

IMPACTOS E RISCOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NO SETOR PORTUÁRIO



Fonte site ANTAQ

Produto 3 – Levantamento das ameaças climáticas no setor portuário costeiro brasileiro

WayCarbon

Elaborado por:

WayCarbon

Essa publicação foi realizada por uma equipe formada por consultores independentes sob a coordenação da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do projeto Apoio a Brasil na Implementação da sua Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (ProAdapta).

Este projeto foi pactuado no âmbito da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da parceria entre o Ministério do Meio Ambiente do Brasil e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), no âmbito da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI, sigla em alemão), do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU, sigla em alemão).

Todas as opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a posição da GIZ e do MMA. Este documento não foi submetido à revisão editorial.

MMA

Secretaria de Clima e Relações Internacionais (SCRI)
Departamento de Clima

EQUIPE TÉCNICA – GIZ

Ana Carolina Câmara (Coordenação)
Eduarda Freitas (Assessora Técnica)
Pablo borges (Assessor Técnico)

EQUIPE TÉCNICA – ANTAQ

Superintendência de Desempenho, Desenvolvimento e Sustentabilidade – SDS
José Renato Ribas Fialho
Gerência de Desenvolvimento e Estudos – GDE
José Gonçalves Moreira Neto
Gerência de Meio Ambiente e Sustentabilidade – GMS
Auxiliadora do Rego Borges

Equipe INPE

Jean Ometto
Lincoln Alves

Ministério do Meio Ambiente

Esplanada dos Ministérios, Bloco B, Brasília/DF, CEP 70068-901
Telefone: + 55 61 2028-1206

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sede da GIZ: Bonn e Eschborn
GIZ Agência Brasília
SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501
Ed. Brasília Trade Center 70.711-902 Brasília/DF
T + 55-61-2101-2170
E giz-brasilien@giz.de
www.giz.de/brasil

A encargo de:

Ministério Federal do Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha

BMU Bonn:
Robert-Schuman-Platz 3 53175 Bonn, Alemanha
T +49 (0) 228 99 305-0
Diretora de Projeto:

Ana Carolina Câmara

T:+55 61 9 99 89 71 71
T +55 61 2101 2098
E ana-carolina.camara@giz.de

Brasília, outubro de 2021



IMPACTOS E RISCOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NO SETOR PORTUÁRIO

P3 – Levantamento das ameaças climáticas no setor portuário costeiro brasileiro

Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável – GIZ no Brasil

Outubro – 2021

Versão 3.1



WWW.WAYCARBON.COM

CLIENTE	
PROJETO	GIZ20A
ENTREGÁVEL	Entregável P3 - Frequência das ameaças climáticas no setor portuário costeiro brasileiro
AUTORES	<p>WAYCARBON</p> <p>Melina Amoni; melina.amoni@waycarbon.com</p> <p>Sergio Margulis; sergio.margulis@waycarbon.com</p> <p>Marina Lazzarini; marina.lazzarini@waycarbon.com</p> <p>Natalie Unterstell; natalieunterstell@gmail.com</p> <p>Franciele Barros; franciele.barros@waycarbon.com</p> <p>Carlos Guimarães; carlos.quimaraes@waycarbon.com</p> <p>Lis Vale; lis.vale@waycarbon.com</p> <p>Dawber Batista; dawber.batista@waycarbon.com</p> <p>Natalia D'Alessandro; natalia.dalessandro@waycarbon.com</p> <p>Marcus Vinicius Ferreira; engenharia.nca@gmail.com</p>
COLABORADORES	<p>GIZ</p> <p>Eduarda Freitas; eduarda.freitas@giz.de</p> <p>Pablo Borges; pablo.borges@giz.de</p> <p>Ana Carolina Camara; ana-carolina.camara@giz.de</p> <p>ANTAQ</p> <p>José Gonçalves Moreira Neto; jose.moreira@antaq.gov.br</p> <p>Anderson Paz; anderson.paz@antaq.gov.br</p> <p>Alessandro Ramalho; alessandro.ramalho@antaq.gov.br</p> <p>INPE</p> <p>Lincoln Alves; lincoln.alves@inpe.br</p>

HISTÓRICO DO DOCUMENTO

Nome do documento	Data	Natureza da revisão
Produto3_12ABR-V1.0	12/04/2021	Primeira versão para comentários
Produto3_18JUN-V2.0	18/06/2021	Segunda versão para comentários
Produto3_30JUN_V3.0_final	30/06/2021	Versão final
Produto3_05OUT_V3.1_final	05/10/2021	Versão final

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Impactos em áreas costeiras observados e projetados na América Central e América do Sul	7
Figura 2 - Análise da relevância das ameaças climáticas para o setor portuário da costa brasileira, baseados nas questões 11,17 e 22.....	10
Figura 3 - Fluxograma das etapas metodológicas.....	12
Figura 4 - Precipitação média anual dos modelos do projeto CORDEX (1961-1990). 15	
Figura 5 – Exemplificação da análise do indicador de aumento do nível do mar.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise da relevância das ameaças climáticas para o setor portuário da costa brasileira, baseado na questão 9.	9
Tabela 2 - Modelos climáticos utilizados e os respectivos centros de desenvolvimento	16
Tabela 3 - Escala para padronização dos dados	23
Tabela 4 - Análise de tendência do índice de extremo climático RX1day no período de 1981 a 2020.....	25
Tabela 5 - Análise de tendência do índice de extremo climático R99p no período de 1981 a 2020.....	26
Tabela 6 - Análise de tendência do índice de extremo climático Wx90p no período de 1979 a 2014.....	27
Tabela 7 - Cenário de mudança do clima para tempestade por porto	30
Tabela 8 - Cenário de mudança do clima para vendavais por porto	31
Tabela 9 - Indicador de aumento do nível do mar	32

Sumário

1	INTRODUÇÃO	4
1.1	OBJETIVO	5
2	AMEAÇAS CLIMÁTICAS QUE AFETAM O SETOR PORTUÁRIO BRASILEIRO. 6	
2.1	SELEÇÃO DAS AMEAÇAS	8
3	METODOLOGIA.....	12
3.1	BASE DE DADOS	12
3.1.1	Dados Observacionais	13
3.1.2	Projeções climáticas.....	13
3.2	INDICADORES	17
3.2.1	Tempestades.....	17
3.2.2	Vendavais.....	19
3.2.3	Aumento do nível do mar	19
3.3	ANÁLISE DE TENDÊNCIA	21
3.4	CENÁRIOS DE MUDANÇA DO CLIMA.....	21
3.5	PADRONIZAÇÃO	23
4	RESULTADOS	24
4.1	ANÁLISE DE TENDÊNCIA	24
4.1.1	Tempestades.....	25
4.1.2	Vendavais.....	27
4.2	CENÁRIOS DE MUDANÇA DO CLIMA.....	28
4.2.1	Tempestades.....	29
4.2.2	Vendavais.....	30
4.2.3	Aumento do nível do mar	32
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
6.1	RECOMENDAÇÕES E PRÓXIMOS PASSOS	35
	REFERÊNCIAS	36
	APÊNDICE I – VALIDAÇÃO DOS MODELOS	40
	APÊNDICE II – TESTES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA	43
	APÊNDICE III – ANÁLISE DO INDICADOR DE AUMENTO DO NÍVEL DO MAR	46

1 INTRODUÇÃO

A WayCarbon foi contratada pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, no contexto do projeto “Apoio ao Brasil na Implantação da Agenda Nacional de Adaptação à Mudança do Clima – PROADAPTA”, através da cooperação entre GIZ e ANTAQ, para prestação de serviços técnicos especializados, coordenação e execução das atividades referente ao Termo de Referência (TR) “Impactos e riscos da variabilidade climática no setor portuário costeiro”.

Este relatório apresenta o **Produto 3 (P3) – Frequência das Ameaças Climáticas**, seguindo requisitos do TR e escopo da Proposta Técnica enviada. De modo geral, o P3 compreende as respostas para as seguintes perguntas norteadoras:

(1) A frequência das ameaças climáticas está aumentando/diminuindo?

(2) A frequência dessas ameaças climáticas irá aumentar/diminuir no futuro?

De acordo com o (IPCC, 2014) a ameaça climática é definida como ocorrências potenciais de um evento natural ou impacto físico ou tendência a estes que podem causar danos. Importante ressaltar que as ameaças climáticas abordadas no presente estudo foram definidas levando-se em consideração (1) as informações fornecidas pelos portos brasileiros através de questionário eletrônico e (2) a disponibilidade de dados provenientes dos modelos climáticos utilizados. Esses pontos resultaram na seleção para avaliação das ameaças climáticas relacionadas às tempestades, vendavais e elevação do nível do mar, consideradas como de maior potencial de impacto aos portos da costa brasileira.

O P3 está estruturado em 5 capítulos, sendo:

- **Capítulo 1 - Introdução:** apresenta as questões norteadoras e o objetivo do relatório;
- **Capítulo 2 – Ameaças Climáticas que afetam o Setor Portuário Brasileiro:** apresenta uma breve contextualização das ameaças climáticas que possuem maior potencial de afetar os portos da costa brasileira, incluindo o processo de seleção das ameaças analisadas no presente estudo;

- **Capítulo 3 – Metodologia:** apresenta os procedimentos metodológicos para o cálculo dos indicadores de ameaça climática e para o desenvolvimento dos cenários de mudança do clima;
- **Capítulo 4 – Resultados:** apresenta a discussão dos resultados obtidos de forma geral, incluindo as respostas e as evidências baseadas nos dados;
- **Capítulo 5 – Considerações Finais:** apresenta as principais conclusões do trabalho realizado, incluindo limitações e próximos passos.

1.1 OBJETIVO

Este relatório (P3) é um dos componentes de um projeto mais amplo que tem como finalidade mensurar o risco climático dos portos costeiros do Brasil. O objetivo geral deste P3 é apresentar um estudo sobre a frequência das ameaças climáticas, previamente selecionadas, no setor portuário costeiro brasileiro. Os objetivos específicos são responder e analisar as duas perguntas norteadoras já mencionadas:

- Analisar a frequência (aumento/diminuição) das ameaças climáticas;
- Avaliar a frequência (aumento/diminuição) das ameaças climáticas no futuro, a partir de dois cenários de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (RCP4.5 e RCP8.5) para os períodos de 2021-2040 e 2041-2060, contraídos em 2030 e 2050, respectivamente.

2 AMEAÇAS CLIMÁTICAS QUE AFETAM O SETOR PORTUÁRIO BRASILEIRO

As zonas costeiras brasileiras são regiões de extrema importância em vários aspectos. A menos de 100 km da costa há diversas cidades populosas localizadas em áreas de baixa altitude com estimativa de dobrarem suas populações até 2080. Além disso, há um intenso fluxo econômico dependente da região, tanto de bens e serviços provenientes dos ecossistemas costeiros, quanto das estruturas portuárias existentes (NOBRE; MARENGO, 2017). Porém, são também zonas que sofrem mais intensamente com as mudanças do clima, pois são afetadas diretamente por eventos como aumento do nível médio do mar, elevação da temperatura superficial, alterações nos regimes de precipitação e eventos extremos de ondas, tempestade e ressacas. Esses fenômenos contribuem para o aumento das ocorrências de inundações, erosão e danificação dos ecossistemas (NOBRE; MARENGO, 2017).

A expansão do volume da água causa um impacto que afeta diretamente a dinâmica das zonas costeiras: o aumento do nível do mar. As estimativas apresentadas no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC- AR5) para a elevação do nível médio do mar global variam entre 26 e 98 centímetros até 2100. Com uma elevação média de 50 cm, a população em risco poderia mais do que triplicar, enquanto a exposição de ativos econômicos de caráter múltiplos, aumentaria mais de 10 vezes (BARBIER, 2015). As projeções de aumento do nível do mar para a costa brasileira apontam valores relativos de 40 cm até 57 cm (NOBRE; MARENGO, 2017). Para os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, já há registros desse aumento, em taxas de 1,8 mm/ano a 4,2 mm/ano desde a década de 1950 (HARARI; FRANÇA; CAMARGO, 2008).

No contexto das inundações costeiras, como a evolução do evento está associada à atuação de ciclones extratropicais e sistemas frontais (baixa pressão atmosférica) que geram elevada precipitação, é comum a conjunção com eventos de enchentes/alagamentos, que amplificam os efeitos nas cidades costeiras, em especial quando ocorrem em fase de maré de sizígia (PBMC, 2016). Becker *et al.* (2012) aponta que eventos de precipitação mais extremos podem causar inundações localizadas e alterações na carga de sedimentação, e, conseqüentemente, podem aumentar as necessidades de dragagem.

Em relação ao aumento da temperatura, Becker *et al.* (2012) aponta que extremos de temperatura podem afetar a forma como a carga portuária é manuseada, sendo necessário, por exemplo, de mais unidades de refrigeração.

A Figura 1 a seguir ilustra os principais impactos decorrentes das ameaças que afetam a zona costeira da América Latina.

Figura 1 - Impactos em áreas costeiras observados e projetados na América Central e América do Sul



Fonte: (ECLAC, 2015); (MAGRIN, *et al.*, 2014)

Dentre as cidades costeiras brasileiras, Santos, a maior cidade da Região Metropolitana da Baixada Santista e detentora do maior porto da América Latina, tem visto o aumento do nível do mar em uma média de 1,2 mm/ano desde a década de 1940 (HARARI; DE CAMARGO, 1995). Santos é vulnerável à elevação do nível médio do mar e às inundações, sendo crítica a vulnerabilidade infraestrutural (ZANETTI; DE SOUSA JUNIOR; DE FREITAS, 2016). Alfredini *et al.* (2014) mostram aumentos significantes na altura das ondas de 1,0 m em 1957 a 1,3 m em 2002, e na frequência

de ressacas durante as últimas décadas (1957-2002) na cidade. Em 2016, ressacas atingiram cidades da Baixada Santista e levaram ao fechamento do porto de Santos por alguns dias, e também destruíram parte das muretas de contenção da orla da praia de Santos, marco turístico do município (PBMC, 2016).

Segundo o PBMC (2016), além de Santos, portos como Rio Grande, Itajaí, Rio de Janeiro, Paranaguá e Belém também podem estar sob risco do aumento do nível do mar, em consequência de suas instalações de transporte estarem localizadas, em sua maioria, ao longo da orla. Além do aumento do nível do mar, tem-se que as marés meteorológicas podem ter efeitos catastróficos sobre as instalações portuárias em decorrência das inundações causada por esses eventos. Hallegate *et al* (2013) aponta que cidades com extensas instalações portuárias e indústrias, como Itajaí e Santos, são especialmente vulneráveis aos riscos do aumento de inundações merecendo, assim, atenção diante de tal risco.

Em geral, os impactos da mudança do clima irão variar de região para região, podendo até mesmo haver diferenças entre uma mesma região. Por exemplo, segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, o qual apresenta os desastres naturais que ocorreram entre os anos de 1991 e 2012 no Brasil, enquanto Fortaleza presenciou eventos extremos de chuva e seca, Recife, além desses eventos, presenciou eventos extremos de vento (UFSC-CEPED, 2013). Assim, portos localizados na mesma região geográfica poderão sofrer com os impactos de diferentes ameaças climáticas.

As próximas seções irão apontar as ameaças climáticas selecionadas para análise de risco climático do setor portuário brasileiro, apontando o comportamento de tais ameaças ao longo da costa brasileira e as particularidades de cada região.

2.1 SELEÇÃO DAS AMEAÇAS

A seleção das ameaças climáticas a serem consideradas na análise de risco climático para o setor portuário da costa brasileira iniciou-se em uma revisão bibliográfica, na qual foi possível compreender e extrair quais ameaças climáticas mais afetam a região costeira do Brasil. Após esse levantamento bibliográfico, que resultou na pré-seleção das ameaças com maior potencial de impactar os portos, foi realizado um processo de

validação por meio da aplicação de um questionário aos 21 portos da costa brasileira, como apresentado no Produto 2 - Impactos do Clima no Setor Portuário da Costa Brasileira.

A princípio, previa-se que a compreensão das ameaças que historicamente geram mais impactos aos portos seria suficiente para a seleção de quais deveriam ser analisadas no presente estudo. No questionário eletrônico aplicado, a questão 9 (Historicamente, quais foram os eventos climáticos extremos que geraram mais impactos para o porto que você representa?) pretendia obter essa informação, entretanto, muitos dos portos consultados deixaram a questão em branco.

Desse modo, para a seleção das ameaças, foi necessário aplicar uma interpretação conjunta das questões referentes ao grau de impacto devido à ocorrência de eventos climáticos extremos, a saber:

- Questão 11 - Para cada ameaça, indique o grau com que cada estrutura do porto já foi afetada negativamente;
- Questão 17 - Para cada ameaça, indique o grau com que a operação do porto já foi afetada negativamente;
- Questão 22 - Para cada ameaça, indique o grau com que cada estrutura do porto já foi afetada negativamente.

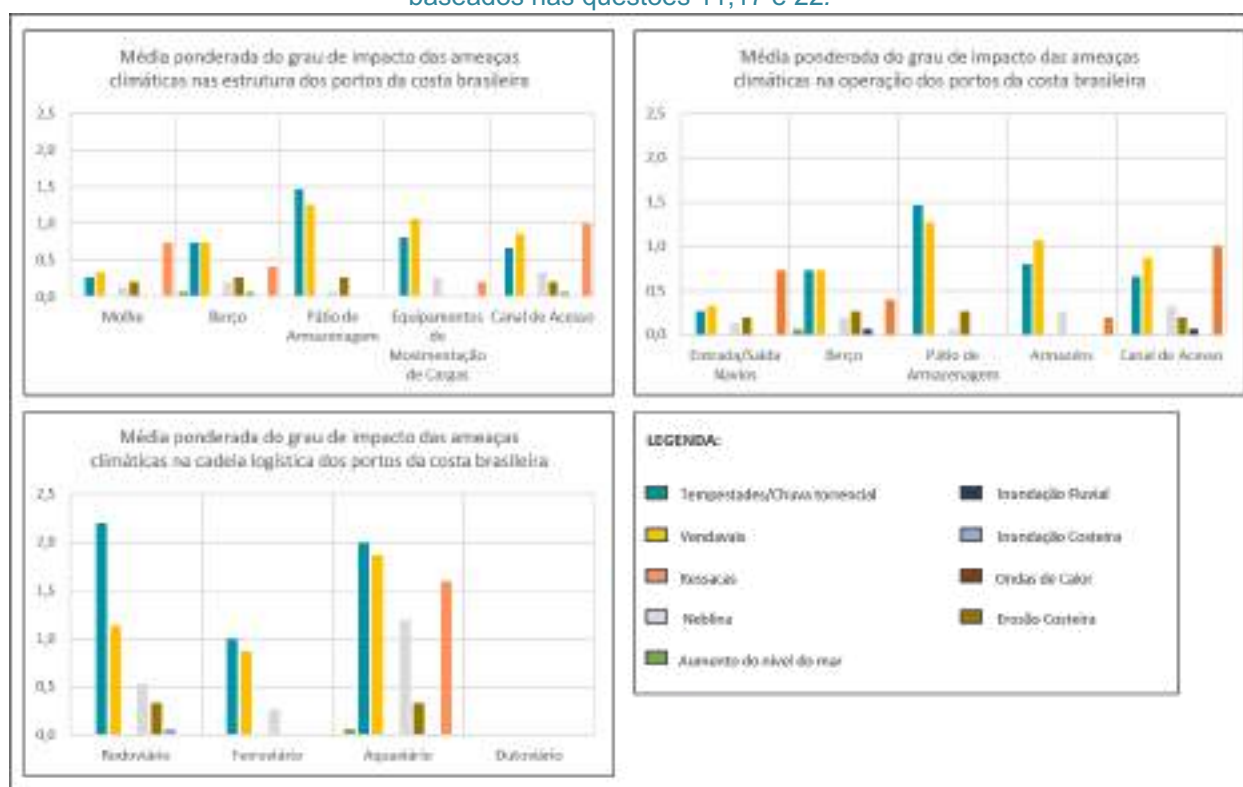
A análise conjunta das questões (9, 11, 17 e 22) permitiu validar e reforçar as ameaças climáticas que deveriam ser analisadas. Assim, identificou-se que as tempestades/chuvas torrenciais, os vendavais e as ressacas são as ameaças climáticas que mais afetam tanto a infraestrutura quanto a operação e logística dos portos consultados (**Error! Reference source not found.** e **Error! Reference source not found.**).

Tabela 1 - Análise da relevância das ameaças climáticas para o setor portuário da costa brasileira, baseado na questão 9.

AMEAÇA CLIMÁTICA	RESPOSTAS
Tempestades/Chuva Torrencial	16
Vendavais	14

AMEAÇA CLIMÁTICA	RESPOSTAS
Ressacas	6
Erosão Costeira	2
Neblina	2
Aumento do Nível do Mar	3
Inundações Fluviais	1
Inundações Costeiras	0
Ondas de Calor	0

Figura 2 - Análise da relevância das ameaças climáticas para o setor portuário da costa brasileira, baseados nas questões 11,17 e 22.



Contudo, a ressaca, definida pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (CPTEC, s.d.) como a “elevação do nível do mar provocada por condições meteorológicas adversas podendo gerar ondas com amplitude maior do que a normal” (CNPQ/CPTEC/INPE, 2018), foi retirada da presente análise, pois os modelos climáticos utilizados não refletem a hidrodinâmica do evento. Dessa maneira, optou-se por considerar a elevação do nível médio do mar, que mesmo sendo um evento de característica crônica ou gradual, está relacionado a eventos de caráter agudo ou extremo, como é o caso das ressacas. Tanto o aumento do nível do mar quanto as ressacas constituem-se em ameaças com significativos impactos para as estruturas

costeiras e devem ser avaliados, quando possível, de forma conjunta (PBMC, 2016; OPPENHEIMER *et al.*, 2019).

Estudo mostram que cientistas do clima estão encontrando evidências de que a velocidade do aumento do nível do mar está aumentando nos últimos anos. Mesmo com os esforços para desacelerar as mudanças do clima, a inércia do aquecimento dos oceanos indica que as previsões de curto prazo sobre o aumento do nível do mar não mudarão significativamente. Essa maior certeza no curto prazo, embora preocupante, reforça a importância da análise dessa ameaça (CLIMATE CENTRAL, 2019).

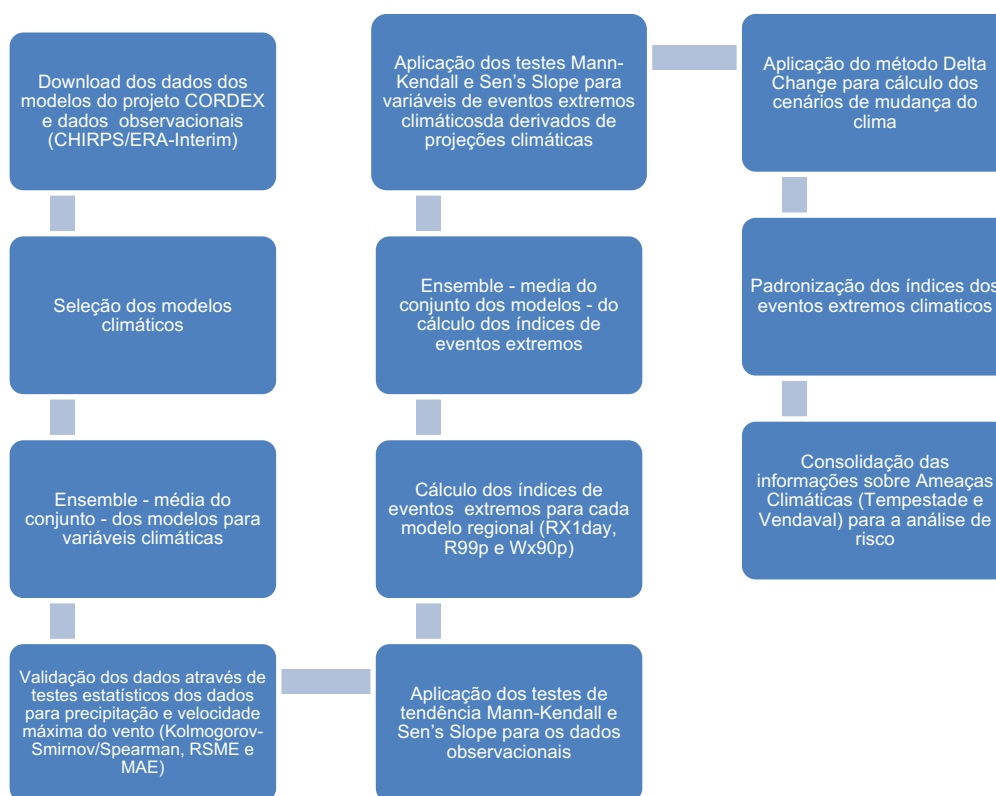
Apesar da baixa representatividade nas respostas aos questionários sobre a ocorrência das ameaças relacionadas à erosão costeira, neblina, inundações fluviais, inundações costeiras e ondas de calor, as mesmas devem ser desconsideradas no planejamento e gestão dos portos da costa brasileira. Entretanto, devido às limitações, como disponibilidade de dados, tais ameaças não foram consideradas na presente análise.

Diante do exposto, foram consideradas as tempestades/chuvas torrenciais, vendavais e elevação do nível do mar para análise das ameaças climáticas. As tempestades, vendavais e aumento do nível do mar podem ocasionar interrupções e complicações na cadeia logística dos portos, gerando uma série de impactos econômicos, além de afetar a integridade das infraestruturas (BECKER *et al.*, 2012).

3 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a metodologia aplicada no presente trabalho. Na seção 3.1 são apresentados os dados observacionais e projeções climáticas analisadas. A descrição dos indicadores de tempestade, vendaval e aumento do nível do mar são apresentados na seção 3.2. Ainda nesta seção são apresentados a análise de tendência (seção 3.3), aplicação do método *Delta Change Factor* (seção 3.4) e a formulação da padronização utilizada (seção 3.5). Abaixo é possível observar um fluxograma contendo todo o processo realizado desde o *download* dos dados observacionais e dos modelos climáticos até a criação das ameaças climáticas de tempestade e vendaval (Figura 3).

Figura 3 - Fluxograma das etapas metodológicas



3.1 BASE DE DADOS

Nesta seção serão apresentados o detalhamento sobre os dados observacionais e das projeções climáticas utilizadas para os cálculos dos índices de extremos climáticos no presente trabalho.

3.1.1 Dados Observacionais

No presente trabalho, utilizou-se três conjuntos de dados observacionais, sendo dois conjuntos relacionados à precipitação – a média climatológica de precipitação acumulada do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (INMET, 2009) do período de 1961-1990 e os dados *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS) (FUNK *et al.*, 2015) em frequência diária de 1986 a 2005 – e um conjunto relacionado à velocidade máxima do vento, no caso o ERA-Interim (DEE *et al.*, 2011), também em frequência diária no período de 1986 a 2005.

3.1.2 Projeções climáticas

Para realizar as análises das ameaças climáticas, foram considerados três horizontes temporais, sendo eles: período observado (1986-2005), período de curto prazo projetado para 2030 (valor central na média entre 2021-2040) e de médio prazo projetado para 2050 (valor central na média entre 2041-2060). A definição dos horizontes temporais vai ao encontro do planejamento estratégico da ANTAQ e, também, da metodologia apresentada na plataforma AdaptaBrasil do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), na qual os resultados deste projeto serão incorporados. Embora a recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) seja utilizar 30 anos de dados para estabelecer a climatologia de um determinado local, o período de 20 anos é considerado representativo para normais climatológicas e vem sendo adotado nos relatórios do IPCC pelo *Working Group I no Fifth Assessment Report* (WGI AR5).

Os modelos climáticos são executados usando dados sobre os fatores que influenciam o clima. Assim, para a geração das projeções climáticas, os modelos climáticos são forçados por um conjunto de condições de contorno e por cenários de concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, denominados como *Representative Concentration Pathways* (RCP)¹. No contexto desse projeto, foram utilizados os

¹ Os RCPs partem de pressupostos para delinear possíveis comportamentos climáticos futuros, desde como o mundo se aquecerá sem uma política climática, até o aquecimento menos extremo que ocorrerá com cortes significativos nas emissões de GEE. Também consideram trajetórias futuras crescimento econômico, populacional e feedbacks climáticos

cenários RCP4.5 e RCP8.5. No cenário RCP4.5 a concentração de CO₂ equivalente na atmosfera atinge cerca de 650 ppm até o final do século XXI e as estratégias para reduzir as emissões de GEE fazem com que as forças radiativas se estabilizem em 4,5 W/m² antes do ano 2100, o que representa um aumento de aproximadamente 1,8°C na temperatura média global. Já o RCP8.5 corresponde a um cenário de alta concentração de GEE na atmosfera, no qual o CO₂ equivalente excede a 1000 ppm até o final do século XXI e, com isso, o forçamento radiativo atingirá 8,5 W/m² até o ano 2100, levando a um aumento de aproximadamente 3,7°C na temperatura média global (INPE, 2021).

Vale ressaltar que os cenários não são previsões do futuro, mas sim projeções do que pode acontecer, criando descrições plausíveis, coerentes e internamente consistentes de possíveis mudanças do clima. E ainda, o desenvolvimento de modelos climáticos tem tido grandes avanços nos últimos anos e o seu uso está no cerne da ciência do clima como parte fundamental para análises de riscos (IPCC, 2014).

Assim sendo, os Modelos Climáticos Regionais (RCMs) foram desenvolvidos com o objetivo de realizar simulações para determinadas regiões geográficas com uma resolução mais alta do que os Modelos Climáticos Globais (GCMs), fornecendo, assim, informações mais adequadas para estudos de fenômenos regionais e para aplicação à vulnerabilidade, impacto e avaliações de adaptação (GIORGI, 2019). Em contrapartida, os modelos regionais, por não abrangerem todo o globo, devem se basear em informações fornecidas nas fronteiras laterais para simular climas no interior do seu domínio de estudo (STANIFORTH, 1997).

Diante disso, utilizou-se os dados dos modelos climáticos regionais que fizeram parte do *Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX)*² como o RCA4³ e

² É um programa patrocinado pelo Programa Mundial de Pesquisa do Clima (WCRP) para desenvolver uma estrutura aprimorada para gerar projeções climáticas em escala regional para avaliação de impacto e estudos de adaptação em todo o mundo dentro do cronograma AR5 do IPCC.

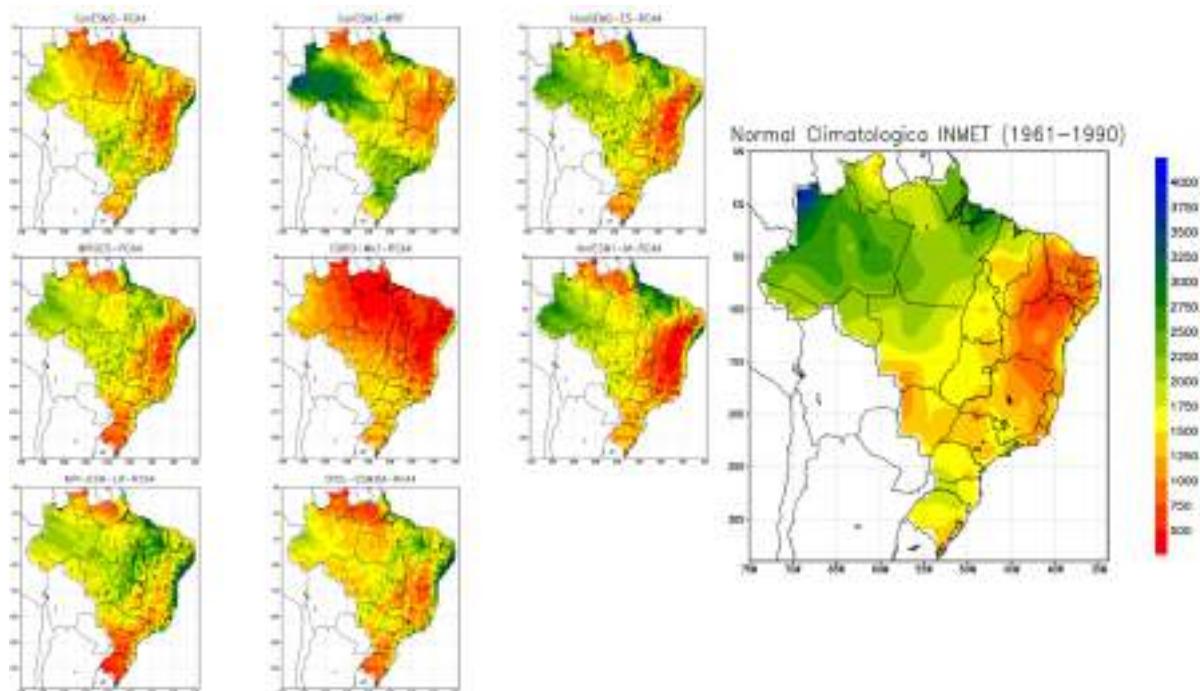
³ Modelo regional sueco Rossby Centre regional atmospheric model (RCA4) ROSSBY CENTRE. Rossby Centre regional atmospheric model, RCA4. Disponível em: <<https://www.smhi.se/en/research/research-departments/climate-research-rossby-centre2-552/rossby-centre-regional-atmospheric-model-rca4-1.16562>>. Acesso em: 13 Apr. 2021.

WRF⁴ forçados por modelos climáticos globais do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) para o domínio da América do Sul (SAM-44). Esses dados estão hospedados na plataforma *Earth System Grid Federation* (ESGF). Os modelos apresentam resolução espacial de 0,44°, isto é, aproximadamente 50 km x 50 km. Para a seleção dos modelos utilizados no presente projeto, foi realizado um estudo de comparação do campo espacial da climatologia anual de precipitação dos modelos CanESM2-RCA4, CanESM2-WRF, HadGEM2-ES-RCA4, MIROC5-RCA, CSIRO-Mk3-RCA4, NorESM1-M-RCA4, MPI-ESM-LR-RCA4 e GFDL-ESM2M-RCA4 que participam do projeto CORDEX (1961-1990) versus a média anual climatológica observada (1961-1990) do INMET.

Na [Figura 4](#) abaixo, observa-se a precipitação média anual para os oito modelos citados acima e a média do conjunto dos modelos selecionados. Desse modo, foi possível identificar que os modelos CanESM2-WRF e CSIRO-Mk3-RCA4 apresentam comportamento espacial diferentes em relação ao dado observado. O Modelo CanESM2-WRF apresentou uma superestimativa da precipitação na região oeste da Amazônia. O modelo CSIRO-Mk3-RCA4, apesar de apresentar valores parecidos na região Nordeste, subestimou a precipitação para toda a região Norte do Brasil. Desta forma, os modelos CanESM2-WRF e CSIRO-Mk3-RCA4 foram excluídos para não comprometer a qualidade da análise.

[Figura 4 - Precipitação média anual dos modelos do projeto CORDEX \(1961-1990\)](#)

⁴ O modelo WRF (Weather Research and Forecasting) é um modelo numérico de área limitada de previsão do tempo, fornecido pelo National Center for Atmospheric Research, que é amplamente utilizado em pesquisa e operação. É usado como modelo numérico de previsão do tempo e modelo climático regional. MMM WEBMASTER. WRF Model Users Site. Ucar.edu. Disponível em: <<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>>. Acesso em: 13 Apr. 2021.



Portanto, os modelos regionais que fizeram parte do multi-ensemble são: CanESM2-RCA4, HadGEM2-ES-RCA4, MIROC5-RCA, NorESM1-M-RCA4, MPI-ESM-LR-RCA4 e GFDL-ESM2M-RCA4 (Tabela 2).

Tabela 2 - Modelos climáticos utilizados e os respectivos centros de desenvolvimento

Modelo Climático Global	Modelo Climático Regional	Centro
CanESM2	RCA4	Canadian Centre of Climate Modelling and Analysis
HadGEM2-ES	RCA4	United Kingdom Met Office
MIROC5	RCA4	University of Tokyo/Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology/National Institute for Environmental Studies
NorESM1-M	RCA4	Norwegian Climate Centre
MPI-ESM-LR	RCA4	Max Planck Institute for Meteorology
GFDL-ESM2M	RCA4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

Para avaliar a distribuição dos dados do conjunto de modelos, foram realizados testes estatísticos, como Kolmogorov-Smirnov, que indica a normalidade da distribuição dos dados. Quando o p-value é estatisticamente significativo ($p \leq 0.05$), os dados não apresentam distribuição normal, com 5% de probabilidade de que a hipótese de não

normalidade esteja incorreta. A partir desse resultado, também foi realizado o teste de correlação de Spearman, que avalia a intensidade de relação entre os dados simulados versus observacionais. Além disso, foram aplicados testes que verificam erros, como o *Root Mean Square Deviation* (RSME), que tem como objetivo verificar quão bom o resultado do modelo climático é sobre os dados observacionais, ou seja, quanto menor o RMSE, melhor a maneira como o modelo se comporta, e *Mean Absolut Error* (MAE), que representa o desvio médio entre o dado observacional e o simulado. Por fim também foi realizado uma medida de dispersão, conhecida como Desvio Padrão, a qual informa o quanto o conjunto analisado é homogêneo, ou seja, quando se obtém um desvio baixo, conclui-se que os dados analisados estão mais próximos da média. Essas avaliações e validações foram realizadas para cada porto e os resultados mostraram que os dados modelados e observacional apresentam uma diferença significativa com correlação fraca para a maioria dos portos (APÊNDICE I). Portanto, através dessa validação, optou-se por adotar a abordagem *Delta Change Factor* para obter uma análise mais realista e consistente. Este método está detalhado na Seção 3.4.

3.2 INDICADORES

Para obter os indicadores de tempestade e vendaval, foram calculados três índices de extremos climáticos definidos pelo *Ex.pert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI), sendo eles: precipitação máxima anual em um dia (RX1day), porcentagem de dias em que a precipitação excedeu o 99 percentil⁶ (R99p) e porcentagem de dias em que a velocidade máxima do vento é igual ou superior a 90 percentil (Wx90p). Esses índices derivam das variáveis dos modelos climáticos selecionados: precipitação e velocidade máxima do vento a 10 metros. Tais dados foram utilizados para representar as ameaças de tempestade (Subseção 3.2.1) e vendaval (Subseção 3.2.2). Após o cálculo dos índices extremos climáticos para os dados observacionais e cada modelo climático, foi realizada a média dos resultados do conjunto de modelos utilizados (multi-model ensemble). Para o indicador de aumento do nível do mar, a ameaça foi estimada a partir do modelo de elevação digital “*CoastalDEM*”.

3.2.1 Tempestades

Em relação as tempestades, tem-se que a sua ocorrência depende de uma combinação de diversas variáveis climáticas, como pressão, temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, dentre outras. De acordo com o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), as tempestades são caracterizadas por uma intensa e por vezes prolongada chuva, acompanhada de ventos fortes, granizo, trovões e relâmpagos, não havendo a necessidade de todos estes elementos estarem presentes (CNPQ/CPTEC/INPE, 2018). O Centro ainda aponta que o excesso de chuvas é o principal componente da tempestade. Assim, ressalta-se que na presente análise considerou-se como tempestades os eventos extremos de chuva, ou seja, apenas as variáveis que refletem o volume de precipitação.

Como os desastres estão associadas àquelas precipitações de maior magnitude e que acontecem em um curto período de tempo, para a composição do indicador de tempestade, foram utilizados os indicadores Rx1day (que representa o maior volume anual de precipitação em um dia) e R99p (que representa a porcentagem de dias no ano em que a precipitação ficou acima do percentil 99 em relação ao período base (1986-2005)). Esses índices foram padronizados de 0 a 1 independentemente (conforme Subseção 3.5), somados e divididos por 2. Portanto o cálculo da ameaça de tempestade é dado pela Equação 2⁵ abaixo:

$$\text{Indicador de Tempestade} = \frac{RX1day + R99p}{2} \quad [2]$$

Para comparação entre o período histórico e os cenários futuros (RCP 4.5 ou RCP 8.5), também foi realizada padronização dos valores entre 0 e 1, sendo que o valor 1 representa a maior probabilidade de ocorrer a ameaça climática e valor 0 representa a menor probabilidade de ocorrência da ameaça climática. Como regra geral os resultados são apresentados em cinco quartis, classificados em: (1) Muito Baixa para valores entre 0 a 0,2; (2) Baixa para valores entre 0,2 e 0,4; (3) Média para valores

⁵ Importante ressaltar que não existe uma referência para a equação na literatura. A seleção das variáveis foi feita em reunião de trabalho entre a equipe da WayCarbon, INPE e GIZ. Foram considerados para a equação índices de eventos climáticos que melhor representam extremos de precipitação. O acréscimo da divisão no índice ocorre, pois os indicadores apresentam unidades de medidas diferentes, assim foi realizado a padronização separadamente para cada índice e, em seguida, a média.

entre 0,4 e 0,6; (4) Alta para valores entre 0,6 e 0,8; (5) Muito Alta para valores entre 0,8 e 1.

3.2.2 Vendavais

Os vendavais são caracterizados por ventos fortes que podem danificar a infraestrutura dos portos e paralisar a operação. No presente estudo, o indicador de ameaça de vendaval, 90p, consiste no cálculo da porcentagem de dias em que a velocidade máxima do vento é superior a 90 percentil, sendo eles padronizados de 0 a 1, no qual o valor 1 representa a maior probabilidade de ocorrer a ameaça e 0 representa baixa probabilidade de ocorrer a ameaça. Desta forma, o cálculo da ameaça de vendaval é observado na Equação 3:

$$\text{Indicador de Vendaval} = W \times 90p \text{ [3]}$$

A mesma metodologia de comparação entre os cenários aplicada na ameaça de tempestade foi aplicada na ameaça de vendavais. Igualmente, os resultados são apresentados em cinco quartis, classificados em: (1) Muito Baixa para valores entre 0 e 0,2; (2) Baixa para valores entre 0,2 e 0,4; (3) Média para valores entre 0,4 e 0,6; (4) Alta para valores entre 0,6 e 0,8; (5) Muito Alta para valores entre 0,8 e 1.

3.2.3 Aumento do nível do mar

O aumento do nível do mar variará para cada região de acordo com os padrões de circulação oceânica, efeitos gravitacionais, subsidência da terra e outros fatores. Nos casos extremos poderá ser necessário a realocação de instalações portuárias ou até mesmo de cidades portuárias. Entretanto, apesar do potencial impacto negativo de tal ameaça climática, dadas as incertezas nos modelos científicos, os portos ainda não consideram plenamente esses impactos nas suas próprias operações (BECKER *et al.*, 2012).

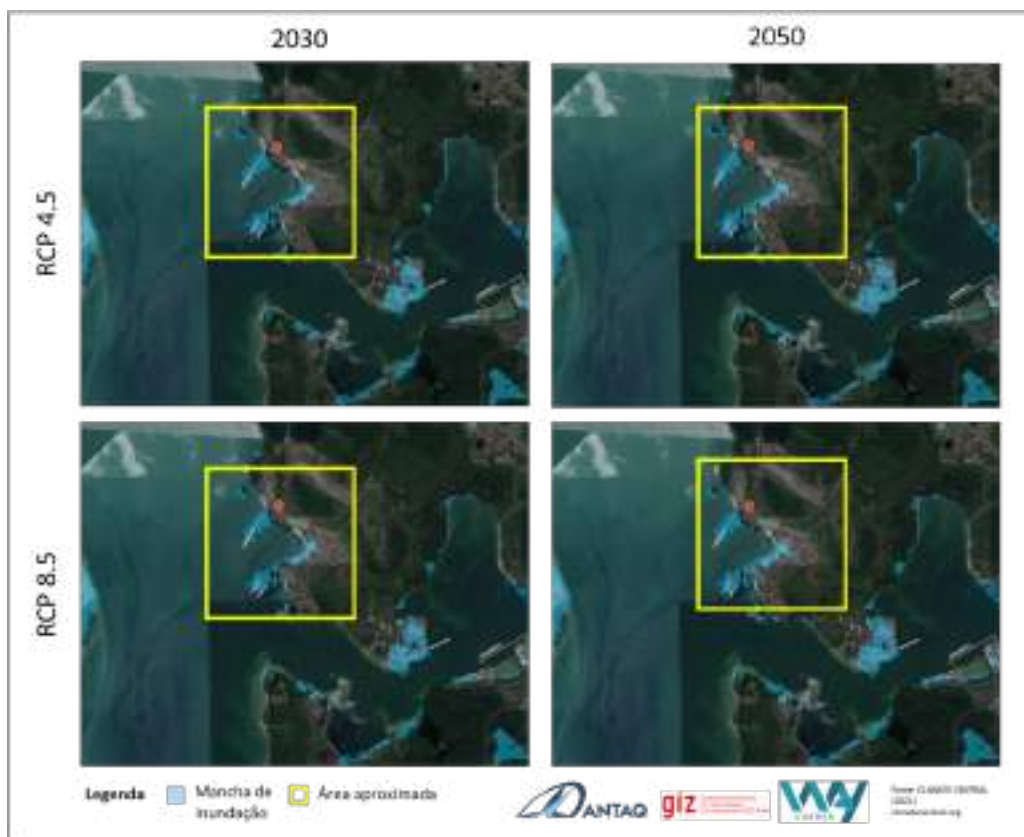
Diferentemente de como foi realizado para as ameaças climáticas de tempestades e vendavais, o cálculo do indicador de aumento do nível do mar foi estimado a partir do

modelo de elevação digital “*CoastalDEM*”, elaborado por geocientistas a partir de uma revisão crítica dos dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*, do Governo Federal dos Estados Unidos da América). Em resumo, os dados são extraídos de um método avançado de identificação de distorções na base do SRTM, no qual, por meio de um modelo computacional, prevê-se o erro contido em cada pixel da base a partir de inferências de outras fontes que são usadas como camadas cartográficas.

Ressalta-se que, por se tratar de uma modelagem de alta complexidade, ela deve ser interpretada de forma relacionada com os efeitos locais, os quais podem exigir uma maior investigação a depender dos dados observacionais e estrutura naturais ou físicas já existentes que possam influenciar na redução do risco, como barreiras, molhe e quebra-mar.

De forma geral, a análise partiu da avaliação se haverá ou não uma mancha de inundação na área (polígono) em que o porto se localiza (APÊNDICE III). Nos casos em que foi possível observar a ocorrência de mancha de inundação na área poligonal, adotou-se o valor 1 para o indicador de ameaça, e nos casos em que não foi possível observar a mancha de inundação, adotou-se o valor 0. Assim, o indicador da ameaça climática de inundação foi tratado como um indicador binário (Figura 5 – Exemplificação da análise do indicador de aumento do nível do mar).

Figura 5 – Exemplificação da análise do indicador de aumento do nível do mar



3.3 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Para cada índice de extremo climático (RX1Day, R99p e Wx90p), foram utilizados dois testes estatísticos, *Mann-Kendall* (MANN, 1945; KENDALL, 1975) e *Sen's Slope* (SEN, 1968). Por meio do teste de *Mann-Kendall* é possível avaliar se existe tendência em uma série temporal através da análise de *p-value*. Caso este valor seja menor ou igual a 0,05 ($p \leq 0.05$), é identificado que há tendência estatisticamente significativa, e se for acima de 0,05, pode-se determinar que não há tendência. Além disso, a estimativa do teste de *Mann-Kendall* verifica se os valores da série temporal tendem a aumentar ou diminuir com o passar do tempo, ou seja, valores maiores que zero indicam tendência positiva, e valores menores que zero indicam tendência negativa. Destaca-se que valores próximos a zero indicam que não há tendência. Por sua vez, o teste de *Sen's Slope* foi utilizado para complementar os resultados, visto que é um teste mais robusto utilizado em análises de séries temporais com sazonalidade e responsável por estimar a magnitude da tendência, isto é, o quanto aumenta ou diminui.

3.4 CENÁRIOS DE MUDANÇA DO CLIMA

Como demonstrado na Subseção 3.1.2, os dados do ensemble no período histórico não representam de forma satisfatória os dados observacionais. No entanto, assume-se que os modelos reproduzem bem as diferenças entre o futuro e o histórico. Portanto, para os índices extremos de tempestades (RX1day e R99p) e de vendavais (Wx90p), foi aplicado o método denominado *Delta Change Factor* (ANANDHI *et al.*, 2011; RUELLAND *et al.*, 2012), considerado apropriado para a avaliação do impacto de mudança do clima local (TRAMBLAY *et al.*, 2013). Este método estima cenários de mudança do clima, considerando a diferença (delta) entre o período histórico e projetado (RCPs) do ensemble, a qual é somada aos dados observacionais (baseline). Neste caso a baseline é o real observado, e não o histórico dos modelos. A metodologia considera a formulação matemática aditiva da seguinte forma (Equação 4):

$$CMC = OBS + (RCP - HIST) [4]$$

Onde:

CMC: Cenário de Mudança do Clima;

OBS: É o índice extremo calculado a partir dos dados observacionais (1986-2005);

RCP: É o índice extremo calculado a partir dos modelos utilizados considerando o RCP 4.5 e RCP 8.5 (2021-2040/2041-2060);

HIST: É o índice extremo calculado a partir do histórico dos modelos utilizados (1986-2005).

A utilização do método *Delta Change Factor* contribui para um nível maior de confiabilidade no cálculo de ameaças, proporcionando análises mais realistas, além de apresentar como vantagens a facilidade e velocidade de aplicação e o ajuste dos dados locais conforme os cenários de mudança do clima sugeridos pelos RCM's (ANANDHI *et al.*, 2011). Sendo assim, utilizar os dados observacionais como baseline torna mais representativo para o cenário histórico do que usar os dados gerados pelos modelos do período histórico. É importante salientar que, embora se reconheça as limitações do método, esta abordagem é utilizada em vários estudos de avaliação da mudança do clima (MEARNS, *et al.*, 2001; SEMADENI-DAVIES, 2004; SEMADENI-DAVIES *et al.*,

2008; GEORGE, 2010) e programas mundiais, como o US *Global Change Research Program*⁶.

3.5 PADRONIZAÇÃO

A padronização dos extremos climáticos foi realizada com o objetivo de se obter valores entre zero e um, em que 0 representa a melhor situação e 1 a pior. O método para a padronização foi validado por especialistas da ANTAQ de modo a minimizar distorções relativas. A partir do conjunto de valores de extremos climáticos (RX1day, R99p e Wx90p) extraídos para cada porto, provenientes dos ensembles climáticos, obteve-se cinco séries (dados observacionais, 2030 - RCP4.5, 2050 - RCP4.5, 2030 - RCP 8.5, 2050 - RCP8.5) das quais os valores foram trazidos à mesma escala, em termos de desvios padrão, conforme a Tabela 3 e equações a seguir:

Tabela 3 - Escala para padronização dos dados

Extremo Climático	OBS	RCP 4.5		RCP 8.5	
	(1986-2005)	2030	2050	2030	2050
Angra dos Reis	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	$x_{1,4}$	$x_{1,5}$
Aratu-Candeias	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	$x_{2,3}$	$x_{2,4}$	$x_{2,5}$
...	$x_{3,1}$...			$x_{m,n}$

Após a padronização cada $x_{i,j}$ recebe o valor pela Equação 5:

$$x_{pad_{i,j}} = \frac{x_{i,j}}{\sqrt{\frac{\sum_{i,j}^{n,m} (x_{i,j} - \bar{x})^2}{n*m-1}}} \quad [5]$$

Em que 'n' é o número de cenários (cinco no total) e o 'm' é o número de portos (21 no total).

Em seguida todos os x_{pad} foram divididos pelo valor máximo do extremo, de modo a obter-se os valores padronizados entre 0 e 1 (Equação 6):

⁶ Maiores informações disponíveis: <<http://www.usgcrp.gov/usgcrp/nacc/default.htm>>.

$$x_{norm_{i,j}} = \frac{x_{pad_{i,j}}}{\max(x_{pad})} \quad [6]$$

4 RESULTADOS

Na presente seção são apresentados os resultados das análises de tendência dos índices de extremo climático, bem como os resultados das ameaças climáticas analisadas.

4.1 ANÁLISE DE TENDÊNCIA

A análise de tendência é uma importante avaliação utilizada para identificar mudança no comportamento de variáveis ou indicadores climáticos. Neste estudo foram utilizados os testes estatísticos de Mann-Kendall e Sen's Slope que verificam a

presença de tendência e a magnitude, respectivamente. Os resultados referentes a análise de tendência são apresentados a seguir.

4.1.1 Tempestades

Os resultados de análise de tendência dos índices de extremo climático associados a tempestades, RX1day e R99p, são provenientes dos dados observacionais do CHIRPS no período de 1981 a 2020. Na Tabela 4 são observados os resultados referentes ao RX1day, o qual apresenta tendência estatisticamente significativa para os portos de Cabedelo, Imbituba, Itajaí, Rio Grande, Santos, São Francisco do Sul e São Sebastião, enquanto o restante dos portos não apresenta tendência. Nota-se que apenas o porto de Cabedelo exhibe tendência de aumento para o índice extremo, o que pode indicar maior frequência de eventos climáticos relacionados a elevados valores de precipitação neste porto.

Tabela 4 - Análise de tendência do índice de extremo climático RX1day no período de 1981 a 2020

RX1day	Observacional (CHIRPS; 1981-2020)	
	Mann-Kendall (p-valor)	Sen's Slope
Angra dos Reis	0,861	0,175
Aratu-Candeias	0,552	0,594
Cabedelo	0,009	2,621
Fortaleza	0,898	-0,128
Ilhéus	0,916	0,105
Imbituba	0,011	-2,552
Itaguaí	0,789	0,268
Itajaí	0,003	-2,924
Itaqui	0,825	-0,221
Natal	0,370	0,897
Niterói	0,449	0,757
Paranaguá	0,666	-0,431
Recife	0,079	1,759
Rio de Janeiro	0,449	0,757
Rio Grande	0,049	-1,969
Salvador	0,213	1,247
Santos	0,049	-1,969
São Francisco do Sul	0,005	-2,785
São Sebastião	0,028	-2,202
SUAPE	0,079	1,759
Vitória	0,382	0,874

Negrito: Há tendência (estatisticamente significativa) p-value \leq 0.05

A

Tabela 5 mostra a análise de tendência do índice de extremo climático R99p em que é possível perceber que somente os portos de Ilhéus, Natal e Rio Grande apresentam tendência de aumento.

Tabela 5 - Análise de tendência do índice de extremo climático R99p no período de 1981 a 2020

R99p	Observacional (CHIRPS; 1981-2020)	
	Mann-Kendall (p-valor)	Sen's Slope
Angra dos Reis	0,221	1,223
Aratu-Candeias	0,568	0,571
Cabedelo	0,071	1,806
Fortaleza	0,954	0,058
Ilhéus	0,019	2,342
Imbituba	0,456	0,746
Itaguaí	0,075	1,783
Itajaí	0,268	1,107
Itaqui	0,139	1,480
Natal	0,006	2,762
Niterói	0,898	0,128
Paranaguá	0,537	-0,618
Recife	0,152	1,433
Rio de Janeiro	0,898	0,128
Rio Grande	0,008	2,645
Salvador	0,139	1,480
Santos	0,075	1,783
São Francisco do Sul	0,954	-0,058
São Sebastião	0,064	1,853
SUAPE	0,435	0,781
Vitória	0,284	1,072

Negrito: Há tendência (estatisticamente significante) p-value ≤ 0.05

Os resultados das análises de tendência dos índices de extremo climático referente ao mesmo período de avaliação da ameaça de tempestade estão apresentados no APÊNDICE II, representados pelo período observacional (1986-2005), RCP4.5 (2021-2060) e RCP8.5 (2021-2060).

Nota-se que no RX1day, somente os portos de Natal e Recife apresentam tendência de aumento no período observacional. Em contrapartida, o RCP4.5 indica tendência para os portos de Itaqui, Niterói, Rio de Janeiro e São Sebastião, sendo apenas o

primeiro com tendência de aumento. Já no RCP8.5, apenas os portos de Itaqui, Santos e São Sebastião apresentam tendência positiva.

No caso do R99p, não há tendência para nenhum dos portos no período observacional. Por sua vez, o RCP4.5 apresenta tendência de aumento para os portos de Fortaleza e Itaqui, enquanto, indica tendência de redução para o porto de Santos. No cenário RCP8.5 observa-se tendência positiva apenas para os portos de Fortaleza e Itaqui.

As análises de tendência para os índices de extremo climático demonstram divergência e somente o porto de Itaqui apresenta tendência em comum para ambos. É importante ressaltar que, os índices são complementares para realização da ameaça de tempestade.

4.1.2 Vendavais

Em relação a ameaça de vendavais, utilizou-se o índice extremo Wx90p com base nos dados do ERA-Interim de 1979 a 2014. De acordo com a Tabela 6, é possível observar tendência de aumento do Wx90p para os portos de Cabedelo, Fortaleza, Itaqui, Natal, Recife e SUAPE, portanto, esses portos podem estar mais propensos a enfrentar eventos de vento extremo.

Tabela 6 - Análise de tendência do índice de extremo climático Wx90p no período de 1979 a 2014

Wx90p	Observacional (Era-Interim; 1979-2014)	
	Mann-Kendall (p-valor)	Sen's Slope
Angra dos Reis	0,703	-0,395
Aratu-Candeias	0,120	1,567
Cabedelo	0,016	2,398
Fortaleza	0,002	3,079
Ilhéus	0,513	0,681
Imbituba	0,764	-0,286
Itaguaí	0,114	-1,581
Itajaí	0,924	0,082
Itaqui	0,001	4,211
Natal	0,006	2,738
Niterói	0,326	-1,009
Paranaguá	0,313	-0,995
Recife	0,026	2,221
Rio de Janeiro	0,326	-1,009
Rio Grande	0,383	0,886

Wx90p	Observacional (Era-Interim; 1979-2014)	
	Mann-Kendall (p-valor)	Sen's Slope
Salvador	0,137	1,485
Santos	0,859	-0,177
São Francisco do Sul	0,989	0
São Sebastião	0,540	0,599
SUAPE	0,026	2,221
Vitória	0,091	1,689

Os resultados da análise de tendência do Wx90p referente ao mesmo período de avaliação da ameaça de vendaval, estão apresentados no APÊNDICE II, representados pelo período observacional (1986-2005), RCP4.5 (2021-2060) e RCP8.5 (2021-2060).

Na análise de tendência do Wx90p é identificado que não há tendência para nenhum dos portos no período observacional. Entretanto, o cenário RCP4.5 demonstra tendência de aumento para a maioria dos portos, com exceção de Aratu-Candeias, Imbituba, Itajaí, Paranaguá, Recife, Rio Grande, Salvador, São Francisco do Sul e SUAPE, o qual tem ausência de tendência. Nesse sentido, quando considerado o cenário RCP8.5 todos os portos apresentam tendência de aumento, exceto o porto de Rio Grande.

4.2 CENÁRIOS DE MUDANÇA DO CLIMA

Esta seção apresenta os resultados das ameaças de tempestades, vendavais e elevação do nível do mar para os 21 portos selecionados, de acordo com testes estatísticos e premissas apresentadas na seção 3 deste relatório. Por meio desses resultados, será possível compreender a probabilidade de ocorrência futura de tempestades, vendavais e aumento do nível do mar, isto é, se tal ameaça irá aumentar ou diminuir nos cenários de projeções climáticas em relação ao período observacional (1986 a 2005). Ressalta-se que a probabilidade deve ser entendida como uma média

da intensidade das ameaças no recorte temporal do estudo (*baseline* e projetado) de acordo com os resultados dos modelos climáticos utilizados. Portanto, o valor não será uma probabilidade *stricto-sensu*, mas um índice médio que reflete a intensidade do evento climático acontecer no período de análise.

4.2.1 Tempestades

O indicador de tempestades no período observacional (1986 a 2005) mostra sob maior ameaça o porto de SUAPE, com uma probabilidade de ocorrência “MUITO ALTA” (Fig. 6). Em seguida, tem-se que quase a metade dos portos analisados apresentam probabilidade de ocorrência “ALTA” para tempestades, sendo eles: são Aratu-Candeias, Cabedelo, Ilhéus, Natal, Recife, Salvador, Santos, São Francisco do Sul, São Sebastião e Vitória.

Considerando o cenário RCP4.5, para o período de 2030, o porto de SUAPE permanece sendo o que possui a maior probabilidade da ameaça de tempestade. Os portos de Aratu-Candeias, Cabedelo, Ilhéus, Natal, Niterói, Recife, Rio de Janeiro, Salvador, Santos, São Francisco do Sul, São Sebastião e Vitória apresentam uma probabilidade de ocorrência “ALTA” para a ameaça de tempestade. Já para o período de 2050, o porto de SUAPE ainda se mantém sendo o que apresenta a maior ameaça, ainda classificada como “MUITO ALTA”, e os portos classificados com uma probabilidade de ocorrência “ALTA” para o período de 2030 também se mantiveram, com exceção para de Niterói, Rio de Janeiro, e Santos que passaram para uma classificação de ameaça “MÉDIA”. De forma geral, analisando o cenário RCP4.5, não houve grandes alterações nos valores comparando 2030 e 2050.

Ao analisar o cenário de maior concentração de GEE (RCP 8.5) no período projetado para 2030, observa-se que os portos de SUAPE e Recife apresentam uma probabilidade de ocorrência “MUITO ALTA” para ameaça de tempestade, enquanto os portos de Aratu-Candeias, Cabedelo, Ilhéus, Natal, Salvador, São Sebastião e Vitória apresentam uma probabilidade de ocorrência “ALTA”. Para o período de 2050, a classificação “MUITO ALTA” da probabilidade da ameaça de tempestade é mantida somente para o porto de SUAPE, ao passo que, a probabilidade “ALTA” da ameaça de tempestades é projetada para os portos de Aratu-Candeias, Cabedelo, Ilhéus, Natal,

Niterói, Rio de Janeiro, Salvador, Santos, São Francisco do Sul, São Sebastião e Vitória. Ressalta-se que esse resultado foi equivalente para o cenário RCP 4.5 no período de 2030. Além disso, comparando os dois períodos (2030 e 2050) para o cenário RCP8.5, observa-se que apenas os portos de Niterói, Rio de Janeiro, Santos e São Francisco do Sul sofreram alterações na classificação, a qual foi de “MÉDIA” para “ALTA”.

Os resultados do indicador de ameaça às tempestades para todos os portos podem ser observados na Tabela 7:

Tabela 7 - Cenário de mudança do clima para tempestade por porto

Porto	Observacional	RCP 4.5		RCP 8.5	
		2030	2050	2030	2050
Angra dos Reis	0,563	0,568	0,561	0,550	0,564
Aratu-Candeias	0,778	0,783	0,777	0,765	0,765
Cabedelo	0,701	0,720	0,722	0,708	0,697
Fortaleza	0,502	0,530	0,537	0,529	0,546
Ilhéus	0,647	0,647	0,663	0,648	0,652
Imbituba	0,553	0,571	0,566	0,562	0,570
Itaguaí	0,529	0,540	0,535	0,535	0,547
Itajaí	0,567	0,574	0,567	0,561	0,569
Itaqui	0,384	0,420	0,438	0,418	0,459
Natal	0,753	0,754	0,769	0,749	0,728
Niterói	0,589	0,605	0,592	0,594	0,606
Paranaguá	0,587	0,593	0,589	0,585	0,595
Recife	0,764	0,793	0,789	0,801	0,781
Rio de Janeiro	0,589	0,605	0,592	0,594	0,606
Rio Grande	0,523	0,514	0,516	0,522	0,518
Salvador	0,778	0,782	0,778	0,768	0,771
Santos	0,604	0,614	0,600	0,598	0,616
São Francisco do Sul	0,603	0,609	0,602	0,598	0,608
São Sebastião	0,632	0,640	0,627	0,617	0,637
SUAPE	0,865	0,894	0,889	0,902	0,882
Vitória	0,616	0,620	0,609	0,608	0,609

Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
0 – 0,199	0,2 – 0,399	0,4 – 0,599	0,6 – 0,799	0,8 – 1,000

4.2.2 Vendavais

Em relação ao indicador de ameaça de vendaval demonstrado na Tabela 8, para o período observacional (1986/2005) sete portos, sendo eles Cabedelo, Fortaleza, Natal, Niterói, Recife, Rio de Janeiro e Suape, apresentam probabilidade “MÉDIA” de ocorrência de vendaval. O restante dos portos indica “ALTA” probabilidade de ocorrência de vendavais.

Quando se analisa o cenário RCP4.5 para o período de 2030, todos os portos possuem probabilidade de ocorrência “ALTA” de vendavais. Já para o período de 2050, os portos de Natal e Vitória recebem a classificação de “MUITO ALTA” para a probabilidade de ocorrência de vendavais enquanto os demais continuam apresentando classificação de “ALTA”.

Para o cenário RCP8.5 considerando o período de 2030, os portos que apresentam a classificação “MUITO ALTA” para a probabilidade de ocorrência de vendaval são Itaqui e Natal. O restante dos portos indica probabilidade “ALTA” para o mesmo período. Em relação ao período de 2050, oito portos são classificados como “MUITO ALTA” para a probabilidade de ocorrência de vendaval, são eles: Aratu-Candeias, Cabedelo, Fortaleza, Ilhéus, Itaqui, Natal, Salvador e Vitória. Destaca-se que o porto de Natal apresenta o valor máximo (1) na escala da probabilidade ocorrência de vendaval. O restante dos portos recebe a classificação “ALTA” para a probabilidade de ocorrência da ameaça climática.

Os resultados do indicador de ameaça aos vendavais para os portos podem ser observados Tabela 8 :

Tabela 8 - Cenário de mudança do clima para vendavais por porto

Porto	Observacional	RCP4.5		RCP8.5	
		2030	2050	2030	2050
Angra dos Reis	0,610	0,665	0,736	0,680	0,752
Aratu-Candeias	0,623	0,726	0,753	0,773	0,909
Cabedelo	0,575	0,734	0,797	0,781	0,953
Fortaleza	0,588	0,703	0,763	0,730	0,832
Ilhéus	0,625	0,697	0,739	0,735	0,829
Imbituba	0,634	0,646	0,669	0,665	0,696
Itaguaí	0,608	0,659	0,734	0,684	0,751
Itajaí	0,628	0,649	0,658	0,661	0,681
Itaqui	0,639	0,731	0,788	0,804	0,870
Natal	0,582	0,756	0,849	0,802	1,000
Niterói	0,599	0,649	0,717	0,683	0,739

Porto	Observacional	RCP4.5		RCP8.5	
		2030	2050	2030	2050
Paranaguá	0,614	0,663	0,694	0,672	0,718
Recife	0,579	0,669	0,695	0,694	0,796
Rio de Janeiro	0,600	0,648	0,716	0,682	0,738
Rio Grande	0,633	0,653	0,671	0,652	0,668
Salvador	0,626	0,714	0,736	0,754	0,874
Santos	0,620	0,656	0,711	0,673	0,724
São Francisco do Sul	0,621	0,657	0,669	0,662	0,694
São Sebastião	0,622	0,656	0,718	0,681	0,735
SUAPE	0,579	0,656	0,674	0,678	0,765
Vitória	0,618	0,712	0,806	0,764	0,849

Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
0 – 0,199	0,2 – 0,399	0,4 – 0,599	0,6 – 0,799	0,8 – 1,000

4.2.3 Aumento do nível do mar

Por meio do resultado da **Error! Reference source not found.**Tabela 9, é possível observar que apenas os portos de Angra dos Reis, Niterói e Rio de Janeiro não apresentaram a ameaça de aumento do nível do mar nos cenários e períodos considerados. Isso significa que, segundo os dados extraídos do modelo de elevação digital “*CoastalDEM*”, para esses portos, o aumento do nível do mar não se constitui em uma ameaça climática para esses portos, sendo atribuído, portanto o valor nulo para tal ameaça. Vale ressaltar que os resultados foram baseados em modelos globais, a partir de uma avaliação qualitativa.

Tabela 9 - Indicador de aumento do nível do mar

Porto	RCP4.5		RCP8.5	
	2030	2050	2030	2050
Angra dos Reis	0	0	0	0
Aratu-Candeias	1	1	1	1
Cabedelo	1	1	1	1
Fortaleza	1	1	1	1
Ilhéus	1	1	1	1
Imbituba	1	1	1	1
Itaguaí	1	1	1	1
Itajaí	1	1	1	1
Itaqui	1	1	1	1
Natal	1	1	1	1
Niterói	0	0	0	0
Paranaguá	1	1	1	1
Recife	1	1	1	1

Porto	RCP4.5		RCP8.5	
	2030	2050	2030	2050
Rio de Janeiro	0	0	0	0
Rio Grande	1	1	1	1
Salvador	1	1	1	1
Santos	1	1	1	1
São Francisco do Sul	1	1	1	1
São Sebastião	1	1	1	1
SUAPE	1	1	1	1
Vitória	1	1	1	1
Ausente	Presente			
0	1			

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente relatório (P3) apresentou o levantamento e análise das ameaças climáticas relacionadas a impactos diretos e indiretos no setor portuário. A seleção das ameaças climáticas foi baseada em revisão bibliográfica e aplicação de um questionário junto aos 21 portos, foco deste projeto.

Sendo assim, abaixo seguem as considerações a partir das perguntas norteadoras do relatório:

(1) A frequência das ameaças climáticas está aumentando/diminuindo?

Com base na análise de tendência (seção 4.1), conclui-se que para a ameaça de tempestade os portos de Ilhéus, Natal e Rio Grande já demonstram aumento na frequência de dias com extremos chuvosos (R99p). No entanto, apesar de Cabedelo não apresentar tendência para o R99p, é observado um aumento na tendência do índice de máxima precipitação diária (RX1day). Em relação a ameaça de vendaval, conclui-se que os portos de Cabedelo, Fortaleza, Itaquí, Natal, Recife e SUAPE já apresentam um aumento na tendência de ocorrência de ventos extremos.

Esta análise de tendência para os indicadores de tempestade e vendaval aponta que os portos citados já são impactados por essas ameaças no período presente.

(2) A frequência dessas ameaças climáticas irá aumentar/diminuir no futuro?

Baseado nos cenários de mudança do clima (seção 4.2), conclui-se que para a ameaça de tempestade considerando o RCP 4.5 o porto de Itaquí apresenta aumento na probabilidade de ocorrência de tempestade nos dois horizontes temporais e os portos de Niterói e Rio de Janeiro apenas em 2030. Ainda considerando o cenário de emissão RCP 4.5, o porto de Santos apresenta redução na probabilidade de ameaça para o período de 2050. Já considerando o RCP 8.5, os portos de Santos e São Francisco do Sul apresentam diminuição na probabilidade de ocorrência no horizonte temporal de 2030, enquanto, o porto de Itaquí indica aumento em ambos os períodos, Recife no período de 2030 e os portos de Niterói e Rio de Janeiro no período de 2050.

Em relação à ameaça de vendaval, identificou-se um aumento na probabilidade de ocorrência para os portos de Cabedelo, Fortaleza, Natal, Niterói, Recife, Rio de Janeiro e SUAPE considerando ambos os cenários de emissões (RCP4.5 e RCP8.5) e horizontes temporais. Para os portos de Aratu-Candeias, Ilhéus, Salvador e Vitória, identificou-se um aumento para o RCP8.5 em 2050, e somente Vitória apresenta o mesmo sinal de mudança para o RCP4.5.

O aumento na ocorrência das ameaças climáticas para os portos mencionados acima, identificado através de análise de tendência com dados observacionais e cenários de

mudança do clima derivados de modelo, indicam que poderão sofrer mais com as ameaças de tempestades e vendavais, podendo ser considerados prioritários em termos de medidas de adaptação. Por outro lado, recomenda-se também considerar os portos que, apesar de não serem classificados como sujeitos a uma ameaça muito alta, tiveram uma variação alta quando comparado os dados do período observacional com os projetados. Isso porque, mesmo não havendo uma ameaça alta para tais portos, a variação da ameaça de forma brusca pode gerar impactos não previstos e gerenciados. Vale ressaltar que a abordagem utilizada para o aumento do nível do mar não permitiu a análise em relação a frequência.

Para os portos em que há e haverá a presença do aumento do nível do mar, é importante observar os efeitos secundários gerados por essa ameaça. Segundo o Wong *et. al* (2014), a elevação relativa do nível do mar pode gerar impactos adversos nos sistemas costeiros e nas zonas baixas, tais como: submersão, inundações costeiras, e erosão costeira. Assim, ao analisar as ações de adaptação em relação a essa ameaça climática, é fundamental um olhar holístico, levando em consideração não somente os efeitos do aumento do nível do mar, mas também outros fatores locais, como por exemplo, a subsidência do solo que ocorre em algumas localidades.

6.1 RECOMENDAÇÕES E PRÓXIMOS PASSOS

Foi possível observar limitações em relação à linearidade e à escala dos dados climáticos. As projeções não apresentaram uma consistência ao longo dos anos para algumas regiões analisadas, visto que nem sempre o horizonte temporal mais distante apresentou a maior probabilidade de ocorrência da ameaça. Apesar das limitações e incertezas dos modelos climáticos, a utilização de cenários futuros do clima é fundamental para auxiliar tomadores de decisão na priorização e direcionamento de estratégias de adaptação efetivas.

Para aprimoramentos de trabalhos futuros, recomenda-se a inclusão de novos modelos e cenários climáticos, estimativa das incertezas associadas ao conjunto de modelos e inclusão de novas ameaças de interesse dos portos. Lembrando que a análise deve ser revista constantemente.

Como próximos passos, o Produto 4 – Vulnerabilidades e Exposição apresentará a sensibilidade, a capacidade adaptativa, bem como a exposição dos 21 portos públicos analisados frente às ameaças de tempestades, vendavais e aumento do nível do mar, para composição do índice de risco climático. Espera-se que a análise dos resultados apresentados no presente relatório, em conjunto com os resultados que serão apresentados nos produtos subsequentes, se constitua em um importante indicador da urgência da adaptação às alterações climáticas para os portos, importantes motores da economia brasileira.

REFERÊNCIAS

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E.; PEZZOLLI, A.; ARCORACE, M.; CRISTOFORI, E.; SOUSA JÚNIOR, W. C. Water Qual Expo Health. **Exposure of Santos Harbor Metropolitan Area (Brazil) to Wave and Storm Surge Climate Changes**, v. 6, p. 73–88, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12403-014-0109-7>

ANANDHI, A.; FREI, A.; PIERSON, D. C.; SCHNEIDERMAN, E. M.; ZION, M. S.; LOUNSBURY, D.; MATONSE, A. H. Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment: EXAMINATION OF CHANGE FACTOR METHODOLOGIES. **Water Resources Research**, v. 47, n. 3, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2010WR009104>

BARBIER, E. Nature. **Hurricane Katrina's lessons for the world**, [s. l.], 2015, p. 285–287.

BECKER, A.; INOUE, S.; FISCHER, M.; SCHWEGLER, B. Climate change impacts on international seaports: knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrators. **Climatic Change**, v. 110, n. 1–2, p. 5–29, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0043-7>

CLIMATE CENTRAL. **Flooded Future: Global vulnerability to sea level rise worse than previously understood | Climate Central**. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.climatecentral.org/news/report-flooded-future-global-vulnerability-to-sea-level-rise-worse-than-previously-understood>. Acesso em: 12 abr. 2021.

CPTEC. **Glossário**. [s. l.], s.d. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>. Acesso em: 8 abr. 2021.

DEE, D. P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.828>

ECLAC. **Efectos del Cambio Climático en la Costa de América Latina y el Caribe: Dinámicas, Tendencias y Variabilidad Climática**. [S. l.]: CEPAL, 2015. *E-book*. Disponível em: https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/3955/S1500961_es.pdf. Acesso em: 12 abr. 2021.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 150066, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

GEORGE, G. (org.). **The Impact of Climate Change on European Lakes**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2945-4>

GIORGI, F. Thirty Years of Regional Climate Modeling: Where Are We and Where Are We Going next? **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, p. 2018JD030094, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>

HALLEGATTE, S.; GREEN, C.; NICHOLLS, R.; CORFEE-MORLOT, J. Future flood losses in major coastal cities. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 802–806, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>

HARARI, J.; DE CAMARGO, R. Tides and mean sea level variabilities in Santos (SP), 1944 to 1989. **Relatório Interno do Instituto Oceanográfico**, v. 36, p. 1–15, 1995.

HARARI, J.; FRANÇA, C. A. de S.; CAMARGO, R. Variabilidade de longo termo de componentes de maré e do nível médio do mar na costa brasileira. p. 12, 2008.

INMET. **Normais Climatológicas do Brasil, 1961-1990**. [s. l.], 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inmet/capa>. Acesso em: 10 jun. 2021.

INPE. **Projeções Climáticas no Brasil**. [s. l.], 2021. Disponível em: <http://pclima.inpe.br/como-consultar/>. Acesso em: 12 abr. 2021.

IPCC. **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge

and New York: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [S. l.: s. n.].

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods.** Londres: Carles Griffin, 1975.

MAGRIN, G.O.; J.A. MARENGO; J.-P. BOULANGE; M.S. BUCKERIDGE; E. CASTELLANOS; G. POVEDA; A. F.R. SCARANO; S. VICUÑA. **Central and South America: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerabilit.** [S. l.]: IPCC, 2014.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245, 1945. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1907187>

MEARNS L, ET. AL. **Climate scenario development in Climate Change 220: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, UK: J. Houghton et. al, 2001.

MMA. **Panorama da Erosão Costeira no Brasil.** Brasil: [s. n.], 2018. NOBRE, C.; MARENGO, J. **Mudanças Climáticas em Rede: Um olhar interdisciplinar.** 1. ed. São José dos Campos, SP: Canal 6, 2017. *E-book.* Disponível em: [https://mudarfuturo.fea.usp.br/wp-content/uploads/2018/02/Livro_Mudan%C3%A7as-Clinaticas-em-Rede_eBook-Conflito-de-codifica%C3%A7%C3%A3o-Unicode.pdf](https://mudarfuturo.fea.usp.br/wp-content/uploads/2018/02/Livro_Mudan%C3%A7as-Climaticas-em-Rede_eBook-Conflito-de-codifica%C3%A7%C3%A3o-Unicode.pdf). Acesso em: 12 abr. 2021.

OPPENHEIMER, M. *et al.* Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. *In:* IPCC (ed.). **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.** [S. l.]: [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds, 2019. p. 321–445.

PBMC. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das Cidades costeiras Brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.** Rio de Janeiro, Brasil: PBMC, COPPE - UFRJ, 2016. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Disponível em: https://ppgoceano.paginas.ufsc.br/files/2017/06/Relatorio_DOIS_v1_04.06.17.pdf. Acesso em: 8 jun. 2021.

RUELLAND, D.; ARDOIN-BARDIN, S.; COLLET, L.; ROUCOU, P. Simulating future trends in hydrological regime of a large Sudano-Sahelian catchment under climate change. **Journal of Hydrology**, v. 424–425, p. 207–216, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.002>

SEMADENI-DAVIES, A. Urban Water Management vs. Climate Change: Impacts on Cold Region Waste Water Inflows. **Climatic Change**, v. 64, n. 1/2, p. 103–126, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000024669.22066.04>

SEMADENI-DAVIES, A.; HERNEBRING, C.; SVENSSON, G.; GUSTAFSSON, L.-G. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater. **Journal of Hydrology**, v. 350, n. 1–2, p. 114–125, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.006>

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

STANIFORTH, A. Regional modeling: A theoretical discussion. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 63, n. 1–2, p. 15–29, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01025361>

TRAMBLAY, Y.; RUELLAND, D.; SOMOT, S.; BOUAICHA, R.; SERVAT, E. High-resolution Med-CORDEX regional climate model simulations for hydrological impact studies: a first evaluation of the ALADIN-Climate model in Morocco. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 10, p. 3721–3739, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-17-3721-2013>

UFSC-CEPED. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 A 2012**. Florianópolis: [s. n.], 2013. 2.

WONG, P. P.; LOSADA, I. J.; GATTUSO, J.-P.; HINKEL, J.; KHATTABI, A; MCLNNES, K.L.; SAITO, Y.; SALLENGER, A. **Coastal systems and low-lying areas**. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: IPCC, 2014.

ZANETTI, V.; DE SOUSA JUNIOR, W.; DE FREITAS, D. A Climate Change Vulnerability Index and Case Study in a Brazilian Coastal City. **Sustainability**, v. 8, n. 8, p. 811, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su8080811>

APÊNDICE I – VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Nas tabelas abaixo é possível observar os resultados dos testes estatísticos para as variáveis de precipitação e velocidade máxima do vento dos modelos em relação aos dados observacionais. Para o campo de precipitação, apenas os portos de Santos e São Sebastião apresentaram, para o teste Kolmogorov-Smirnov, valores estatísticos não significativos. Além disso, nota-se que o porto de Rio Grande apresentou um baixo nível de correlação de Spearman entre as séries.

Dados Mensais de 1986 a 2005 do CORDEX (Ensemble) e CHIRPS (Observacional)

Validação do ENSEMBLE - Precipitação

Porto	Teste Kolmogorov-Smirnov	Correlação de Spearman	RMSE	MAE	Desvio Padrão
Angra dos Reis	0,225	0,774	81,63	55,34	98,71
Aratu-Candeias	0,433	0,347	139,46	111,45	87,55
Cabedelo	0,467	0,493	155,79	127,74	95,96
Fortaleza	0,263	0,771	105,02	72,79	115,11
Ilhéus	0,579	0,118	117,26	99,54	57,22
Imbituba	0,213	0,478	62,33	47,79	62,58
Itaguaí	0,158	0,821	63,02	43,32	91,02
Itajaí	0,246	0,528	77,92	59,33	75,15
Itaqui	0,279	0,879	86,46	68,31	154,95
Natal	0,296	0,461	118,60	90,29	74,92
Niterói	0,113	0,833	57,50	40,87	92,61
Paranaguá	0,158	0,635	74,55	57,23	86,32
Recife	0,479	0,442	161,62	133,78	119,42
Rio de Janeiro	0,113	0,833	57,50	40,87	92,61
Rio Grande	0,367	*0,033	71,87	52,60	59,49
Salvador	0,479	0,332	117,04	95,22	67,44

Santos	0,108	0,811	55,42	42,53	88,03
São Francisco do Sul	0,158	0,567	78,38	59,89	82,72
São Sebastião	0,100	0,782	58,82	44,68	85,13
SUAPE	0,479	0,442	161,62	133,78	119,42
Vitória	0,467	0,267	87,95	74,49	73,98

Negrito: Valores estatisticamente não significantes p-value > 0.05

Para o campo de velocidade máxima do vento, todos os portos apresentaram valores estatísticos significantes e valores (positivos e negativos) de correlação de Spearman, ou seja, possuem uma alta relação entre os dados modelados versus o observacional.

Dados Mensais de 1986 a 2005 do CORDEX (Ensemble) e ERA-Interim (Observacional)

Validação do ENSEMBLE - Máxima Velocidade do Vento					
Porto	Teste Kolmogorov-Smirnov	Correlação de Spearman	RMSE	MAE	Desvio Padrão
Angra dos Reis	0,979	0,245	163,12	130,38	98,71
Aratu-Candeias	0,979	0,251	139,03	108,40	87,55
Cabedelo	0,804	0,176	128,52	88,06	95,96
Fortaleza	0,521	-0,781	137,01	89,01	115,11
Ilhéus	1,000	0,105	105,16	88,47	57,22
Imbituba	0,992	0,263	125,08	108,64	62,58
Itaguaí	0,963	0,259	145,87	114,51	91,02
Itajaí	0,996	0,333	152,38	133,00	75,15
Itaqui	0,742	-0,779	217,88	155,44	154,95
Natal	0,608	-0,255	92,86	62,44	74,92
Niterói	0,963	0,323	148,25	116,44	92,61
Paranaguá	1,000	0,352	172,31	149,57	86,32

Recife	0,892	0,469	166,79	118,32	119,42
Rio de Janeiro	0,963	0,323	148,25	116,44	92,61
Rio Grande	0,967	-0,114	104,39	85,81	59,49
Salvador	0,992	-0,362	118,87	97,79	67,44
Santos	0,954	0,197	144,65	115,30	88,03
São Francisco do Sul	1,000	0,347	166,50	144,93	82,72
São Sebastião	0,946	0,220	141,72	113,82	85,13
SUAPE	0,892	0,469	166,79	118,32	119,42
Vitória	0,983	0,558	114,32	88,50	73,98

Negrito: Valores estatisticamente não significantes p-value > 0.05

APÊNDICE II – TESTES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA

RX1day	Observacional (1985 – 2005)		RCP 4.5 (2021 – 2060)		RCP 8.5 (2021 – 2060)	
	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope
Angra dos Reis	0,974	0,032	0,110	-1,596	0,087	1,713
Aratu-Candeias	0,284	1,071	0,789	0,268	0,935	0,082
Cabedelo	0,256	1,136	0,268	-1,107	0,584	-0,548
Fortaleza	0,538	0,616	0,382	-0,874	0,825	-0,221
Ilhéus	0,127	1,525	0,880	0,151	0,753	0,315
Imbituba	0,721	-0,357	0,492	-0,687	0,463	0,734
Itaguaí	0,183	-1,330	0,079	-1,759	0,221	1,223
Itajaí	0,922	-0,097	0,213	1,247	0,188	1,317
Itaqui	0,626	-0,487	0,049	1,969	0,014	2,458
Natal	0,048	1,979	0,972	0,035	0,173	-1,363
Niterói	0,417	-0,811	0,016	-2,412	0,230	1,200
Paranaguá	0,127	1,525	0,477	0,711	0,666	0,431
Recife	0,007	2,693	0,230	-1,200	0,071	-1,806
Rio de Janeiro	0,417	-0,811	0,016	-2,412	0,230	1,200
Rio Grande	0,820	0,227	0,861	0,175	0,357	0,920
Salvador	0,086	1,720	0,991	0,012	0,954	0,058
Santos	0,456	-0,746	0,091	-1,689	0,028	2,202
São Francisco do Sul	0,922	-0,097	0,268	1,107	0,322	0,990
São Sebastião	0,626	0,487	0,011	-2,528	0,011	2,528
SUAPE	0,007	2,693	0,230	-1,200	0,071	-1,806
Vitória	0,456	0,746	0,584	-0,548	0,954	-0,058

Negrito: Há tendência (estatisticamente significativa) p-value ≤ 0.05

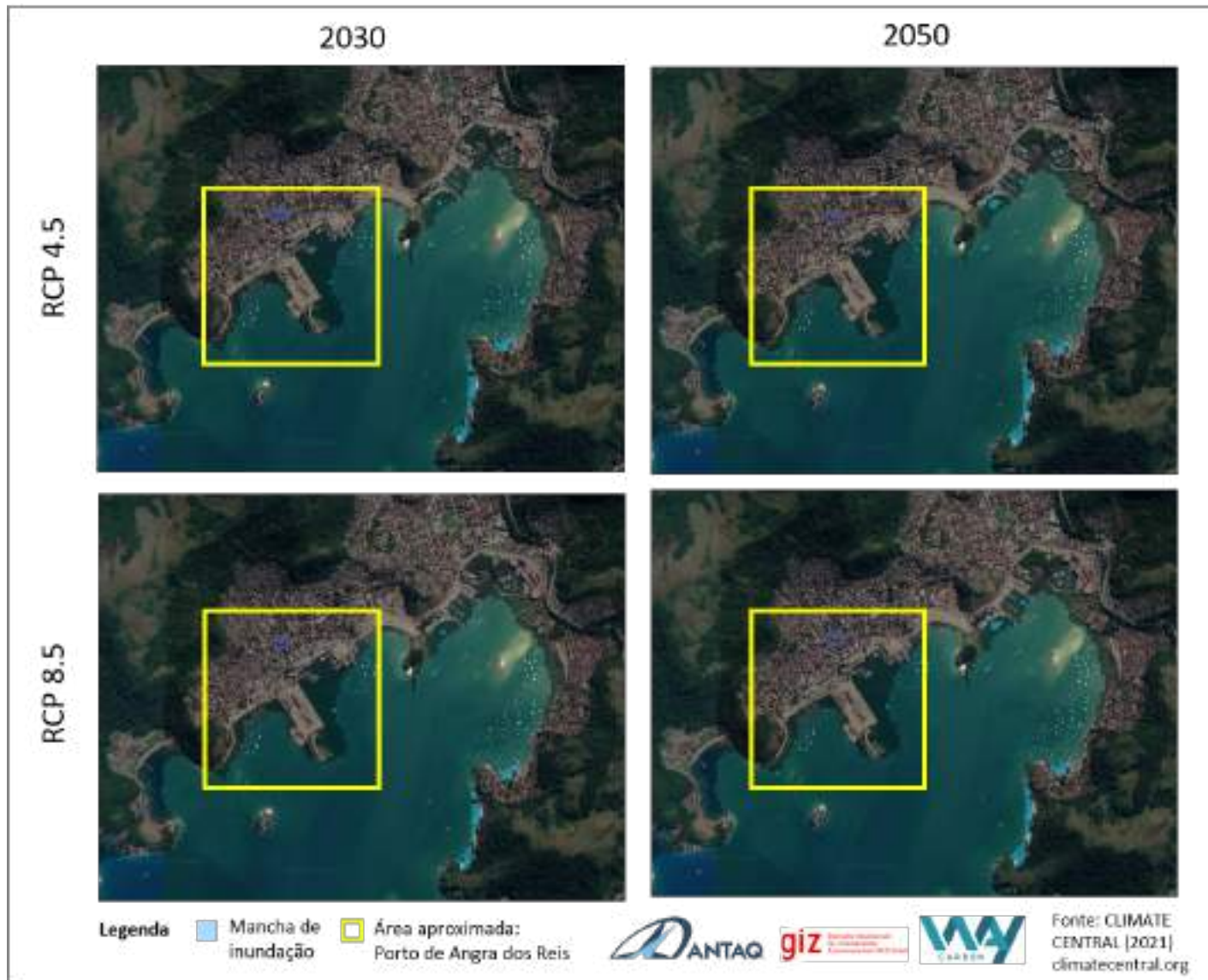
R99p	Observacional (1986 – 2005)		RCP 4.5 (2021 – 2060)		RCP 8.5 (2021 – 2060)	
	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope
Angra dos Reis	0,673	-0,422	0,061	-1,876	0,843	-0,198
Aratu-Candeias	0,363	-0,909	0,991	0,012	0,345	0,944
Cabedelo	0,183	1,330	0,991	0,012	0,650	-0,454
Fortaleza	0,922	0,097	0,010	2,575	0,011	2,528
Ilhéus	0,538	0,616	0,258	1,130	0,666	0,431
Imbituba	0,363	-0,909	0,666	0,431	0,753	-0,315
Itaguaí	0,721	-0,357	0,173	-1,363	0,616	0,501
Itajaí	0,721	-0,357	0,105	-1,619	0,935	0,082
Itaqui	0,581	-0,552	0,046	1,992	0,000	5,488
Natal	0,098	1,655	0,492	0,687	0,507	-0,664
Niterói	0,820	-0,227	0,204	-1,270	0,552	0,594
Paranaguá	0,112	-1,590	0,843	-0,198	0,843	0,198
Recife	0,626	0,487	0,616	0,501	0,843	-0,198
Rio de Janeiro	0,820	-0,227	0,204	-1,270	0,552	0,594
Rio Grande	0,871	-0,162	0,825	0,221	0,382	0,874
Salvador	0,871	0,162	0,650	0,454	0,180	1,340
Santos	0,206	-1,265	0,008	-2,645	0,395	0,851
São Francisco do Sul	0,496	-0,681	0,239	-1,177	0,701	0,384
São Sebastião	0,538	-0,616	0,100	-1,643	0,972	-0,035
SUAPE	0,871	-0,162	0,616	0,501	0,843	-0,198
Vitória	0,315	1,006	0,249	-1,153	0,249	-1,153

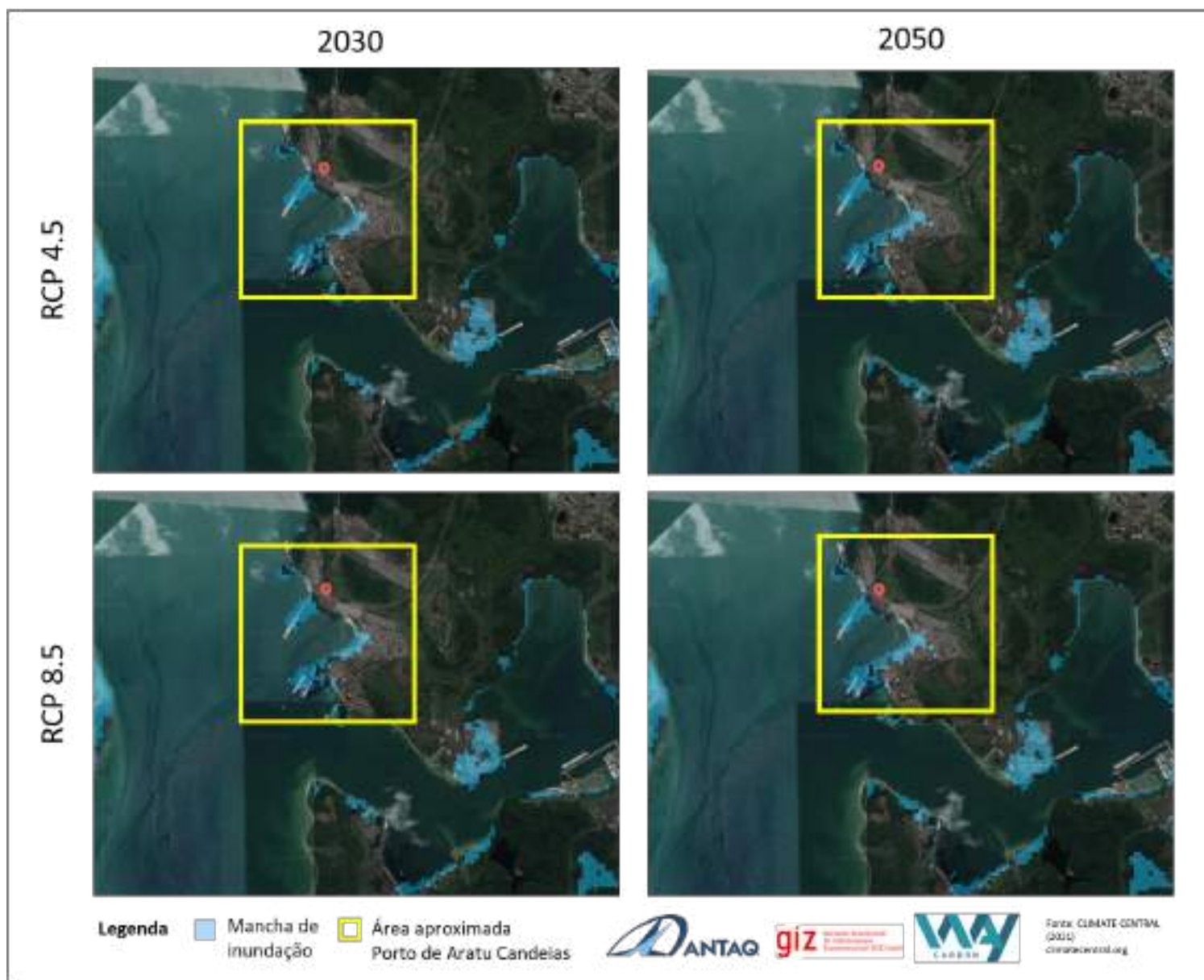
Negrito: Há tendência (estatisticamente significante) p-value ≤ 0.05

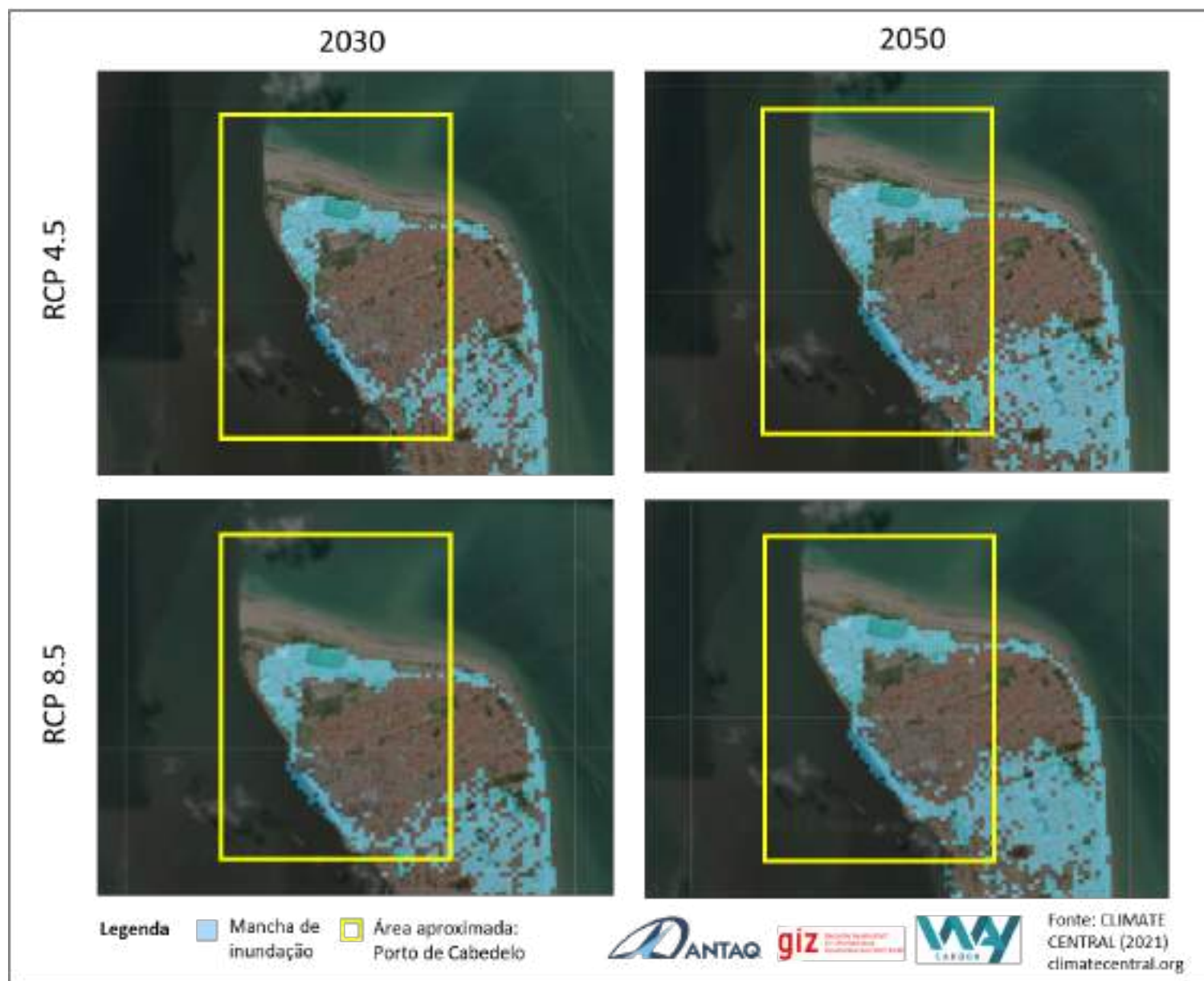
Wx90p	Observacional (1986 – 2005)		RCP 4.5 (2021 – 2060)		RCP 8.5 (2021 – 2060)	
	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope	Mann-Kendall (p-value)	Sen's Slope
Angra dos Reis	0,770	-0,292	0,003	3,006	0,001	3,426
Aratu-Candeias	0,436	-0,779	0,600	0,524	0,000	3,519
Cabedelo	0,284	1,104	0,002	3,123	0,000	5,371
Fortaleza	0,194	1,235	0,007	2,692	0,000	4,416
Ilhéus	0,330	-0,974	0,008	2,645	0,000	3,985
Imbituba	0,770	0,292	0,560	0,594	0,003	2,949
Itaguaí	0,242	-1,170	0,004	2,901	0,004	2,843
Itajaí	0,922	0,097	0,954	0,047	0,015	2,425
Itaqui	0,051	1,948	0,024	2,260	0,025	2,249
Natal	0,144	1,494	0,001	3,367	0,000	5,803
Niterói	0,475	-0,715	0,003	2,983	0,003	2,948
Paranaguá	0,496	-0,681	0,148	1,457	0,000	3,589
Recife	0,795	0,260	1,000	0,000	0,002	3,135
Rio de Janeiro	0,475	-0,715	0,003	2,983	0,003	2,948
Rio Grande	1,000	0,000	0,159	1,410	0,311	1,014
Salvador	0,559	-0,552	0,118	1,550	0,000	4,428
Santos	0,538	0,616	0,002	3,088	0,003	3,006
São Francisco do Sul	1,000	0,000	0,780	0,268	0,008	2,645
São Sebastião	0,697	-0,390	0,001	3,216	0,001	3,437
SUAPE	0,795	0,260	1,000	0,000	0,002	3,135
Vitória	0,820	0,195	0,002	3,076	0,016	2,377

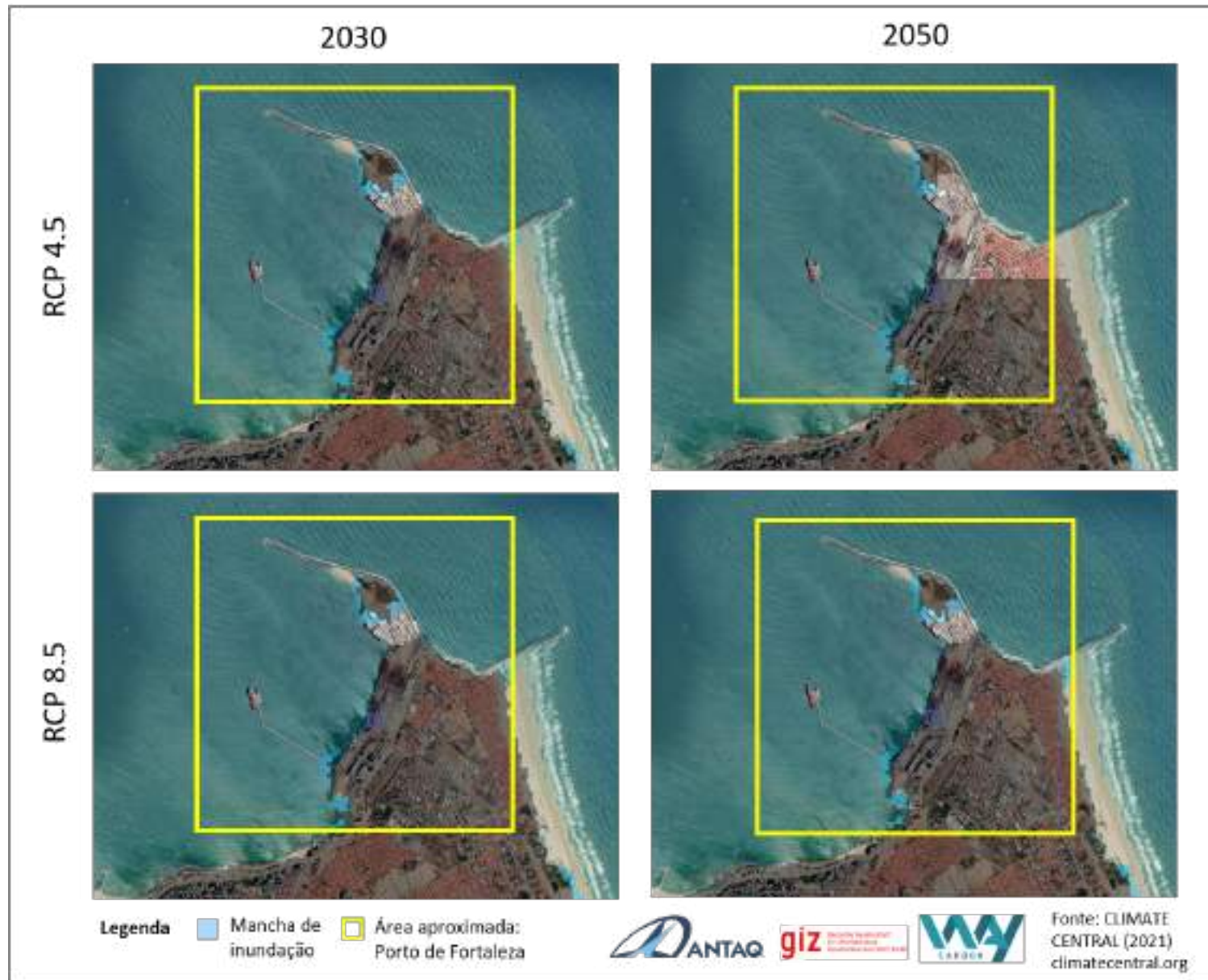
Negrito: Há tendência (estatisticamente significante) p-value ≤ 0.05

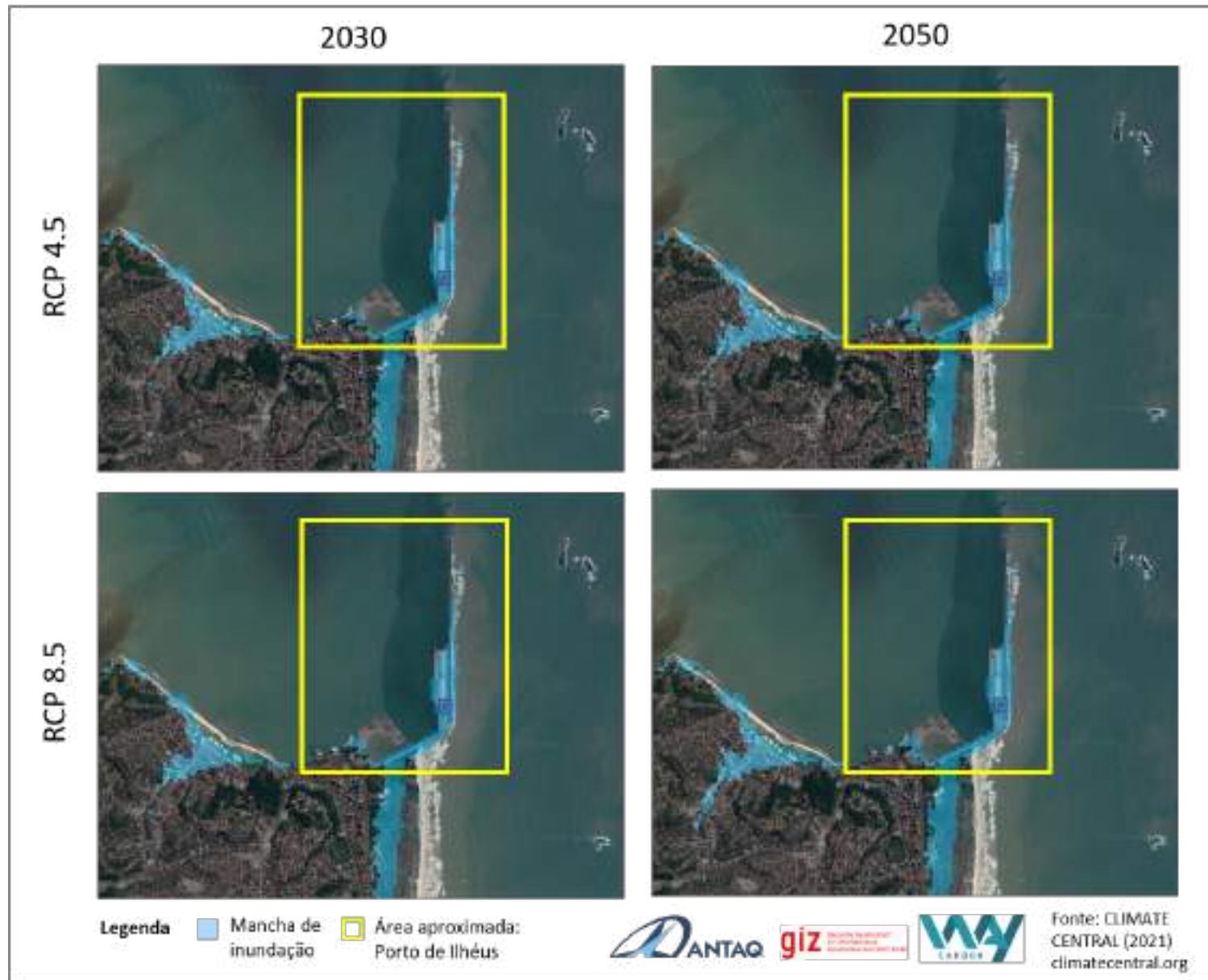
APÊNDICE III – ANÁLISE DO INDICADOR DE AUMENTO DO NÍVEL DO MAR

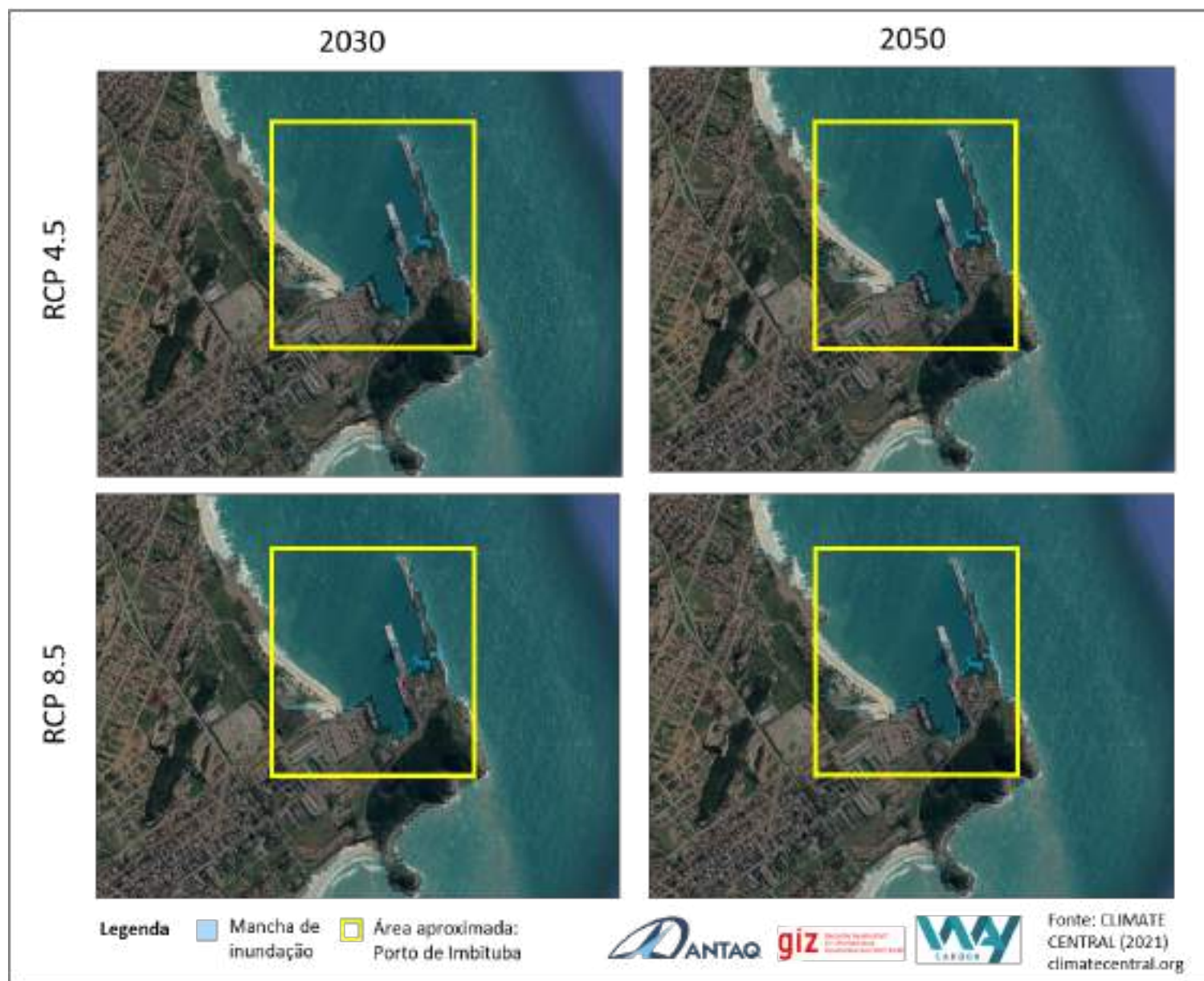


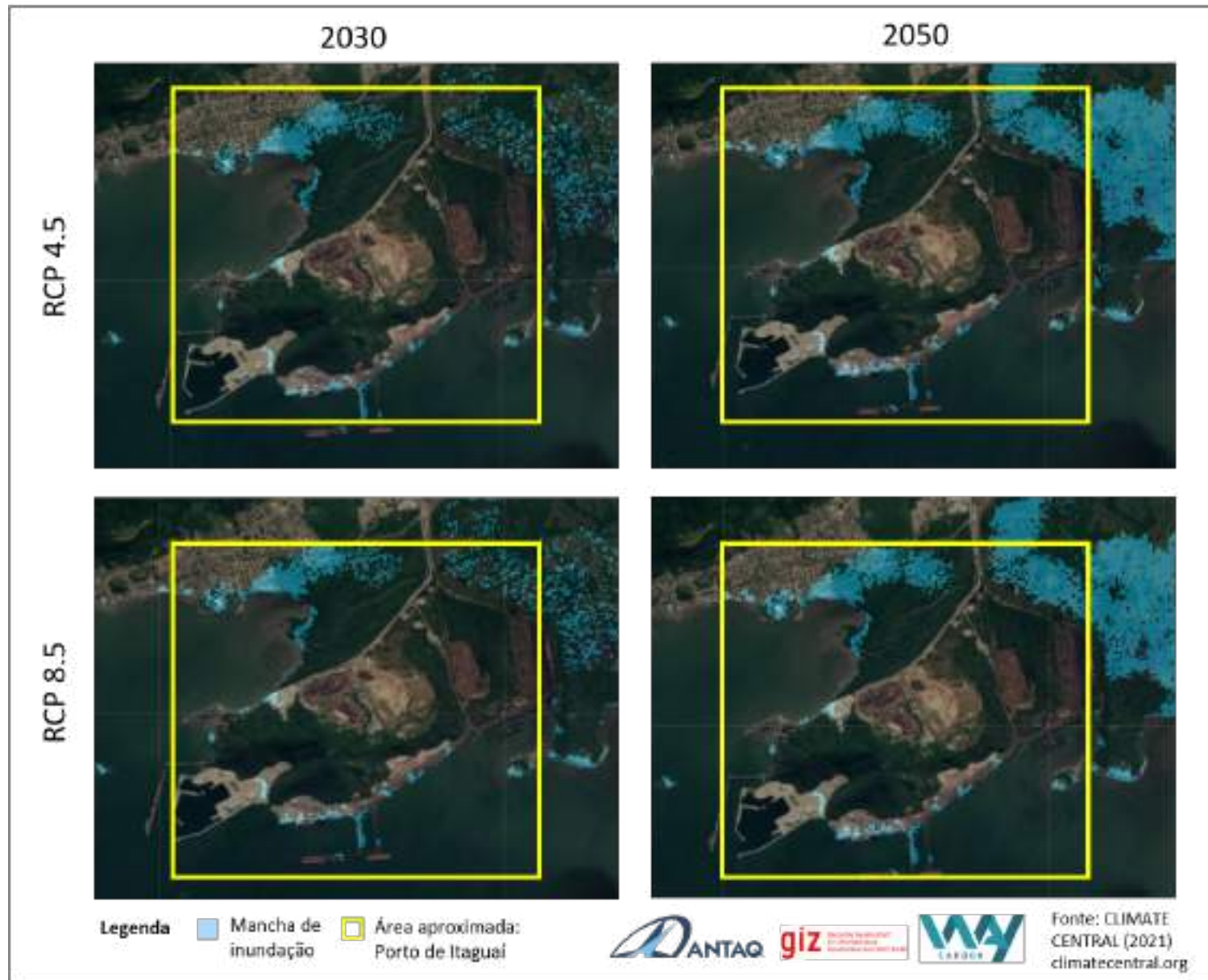


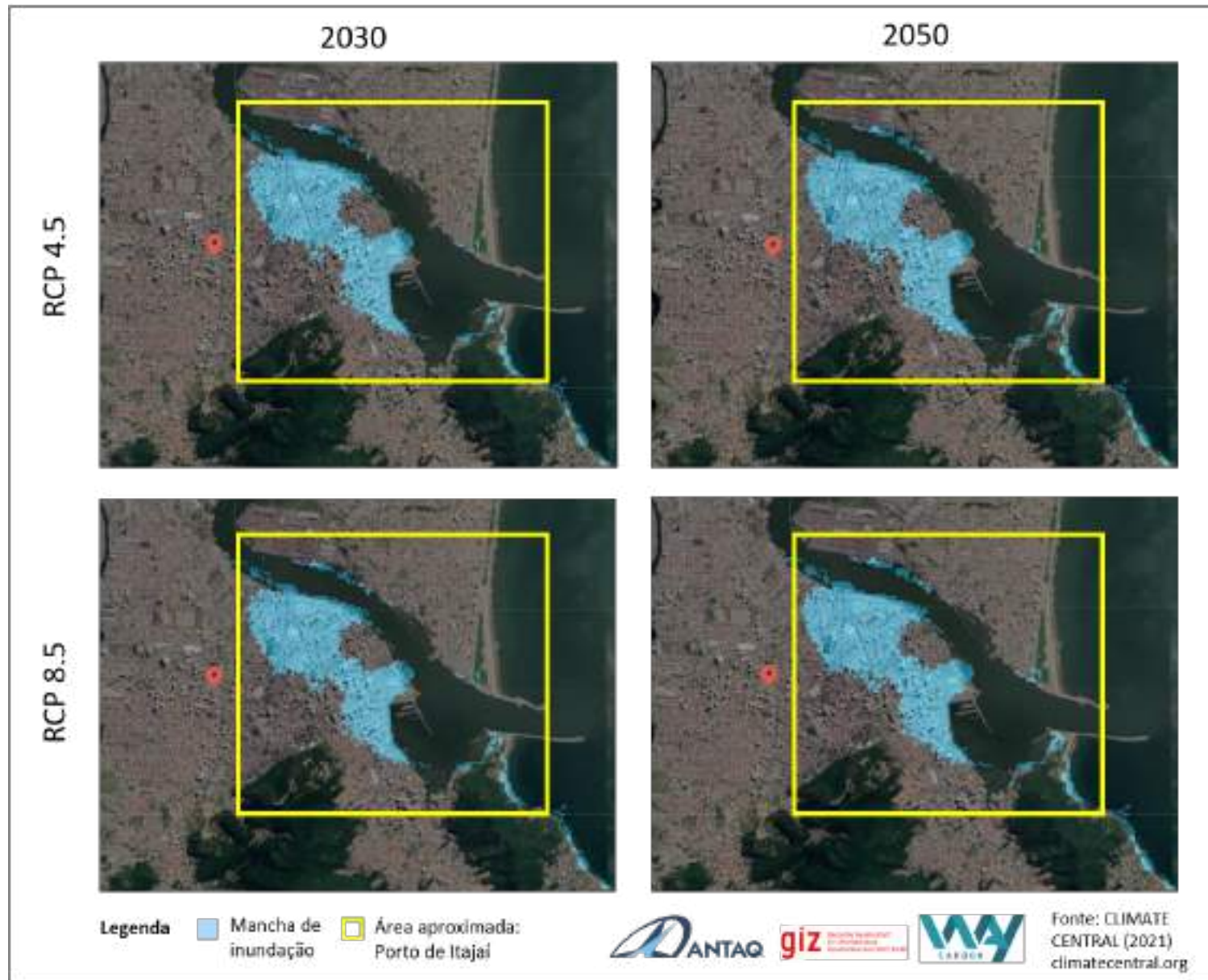


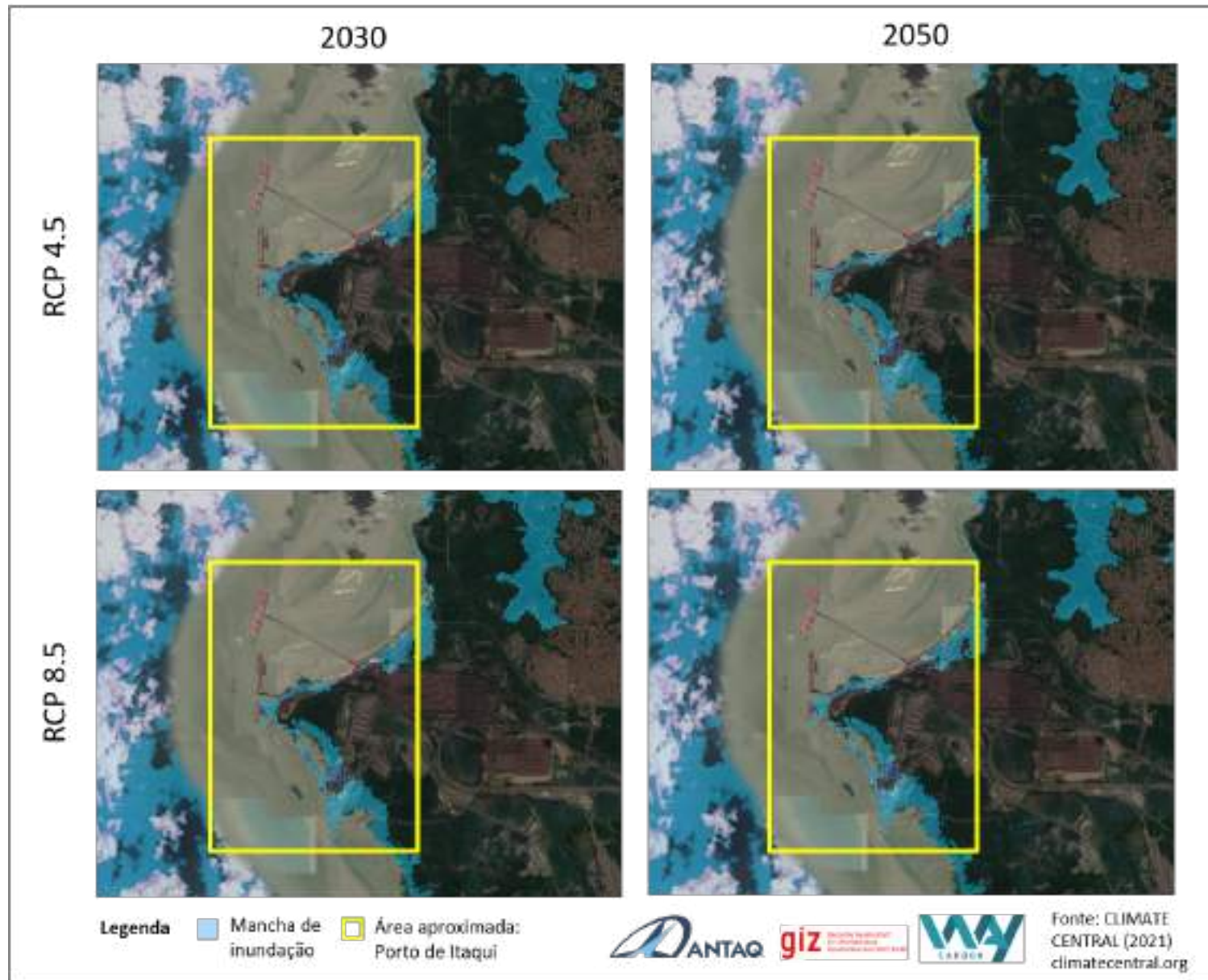


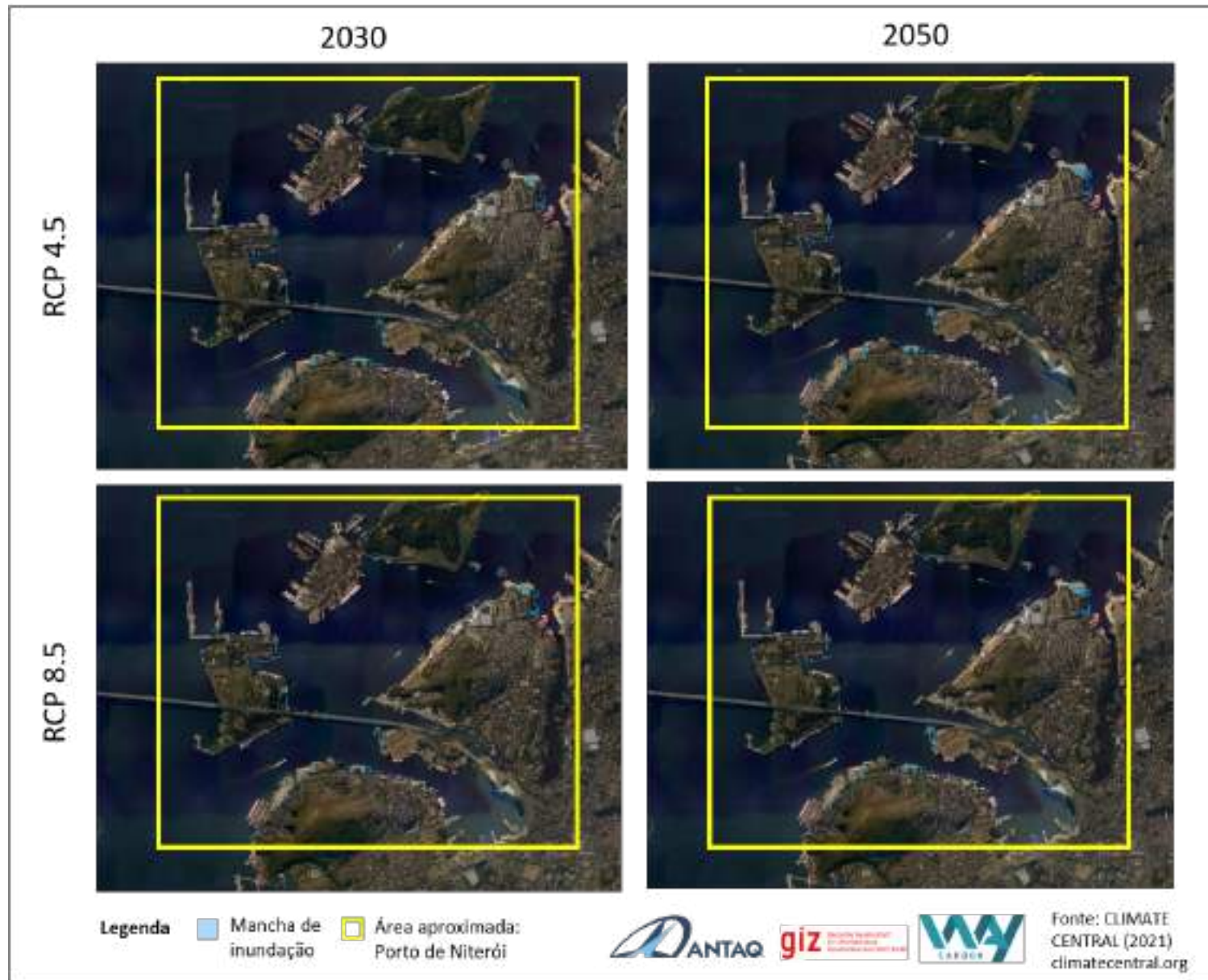


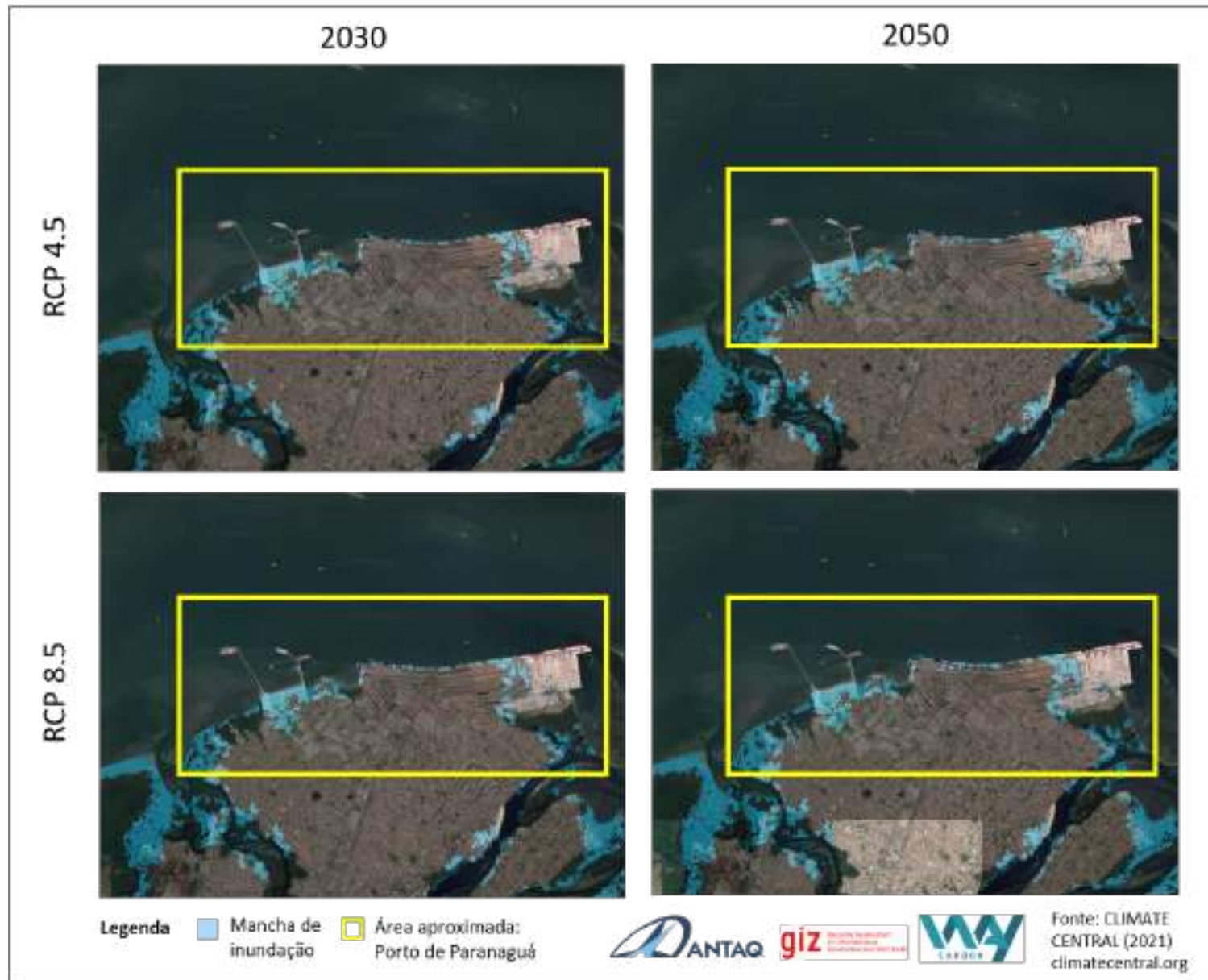


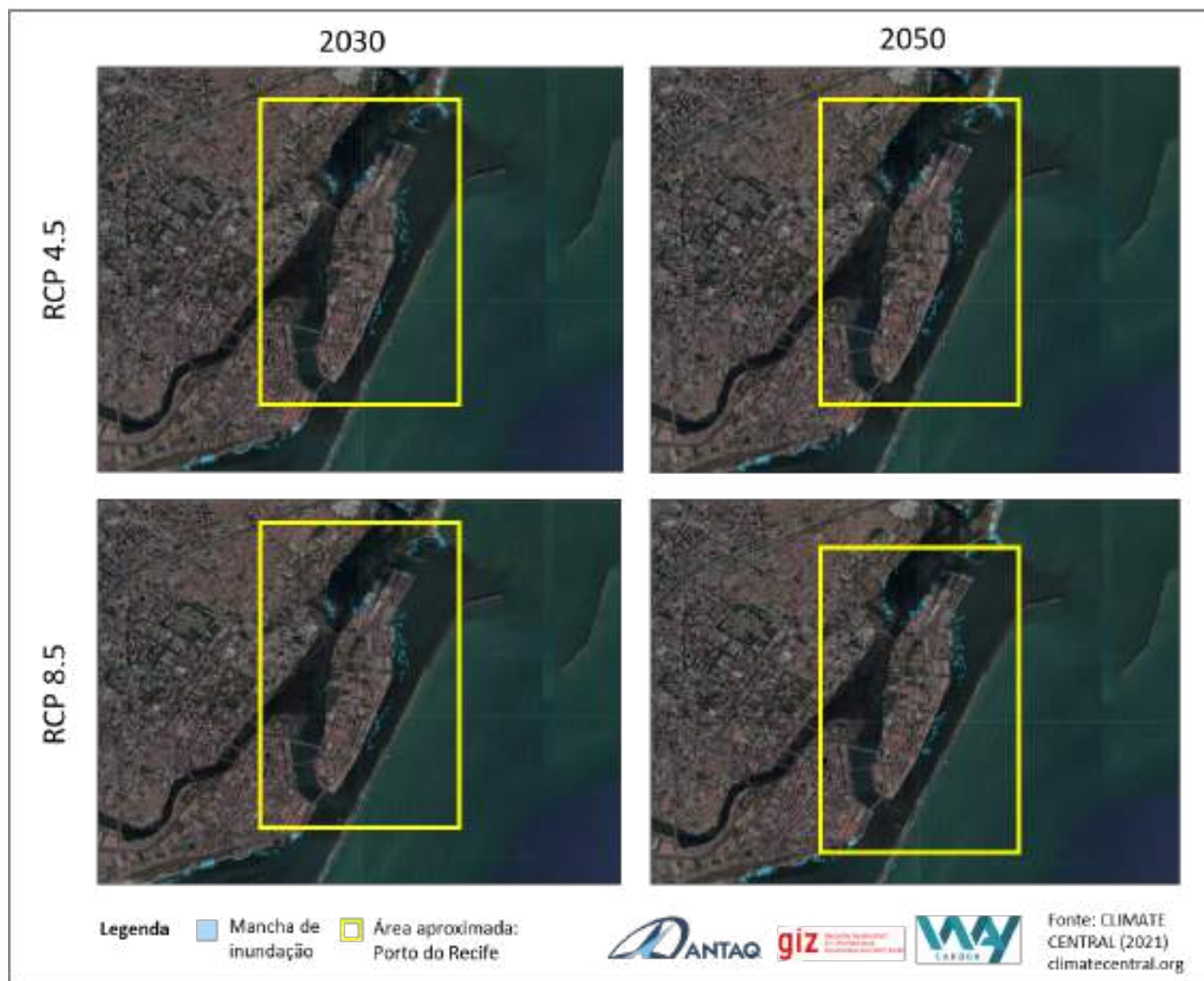


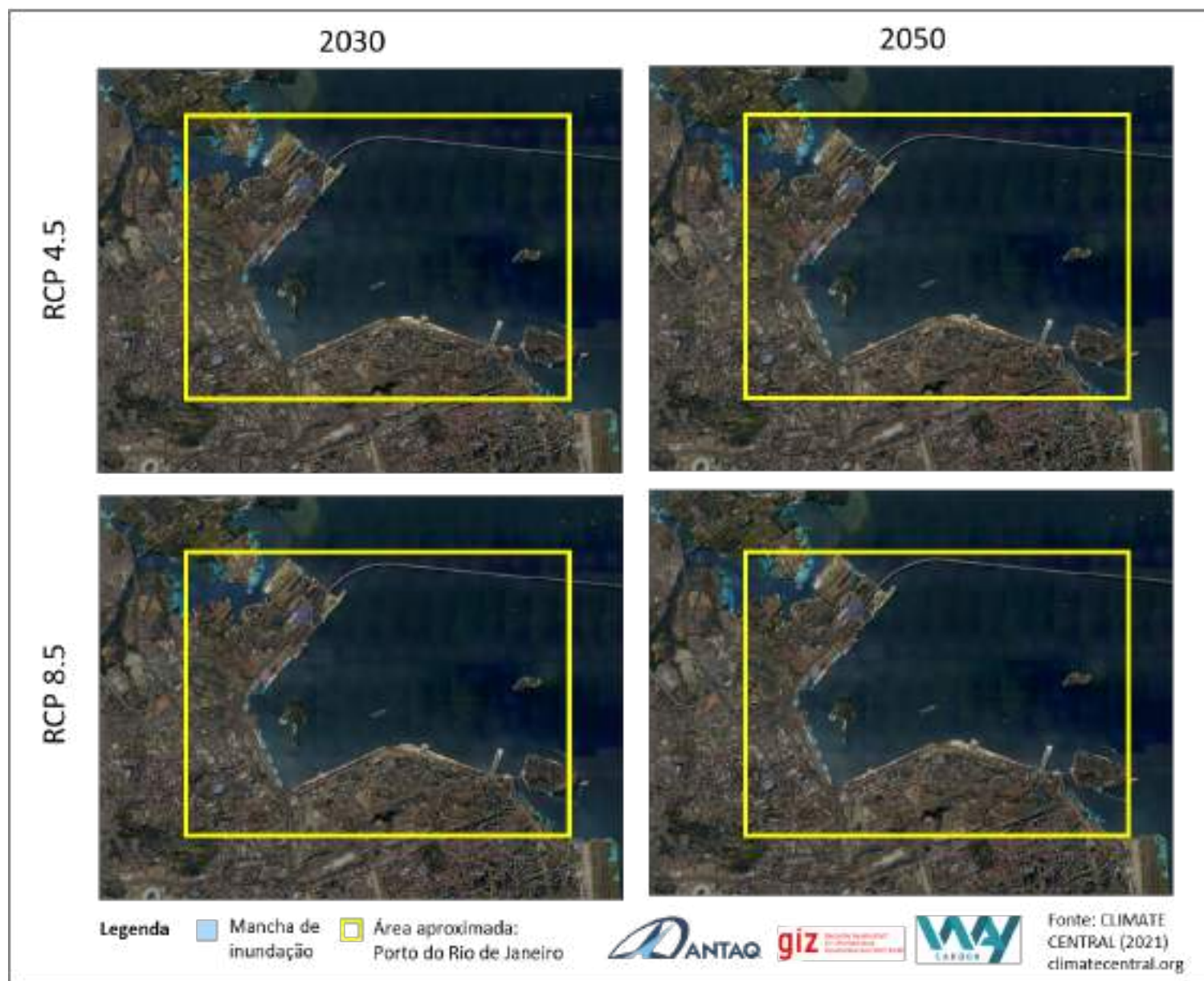




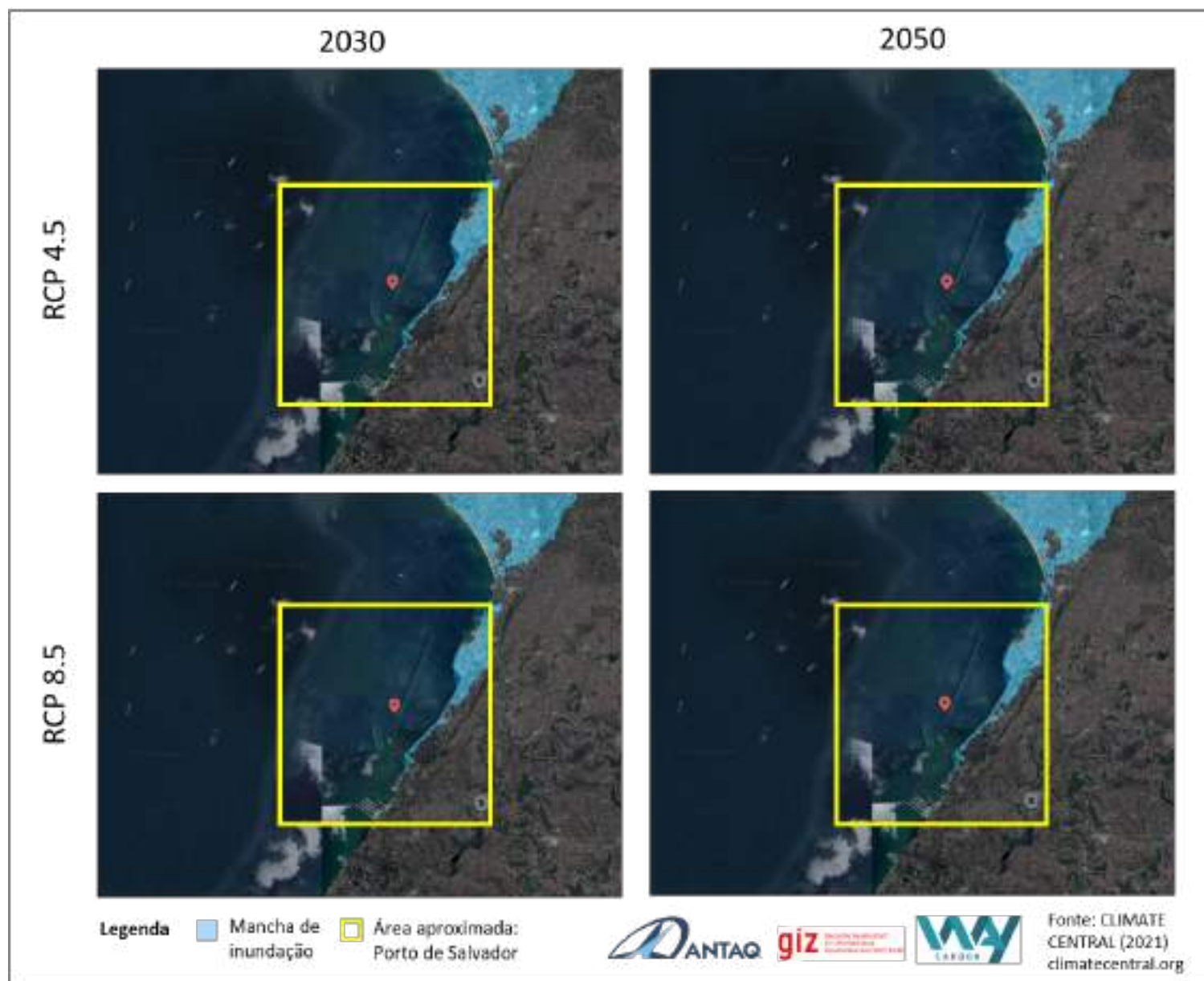


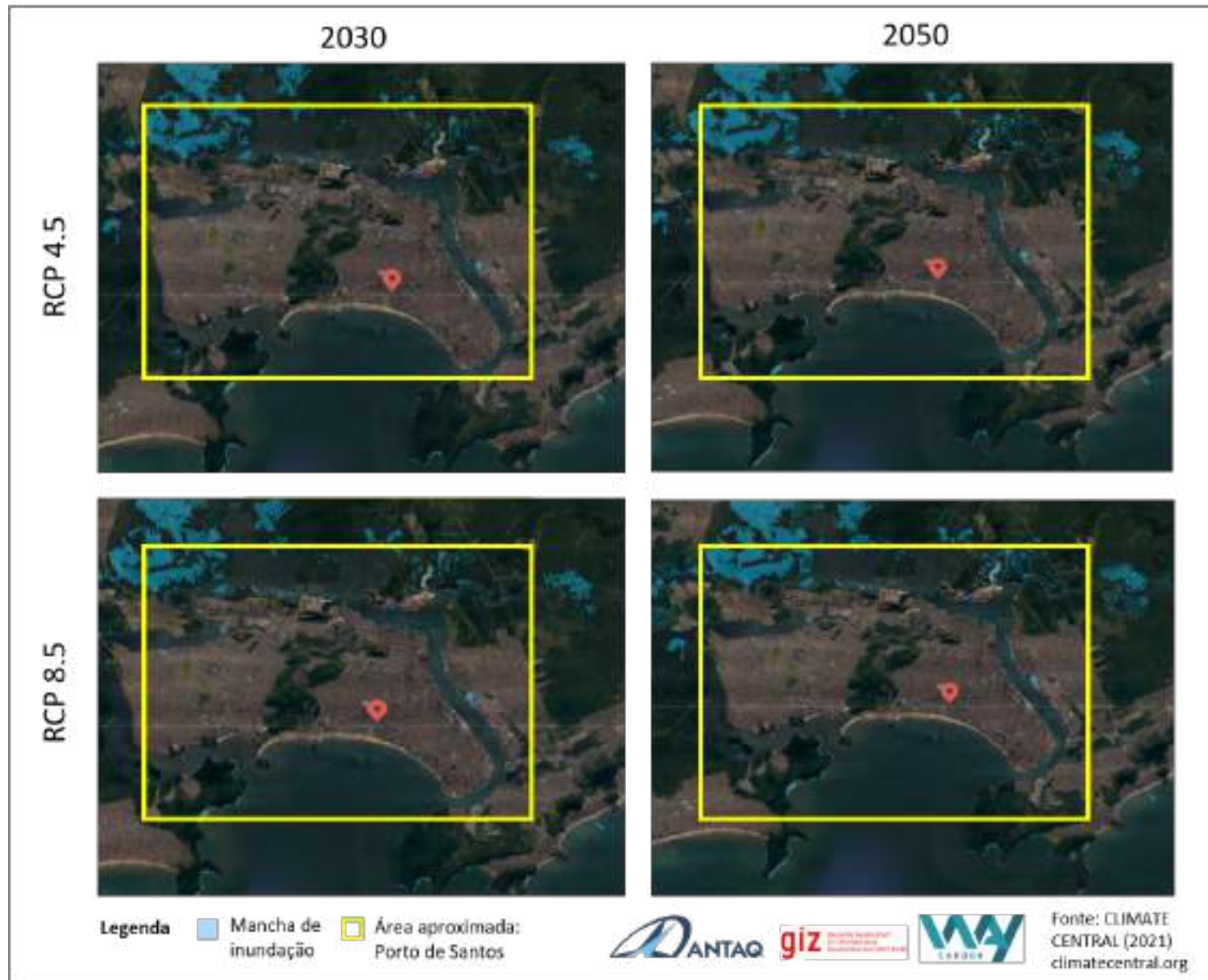






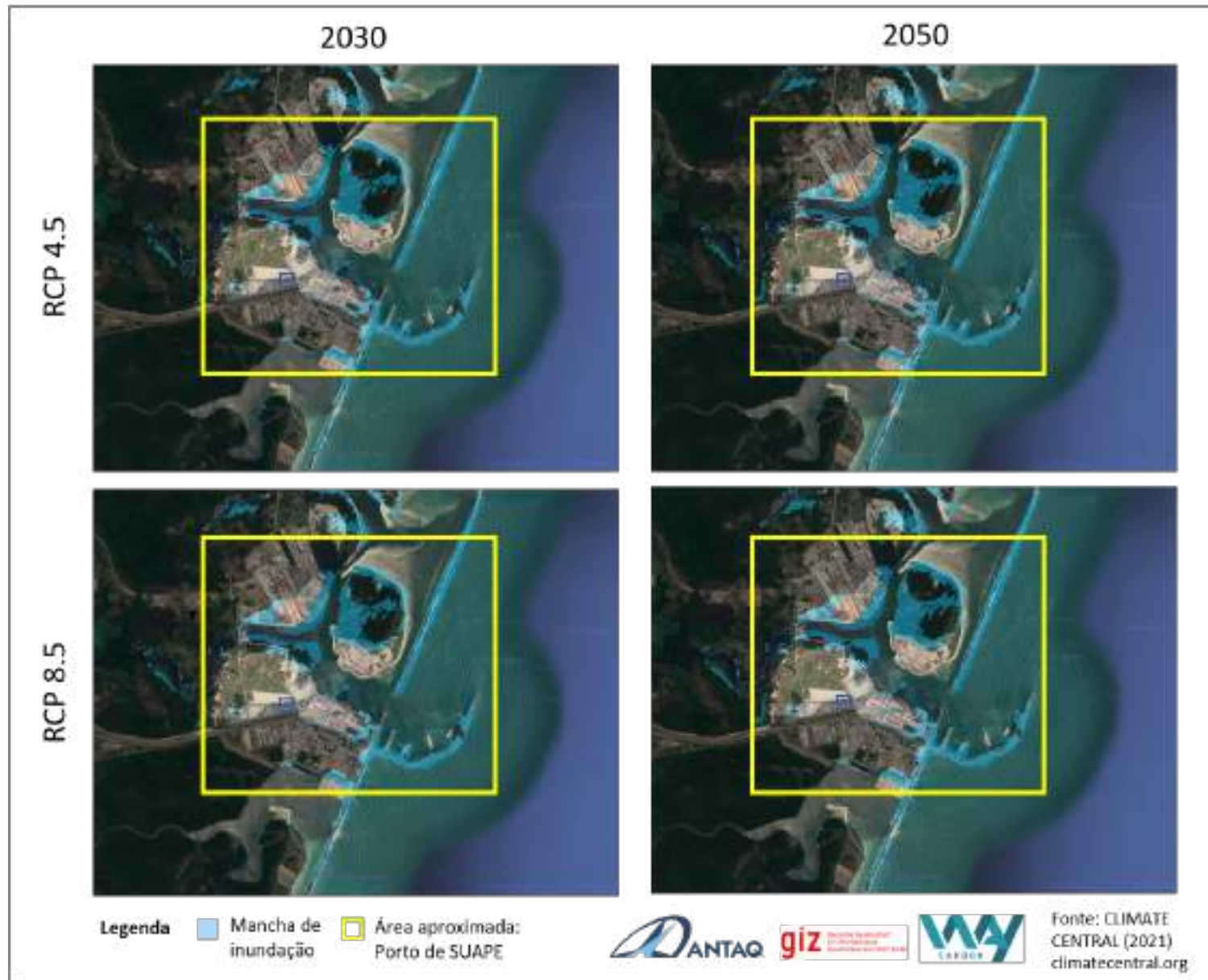


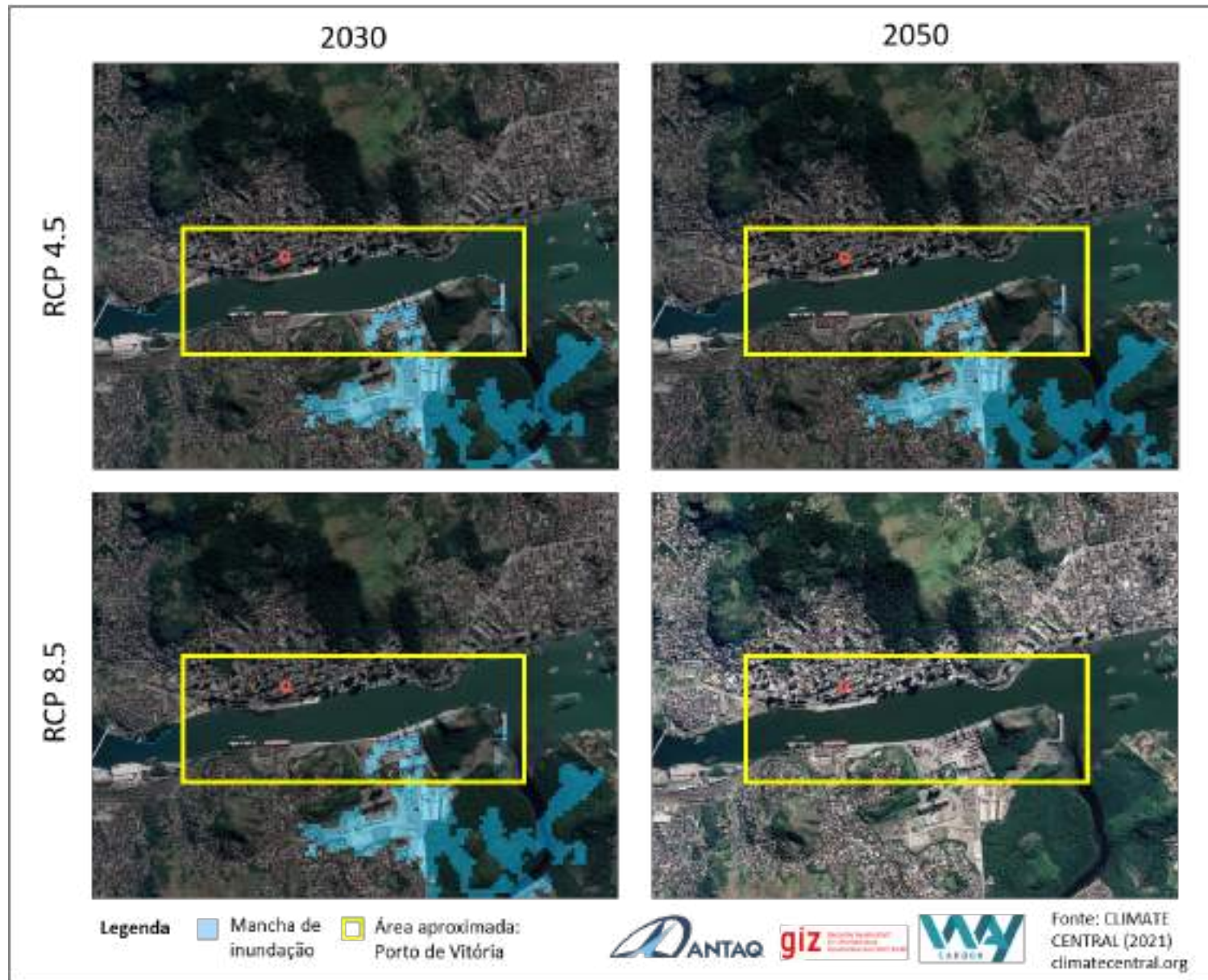














Rua Paraíba, 1.000 – 7º andar – Funcionários

CEP 31130 – 141 - Belo Horizonte – MG

Telefone | Fax 55 31 3656 0501

BH | SP | RJ

WWW.WAYCARBON.COM