0,64	0%	0%	67%	33%	0%

#### 4.2.1.2. Ondas de Calor

Os riscos climáticos de ondas de calor em sistemas de água são apresentados nas tabelas 12 a 17.

Tabela 12 – Resultado da modelagem do Risco Climático 3

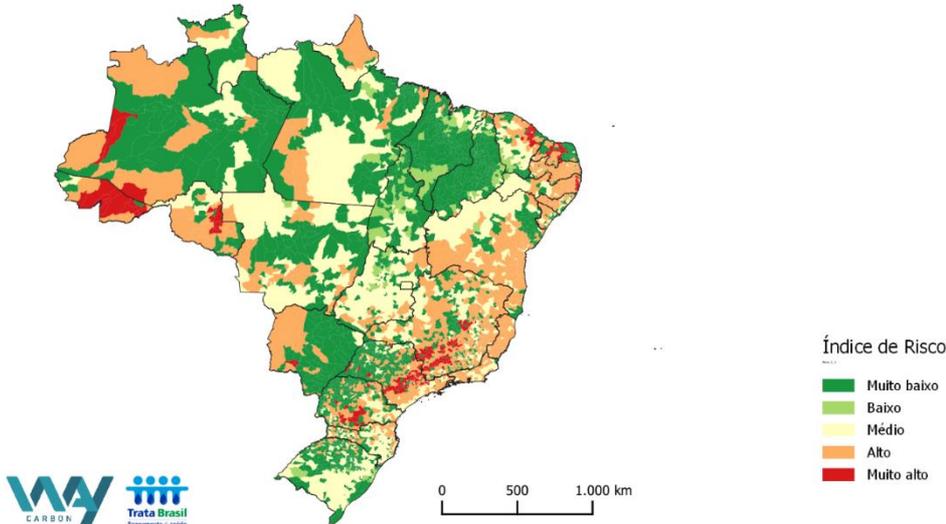
<b>Ameaça Climática</b>	Ondas de Calor
<b>Sistema</b>	Abastecimento de Água
<b>Etapa do sistema</b>	Manancial
<b>Impactos no sistema</b>	Redução do volume de água e aumento na concentração de poluentes; Afloramento de cianobactérias
<b>Esfera de Impacto</b>	Infraestrutura de Saneamento
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>HW.N</b> - Número de ondas de calor registradas no ano
<b>Variável Suporte</b>	Tipo de manancial (subterrâneo, superficial ou misto)
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>O Brasil enfrenta um aumento na frequência e intensidade das ondas de calor, com consequências diretas para o setor de saneamento e a população que depende dos serviços prestados. Estes eventos intensificam a evaporação da água, reduzindo o volume disponível nos mananciais, e agravando a concentração de poluentes. As ondas de calor também favorecem o afloramento de cianobactérias, que podem comprometer a qualidade da água.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles que possuem abastecimento por manancial exclusivamente superficial e que se localizam em regiões onde há tendência de agravamento dos eventos de ondas de calor. Os maiores valores ocorrem no interior de São Paulo, sudoeste de Minas Gerais, região litorânea de Pernambuco e alguns municípios dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Acre e Amazonas.</p>	

Tabela 13 – Distribuição de resultados do Risco Climático 3 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
AC	22	0,65	18%	0%	5%	32%	45%
RO	52	0,57	19%	0%	10%	52%	19%
CE	184	0,44	29%	7%	30%	21%	14%
RN	167	0,41	44%	0%	4%	38%	13%
MG	853	0,52	25%	0%	17%	47%	11%
SP	645	0,33	52%	0%	10%	28%	10%
PE	184	0,65	5%	2%	17%	67%	9%
AM	62	0,20	71%	0%	6%	15%	8%
PR	399	0,26	61%	0%	10%	25%	4%
PB	223	0,66	8%	0%	7%	83%	3%
MS	79	0,14	80%	0%	3%	15%	3%
SC	295	0,45	26%	0%	43%	31%	0%
DF	1	0,44	0%	0%	100%	0%	0%
GO	246	0,40	24%	4%	58%	14%	0%
MT	141	0,32	44%	1%	32%	23%	0%
AL	102	0,58	16%	0%	16%	69%	0%
BA	417	0,53	18%	0%	20%	62%	0%
MA	217	0,09	78%	11%	9%	2%	0%
PI	224	0,09	79%	9%	9%	2%	0%
SE	75	0,49	27%	0%	13%	60%	0%
AP	16	0,52	19%	0%	31%	50%	0%
PA	144	0,13	74%	4%	15%	6%	0%
RR	15	0,39	33%	0%	53%	13%	0%
TO	139	0,17	61%	17%	19%	3%	0%
ES	78	0,72	0%	0%	9%	91%	0%
RJ	92	0,63	1%	0%	25%	74%	0%
RS	499	0,19	63%	4%	27%	6%	0%

Tabela 14 – Resultado da modelagem do Risco Climático 4

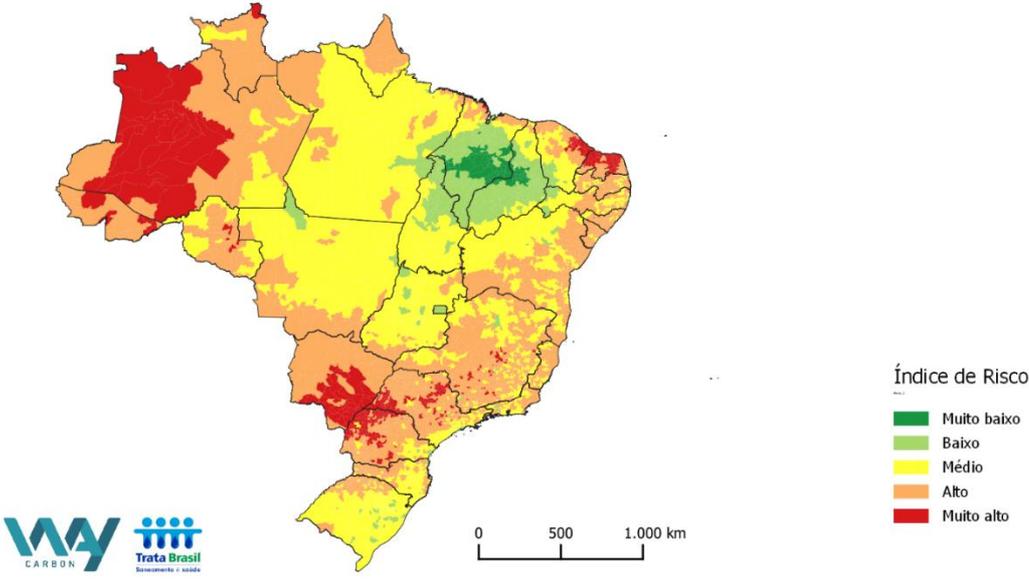
<b>Ameaça Climática</b>	Ondas de Calor
<b>Sistema</b>	Abastecimento de Água
<b>Etapa do sistema</b>	Estação de Tratamento de Água (ETA)
<b>Impactos no sistema</b>	Danos na infraestrutura e sobrecarga de equipamentos; Aumento da demanda de água e energia
<b>Esfera de Impacto</b>	Infraestrutura de Saneamento
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>HW.N</b> - Número de ondas de calor registradas no ano
<b>Variável Suporte</b>	Quantidade de ETAs
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>A intensificação dos eventos de ondas de calor no Brasil também traz desafios relevantes para as infraestruturas de saneamento. Estes eventos aumentam a demanda por água, podendo apresentar sobrecarga da infraestrutura existente, elevando o consumo de energia e colocando pressão adicional sobre equipamentos que podem ter seu desempenho comprometido.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles em regiões onde há tendência de agravamento das ondas de calor e que possuem menores quantidades de ETAs, já que a capacidade de resposta ao aumento da demanda se torna limitada. Com menos estações para tratar e distribuir água, a pressão sobre o sistema de saneamento é acentuada, com maior risco de desabastecimento. Os maiores valores de índice de risco ocorrem em regiões como Amazonas, sul do Mato Grosso do Sul, noroeste do Paraná e oeste de São Paulo, no Rio Grande do Norte e Ceará.</p>	

Tabela 15 – Distribuição de resultados do Risco Climático 4 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
MS	79	0,79	0%	0%	0%	49%	51%
AM	62	0,75	0%	0%	11%	48%	40%
RN	167	0,77	0%	0%	2%	60%	38%
PR	399	0,74	0%	1%	8%	56%	35%
AC	22	0,77	0%	0%	0%	68%	32%
SP	645	0,71	0%	1%	13%	67%	19%
CE	184	0,63	0%	7%	41%	34%	17%
RO	52	0,68	0%	0%	23%	65%	12%
RR	15	0,67	0%	0%	7%	87%	7%
MG	853	0,66	0%	0%	20%	75%	4%
PB	223	0,66	0%	0%	25%	73%	2%
MA	217	0,35	23%	43%	18%	14%	2%
PE	184	0,61	0%	5%	43%	49%	2%
SC	295	0,61	0%	1%	44%	54%	1%
DF	1	0,36	0%	100%	0%	0%	0%
GO	246	0,52	0%	2%	83%	15%	0%
MT	141	0,55	0%	2%	70%	28%	0%
AL	102	0,67	0%	0%	13%	87%	0%
BA	417	0,62	0%	1%	37%	62%	0%
PI	224	0,34	12%	59%	27%	3%	0%
SE	75	0,67	0%	0%	11%	89%	0%
AP	16	0,62	0%	0%	31%	69%	0%
PA	144	0,52	0%	10%	74%	16%	0%
TO	139	0,41	1%	45%	53%	1%	0%
ES	78	0,64	0%	0%	27%	73%	0%
RJ	92	0,59	0%	2%	47%	51%	0%
RS	499	0,56	0%	4%	64%	31%	0%

Tabela 16 – Resultado da modelagem do Risco Climático 5

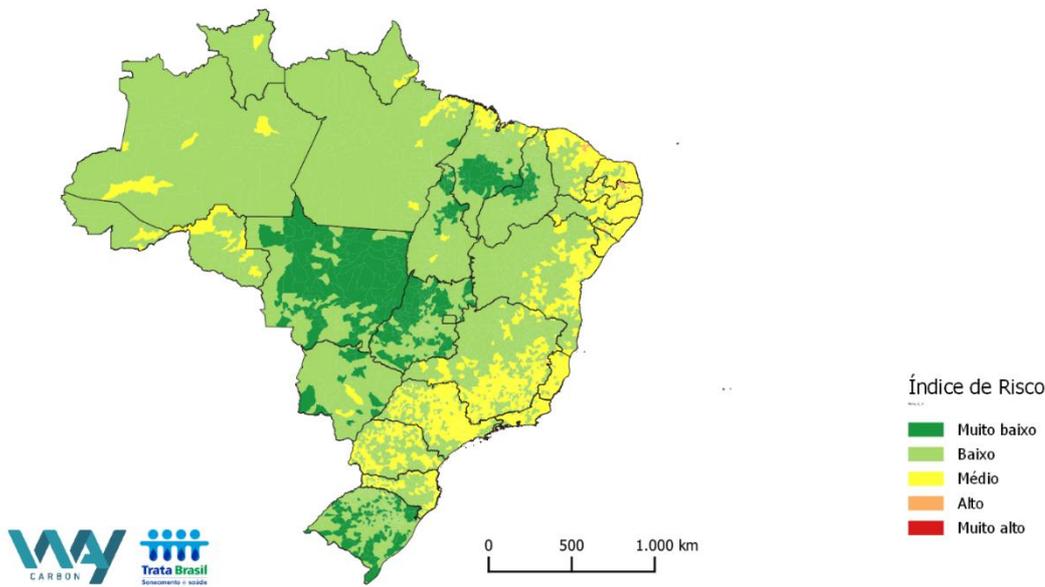
<b>Ameaça Climática</b>	Ondas de Calor
<b>Sistema</b>	Abastecimento de Água
<b>Etapa do sistema</b>	Consumo
<b>Impactos no sistema</b>	Contaminação e propagação de doenças; Aumento da demanda de água
<b>Esfera de Impacto</b>	Infraestrutura de Saneamento e Sociedade
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>HW.N</b> - Número de ondas de calor registradas no ano
<b>Variáveis Suporte</b>	Densidade demográfica; índice de cobertura de água; ISHU (Índice de Segurança Hídrica Urbana)
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>As ondas de calor podem representar uma crescente ameaça para o sistema de saneamento no Brasil, com impactos diretos na demanda de água e na saúde pública. As ondas de calor favorecem a propagação de doenças, especialmente em áreas onde o índice de cobertura de água é insuficiente, a densidade demográfica é elevada e o Índice de Segurança Hídrica Urbana (ISHU) é baixo, o que aumenta o risco de contaminação.</p> <p>Embora não tenha sido identificado risco alto ou muito alto, em termos gerais, para o país, a região Sudeste apresentou risco médio para São Paulo, Espírito Santo e regiões de Minas Gerais e Rio de Janeiro, grande parte do litoral do Nordeste e em áreas de estados do Sul, como Paraná e Santa Catarina.</p>	

Tabela 17 – Distribuição de resultados do Risco Climático 5 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
PB	223	0,44	0%	35%	57%	8%	1%
DF	1	0,30	0%	100%	0%	0%	0%
GO	246	0,29	0%	100%	0%	0%	0%
MS	79	0,39	0%	54%	46%	0%	0%
MT	141	0,31	0%	99%	1%	0%	0%
AL	102	0,40	0%	46%	53%	1%	0%
BA	417	0,36	0%	83%	17%	0%	0%
CE	184	0,38	0%	67%	33%	0%	0%
MA	217	0,25	39%	49%	12%	0%	0%
PE	184	0,39	0%	46%	54%	0%	0%
PI	224	0,25	28%	71%	1%	0%	0%
RN	167	0,42	0%	46%	53%	2%	0%
SE	75	0,40	0%	51%	49%	0%	0%
AC	22	0,43	0%	23%	77%	0%	0%
AM	62	0,40	0%	47%	53%	0%	0%
AP	16	0,26	0%	56%	44%	0%	0%
PA	144	0,33	1%	96%	3%	0%	0%
RO	52	0,41	0%	67%	31%	2%	0%
RR	15	0,35	0%	80%	20%	0%	0%
TO	139	0,25	27%	73%	0%	0%	0%
ES	78	0,38	0%	63%	37%	0%	0%
MG	853	0,37	0%	79%	21%	0%	0%
RJ	92	0,38	0%	76%	24%	0%	0%
SP	645	0,36	0%	78%	22%	0%	0%
PR	399	0,35	0%	89%	11%	0%	0%
RS	499	0,30	0%	99%	0%	0%	0%
SC	295	0,34	0%	92%	8%	0%	0%

### 4.2.1.3. Secas Meteorológicas

Os riscos climáticos de secas meteorológicas são apresentados nas tabelas 18 a 23.

Tabela 18 – Resultado da modelagem do Risco Climático 6

<b>Ameaça Climática</b>	Secas Meteorológicas
<b>Sistema</b>	Abastecimento de Água
<b>Etapa do sistema</b>	Mananciais
<b>Impactos no sistema</b>	Aumento na concentração de poluentes; Aumento da demanda por águas subterrâneas; Conflito de uso dos recursos hídricos
<b>Esfera de Impacto</b>	Infraestrutura de Saneamento
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>CDD – Dias consecutivos sem chuva no ano</b>
<b>Variáveis Suporte</b>	Tipo de manancial (subterrâneo, superficial ou misto); Densidade demográfica
<b>Resultado da Modelagem</b>	
<b>Discussão</b>	
<p>As secas apresentam grandes desafios para o setor de saneamento no Brasil, como a redução do volume de água nos mananciais que pode elevar a concentração de poluentes e prejudicar a qualidade da água, exigindo tratamentos mais complexos e custosos.</p> <p>Além dos impactos operacionais, as secas agravadas pelas mudanças climáticas afetam diretamente a população, que enfrenta restrições de abastecimento e, em algumas situações, possíveis crises sanitárias. Em contrapartida, aumento da dependência de águas subterrâneas em períodos de seca pode levar ao esgotamento e gerar efeitos negativos para segurança hídrica.</p> <p>Os municípios com maiores índices de riscos são aqueles com tendência de agravamento dos dias consecutivos sem chuva, abastecidos por mananciais superficiais e que estão em regiões de maior densidade demográfica, destacando-se os estados da região Nordeste.</p>	

Tabela 19 – Distribuição de resultados do Risco Climático 6 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
PB	223	0,75	0%	0%	15%	43%	40%
RN	167	0,68	1%	0%	44%	19%	36%
CE	184	0,71	0%	0%	32%	35%	33%
PE	184	0,67	0%	0%	20%	62%	16%
PI	224	0,45	0%	0%	46%	10%	4%
MA	217	0,48	0%	0%	52%	15%	2%
BA	417	0,49	0%	0%	57%	15%	2%
GO	246	0,52	0%	0%	36%	34%	2%
MG	853	0,44	0%	0%	52%	9%	0%
DF	1	0,67	0%	0%	0%	100%	0%
MS	79	0,30	0%	0%	11%	1%	0%
MT	141	0,37	1%	0%	43%	2%	0%
AL	102	0,52	0%	0%	61%	24%	0%
SE	75	0,47	0%	0%	73%	0%	0%
AC	22	0,33	14%	0%	14%	0%	0%
AM	62	0,20	55%	0%	0%	0%	0%
AP	16	0,37	0%	0%	31%	0%	0%
PA	144	0,39	2%	0%	42%	6%	0%
RO	52	0,40	0%	0%	56%	4%	0%
RR	15	0,22	47%	0%	7%	0%	0%
TO	139	0,38	0%	0%	35%	4%	0%
ES	78	0,44	0%	0%	90%	0%	0%
RJ	92	0,44	0%	0%	74%	0%	0%
SP	645	0,41	0%	0%	47%	2%	0%
PR	399	0,34	2%	0%	21%	1%	0%
RS	499	0,25	26%	0%	5%	0%	0%
SC	295	0,30	9%	0%	4%	0%	0%

Tabela 20 – Resultado da modelagem do Risco Climático 7

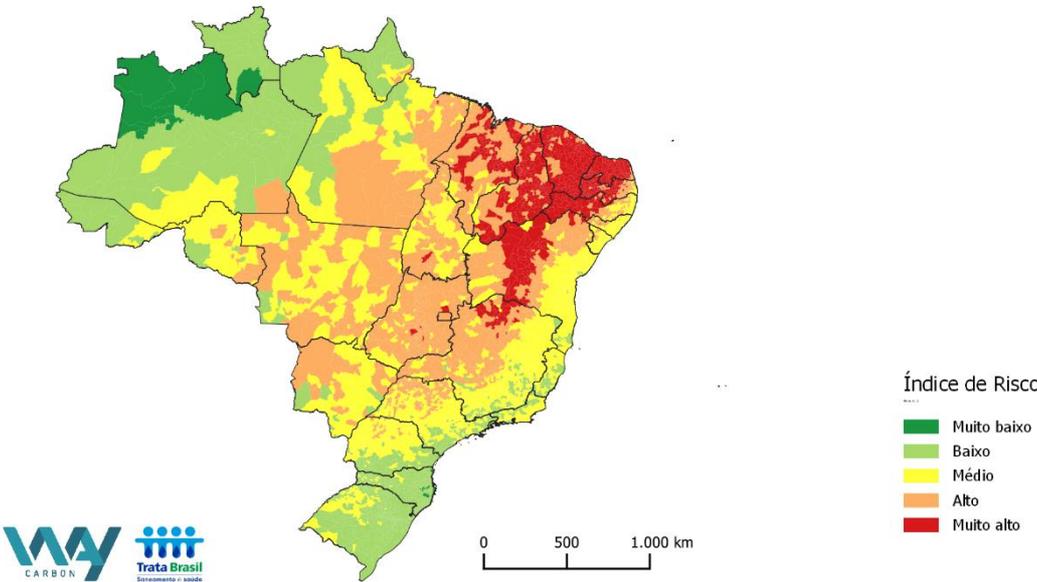
<b>Ameaça Climática</b>	Secas Meteorológicas
<b>Sistema</b>	Abastecimento de Água
<b>Etapa do sistema</b>	Estações de Tratamento de Água (ETA)
<b>Impactos no sistema</b>	Aumento de custos operacionais; Redução da eficiência de tratamento
<b>Esfera de Impacto</b>	Infraestrutura de saneamento/Sociedade
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>CDD</b> – Dias consecutivos sem chuva no ano
<b>Variáveis Suporte</b>	Balanço Qualitativo ANA; Quantidade de ETAs
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>No Brasil, as secas também apresentam um risco crescente para as infraestruturas de saneamento, como as ETAs. Os longos períodos de seca, principalmente em áreas com balanço qualitativo ruim, podem afetar os volumes de captação e comprometer a qualidade da água que chega às estações, elevando custos operacionais. As regiões com menor quantidade de ETAs ou com sistemas de tratamento já sobrecarregados podem enfrentar riscos ainda maiores, pela falta de alternativas de redistribuição de carga ou fornecimento de água.</p> <p>As áreas destacadas com maior nível de risco são aquelas que apresentam tendência de agravamento dos períodos sem chuva, com balanço hídrico qualitativo ruim e que dispõem de um menor número de ETAs. É possível notar uma concentração de municípios com risco muito alto no agreste e sertão nordestino, com destaque para Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Bahia. O efeito é reduzido na região da Zona da Mata, próxima ao litoral. Também se destacam alguns municípios com risco alto em Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, norte de Minas Gerais, Tocantins e Pará.</p>	

Tabela 21 – Distribuição de resultados do Risco Climático 7 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
RN	167	0,88	0%	0%	1%	16%	83%
CE	184	0,87	0%	0%	3%	21%	76%
PB	223	0,78	0%	0%	8%	48%	44%
PI	224	0,70	0%	0%	30%	50%	20%
PE	184	0,65	0%	2%	40%	47%	11%
BA	417	0,55	0%	8%	65%	16%	11%
MA	217	0,65	0%	0%	34%	59%	7%
PA	144	0,47	0%	20%	65%	13%	1%
MG	853	0,43	0%	42%	50%	7%	1%
DF	1	0,63	0%	0%	0%	100%	0%
GO	246	0,54	0%	1%	72%	26%	0%
MS	79	0,42	0%	54%	39%	6%	0%
MT	141	0,44	0%	17%	81%	2%	0%
AL	102	0,54	0%	2%	80%	18%	0%
SE	75	0,53	0%	4%	95%	1%	0%
AC	22	0,33	0%	100%	0%	0%	0%
AM	62	0,28	13%	82%	5%	0%	0%
AP	16	0,37	0%	69%	31%	0%	0%
RO	52	0,41	0%	42%	56%	2%	0%
RR	15	0,26	7%	93%	0%	0%	0%
TO	139	0,49	0%	0%	95%	5%	0%
ES	78	0,34	0%	79%	21%	0%	0%
RJ	92	0,37	0%	67%	33%	0%	0%
SP	645	0,45	0%	34%	60%	6%	0%
PR	399	0,40	0%	50%	50%	0%	0%
RS	499	0,30	2%	95%	3%	0%	0%
SC	295	0,28	11%	89%	0%	0%	0%

Tabela 22 – Resultado da modelagem do Risco Climático 8

<b>Ameaça Climática</b>	Secas Meteorológicas
<b>Sistema</b>	Abastecimento de Água
<b>Etapa do sistema</b>	Consumo
<b>Impactos no sistema</b>	Racionamento e uso de fontes alternativas
<b>Esfera de Impacto</b>	Sociedade
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>CDD</b> – Dias consecutivos sem chuva no ano
<b>Variáveis Suporte</b>	Densidade Demográfica
<b>Resultado da Modelagem</b>	
<b>Discussão</b>	
<p>No Brasil, as secas impactam diretamente o abastecimento de água para população em determinadas regiões do Brasil. Em eventos de secas prolongadas, algumas regiões podem passar por racionamentos ou ter que recorrer a fontes alternativas de água, como a perfuração de poços ou o transporte de água de regiões cada vez mais distantes. O impacto para população frequentemente se traduz em acesso limitado à água potável, o que pode resultar em riscos à saúde e bem-estar geral.</p> <p>As áreas destacadas com maior índice de risco são aquelas que combinam o agravamento dos dias consecutivos sem chuva com altas densidades demográficas. É notável uma concentração de risco muito alto na região Nordeste, como no interior de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, além de municípios com risco médio e alto em Minas Gerais, Bahia, Goiás, São Paulo, Tocantins, Pará e o Distrito Federal.</p>	

Tabela 23 – Distribuição de resultados do Risco Climático 8 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
CE	184	0,78	0%	0%	13%	39%	49%
RN	167	0,74	0%	0%	9%	59%	32%
PB	223	0,70	0%	2%	24%	51%	24%
PE	184	0,59	0%	1%	69%	21%	9%
PI	224	0,52	0%	29%	46%	21%	4%
MA	217	0,55	0%	19%	41%	37%	3%
BA	417	0,39	3%	62%	29%	5%	0%
DF	1	0,78	0%	0%	0%	100%	0%
GO	246	0,47	0%	47%	33%	20%	0%
MS	79	0,29	0%	91%	9%	0%	0%
MT	141	0,32	0%	90%	7%	3%	0%
AL	102	0,44	0%	25%	73%	2%	0%
SE	75	0,40	0%	47%	53%	0%	0%
AC	22	0,22	32%	64%	5%	0%	0%
AM	62	0,16	76%	24%	0%	0%	0%
AP	16	0,27	6%	81%	13%	0%	0%
PA	144	0,42	8%	44%	26%	21%	0%
RO	52	0,30	0%	94%	6%	0%	0%
RR	15	0,16	93%	7%	0%	0%	0%
TO	139	0,37	0%	83%	11%	6%	0%
ES	78	0,31	0%	100%	0%	0%	0%
MG	853	0,37	2%	67%	28%	3%	0%
RJ	92	0,32	0%	100%	0%	0%	0%
SP	645	0,41	2%	49%	48%	1%	0%
PR	399	0,33	6%	74%	20%	0%	0%
RS	499	0,20	47%	53%	0%	0%	0%
SC	295	0,21	37%	63%	0%	0%	0%

## 4.2.2. Sistema de Esgotamento Sanitário

### 4.2.2.1. Tempestades

Os riscos climáticos de tempestades em sistemas de esgotamento sanitário são apresentados nas tabelas 24 a 27.

Tabela 24 - Resultado da modelagem do Risco Climático 9

<b>Ameaça Climática</b>	Tempestades
<b>Sistema</b>	Esgotamento sanitário
<b>Etapa do sistema</b>	Geração do efluente bruto
<b>Impactos no sistema</b>	Contaminação de águas superficiais
<b>Esfera de Impacto</b>	Infraestrutura de saneamento; População
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>RX1day</b> - Precipitação máxima em 1 dia
<b>Variável Suporte</b>	Índice de coleta de esgoto; Densidade demográfica
<b>Resultado da Modelagem</b>	
<b>Discussão</b>	
<p>As tempestades intensas também apresentam um desafio para os sistemas de esgotamento sanitário no país. Estas chuvas concentradas em um único dia intensificam o risco de sobrecarga dos sistemas de esgoto, principalmente em áreas com índice de coleta é insuficiente. O acúmulo repentino de água nas redes pode resultar no transbordamento de efluentes brutos, contaminando cursos d'água e impactando negativamente ecossistemas locais e qualidade de vida da população.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles que possuem elevada densidade demográfica, menores índices de atendimento de coleta de esgoto e que se localizam em regiões com tendência de agravamento de precipitação máxima em um único dia. É possível observar uma mancha de risco médio que se estende grande parte do país, porém os maiores índices se concentram nos estados da região Sul, principalmente Rio Grande do Sul e Santa Catarina, além de parte do estado do Rio de Janeiro e Pará.</p>	

Tabela 25 – Distribuição de resultados do Risco Climático 9 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
SC	295	0,76	0%	1%	12%	46%	42%
RS	499	0,70	0%	2%	20%	57%	21%
RJ	92	0,62	0%	0%	48%	39%	13%
PA	144	0,57	0%	6%	53%	33%	8%
PR	399	0,64	0%	2%	31%	59%	7%
ES	78	0,57	0%	3%	62%	32%	4%
MA	217	0,55	0%	1%	69%	29%	1%
SP	645	0,44	0%	37%	53%	9%	1%
MG	853	0,45	0%	29%	63%	8%	0%
DF	1	0,46	0%	0%	100%	0%	0%
GO	246	0,50	0%	16%	63%	21%	0%
MS	79	0,45	0%	41%	53%	6%	0%
MT	141	0,41	0%	47%	51%	2%	0%
AL	102	0,33	11%	66%	24%	0%	0%
BA	417	0,46	0%	31%	58%	11%	0%
CE	184	0,53	0%	7%	70%	24%	0%
PB	223	0,30	23%	52%	24%	0%	0%
PE	184	0,35	2%	74%	21%	3%	0%
PI	224	0,51	0%	3%	78%	19%	0%
RN	167	0,36	6%	63%	30%	1%	0%
SE	75	0,39	0%	53%	47%	0%	0%
AC	22	0,34	0%	91%	9%	0%	0%
AM	62	0,40	0%	55%	44%	2%	0%
AP	16	0,30	0%	88%	13%	0%	0%
RO	52	0,42	0%	42%	58%	0%	0%
RR	15	0,44	0%	20%	73%	7%	0%
TO	139	0,50	0%	1%	86%	13%	0%

Tabela 26 - Resultado da modelagem do Risco Climático 10

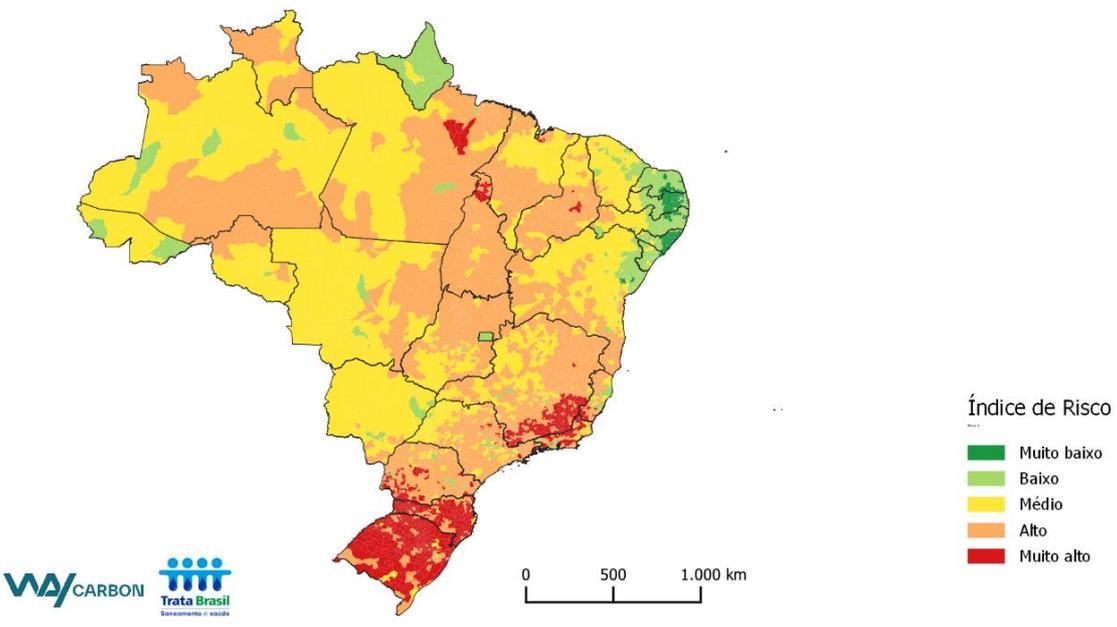
<b>Ameaça Climática</b>	Tempestades
<b>Sistema</b>	Esgotamento sanitário
<b>Etapa do sistema</b>	Estação de Tratamento de Efluentes
<b>Impactos no sistema</b>	Danos físicos às estruturas; redução da eficiência de tratamento; interrupção do fornecimento de energia.
<b>Esfera de Impacto</b>	População
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>RX1day</b> - Precipitação máxima em 1 dia
<b>Variável Suporte</b>	Quantidade de ETEs
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>As tempestades agravadas pelas mudanças do clima também geram desafios para as ETEs. Nestes eventos, a sobrecarga e os danos nas ETEs podem resultar em qualidade inferior no tratamento de efluentes, com potencial impacto na qualidade de corpos hídricos locais e na saúde pública. As regiões com menor quantidade de ETEs ou com sistemas de tratamento já sobrecarregados podem enfrentar riscos maiores, pela falta de alternativas de resposta aos eventos extremos.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles que possuem menor quantidade de ETEs e que se localizam em regiões onde há tendência de agravamento dos eventos de precipitação máxima em 1 dia nos cenários climáticos futuros. É possível observar uma mancha de risco alto que se estende por todo o Brasil, porém os maiores índices se concentram região sul, especialmente o estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, além da região sul e sudeste de Minas Gerais e parte do estado do Rio de Janeiro.</p>	

Tabela 27 – Distribuição de resultados do Risco Climático 10 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
RS	499	0,85	0%	0%	2%	12%	86%
SC	295	0,84	0%	1%	1%	15%	83%
RJ	92	0,74	0%	8%	4%	45%	43%
MG	853	0,72	0%	1%	11%	60%	28%
ES	78	0,66	0%	12%	10%	59%	19%
PR	399	0,72	0%	1%	5%	75%	19%
TO	139	0,71	0%	0%	4%	88%	9%
PA	144	0,68	0%	1%	16%	77%	6%
PI	224	0,62	0%	0%	36%	61%	3%
SP	645	0,62	0%	2%	32%	64%	2%
MA	217	0,59	0%	0%	54%	45%	1%
DF	1	0,31	0%	100%	0%	0%	0%
GO	246	0,65	0%	0%	20%	80%	0%
MS	79	0,53	0%	4%	75%	22%	0%
MT	141	0,55	0%	2%	70%	28%	0%
AL	102	0,22	50%	43%	7%	0%	0%
BA	417	0,52	0%	18%	50%	31%	0%
CE	184	0,48	1%	14%	80%	5%	0%
PB	223	0,26	39%	41%	21%	0%	0%
PE	184	0,31	11%	65%	18%	5%	0%
RN	167	0,28	14%	72%	14%	0%	0%
SE	75	0,30	4%	87%	9%	0%	0%
AC	22	0,41	0%	45%	55%	0%	0%
AM	62	0,53	0%	10%	68%	23%	0%
AP	16	0,33	0%	94%	6%	0%	0%
RO	52	0,55	0%	2%	77%	21%	0%
RR	15	0,63	0%	0%	33%	67%	0%

#### 4.2.2.2. Ondas de calor

Os riscos climáticos de ondas de calor em sistemas de esgotamento sanitário são apresentados nas Tabelas 28 a 31.

Tabela 28 - Resultado da modelagem do Risco Climático 11

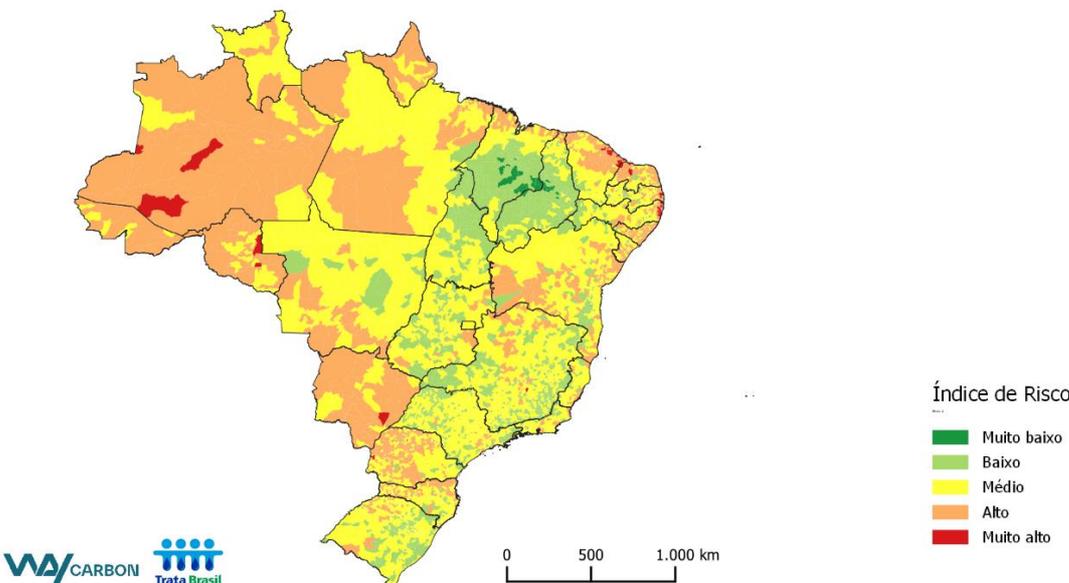
<b>Ameaça Climática</b>	Ondas de calor
<b>Sistema</b>	Esgotamento sanitário
<b>Etapa do sistema</b>	Geração de efluentes
<b>Impactos no sistema</b>	Aumento da geração de odores
<b>Esfera de Impacto</b>	População
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	HW.N - Número de ondas de calor registradas no ano
<b>Variável Suporte</b>	Carga de esgoto gerada; Índice de coleta de esgoto
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>As ondas de calor no Brasil também apresentam riscos para o sistema de esgotamento sanitário, com efeitos diretos sobre a população. Após eventos de onda de calor, a decomposição acelerada da matéria orgânica nos efluentes gera um aumento significativo na liberação de odores, o que pode impactar diretamente a qualidade de vida da população, especialmente em áreas com elevada carga de esgoto gerada e com índice de coleta insuficiente.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles que possuem maior carga de esgoto gerada, menores índices de atendimento de coleta de esgoto e que se localizam em regiões com tendência de agravamento de ondas de calor. É notável uma predominância de risco alto e muito alto na região norte, especialmente no estado do Amazonas. Além disso, outros estados no país se destacam, como o Ceará, Rio Grande do Norte, Alagoas, Sergipe, Mato Grosso do Sul e Paraná.</p>	

Tabela 29 – Distribuição de resultados do Risco Climático 11 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
CE	184	0,58	0%	9%	49%	36%	6%
PE	184	0,54	0%	14%	58%	23%	5%
AM	62	0,69	0%	0%	13%	82%	5%
RO	52	0,60	0%	0%	40%	56%	4%
RN	167	0,58	0%	6%	47%	44%	2%
PB	223	0,51	0%	17%	63%	19%	1%
MS	79	0,67	0%	0%	20%	78%	1%
PR	399	0,58	0%	2%	49%	49%	1%
MG	853	0,42	0%	45%	50%	6%	0%
DF	1	0,40	0%	0%	100%	0%	0%
GO	246	0,46	0%	34%	60%	7%	0%
MT	141	0,52	0%	9%	73%	18%	0%
AL	102	0,60	0%	5%	39%	56%	0%
BA	417	0,53	0%	13%	59%	29%	0%
MA	217	0,39	8%	48%	33%	11%	0%
PI	224	0,33	5%	72%	21%	2%	0%
SE	75	0,56	0%	5%	59%	36%	0%
AC	22	0,67	0%	0%	23%	77%	0%
AP	16	0,60	0%	0%	44%	56%	0%
PA	144	0,55	0%	6%	69%	25%	0%
RR	15	0,57	0%	0%	73%	27%	0%
TO	139	0,38	0%	66%	34%	0%	0%
ES	78	0,49	0%	23%	60%	17%	0%
RJ	92	0,49	0%	25%	63%	12%	0%
SP	645	0,42	0%	36%	60%	4%	0%
RS	499	0,45	0%	28%	67%	5%	0%
SC	295	0,53	0%	8%	66%	26%	0%

Tabela 30 - Resultado da modelagem do Risco Climático 12

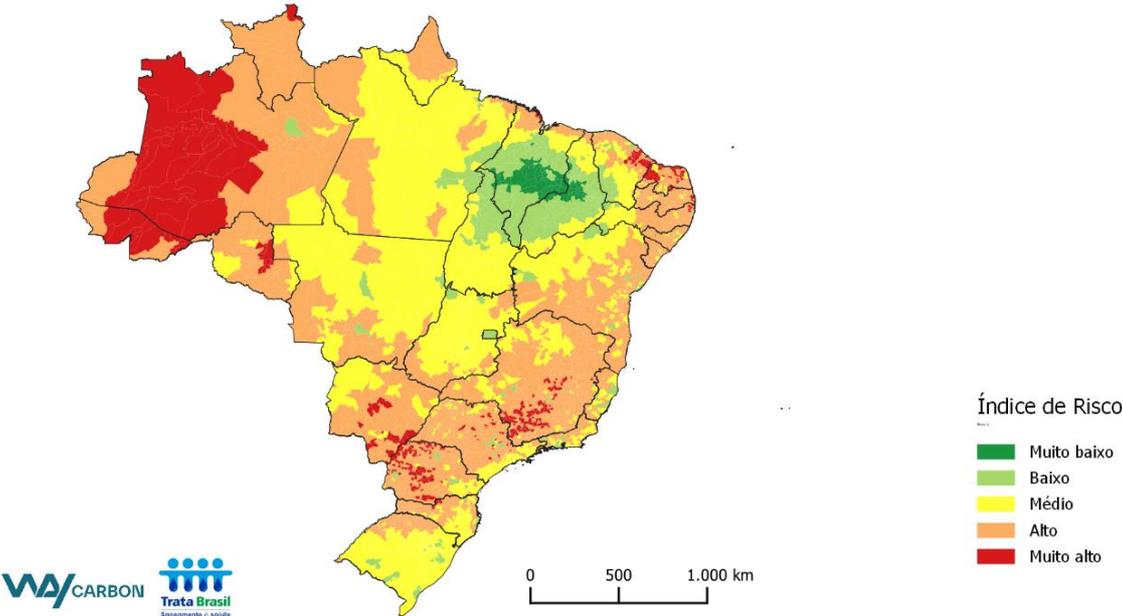
<b>Ameaça Climática</b>	Ondas de calor
<b>Sistema</b>	Esgotamento sanitário
<b>Etapa do sistema</b>	Estação de tratamento de efluentes
<b>Impactos no sistema</b>	Redução da eficiência de tratamento e sobrecarga das infraestruturas; danos físicos às infraestruturas
<b>Esfera de Impacto</b>	População
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	<b>HW.N</b> - Número de ondas de calor registradas no ano
<b>Variável Suporte</b>	Quantidade de ETEs
<b>Resultado da Modelagem</b>	
	
<b>Discussão</b>	
<p>As ondas de calor no Brasil, agravadas pelos efeitos da mudança do clima, apresentam desafios diretos sobre a operação de ETEs. Nestes eventos de altas temperaturas, o maior consumo de água pela população gera maior volume de efluentes a serem processados, e as estações podem sofrer redução na eficiência de tratamento pela sobrecarga. O desgaste físico de equipamentos e infraestruturas pelas elevadas temperaturas também podem levar a necessidades de manutenções mais frequentes, e aumento de custos.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles que possuem menores quantidade de estações de tratamento de efluentes e que se localizam em regiões onde há mais ondas de calor ao ano. É notável uma predominância de risco alto em boa parte do Brasil, mas há realce de riscos muito altos em parte do Amazonas, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Rio Grande do Norte e Ceará.</p>	

Tabela 31 – Distribuição de resultados do Risco Climático 12 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
AC	22	0,80	0%	0%	0%	45%	55%
AM	62	0,75	0%	2%	6%	48%	44%
PR	399	0,73	0%	1%	9%	64%	26%
RN	167	0,74	0%	1%	9%	65%	25%
MS	79	0,72	0%	0%	10%	67%	23%
RO	52	0,70	0%	0%	6%	75%	19%
CE	184	0,60	0%	11%	41%	36%	13%
MG	853	0,71	0%	1%	8%	79%	12%
RR	15	0,71	0%	0%	0%	93%	7%
PE	184	0,68	0%	4%	14%	77%	5%
PB	223	0,72	0%	0%	5%	91%	4%
SP	645	0,67	0%	1%	14%	81%	4%
MA	217	0,36	22%	41%	20%	15%	2%
SC	295	0,64	0%	1%	35%	62%	1%
DF	1	0,25	0%	100%	0%	0%	0%
GO	246	0,54	0%	1%	78%	20%	0%
MT	141	0,57	0%	3%	60%	38%	0%
AL	102	0,70	0%	1%	7%	92%	0%
BA	417	0,63	0%	2%	25%	73%	0%
PI	224	0,35	12%	55%	29%	4%	0%
SE	75	0,68	0%	0%	7%	93%	0%
AP	16	0,65	0%	0%	31%	69%	0%
PA	144	0,53	0%	11%	70%	19%	0%
TO	139	0,41	1%	44%	52%	3%	0%
ES	78	0,61	0%	12%	26%	63%	0%
RJ	92	0,60	0%	9%	28%	63%	0%
RS	499	0,57	0%	3%	63%	34%	0%

### 4.2.2.3. Secas Meteorológicas

Os riscos climáticos de secas meteorológicas em sistemas de esgotamento sanitário são apresentados nas Tabelas 32 a 35.

Tabela 32 - Resultado da modelagem do Risco Climático 13

<b>Ameaça Climática</b>	Secas meteorológicas
<b>Sistema</b>	Esgotamento sanitário
<b>Etapa do sistema</b>	Estação de tratamento de efluentes
<b>Impactos no sistema</b>	Redução da eficiência de tratamento
<b>Esfera de Impacto</b>	População
<b>Parâmetros do Risco Climático</b>	
<b>Variável Climática</b>	CDD – Dias consecutivos sem chuva no ano
<b>Variável Suporte</b>	Carga de esgoto gerada; Quantidade de ETES
<b>Resultado da Modelagem</b>	
<b>Discussão</b>	
<p>No contexto brasileiro, a intensificação dos períodos de secas pode comprometer a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos utilizados para diluir e tratar os efluentes lançados. Estes períodos de seca podem demandar ajustes operacionais e redução na eficiência das ETES. Em regiões com maior carga de esgoto gerada e com quantidade insuficiente de ETES, a população pode ser afetada pelo aumento de contaminação de cursos d'água e possíveis problemas de saúde pública.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles que possuem maior carga de esgoto gerada, menor quantidade de ETES e que se localizam em regiões onde há tendência de agravamento dos períodos de seca. É notável uma predominância de risco médio a alto na região central do país, especialmente no noroeste de Minas Gerais, Goiás, noroeste da Bahia, Ceará e Rio Grande do Norte.</p>	

Tabela 33 – Distribuição de resultados do Risco Climático 13 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
CE	184	0,56	0%	0%	81%	18%	1%
BA	417	0,40	0%	58%	40%	2%	0%
DF	1	0,50	0%	0%	100%	0%	0%
GO	246	0,52	0%	0%	89%	11%	0%
MS	79	0,39	0%	58%	42%	0%	0%
MT	141	0,46	0%	6%	92%	2%	0%
AL	102	0,35	0%	86%	13%	1%	0%
MA	217	0,50	0%	0%	99%	1%	0%
PB	223	0,52	0%	6%	90%	4%	0%
PE	184	0,45	0%	38%	59%	3%	0%
PI	224	0,54	0%	0%	98%	2%	0%
RN	167	0,55	0%	1%	88%	11%	0%
SE	75	0,34	0%	99%	1%	0%	0%
AC	22	0,35	0%	95%	5%	0%	0%
AM	62	0,27	0%	82%	5%	0%	0%
AP	16	0,40	0%	63%	38%	0%	0%
PA	144	0,44	0%	18%	82%	0%	0%
RO	52	0,41	0%	23%	77%	0%	0%
RR	15	0,28	0%	93%	7%	0%	0%
TO	139	0,48	0%	0%	99%	1%	0%
ES	78	0,29	0%	96%	0%	0%	0%
MG	853	0,38	0%	66%	33%	1%	0%
RJ	92	0,30	0%	99%	0%	0%	0%
SP	645	0,40	0%	52%	48%	0%	0%
PR	399	0,34	0%	85%	15%	0%	0%
RS	499	0,25	0%	98%	0%	0%	0%
SC	295	0,24	0%	93%	0%	0%	0%

Tabela 34 - Resultado da modelagem do Risco Climático 14

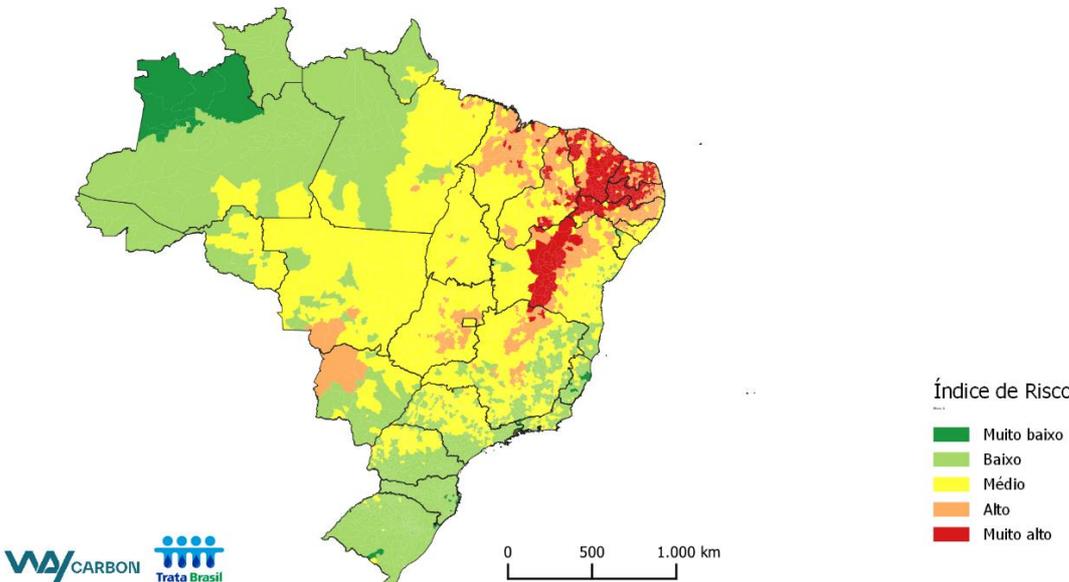
Risco Climático 14	
Ameaça Climática	Secas meteorológicas
Sistema	Esgotamento sanitário
Etapa do sistema	Lançamento
Impactos no sistema	Contaminação de águas superficiais
Esfera de Impacto	População
Parâmetros do Risco Climático	
Variável Climática	CDD – Dias consecutivos sem chuva no ano
Variável Suporte	Balanco Qualitativo ANA; Quantidade de ETES
Resultado da Modelagem	
 <p>Índice de Risco</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Muito baixo</li> <li>Baixo</li> <li>Médio</li> <li>Alto</li> <li>Muito alto</li> </ul> <p>0 500 1.000 km</p> <p>WV CARBON Trata Brasil</p>	
Discussão	
<p>As secas prolongadas são um desafio crítico para o setor de saneamento no Brasil, afetando também a qualidade de vida da população. Nestes eventos, o fluxo dos rios e corpos d'água pode diminuir, prejudicando a capacidade de diluição e aumentando a concentração de poluentes nas águas superficiais. O risco de contaminação e degradação ambiental é ainda maior em áreas onde o balanço hídrico qualitativo já é desfavorável e onde a infraestrutura de tratamento é limitada, com quantidade insuficiente de ETES.</p> <p>Os municípios que apresentaram maiores índices de risco são aqueles que possuem pior balanço qualitativo, menor quantidade de ETE e que se localizam em regiões onde há mais dias consecutivos sem chuva. É notável uma predominância de risco alto na região central do país, especialmente na região do Pantanal, além de municípios em Goiás, norte de Minas Gerais, Maranhã e Piauí. Porém, a predominância de municípios com risco muito alto se dá nos estados da Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco.</p>	

Tabela 35 – Distribuição de resultados do Risco Climático 14 por UF

UF	Qtd. de municípios	Índice Médio de Risco	Percentual de municípios com risco na UF				
			Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
CE	184	0,85	0%	0%	5%	23%	72%
RN	167	0,85	0%	0%	2%	27%	71%
PB	223	0,83	0%	0%	5%	31%	64%
PI	224	0,70	0%	0%	30%	46%	24%
PE	184	0,69	0%	2%	16%	61%	21%
BA	417	0,56	0%	9%	62%	15%	13%
MA	217	0,66	0%	0%	30%	63%	7%
PA	144	0,47	0%	18%	68%	13%	1%
MG	853	0,45	0%	32%	59%	8%	1%
DF	1	0,50	0%	0%	100%	0%	0%
GO	246	0,55	0%	0%	70%	30%	0%
MS	79	0,40	0%	63%	29%	8%	0%
MT	141	0,45	0%	9%	88%	3%	0%
AL	102	0,56	0%	3%	69%	28%	0%
SE	75	0,54	0%	4%	95%	1%	0%
AC	22	0,34	0%	100%	0%	0%	0%
AM	62	0,28	13%	82%	5%	0%	0%
AP	16	0,39	0%	69%	31%	0%	0%
RO	52	0,42	0%	23%	75%	2%	0%
RR	15	0,27	0%	100%	0%	0%	0%
TO	139	0,49	0%	1%	95%	4%	0%
ES	78	0,32	4%	78%	18%	0%	0%
RJ	92	0,37	2%	52%	46%	0%	0%
SP	645	0,43	0%	37%	62%	1%	0%
PR	399	0,40	0%	51%	49%	0%	0%
RS	499	0,31	1%	95%	4%	0%	0%
SC	295	0,29	4%	96%	0%	0%	0%

## 5. Conclusões

O estudo de riscos climáticos no setor de saneamento no Brasil revela uma situação que exige atenção e adaptação diante das mudanças climáticas, especialmente em regiões que já enfrentam vulnerabilidades sociais, ambientais e de infraestrutura de saneamento.

Os cenários climáticos do IPCC indicam que o país será cada vez mais impactado por eventos de ondas de calor, secas prolongadas e tempestades intensas, que colocam em risco a eficiência dos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário e, conseqüentemente, a saúde e a segurança hídrica da população. De acordo com os resultados apresentados, algumas ameaças climáticas se destacam por região do país, destacadas na ilustração da Figura 9.

Figura 9 - Principais ameaças climáticas para o setor de saneamento por região do Brasil



Nas secas prolongadas, há redução na quantidade e qualidade da água disponível, o que sobrecarrega os sistemas de captação e tratamento e pode aumentar os riscos para a população. Em eventos de ondas de calor, os efeitos podem ser agravados pelo aumento da demanda de água e perdas por evaporação nos mananciais, com riscos de racionamento ou limitação do acesso aos serviços de saneamento básico pela população. Já nas tempestades, aumentam as chances de contaminação dos recursos hídricos, o que pode aumentar a incidência de doenças transmitidas pela água; além da sobrecarga das estações de tratamento e infraestrutura de distribuição, com risco de interrupção destes serviços.

Para enfrentamento dos riscos climáticos, torna-se necessário que tanto o poder público quanto as empresas de saneamento adotem estratégias de adaptação climática. Ações que contribuem para redução dos riscos incluem o fortalecimento da infraestrutura de captação e tratamento de água e esgoto, a modernização dos sistemas de monitoramento e controle de qualidade da água e investimentos em tecnologia, como o reúso, contribuindo para diversificação das fontes de água. Ainda, políticas públicas que promovem a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos e incentivo a práticas de conservação e reúso de água são indispensáveis para mitigar os impactos das mudanças climáticas e garantir a segurança hídrica da população.

## 6. Referências

BRANDS, S.; HERRERA, S.; SAN-MARTÍN, D.; GUTIÉRREZ, J. M. Validation of the ENSEMBLES global climate models over southwestern Europe using probability density functions, from a downscaling perspective. *Climate Research*, v. 48, n. 2-3, p. 145-161, 2011.

EYRING, V. et al. Taking climate model evaluation to the next level. *Nature Climate Change*, v. 9, n. 2, p. 102–110, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0355-y>.

HERGER, N. et al. Selecting a climate model subset to optimise key ensemble properties. *Earth System Dynamics*, v. 9, n. 1, p. 135–151, fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/esd-9-135-2018>.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3-33 p. (Summary for Policymakers). ISBN 9781009325844.

MCAVANEY, B. J. et al. Model evaluation. In: *Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of WG1 to the third assessment report of the IPCC (TAR)*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p. 471-523.

MORADIAN, S.; AKBARI, M.; IGLESIAS, G. Optimized hybrid ensemble technique for CMIP6 wind data projections under different climate-change scenarios. Case study: United Kingdom. *Science of The Total Environment*, v. 826, p. 154124, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154124>.

PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H.; KUMAR, T. L. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *Journal of Arid Environments*, v. 139, p. 26–40, abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>.

STAINFORTH, D. A. et al. Issues in the interpretation of climate model ensembles to inform decisions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 365, n. 1857, p. 2163–2177, jun. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2073>.

STOTT, P. A.; FOREST, C. E. Ensemble climate predictions using climate models and observational constraints. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 365, n. 1857, p. 2029–2052, jun. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2075>).

THRASHER, B. et al. NASA global daily downscaled projections, CMIP6. *Scientific Data*, v. 9, n. 1, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>).

## ANEXO I – Normalização das variáveis do estudo

O índice de abastecimento de água foi classificado considerando que coberturas mais altas representam menores riscos (Tabela 36).

Tabela 36 - Classificação Intervalos Índice de Atendimento de Abastecimento de Água

Intervalo	Risco
0 – 20%	1,0
20% - 40%	0,8
40% - 60%	0,6
60% - 80%	0,4
80% - 100%	0,2

Fonte: Autores

Com relação ao índice de segurança hídrica urbana, quanto maior o índice, menor seria o risco (Tabela 37).

Tabela 37 – Classificação ISHU

Valor	Risco
Máxima	0,2
Alta	0,4
Média	0,6
Baixa	0,8
Mínima	1,0

Fonte: Autores.

A ótica de avaliação da quantidade de Estações de Tratamento de Água esta relacionada com a capacidade que o município teria em lidar com eventos extremos, sem interromper o serviço por completo, sendo assim, aqueles municípios com mais quantidade de ETAs teriam menor risco associado (Tabela 38).

Tabela 38 - Classificação da quantidade de ETAs

Intervalo	Risco
0	1,0
1	0,8
2 – 4	0,6
4 – 8	0,4
8 - máximo	0,2

Fonte: Autores.

A classificação do manancial de abastecimento variou de acordo com o impacto que estava sendo analisado. Para o risco de afloramento de cianobactérias, foi adotado o valor zero para o manancial subterrâneo, devido à impossibilidade de floração de cianobactérias em águas subterrâneas (Tabela 39). Em contrapartida, para outros impactos o valor adotado para água subterrânea não foi zero (Tabela 40).

Tabela 39 - Classificação do manancial de abastecimento para os riscos de afloramento de cianobactérias

Tipo de manancial	Risco
Superficial	1,0
Superficial / Subterrânea	0,6
Subterrânea	0

Fonte: Autores.

Tabela 40 - Classificação do manancial de abastecimento para outros impactos

Tipo de manancial	Risco
Superficial	1,0
Superficial / Subterrânea	0,6
Subterrânea	0,2

Fonte: Autores.

A densidade demográfica está associada à uma maior concentração de pessoas no município, que pode representar problemas em caso de eventos climáticos extremos, sendo assim os valores foram reclassificados, com maiores densidades associadas à maiores riscos. É importante notar que o último intervalo é bem elevado, com a finalidade de reduzir as discrepâncias da maioria dos municípios com grandes centros urbanos, como a região de metropolitana de São Paulo e Rio de Janeiro, que possuem densidades demográficas muito elevadas (Tabela 41).

Tabela 41 - Classificação da densidade demográfica

Intervalo (hab/km <sup>2</sup> )	Risco
0 – 9,1	0,2
9,1 – 18,8	0,4
18,8 – 31,9	0,6
31,9 – 69,1	0,8
69,1 – 13416,8	1,0

Fonte: Autores

Quanto a carga de esgoto, seja lançada (Tabela 42) ou gerada (Tabela 43), o índice de risco estava associado a valores mais altos de carga orgânica.

Tabela 42 - Classificação de carga de esgoto lançada

Intervalo (kg DBO/dia)	Risco
0 – 3.104	0,2
3.104 – 11.796	0,4
11.796 – 30.460	0,6
30.460 – 143.905	0,8
143.905 – máximo	1,0

Fonte: Autores.

Tabela 43 - Classificação de carga de esgoto gerada

Intervalo (kg DBO/dia)	Risco
0 – 150	0,2
150 – 300	0,4
300 – 2.000	0,6
2.000 – 50.000	0,8
50.000 – máximo	1,0

Fonte: Autores.

O balanço qualitativo foi classificado a partir do valor de carga orgânica assimilável (Tabela 44). Valores cada vez mais altos indicam a sobrecarga do corpo receptor, indicando menor capacidade de autodepuração de novos lançamentos de carga orgânica.

Tabela 44 - Classificação do balanço qualitativo da ANA

Intervalo	Risco
0 – 0,5 (Ótima)	0,2
0,5 – 1,0 (Boa)	0,4
1,0 – 5,0 (Razoável)	0,6
5,0 – 20,0 (Ruim)	0,8
20,0 – máximo (Péssima)	1,0

Fonte: Autores.

O balanço quantitativo foi classificado em relação ao comprometimento do manancial, com valores mais altos representando o nível de comprometimento da vazão Q95 do manancial e a demanda de

consumo (Tabela 45). Valores mais altos representam uma menor capacidade do manancial para suprir a demanda de água em resposta à determinados eventos climáticos.

Tabela 45 - Classificação do balanço quantitativo da ANA

Valor	Risco
1 (Baixo)	0,2
2 (Mediano)	0,4
3 (Alto)	0,6
4 (Muito alto)	0,8
5 e 6 (Crítico e Intermitente)	1,0

Fonte: Autores.

O índice de coleta de esgoto foi reclassificado seguindo a mesma lógica do índice de abastecimento de água, quanto maior o atendimento, menor seriam os riscos associados (Tabela 46).

Tabela 46 - Classificação do índice de coleta de esgoto

Intervalo	Risco
0 – 20%	1,0
20% - 40%	0,8
40% - 60%	0,6
60% - 80%	0,4
80% - 100%	0,2

Fonte: Autores

A população absoluta foi reclassificada considerando que locais com populações mais elevadas estariam mais suscetíveis a riscos a partir de um evento extremo (Tabela 47).

Tabela 47 - Classificação da população

Intervalo	Risco
0 – 20.000	0,17
20.000 – 100.000	0,33
100.000 – 200.000	0,50
200.000 – 500.000	0,67
500.000 – 1.000.000	0,83
1.000.000 - máximo	1,00

**Fonte: Autores**

A classificação feita em cima da quantidade de estações de tratamento de efluentes (ETE) seguiu a mesma lógica da quantidade de estações de tratamento de água, considerando que municípios com maior número de ETes estariam mais adaptados à eventos climáticos extremos (tabela 48).

Tabela 48 - Classificação da quantidade de estações de tratamento de efluentes

Intervalo	Risco
0	1,0
1	0,8
2 - 4	0,6
4 - 6	0,4
7 - máximo	0,2

**Fonte: Autores**

Por fim, o índice de atendimento por solução individual de esgotamento sanitário foi classificado considerando que locais que dependem mais dessas soluções, por geralmente se tratar de soluções de caráter simplificado, apresentam maiores riscos inerentes, conforme a tabela 49.

Tabela 49 - Classificação do índice de atendimento por solução individual de esgotamento sanitário

Intervalo	Risco
0 – 20%	0,2
20% – 40%	0,4
40% - 60%	0,6
60% - 80%	0,8
80% - 100%	1,0

**Fonte: Autores**

## ANEXO II – Identificação de Riscos Climáticos com GT

A tabela 50 apresenta a lista de impactos que foram identificados nas reuniões com GT, para o sistema de saneamento de água, antes da consolidação no material final.

Tabela 50 – Resultado de discussão com o GT no levantamento de riscos climáticos no sistema de água

AMEAÇA CLIMÁTICA	DESCRIÇÃO DO IMPACTO
Ondas de Calor	Aumento abrupto da demanda por energia pode causar uma interrupção deste serviço.
Ondas de Calor	Aumento da deterioração da infraestrutura
Ondas de Calor	Sobrecarga nas estruturas, com aumento de uso de bombas, por exemplo, acima da capacidade dos equipamentos.
Ondas de Calor	Favorecimento da sobrevivência de patógenos na rede de abastecimento de água.
Ondas de Calor	Afloramento de cianobactérias em lagos e reservatórios.
Ondas de Calor	Aumento na concentração de poluentes pela redução do volume d'água nos reservatórios.
Ondas de Calor	Aumento da evaporação dos reservatórios de água.
Secas	Demanda mais alta por águas subterrâneas, acima da capacidade de recarga.
Secas	Conflito pelo uso da água
Secas	Aumento da demanda por água para atividades agrícolas
Secas	Aumento da demanda por água para geração de energia
Secas	Afloramento de cianobactérias em lagos e reservatórios.
Secas	Redução da vazão nos corpos hídricos pode levar ao aumento da concentração de poluentes direcionados para ETAs.
Secas	Racionamento na rede de abastecimento de água pode levar os consumidores a buscarem alternativas impróprias para o consumo
Secas	Vazões pouco pressurizadas, ou com interrupção de distribuição, podendo sofrer com intrusão de águas subterrâneas nas redes de distribuição.
Secas	Isolamento de comunidades e alteração no padrão de atendimento em regiões afastadas e/ou dependentes de meios hídricos de transporte.

Secas	As estações de tratamento recebem fluxos aquém da capacidade projetada.
Secas	Aumento do custo para produção (ativação de fontes alternativas, aumento da manutenção da rede)
Secas	Redução da disponibilidade de água para captação
Secas	Aumento do custo para produção
Secas	Mudança de comportamento do cliente: busca por fontes alternativas, redução do consumo após campanha de economia
Secas	Redução da oferta de água tratada, perda de faturamento por redução na produção (Rodízio)
Tempestades	Mudança de comportamento da população, devido às falhas nos sistemas, levando a riscos de saúde
Tempestades	Vazões pouco pressurizadas, ou com interrupção de distribuição, podendo sofrer com intrusão de águas subterrâneas nas redes de distribuição.
Tempestades	Contaminação dos recursos hídricos pela mistura de componentes durante as cheias
Tempestades	Destruição das estruturas de saneamento, como a rede de coleta ou unidades das ETAs.
Tempestades	Erosão de áreas e comprometimento das estruturas
Tempestades	Aumento da deterioração da infraestrutura
Tempestades	Interrupção no funcionamento e até inutilização de equipamentos não preparados para funcionamento em níveis mais elevados de cheia
Tempestades	Rompimento de barragens
Tempestades	Interrupção do sistema de tratamento
Tempestades	As estações de tratamento recebem fluxos que excedem suas capacidades projetadas
Tempestades	Aumento do teor de sólidos suspensos na água bruta
Tempestades	Perda de receita por impossibilidade de fornecimento de água tratada, devido à danos na infraestrutura

A tabela 51 apresenta a lista de impactos que foram identificados nas reuniões com GT, para o sistema de esgoto, antes da consolidação no material final.

Tabela 51 – Resultado de discussão com o GT no levantamento de riscos climáticos no sistema de esgoto

AMEAÇA CLIMÁTICA	DESCRIÇÃO DO IMPACTO
Ondas de Calor	Aumento da deterioração da infraestrutura
Ondas de Calor	Sobrecarga nas estruturas, com aumento de uso de bombas, por exemplo, acima da capacidade dos equipamentos.
Ondas de Calor	Aumento abrupto da demanda por energia, o que pode causar uma interrupção deste serviço.
Ondas de Calor	Sobrecarga das estruturas pelo aumento de consumo d'água, acima da capacidade projetada para o equipamento.
Ondas de Calor	Aumento da geração de odores na rede de esgoto
Secas	Corpos receptores terão menos capacidade de diluição
Secas	Aumento da corrosão nas redes de esgoto.
Secas	Impedimento de sistemas que utilizam a água como agente de transporte
Secas	Isolamento de comunidades e alteração no padrão de atendimento em regiões afastadas e dependentes de meios hídricos de transporte
Secas	Redução da qualidade do efluente final após o tratamento devido ao aumento da concentração e/ou variabilidade do fluxo de vazão de entrada.
Tempestades	Derramamento dos canais de esgoto a céu aberto e aumento da incidência de doenças, seja por sobrecarga na rede ou impedimento físico.
Tempestades	Transbordo de estações de tratamento de efluentes
Tempestades	Colapso de estruturas individuais de tratamento de esgoto
Tempestades	Destruição das estruturas de saneamento, como as tubulações do sistema de coleta, unidades das ETEs.
Tempestades	Aumento da deterioração da infraestrutura
Tempestades	Impedimento da chegada de suprimentos para as unidades de tratamento e/ou dos operadores.
Tempestades	Mudança de comportamento da população, devido às falhas nos sistemas, levando a riscos de saúde
Tempestades	Danos/impedimento de estruturas pressurizadas (Elevatórias/linhas de recalque).
Tempestades	Impedimento da coleta de lodo e/ou o material a ser tratado
Tempestades	Deposição de sólidos grosseiros nas redes de esgotos e consequente redução da área transversal das tubulações.
Tempestades	Rompimento nas tubulações de esgoto devido à mudança da umidade de solo.
Tempestades	Interrupção do sistema de tratamento
Tempestades	Redução do tempo de detenção nas unidades de tratamento de esgoto

## ANEXO III – Análise das Variações Climáticas

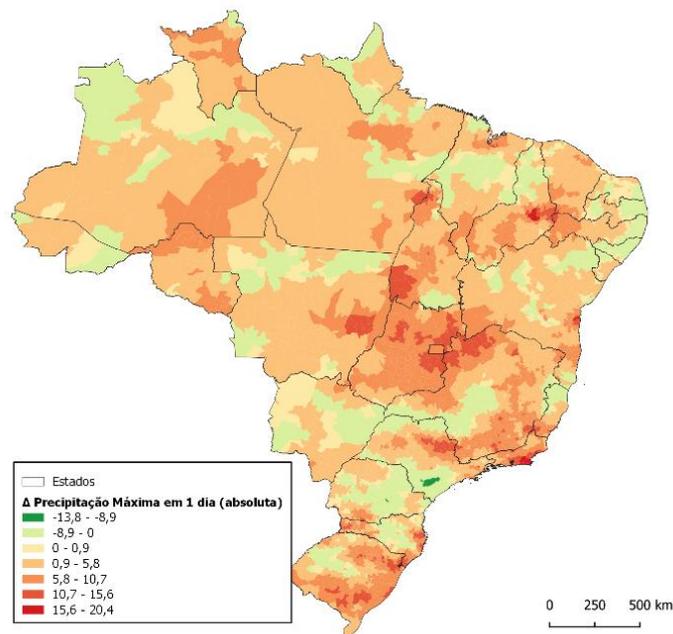
Além da modelagem considerando os valores absolutos das projeções das variáveis climáticas, algumas regiões apresentam maiores variações dos padrões climáticos entre o período histórico e o cenário avaliado, para o horizonte de 2050, que são identificadas a seguir.

### Tempestades

#### *Precipitação máxima em um dia (RX1)*

É notável observar um aumento expressivo de até 20,4 milímetros de precipitação máxima em um dia em diversas regiões do Brasil, com destaque para o Estado de Goiás, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, Tocantins e Minas Gerais (Figura 10). Este aumento pode trazer impactos significativos, visto que muitos municípios não estão preparados para receber grandes volumes de precipitação em tão pouco tempo, como já é observado nos últimos anos no Brasil.

Figura 10 - Variação da precipitação máxima em um dia entre o período histórico e o cenário em 2050



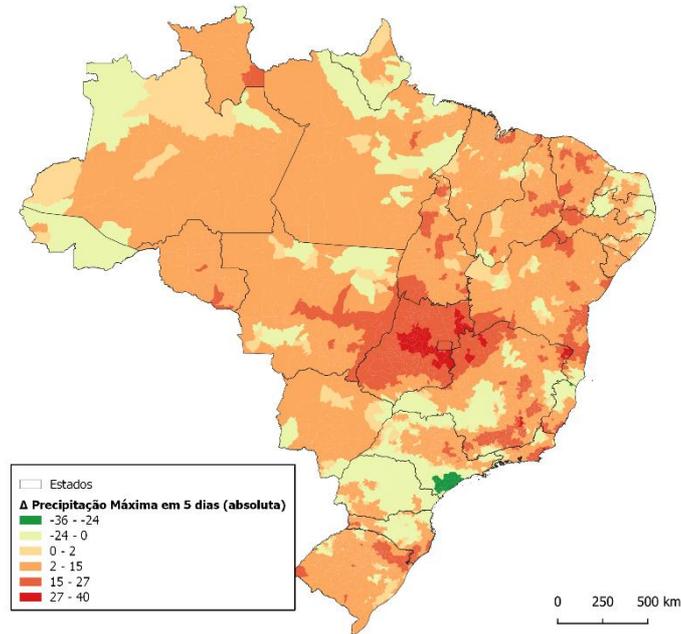
Fonte: Adaptado de CMIP6 por autores

#### *Precipitação máxima em cinco dias (RX5)*

Sob a ótica da precipitação máxima em cinco dias, o estado que apresenta as maiores variações é Goiás, com aumento de até 40 milímetros de precipitação acumulada em 5 dias. Outras regiões também despontam, com variações de até 27 milímetros, como a Zona da Mata de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia (Figura 11).

Este aumento no volume de precipitação acumulada em 5 dias pode demandar esforços adicionais no tratamento de água, dado o carreamento constante de partículas para os mananciais, aumentando a turbidez e a quantidade de sólidos em suspensão na água bruta.

Figura 11 - Variação da precipitação máxima em cinco dias entre o período histórico e o cenário em 2050



Fonte: Adaptado de CMIP6 por autores

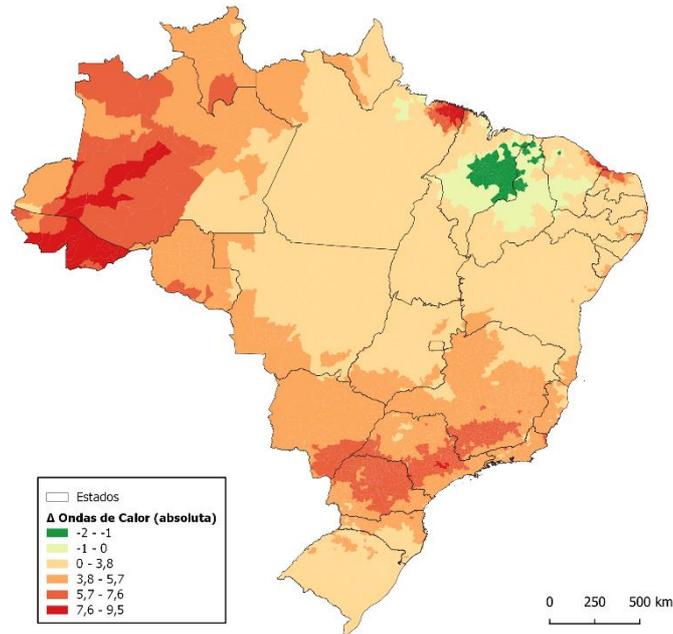
## Ondas de calor

Ao olhar para a variação da incidência de ondas de calor (

Figura 12), é possível notar uma redução na parte central dos estados do Maranhão e Piauí e um aumento, quase que em todo o Brasil, de até 4 ondas de calor ao ano. Destaca-se os estados do Amazonas, Acre e boa parte do Mato Grosso do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais e a região nordeste do Pará e norte do Ceará e Rio Grande do Norte com aumentos de até 9 ondas de calor ao ano.

Este aumento pode representar um maior consumo de água nessas regiões e no aumento da deterioração das infraestruturas de água e esgoto, além de reforçar problemas já observados, como a geração de odores nos sistemas de esgotos e a proliferação de cianobactérias em mananciais.

Figura 12 - Variação do número de ondas de calor entre o período histórico e o cenário em 2050



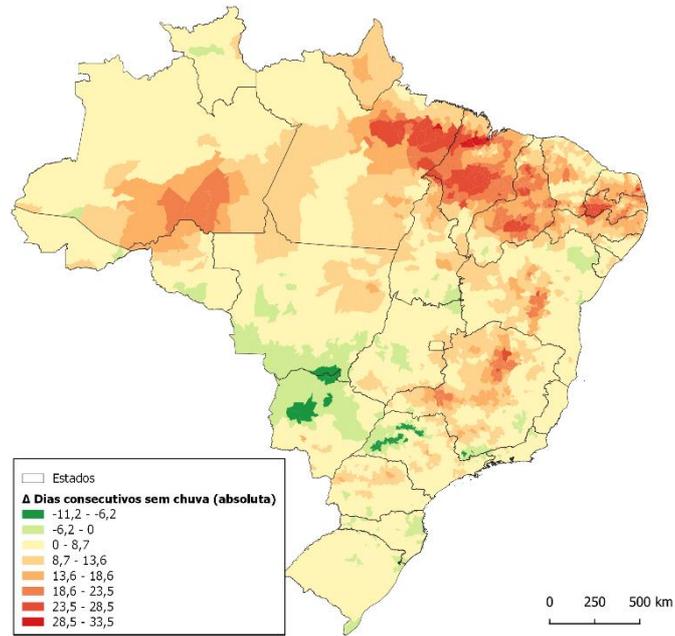
Fonte: Adaptado de CMIP6 por autores

## Secas Meteorológicas

Ao olhar para a variação de dias consecutivos sem chuva (Figura 13), é possível notar uma redução do período de seca em parte do centro-oeste e interior de São Paulo. Porém, boa parte do país pode ficar com até 9 dias a mais sem chuva durante o período de seca, além de boa parte do nordeste e norte e regiões dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Santa Catarina que apresentam um aumento de até 30 dias sem chuva adicionais ao ano.

Este resultado levará a uma redução na disponibilidade de água dos mananciais e o aumento do conflito de uso dos recursos hídricos, aumentando os custos de produção de água, alimentos e energia.

Figura 13 - Variação de dias consecutivos sem chuva entre o período histórico e o cenário em 2050



Fonte: Adaptado de CMIP6 por autores

# As Mudanças Climáticas no Setor de Saneamento

Como secas, tempestades e ondas de calor  
Impactam o consumo de água?

[WAYCARBON.COM](https://waycarbon.com)

 @WayCarbon

 /waycarbon

 WAYCARBON