

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
VICTOR MOURA BUSSOLOTTI



MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O AUMENTO DO NÍVEL DO MAR:

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ADAPTAÇÃO DAS CIDADES COSTEIRAS

VITÓRIA
2025

*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE ARTES – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ARQUITETURA E URBANISMO

VICTOR MOURA BUSSOLOTI

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O AUMENTO DO NÍVEL DO MAR:
PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ADAPTAÇÃO DAS
CIDADES COSTEIRAS**

VITÓRIA

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE ARTES – PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ARQUITETURA E URBANISMO

VICTOR MOURA BUSSOLOTTI

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O AUMENTO DO NÍVEL DO MAR:
PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ADAPTAÇÃO DAS
CIDADES COSTEIRAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito final para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez.

Coorientador: Prof. Dr. Miguel José das Neves Pires Amado.

VITÓRIA

2025

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

B981 m Bussolotti, Victor Moura, 1991-
Mudanças climáticas e o aumento do nível do mar: : Proposta de metodologia para adaptação das cidades costeiras / Victor Moura Bussolotti. - 2025.
245 f. : il.

Orientadora: Cristina Engel de Alvarez.
Coorientador: Miguel José das Neves Pires Amado.
Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Artes.

1. Mudanças climáticas. 2. Cidades e vilas. 3. Planejamento urbano. 4. Arquitetura. 5. Costa. I. Alvarez, Cristina Engel de. II. Amado, Miguel José das Neves Pires. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Artes. IV. Título.

CDU: 72

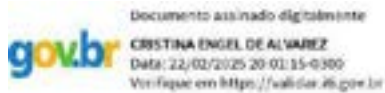
VICTOR MOURA BUSSOLOTI

“MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O AUMENTO DO NÍVEL DO MAR:
PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ADAPTAÇÃO DAS CIDADES
COSTEIRAS”

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito final para a obtenção do grau de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em 18 de fevereiro de 2025.

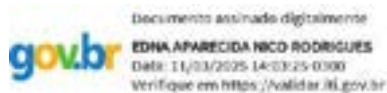
Comissão Examinadora



Prof^ª. Dr^ª. Cristina Engel de Alvarez
(orientadora – PPGAU/UFES)

Assinado por: **Miguel José das Neves Pires Amado**
Num. de Identificação: 04314986
Data: 2025.02.21 19:04:39+00'00'

Prof. Dr. Miguel José das Neves Pires Amado
(coorientador – IST/Universidade de Lisboa)



Prof^ª. Dr^ª. Edna Aparecida Nico Rodrigues
(membro interno – PPGAU/UFES)

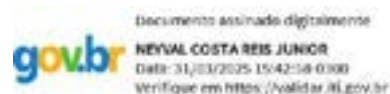
CARLOS AFONSO
NOBRE:73812897849

Assinado de forma digital por
CARLOS AFONSO
NOBRE:73812897849
Dados: 2025.04.04 16:20:28 -03'00'

Prof. Dr. Carlos Afonso Nobre
(membro externo – Instituto de Estudos Avançados/USP)

Assinado por: António Ribeiro Amado
Num. de Identificação: 13536670
Data: 2025.04.02 15:13:48+01'00'

Prof. Dr. António Ribeiro Amado
(membro externo – Faculdade de Arquitectura/ULisboa)



Prof. Dr. Neyval Costa Reis Junior
(membro externo – PPGEA/UFES)

**ESTA TESE É DEDICADA A TODOS OS GIGANTES QUE
ME PERMITIRAM VER MAIS LONGE.**



*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas são fundamentais para que uma tese possa ser concluída, de modo que os agradecimentos aqui mencionados representam apenas uma parcela das pessoas que contribuíram para o fechamento de mais este ciclo.

Agradeço inicialmente a todos que, de alguma forma, me proporcionaram momentos de alegria ao longo dos anos de dedicação aos estudos, me distraindo das preocupações tão presentes na rotina acadêmica.

À professora e orientadora Dra. Cristina Engel de Alvarez e ao professor e coorientador Dr. Miguel Amado, agradeço imensamente pelo tempo dedicado a este trabalho, com contribuições que foram fundamentais para o sucesso da pesquisa. Acima de tudo, minha gratidão se dá pela confiança, pela paciência e pela gentileza com que sempre fui tratado por ambos. Em um meio onde são tão comuns relatos de experiências negativas, sinto-me privilegiado por poder relatar apenas bons momentos junto aos dois.

Agradeço aos membros que participaram das bancas de qualificação e de defesa da tese pela disponibilidade e pelas contribuições. Deixo menção especial à professora Edna Aparecida Nico Rodrigues, minha orientadora de mestrado – e que me acolheu em um estágio docente de última hora –, que se manteve presente em minha jornada acadêmica no doutorado. Aos Profs. Drs. Marcela Alves de Almeida e Jarryer Andrade de Martino (meu coorientador de mestrado) também agradeço o acolhimento no estágio em docência.

Aos meus muitos colegas do LPP e do GEOTPU.LAB, sou grato pelos bons momentos que passamos juntos ao longo de nossa agradável convivência rotineira. Deixo especial agradecimento aos demais membros do “Quarteto Fantástico”: Renata, Juliana e Izabela. Esta última, inclusive, minha companheira de vida e de aventuras, foi o principal motivo de ter dado tudo certo, estando sempre ao meu lado quando precisei, me incentivando e motivando.

Por fim, agradeço aos meus demais familiares e amigos pelo apoio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A comunidade científica observa, desde o século XX, mudanças climáticas no planeta causadas pelo aquecimento de sua temperatura média. E, o aumento na intensidade e na frequência de eventos adversos, decorrentes dessa alteração no clima, são esperados, tais como: secas, tempestades, ondas de calor, aumento do nível do mar, dentre outros. E, para lidar com esse cenário, as cidades devem ser capazes de adotar estratégias de adaptação, sendo que, especificamente com relação às cidades localizadas nas zonas costeiras, há a preocupação com a elevação no nível dos oceanos. Considera-se que os riscos para tais municípios apresentam-se em cinco diferentes escalas: vida humana, economia, infraestruturas, patrimônio e ecossistemas. Assim, os gestores municipais necessitam de ter planos de ação e políticas públicas pautados em uma metodologia confiável para decidirem como agir. Dessa forma, o objetivo da pesquisa é desenvolver metodologia aplicável no planejamento urbano para auxiliar no enfrentamento do aumento do nível do mar, que resulte orientações para a construção de políticas públicas para as cidades costeiras. Para tanto, são elaborados procedimentos metodológicos divididos em 6 etapas distintas adicionais à natural revisão de literatura: 1. definição dos critérios e escolha das cidades estudo de caso; 2. simulação com mapeamento de áreas alagáveis; 3, identificação das tecnologias e soluções; 4. aplicação das estratégias; 5. desenvolvimento das ações; e 6. avaliação e discussão dos resultados. Foi gerada metodologia de auxílio aos gestores públicos a partir dos procedimentos realizados, pautada em cinco etapas a partir do emprego das três estratégias de enfrentamento do nível do mar existentes: proteção, acomodação e recuo. Complementarmente, como resultado adicional, que embasa as decisões tomadas na geração da metodologia, há os resultados das simulações e mapeamentos das seis cidades utilizadas como estudo de caso, sendo três no Norte Global e três no Sul Global. Destaca-se que a proposta de metodologia foi desenvolvida considerando a possibilidade de ser aplicada em diferentes cidades de contexto semelhante ao redor do planeta.

Palavras-chave: Mudança Climática; Aumento do Nível do Mar; Adaptação; Cidade Costeira.

ABSTRACT

Since the 20th century, the scientific community has observed climate changes on the planet caused by the warming of its average temperature. And, the increase in the intensity and frequency of adverse events resulting from this change in the climate is expected, such as: droughts, storms, heat waves, rising sea levels, among others. And, to deal with this scenario, cities must be able to adopt adaptation strategies, and, specifically in relation to cities located in coastal areas, there is concern about rising sea levels. It is considered that the risks to these municipalities appear on five different scales: human life, economy, infrastructure, heritage and ecosystems. Therefore, municipal managers need to have action plans and public policies based on a reliable methodology to decide how to act. Thus, the objective of the research is to develop a methodology applicable to urban planning to help address rising sea levels, resulting in guidelines for the construction of public policies for coastal cities. To this end, methodological procedures were developed, divided into 6 distinct stages in addition to the natural literature review: 1. definition of criteria and selection of case study cities; 2. simulation with mapping of flood-prone areas; 3. identification of technologies and solutions; 4. application of strategies; 5. development of actions; and 6. evaluation and discussion of results. A methodology to assist public managers was generated based on the procedures performed, based on five stages based on the use of the three existing strategies for dealing with sea level rise: protection, accommodation and retreat. In addition, as an additional result, which supports the decisions taken in generating the methodology, there are the results of the simulations and mapping of the six cities used as case studies, three in the Global North and three in the Global South. It is noteworthy that the proposed methodology was developed considering the possibility of being applied in different cities with similar contexts around the planet.

Keywords: Climate Change; Sea Level Rise; Adaptation; Coastal City.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estimativas de aumento de temperatura	28
Figura 2: Estimativas das emissões de Gases de Efeito Estufa até 2.100.....	29
Figura 3: Emissões futuras de GEE de acordo com diferentes cenários de SSP.	31
Figura 4: Fontes contribuidoras para o aumento na temperatura global.	31
Figura 5: Alterações de temperatura para os diferentes cenários de SSP em relação ao período de 1850-1900.	32
Figura 6: Projeção de aumento da temperatura global em 2100.....	33
Figura 7: Riscos globais ranqueados por severidade em curto e longo prazo.	34
Figura 8: Relação entre os riscos globais.....	35
Figura 9: Estimativas de refugiados climáticos.....	36
Figura 10: Números de afetados pelos eventos climáticos.	37
Figura 11: Impactos, perdas e danos atribuídos às mudanças climáticas.....	38
Figura 12: Projeção no aumento de eventos extremos.	39
Figura 13: Fatores físicos das mudanças climáticas observados atribuídos às ações antrópicas.	39
Figura 14: Exemplos de consequências das mudanças climáticas.....	40
Figura 15: Estimativas de aumento do nível do mar.	42
Figura 16: Processos relacionados ao SLR.	43
Figura 17: Alterações climáticas ao longo de séculos.....	44
Figura 18: Impactos dos vetores relacionados ao SLR.	45
Figura 19: Indicação dos municípios que compõem a zona costeira brasileira.	46
Figura 20: Estimativa global de aumento do nível do mar para o cenário de SSP5-8.5 em 2100.....	48
Figura 21: Previsão do aumento do nível do mar em Serra Leoa.	49
Figura 22: Exemplos de perfis geográficos e de ocupação da zona costeira...	50
Figura 23: Perfil da plataforma continental brasileira.....	51
Figura 24: Exemplos de perfis de praia.....	52
Figura 25: Características dos tipos de orla.	52
Figura 26: Processos e danos da subsidência nas cidades costeiras.....	53
Figura 27: Comparação da subsidência em diferentes cidades.	53
Figura 28: Exemplos de abordagens para o enfrentamento do aumento do nível do mar.	62

Figura 29: Abordagens de adaptação adotadas em São Francisco.....	66
Figura 30: Visão geral da ferramenta de projeção do nível do mar da NASA. .	68
Figura 31: Exemplo de tabela obtida pela ferramenta de projeção do nível do mar da NASA.	69
Figura 32: Exemplo de simulação para a cidade de Ho Chi Minh.	69
Figura 33: Exemplo de simulação para a cidade de Bristol.....	70
Figura 34: Gráficos estimativos das consequências do aumento do nível do mar em Ho Chi Minh (Vietnã).	71
Figura 35: Exemplo de simulação do nível do mar elaborado a partir do <i>software</i> DIVA.	72
Figura 36: Exemplo de simulação a partir do <i>software</i> de triagem de risco costeiro para a cidade de Vitória.	73
Figura 37: Exemplo de resultados possíveis com o Ladybug.....	74
Figura 38: LCZ e suas definições.....	75
Figura 39: Plano de ação para enfrentamento do aumento do nível do mar da cidade de São Francisco, EUA.....	79
Figura 40: Critérios para escolha das cidades estudos de caso	81
Figura 41: Cidades que fazem parte do C40 Cities Climate Leadership Group (amarelo para comitê diretor e azul para as demais).	82
Figura 42: Quantidade de cidades costeiras pertencentes ao C40 Cities com planos de ação climática por país.	85
Figura 43: Número de planos de ação climática de cada categoria	86
Figura 44: Quantitativos dos tipos de abordagem do SLR nos planos (a) e nas cidades (b).....	87
Figura 45: Número de cidades com estratégias e mapeamentos	88
Figura 46: Países que contém as cidades selecionadas como estudo de caso.....	90
Figura 47: Exemplo de simulação a partir da Ferramenta de Projeção do Nível do Mar	91
Figura 48: Exemplo de simulação de áreas alagáveis na cidade de Mumbai ..	93
Figura 49: Exemplo de configuração das opções para mapeamento das áreas alagáveis	95
Figura 50: Exemplo de mapa de LCZ.....	96
Figura 51: Imagem ilustrativa de modelagem de LCZ realizada	97
Figura 52: Categorias de classificação das pesquisas	101

Figura 53: Tópicos abordados na publicação selecionada.....	102
Figura 54: Quantitativos das palavras-chave	102
Figura 55: Modelos digitais construídos no ENVI-met sem áreas alagáveis (esquerda) e com áreas alagáveis (direita)	105
Figura 56: Gráfico do Índice de Calor.....	106
Figura 57: Fluxograma das etapas metodológicas.....	109
Figura 58: Simulação de temperatura em Salvador, 2050, verão, sem área alagável.....	111
Figura 59: Simulação de umidade relativa em Salvador, 2050, verão, sem área alagável.....	111
Figura 60: Resultado para 2050, verão, sem área alagável no gráfico do índice de calor.....	112
Figura 61: Simulação de temperatura em Salvador, 2050, verão, com área alagável.....	113
Figura 62: Simulação de umidade em Salvador, 2050, verão, com área alagável	113
Figura 63: Resultado para 2050 com área alagável, verão, no gráfico do índice de calor.....	114
Figura 64: Comparação de resultados de temperatura em Salvador, verão, para 2050	115
Figura 65: Comparação de resultados de umidade relativa em Salvador, verão, para 2050	115
Figura 66: Metodologia para adaptação das cidades costeiras ao aumento do nível do mar.....	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Cidades do C40 que pertencem à zona costeira destacadas	83
Quadro 2: Cidades do C40 que pertencem à zona costeira e possuem plano de ação climática.....	84
Quadro 3: Aumento do Nível do Mar previsto para as cidades selecionadas em 2050	88
Quadro 4: Aumento do Nível do Mar previsto para as cidades selecionadas em 2100	89
Quadro 5: Soluções Baseadas na Natureza Identificadas na Revisão de Literatura.....	100
Quadro 6: Resultados de Índice de Calor para 2050, verão, sem área alagável.	112
Quadro 7: Resultados de Índice de Calor para 2050, verão, com área alagável.	114
Quadro 8: Resultados de Índice de Calor para 2050, inverno, sem área alagável.....	116
Quadro 9: Resultados de Índice de Calor para 2050, inverno, com área alagável.....	116
Quadro 10: Resultados de Índice de Calor para 2080, verão, sem área alagável.....	116
Quadro 11: Resultados de Índice de Calor para 2080, verão, com área alagável.....	117
Quadro 12: Resultados de Índice de Calor para 2080, inverno, sem área alagável.....	117
Quadro 13: Resultados de Índice de Calor para 2080, inverno, com área alagável.....	117
Quadro 14: Comparação dos resultados dos cenários simulados no verão...	118
Quadro 15: Comparação dos resultados dos cenários simulados no inverno.	118
Quadro 16: Comparação dos resultados numéricos dos Índices de Calor simulados no verão.	119
Quadro 17: Comparação dos resultados numéricos dos Índices de Calor simulados no inverno.....	119
Quadro 18: Orientação quanto aos procedimentos da metodologia	122

LISTA DE SIGLAS

AR5	<i>Fifth Assessment Report</i> (Quinto Relatório de Avaliação);
AR6	<i>Sixth Assessment Report</i> (Sexto Relatório de Avaliação);
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project (Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados);
CAT	<i>Climate Action Tracker</i> (Rastreador de Ação Climática);
COP	<i>Conference of the Parties</i> (Conferência das Partes);
GEE	Gases de Efeito Estufa;
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima);
LCZ	<i>Local Climate Zones</i> (Zonas Climáticas Locais);
ONU	Organização das Nações Unidas;
RCP	Representative Concentration Pathway (Rotas de Concentração Representativas);
SBN	Soluções Baseadas na Natureza;
SLR	<i>Sea Level Rise</i> (aumento do nível do mar);
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i> (Caminhos Socioeconômicos Compartilhados);
WEF	World Economic Forum (Fórum Econômico Mundial).

SUMÁRIO

1	- INTRODUÇÃO	18
1.1	Problema de Pesquisa.....	20
1.2	Justificativa.....	21
1.3	Hipótese.....	22
1.4	Objeto	22
1.5	Objetivos.....	23
1.6	Metodologia de Investigação	23
2	- ABORDAGEM TEÓRICA	26
2.1	Mudanças Climáticas	26
2.2	Consequências das Mudanças Climáticas.....	33
2.3	Aumento do Nível do Mar.....	41
2.4	Cidades Costeiras.....	46
2.5	Tipologias de Cidades e de Praia	49
2.6	Escalas de Risco	54
2.7	Políticas Públicas	56
2.8	Soluções e Estratégias.....	61
2.9	Simulações e Montagem de Modelos Digitais	67
3	- PROPOSTA METODOLÓGICA.....	78
3.1	Construção da Metodologia.....	78
3.2	Definição de Critério e Escolha das Cidades	80
3.3	Simulações e Mapeamento.....	90
3.4	Tecnologias e Soluções Identificadas	98
3.5	Aplicação das Estratégias.....	103
4	- DISCUSSÃO DE RESULTADOS	108
4.1	Validação do Método.....	110
4.2	Metodologia para Auxiliar Gestores Municipais	120
5	- CONCLUSÕES	125
6	- REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	129
	APÊNDICES.....	135
	APÊNDICE 1: Estimativas de Aumento do Nível do Mar	135
	1 – Auckland (2050):.....	136
	1 – Auckland (2100):.....	137

2 – Copenhagen (2050):	138
2 – Copenhagen (2100):	139
3 - Nova York (2050):.....	140
3 - Nova York (2100):.....	141
4 - São Francisco (2050):.....	142
4 - São Francisco (2100):.....	143
5 - Seattle (2050):.....	144
5 - Seattle (2100):.....	145
6 - Vancouver (2050):.....	146
6 - Vancouver (2100):.....	147
7 - Salvador (2050):	148
7 - Salvador (2100):	149
8 - Durban (2050):	150
8 - Durban (2100):	151
9 – Dar es Salaam (2050):	152
9 – Dar es Salaam (2100):	153
10 – Dakar (2050):	154
10 – Dakar (2100):	155
11 – Freetown (2050):	156
11 – Freetown (2100):	157
12 – Mumbai (2050):	158
12 – Mumbai (2100):	159
13 – Chennai (2050):	160
13 – Chennai (2100):	161
APÊNDICE 2: Mapeamento das Áreas Alagáveis	162
1 – Auckland (2050):.....	163
1 – Auckland (2100):.....	163
2 – Copenhagen (2050):	164
2 – Copenhagen (2100):	164
3 – Nova York (2050):	165
3 – Nova York (2100):	165
4 – Salvador (2050):.....	166
4 – Salvador (2100):.....	166
5 – Freetown (2050):	167
5 – Freetown (2100):	167
6 – Mumbai (2050):.....	168

6 – Mumbai (2100):	168
APÊNDICE 3: Mapeamento das LCZ	169
1 – Auckland:.....	170
2 – Copenhagen:	170
3 – Nova York:	170
4 – Salvador:	171
5 – Freetown:	171
6 – Mumbai:.....	171
APÊNDICE 4: Resultados das Simulações	172
1 – Auckland (2050 – Inverno):	173
1 – Auckland (2050 – Verão):.....	176
1 – Auckland (2080 – Inverno):	179
1 – Auckland (2080 – Verão):.....	182
2 – Copenhagen (2050 – Inverno):.....	185
2 – Copenhagen (2050 – Verão):	188
2 – Copenhagen (2080 – Inverno):.....	191
2 – Copenhagen (2080 – Verão):	194
3 – Nova York (2050 – Inverno):	197
3 – Nova York (2050 – Verão):	200
3 – Nova York (2080 – Inverno):	203
3 – Nova York (2080 – Verão):	206
4 – Salvador (2050 – Inverno):.....	209
4 – Salvador (2050 – Verão):.....	212
4 – Salvador (2050 – Inverno):	215
4 – Salvador (2080 – Verão):.....	218
5 – Freetown (2050 – Inverno):	221
5 – Freetown (2050 – Verão):	224
5 – Freetown (2080 – Inverno):	227
5 – Freetown (2080 – Verão):	230
6 – Mumbai (2050 – Inverno):	233
6 – Mumbai (2050 – Verão):.....	236
6 – Mumbai (2080 – Inverno):	239
6 – Mumbai (2080 – Verão):.....	242



INTRODUÇÃO

*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

1 - INTRODUÇÃO

Alterações climáticas decorrentes de ações antrópicas são observadas no globo terrestre desde o Século XX. As atividades humanas após a Revolução Industrial iniciada nos anos 1800 levaram a um aquecimento da temperatura média da superfície do planeta – que já se estima ter ultrapassado 1°C em relação aos níveis pré-industriais –, considerando que os principais responsáveis pela mudança do clima são os gases de efeito estufa (GEE) emitidos na atmosfera.

Com essa elevação da temperatura média global, mudanças nos eventos climáticos são observadas em intensidade e em quantidade, prevendo-se que extremos climáticos sejam cada vez mais frequentes. Alguns exemplos desses extremos são o aumento no número de incêndios, de secas e na intensidade de tempestades, bem como a aceleração no derretimento de geleiras, que combinada com o aquecimento do mar, leva a um aumento no nível dos oceanos.

Diante desse cenário, entende-se que as cidades devem ser capazes de se adaptar para lidar com as consequências do aumento da temperatura planetária, além de buscarem meios de mitigarem as emissões dos gases poluentes. Assim, políticas públicas para o enfrentamento das mudanças climáticas, pautadas em metodologias eficazes, podem ser fundamentais para possibilitar essa resposta adaptativa urbana desejada.

Existem cidades que já se encontram organizadas em busca de soluções para lidar com o clima, como aquelas membras do C40 Cities (uma organização mundial formada por cidades globalmente distribuídas preocupadas com o clima, se unindo como forma de somar forças no combate às consequências das mudanças climáticas em seus territórios), que, dentre outras ações, elaboram planos de ação climática e descarbonização em busca de uma adequada adaptação com mitigação de consequências.

A organização conta com quase 100 cidades membros, tendo mais de 1.900 funcionários vinculados ao poder público destas cidades que estão envolvidas na rede do C40 Cities. Cerca de 600 milhões de residentes vivem atualmente nestas cidades e 900 milhões vivem e trabalham nas regiões em torno delas,

que movimentam em torno de 36% do PIB global (C40 Cities Climate Leadership Group, 2023b).

Um dos fenômenos que demanda tomadas de decisões adequadas para o seu enfrentamento é o aumento do nível do mar (SLR – sigla para *Sea Level Rise* no original em inglês), que ameaça, particularmente, as cidades costeiras. Se localizadas em áreas de baixas altitudes – o que normalmente acontece –, as zonas litorâneas tornam-se especialmente vulneráveis aos efeitos da elevação dos oceanos.

Espera-se, assim, que algumas cidades – em consequência da proximidade com a linha de costa somada com a baixa elevação – percam parte do seu território (o que já acontece em muitas localidades ao redor do globo) em função do avanço do mar. Esse fato leva a problemas e riscos em diferentes níveis, tais como à vida humana, à economia, às infraestruturas, ao patrimônio e aos ecossistemas.

Isso acontece pois, além das óbvias perdas econômicas relacionadas à redução do território e à necessidade de deslocamento das pessoas que ali residem, há questões como a perda de produtividade agrícola, salinização da água, perda de biodiversidade e a migração forçada.

Assim, dentre as cidades que já enfrentam esse desafio, algumas delas buscam mitigar o problema por meio de estratégias de proteção e adaptação, que se tornam fundamentais para auxiliar na proteção dos ecossistemas e das populações costeiras.

Dessa forma, o desenvolvimento de políticas públicas eficazes torna-se imperativo em cidades sob essas condições. No entanto, para que se tenha clareza em relação aos impactos previstos – que são diferenciados de acordo com as características do lugar – é necessário identificar cenários confiáveis, a partir das estimativas geradas de acordo com as emissões futuras de GEE, que contribuam com a tomada de decisão, especialmente dos gestores dos territórios ameaçados.

Sabe-se que o mar já se elevou, de maneira não linear, em muitos locais do planeta, sendo uma tendência que tal fenômeno continue a ocorrer, num futuro próximo e por muitos séculos. Com a definição dos cenários futuros e uma

estimativa realista do aumento do nível do mar em cidades costeiras, os municípios devem aplicar as estratégias de adaptação adequadas às características mapeadas.

Há casos de localidades que utilizam, por exemplo, barreiras de proteção para impedir a entrada de água, ou que adaptam o interior de seus territórios para a convivência com a água ou, ainda, que deslocam parte de sua população de determinadas partes do território, por entenderem que as outras respostas de enfrentamento são inviáveis.

Assim, em cidades que ainda não tomaram medidas para lidar com o risco climático do SLR, é importante avaliar o potencial de utilização de soluções existentes, sejam elas baseadas na natureza ou na engenharia convencional, ou mesmo considerar a eventual necessidade de retirada gradual das populações a serem atingidas.

Com isso, tendo-se o entendimento adequado do fenômeno, a elaboração de estratégias eficazes e a implementação das medidas adaptativas, espera-se uma redução na vulnerabilidade das cidades costeiras, fazendo com que elas enfrentem o aumento do nível do mar de forma segura e planejada.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema da pesquisa parte do princípio de que o aumento do nível do mar – que ocorre em função do aumento da temperatura média global, acelerado pelas ações antrópicas que causam as mudanças climáticas – coloca em risco uma porção da população das cidades localizadas nas zonas costeiras ao redor do planeta. Parcelas do território costeiro tendem a ser inundadas e a sofrer outras consequências decorrentes desse cenário, como a salinização de aquíferos, enchentes, enxurradas e erosão, o que pode acentuar suas vulnerabilidades socioeconômicas pré-existentes.

Para tanto, identifica-se a necessidade da adoção, especialmente por parte dos gestores vinculados à administração das cidades – onde ocorrem as maiores concentrações de população –, de estratégias de adaptação para minimizar as consequências do SLR em territórios de cidades costeiras. Observa-se que tais

estratégias podem estar pautadas em soluções já existentes e empregadas por alguns municípios, cuja eficácia deve ser avaliada.

Entretanto, a ausência de uma metodologia para auxiliar as medidas de implantação de ações de enfrentamento dos riscos climáticos, dificulta a elaboração de planos diretores e demais instrumentos de políticas públicas voltados para a prevenção e o enfrentamento das consequências das mudanças climáticas.

Parte-se do pressuposto de que há a necessidade de uma metodologia para a determinação confiável das áreas que serão atingidas pelo aumento previsto do nível do mar, associada ao estudo das suas consequências sob os diferentes aspectos, visando o estabelecimento das estratégias adequadas de enfrentamento a serem utilizadas.

Observa-se que existem países que já enfrentam o aumento do nível médio dos oceanos e já adotam medidas para minimizar suas consequências. Dessa forma, analisar o que já vem sendo utilizado, com a determinação de sua eficácia para os diferentes contextos e tipologias de cidades e de perfis da orla, também é uma das maneiras de se preparar as cidades costeiras do planeta para lidarem com o problema.

Assim sendo, como problema da pesquisa, pergunta-se: é possível elaborar uma metodologia para auxiliar na elaboração de políticas públicas para o enfrentamento do aumento do nível do mar decorrente das mudanças climáticas?

1.2 JUSTIFICATIVA

A proposta de pesquisa busca preencher lacunas de conhecimento anteriormente constatadas. O emprego de estratégias para o enfrentamento da elevação do nível do mar no contexto das cidades costeiras induz à necessidade de estudos sobre essa questão, que precisa ser adequadamente entendida pelos gestores urbanos.

Estudos que proponham soluções para a região costeira urbanizada são, indiscutivelmente, necessários, visto que as estimativas indicam a existência de parcela significativa da população atualmente vivendo em locais que vão ser atingidas pelo aumento do nível do mar. Espera-se que o desenvolvimento de uma metodologia de análise e de elaboração de estratégias possa ser replicado para diferentes contextos das cidades costeiras do planeta de acordo com suas características específicas.

Com isso, reitera-se que a relevância da pesquisa pode ser demonstrada na sistematização das publicações existentes a respeito das consequências e das estratégias de enfrentamento do aumento do nível do mar, que serve de base para proposição de soluções.

Destaca-se que a elaboração de uma metodologia auxiliar para o direcionamento das políticas públicas é uma maneira de se utilizar os resultados da pesquisa como aliados no alcance de um desenvolvimento mais sustentável das cidades costeiras, permitindo que o produto da pesquisa seja aplicado, na prática, a favor da sociedade.

1.3 HIPÓTESE

Parte-se do princípio de que o planejamento urbano de zonas costeiras que considera as estimativas de aumento do nível do mar minimiza as consequências das mudanças climáticas em seu território. Dessa forma, a pesquisa adota a hipótese de que as cidades costeiras serão as mais afetadas pelo aumento do nível do mar e questiona se é possível resolver essa ameaça por meio do planejamento urbano.

1.4 OBJETO

O objeto de estudo da pesquisa é o enfrentamento e a busca pela mitigação das consequências do aumento do nível do mar decorrente das mudanças climáticas

por meio de metodologia de adaptação eficiente em cidades localizadas em zona costeira.

1.5 OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Desenvolver metodologia aplicável no planejamento urbano para auxiliar no enfrentamento do aumento do nível do mar, que resulte em orientações para a construção de políticas públicas para as cidades costeiras.

Objetivos Específicos:

- I. Identificar e analisar estratégias de adaptação das zonas costeiras frente aos efeitos decorrentes das mudanças climáticas;
- II. Identificar metodologias existentes de simulação do aumento do nível do mar, bem como da existência de planos de ação para a proteção da zona costeira;
- III. Sistematizar e identificar os critérios das estratégias de adaptação para possível uso pelos gestores, visando o enfrentamento das consequências urbanas relacionadas ao aumento do nível do mar;
- IV. Testar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em cidades selecionadas como estudo de caso.

1.6 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

A investigação relativa à temática da adaptação das cidades costeiras aos impactos das alterações climáticas foi desenvolvida com base na seguinte metodologia:

- Revisão do estado da arte;

- Construção do enquadramento teórico de apoio à elaboração de uma metodologia de abordagem de adaptação das cidades costeiras;
- Avaliação da metodologia por meio da sua aplicação a casos de estudo;
- Discussão dos resultados obtidos e confrontação/comparação dos mesmos com a revisão da literatura e o estado do conhecimento atual.



ABORDAGEM TEÓRICA

*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

2- ABORDAGEM TEÓRICA

Considerando os objetivos da pesquisa, o referencial teórico foi subdividido em nove principais temas, que configuram os seguintes subcapítulos: 2.1. – o entendimento dos aspectos inerentes às mudanças climáticas; 2.2 – as principais consequências previstas, especialmente para as comunidades urbanas, com o avanço das mudanças climáticas; 2.3 – os aspectos inerentes ao aumento do nível do mar nos territórios urbanos; 2.4 – as cidades costeiras; 2.5 – a identificação de tipologias de cidades e de praias visando o estabelecimento de modelos de impactos e de possíveis soluções; 2.6 – as escalas de risco relacionadas à vida humana, à economia, às infraestruturas, ao patrimônio e aos ecossistemas; 2.7 – os instrumentos relacionados às políticas públicas já em execução, com foco nas estratégias de enfrentamento das mudanças climáticas; 2.8 – as soluções já adotadas e de possível adoção em relação à elevação do nível do mar em cidades litorâneas; e 2.9 – as simulações relacionadas a cenários climáticos futuros, com suas possibilidades e limitações.

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Tem-se, desde os anos 1960, estudos que demonstram a influência das atividades humanas no clima do mundo (Manabe; Wetherald, 1967). Ainda que se considere natural para o ciclo do planeta o acontecimento das denominadas mudanças climáticas, a velocidade com que elas vêm acontecendo desde a revolução industrial do Século XIX indica a influência de atividades antrópicas no processo, ao emitirem gases causadores de efeito estufa (GEE) na atmosfera.

Entretanto, a temática passou a ter destaque, com um maior volume de publicações científicas sobre o assunto, apenas mais recentemente, entre o fim do Século XX e o início do Século XXI. Dentre as principais organizações responsáveis pelo estudo das alterações no clima, destaca-se o Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC – sigla para *Intergovernmental Panel on Climate Change* no original em inglês), que já estima

mais de 1°C de aumento da temperatura média da superfície terrestre em relação aos níveis pré-industriais.

O IPCC é o órgão da Organização das Nações Unidas (ONU) responsável por avaliar o que existe de ciência relacionada às mudanças climáticas, sendo criado para fornecer avaliações regulares destinadas aos formuladores de políticas. Assim, o órgão fornece projeções futuras diante de uma variedade de cenários climáticos possíveis de se estimar (National Aeronautics and Space Administration, 2023).

Essa organização aponta que o valor do aumento de temperatura entre o período de 1850-1900 e 2011-2020 é de cerca de 1,1°C, sendo possível afirmar, com segurança, que tal fato se dá em função das atividades humanas (Calvin et al., 2023).

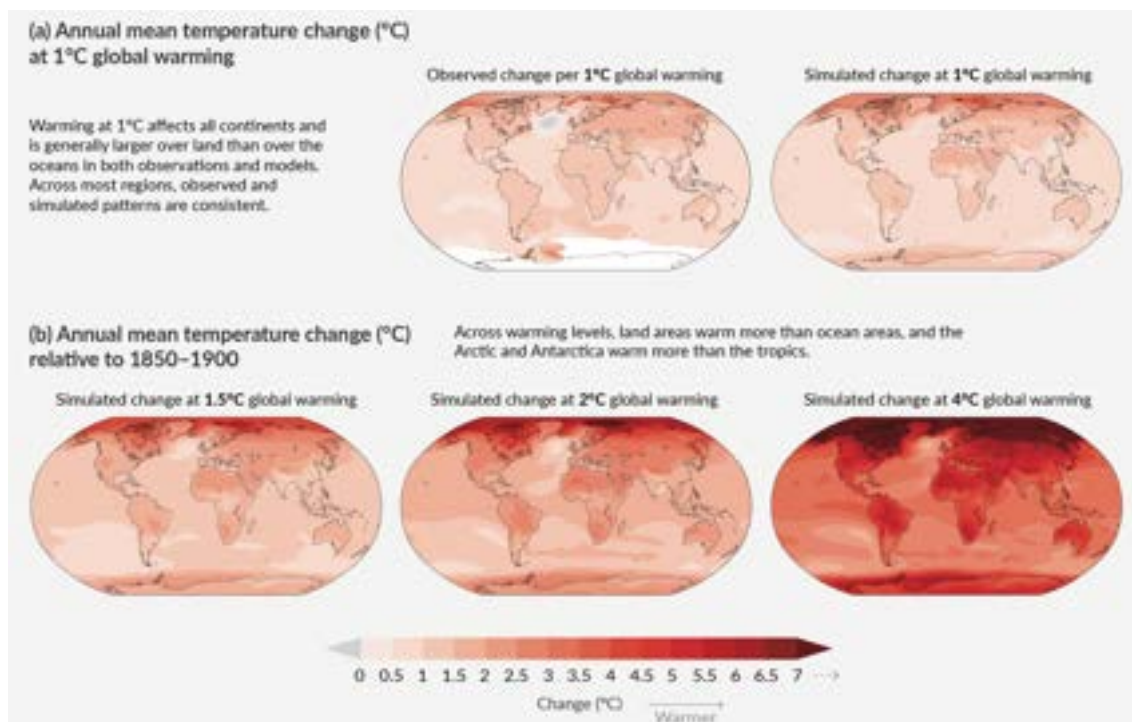
Este valor, entretanto, não é constante ao longo da superfície global, variando de acordo com a localização. Na superfície terrestre, a estimativa de aumento é maior do que na superfície dos oceanos, sendo de 1,59°C e de 0,88°C, respectivamente. É possível, ainda, afirmar que, em uma análise dos últimos 2000 anos, a superfície planetária aqueceu mais rapidamente entre 1970 e 2020 do que em qualquer outro período de 50 anos (Calvin *et al.*, 2023).

Ainda de acordo com Calvin et al. (2023), o aumento já computado de cerca de 1,1°C na temperatura, causado por ações antrópicas, é proveniente, principalmente, dos GEE, com destaque para os aerossóis, também contribuído para mudar a temperatura global, mas em menor escala. Fatores naturais, como fenômenos solares e vulcânicos (de -0,1°C a +0,1°C) e a própria variabilidade interna do planeta (de -0,2°C a +0,2°C), também entram nessa conta, mas com valores significativamente mais modestos do que os de origem antrópica.

A Figura 1 demonstra essa diferença mencionada entre o aquecimento na superfície da terra e na superfície dos oceanos, além de ilustrar sua não uniformidade ao redor do globo, onde, à medida em que o aumento médio de temperatura se intensifica, evidencia-se um aquecimento significativamente maior no Ártico e na Antártica do que nas regiões tropicais do planeta. Com uma estimativa de aumento médio de 4°C, por exemplo, há regiões polares com

previsão de 7°C de aquecimento, enquanto algumas regiões tropicais não chegam aos 2°C de elevação da temperatura.

Figura 1: Estimativas de aumento de temperatura



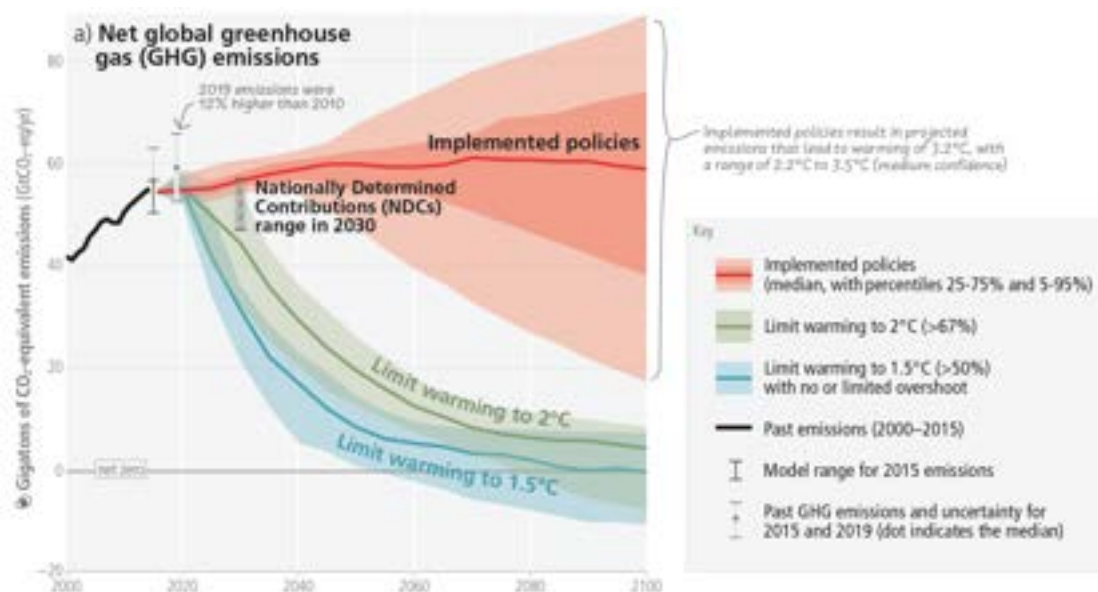
Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change, (2023b).

Em seu 6º Relatório de Avaliação, o AR6 (sigla para *Sixth Assessment Report* no original em inglês), o IPCC identificou que algumas mudanças no clima do planeta são irreversíveis (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023b). O AR6 compreende três grupos de trabalho que tratam da base da ciência física, dos impactos, adaptação e vulnerabilidades e da mitigação às mudanças climáticas, sendo o relatório de 2023 o mais atualizado da organização.

Embora a identificação das mudanças climáticas demonstre que é necessário reduzir as emissões de GEE, as emissões desses gases aumentaram ao longo dos anos, devido, entre outros fatores, ao uso de energia de maneira insustentável; aos padrões de consumo e produção desiguais entre países e indivíduos; e ao uso inadequado da terra. Em 2019, por exemplo, as emissões foram 12% maiores do que em 2010 (Calvin et al., 2023).

A Figura 2 apresenta as estimativas de liberação dos GEE na atmosfera ao longo dos anos e as previsões futuras diante de diferentes cenários de comportamento humano na busca pela redução no aumento da temperatura global.

Figura 2: Estimativas das emissões de Gases de Efeito Estufa até 2.100.



Fonte: Adaptado de Calvin et al. (2023).

É possível observar, de acordo com figura, que para que o aumento de temperatura global não ultrapasse 1,5°C ou 2°C – valores de referência no Acordo de Paris de 2015 – é necessária uma redução imediata na emissão dos GEE. Entretanto, a trajetória atual, diante das políticas implementadas, leva a uma previsão de que a temperatura pode se elevar em até 3,5°C no ano de 2100.

O Acordo de Paris é um tratado sobre as ações climáticas adotado na COP21 (sigla para *Conference of the Parties* no original em inglês) de 2015 que teve como principal objetivo estabelecer metas visando manter o aumento de temperatura abaixo de 2°C, buscando esforços para limitar a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais. É considerado um marco nas políticas internacionais relacionadas à mudança climática em função de ter reunido nações preocupadas em combater e se adaptar às alterações do clima (United Nations Climate Change, 2023).

É importante observar ainda que as emissões de GEE não são uniformes. Tendo o CO₂ como exemplo, em 2019 cerca de 35% da população do planeta vivia em países que emitem mais de 9 tCO₂-eq *per capita*, enquanto 41% viviam em países emissores de menos de 3 tCO₂-eq *per capita*, ou seja, menos de um terço do volume de emissões. Aumenta-se ainda mais essa diferença ao se analisar os países menos desenvolvidos, com 1,7 tCO₂-eq. Os 50% da população mais pobre contribui com apenas 13-15% das emissões globais, enquanto os 10%

mais emissores geram 34-45% de emissões globais. Este cenário leva a uma média global de emissões de 6,9 tCO₂-eq per capita (Calvin et al., 2023).

Para estimar as possíveis respostas do clima a diferentes cenários futuros desenvolvidos a partir das ações antrópicas com relação aos níveis de liberação de GEE, o IPCC apresenta em seu AR6, cinco cenários ilustrativos de emissões, a partir dos quais modelos climáticos futuros são projetados (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023b). Tais cenários são denominados de SSPs (sigla para *Shared Socioeconomic Pathways* no original em inglês), ou seja, os caminhos socioeconômicos compartilhados.

Os diferentes cenários de SSPs podem ser interpretados como um conjunto de estimativas para crescimento econômico, mudança populacional e urbanização. As projeções dessas estimativas representam características diferentes para os desafios de mitigação e de adaptação (Riahi et al., 2017).

Os cenários SSP1-1.9 e SSP1-2.6 representam respectivamente as emissões muito baixas e baixas dos GEE, com a liberação de CO₂ atingindo o zero líquido em torno do ano de 2050, que deve ser seguido por emissões negativas do gás a partir dessa data. Já o cenário de SSP2-4.5 é considerado de emissões intermediárias, onde mantém-se a média dos níveis atuais de emissão de CO₂ até metade do Século XXI. Há, ainda, dois cenários de emissões altas e muito altas desse gás: o SSP3-7.0 e o SSP5-8.5, respectivamente (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023b).

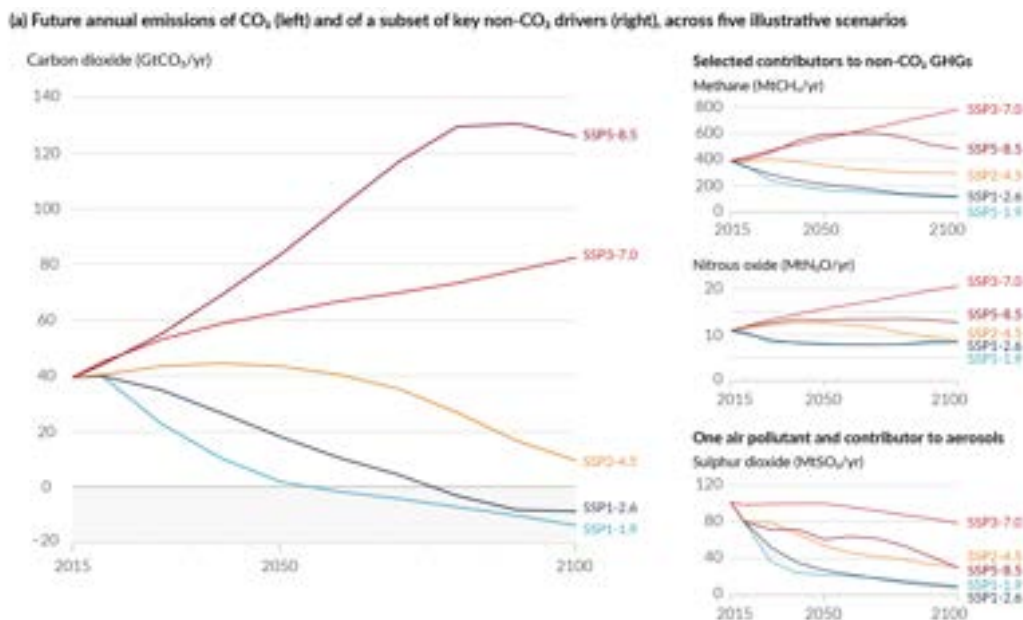
Fatores socioeconômicos, níveis de mitigação das mudanças climáticas e controles da poluição do ar estão entre os fatores que levam à variação nos cenários apresentados (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023b). Pode-se observar, na Figura 3, as estimativas de emissão dos GEE na atmosfera diante dos 5 cenários propostos pelo IPCC.

Complementarmente, é possível observar, de acordo com a Figura 4, que o CO₂ é o principal gás responsável pelas mudanças estimadas na temperatura do planeta, o que pode ser observado em todos os 5 diferentes cenários de SSP propostos pelo IPCC.

Ao se comparar com os níveis relativos ao período compreendido entre 1850-1900, é provável que até 2100, o cenário de SSP1-1.9 apresente um aumento

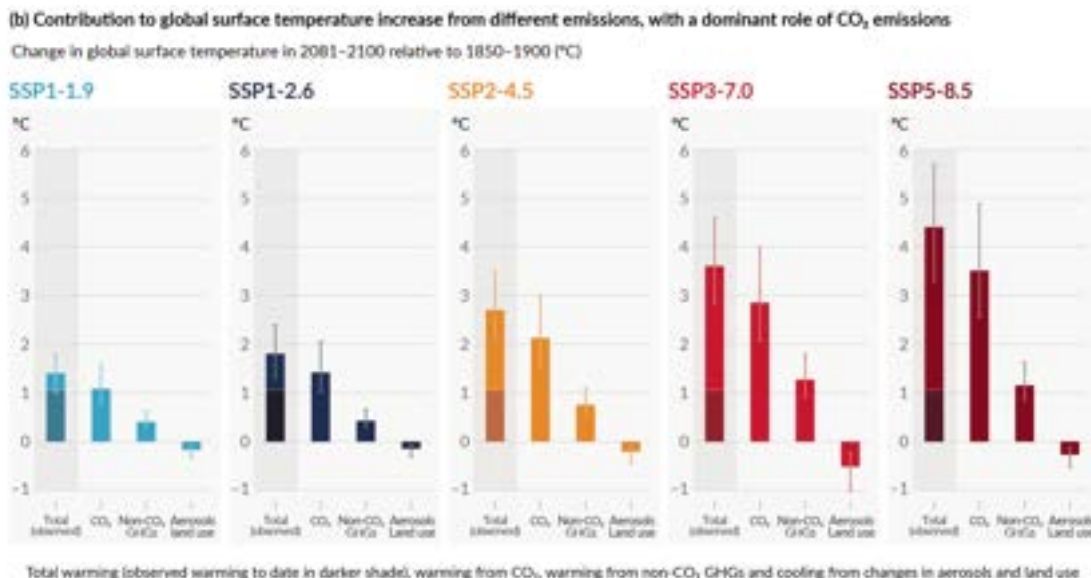
médio de temperatura da superfície terrestre de até 1,8°C. No cenário de emissões intermediárias, com SSP2-4.5, pode-se chegar a +3,5°C. Já em emissões muito altas, estima-se até um aumento de 5,7°C (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023b). A Figura 5 ilustra tais estimativas.

Figura 3: Emissões futuras de GEE de acordo com diferentes cenários de SSP.



Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change, (2023b).

Figura 4: Fontes contribuidoras para o aumento na temperatura global.

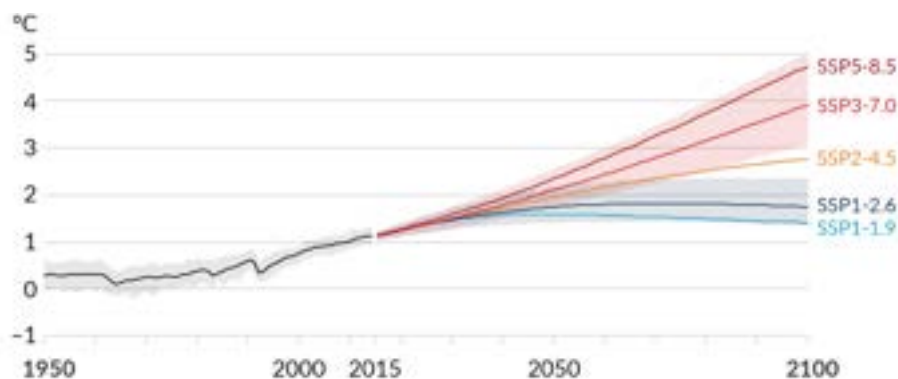


Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change, (2023b).

É possível observar que a temperatura da superfície global vai continuar a aumentar até, pelo menos, por volta do ano 2050, mesmo no melhor cenário de

SSP proposto. Também fica evidente que apenas com as reduções significativas nas emissões dos GEE, presentes nos cenários de SSP1-1.9 e SSP1-2.6, é possível manter o aquecimento médio do planeta entre os 1,5°C e os 2°C (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023b) almejados no Acordo de Paris.

Figura 5: Alterações de temperatura para os diferentes cenários de SSP em relação ao período de 1850-1900.



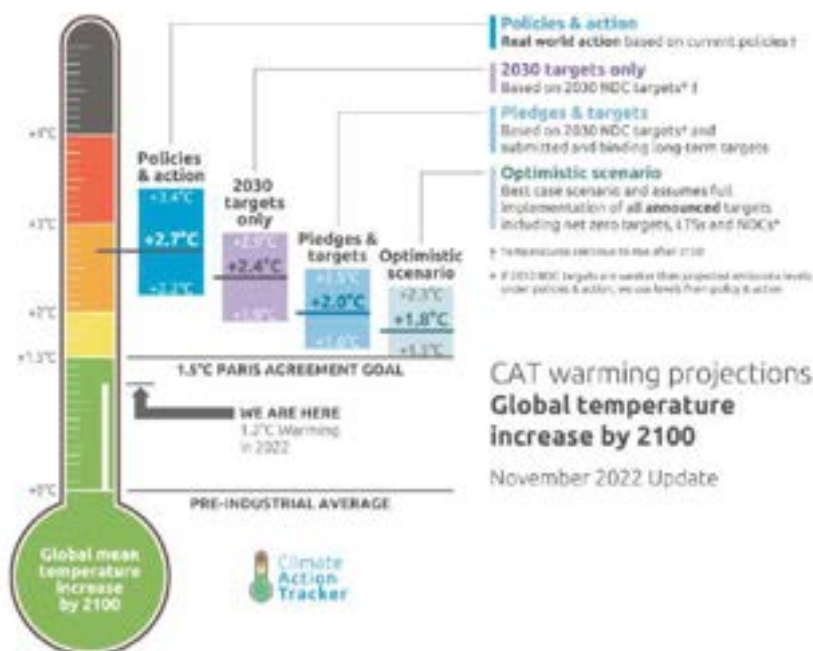
Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (2023b).

Observa-se que as medidas adotadas até o momento pelos gestores têm se demonstrado insuficientes para impedir a continuidade no aumento de temperatura nos próximos anos e, até mesmo, séculos. Estima-se que, mantida a trajetória atual, haja um aquecimento de 2,7°C até 2100, valor que continuará aumentando mesmo após essa data (Climate Analytics and Nexclimate Institute, 2022).

Pode-se observar na Figura 6 a projeção do aumento da temperatura global de acordo com as políticas implementadas, evidenciando que o atual percurso pode levar a +3,4°C na temperatura em relação aos níveis pré-industriais.

É importante mencionar que cada pequeno aumento na temperatura da superfície planetária já é suficiente para intensificar uma série de desequilíbrios climáticos e, mesmo que se consiga alcançar reduções rápidas na emissão de GEE, levaria cerca de 20 anos para uma desaceleração perceptível no aquecimento do planeta (Calvin et al., 2023).

Figura 6: Projeção de aumento da temperatura global em 2100.



Fonte: Climate Analytics and Nexclimate Institute, (2022).

2.2 CONSEQUÊNCIAS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas, ocasionadas pelo aumento da temperatura, levam a diversas consequências e riscos que se estendem para além do simples aumento médio da temperatura planetária. O Fórum Econômico Mundial (WEF – sigla para *World Economic Forum* no original em inglês) traz em um de seus relatórios de riscos (World Economic Forum, 2023) uma estimativa de que, nos próximos 10 anos, todos os seis riscos categorizados como sendo relacionados a fatores ambientais estarão entre os 10 principais riscos globais existentes. E, em um recorte de dois anos, haveria cinco riscos ambientais entre os 10 principais.

Além disso, o WEF ainda estima que, dos seis principais riscos previstos para os próximos 10 anos, cinco são ambientais, sendo que a falha em mitigar as mudanças climáticas é o principal risco global estimado para esse período. A Figura 7 apresenta os riscos ranqueados por severidade para os próximos dois e dez anos, curto e longo prazos respectivamente (World Economic Forum, 2023).

Figura 7: Riscos globais ranqueados por severidade em curto e longo prazo.



Fonte: World Economic Forum (2023).

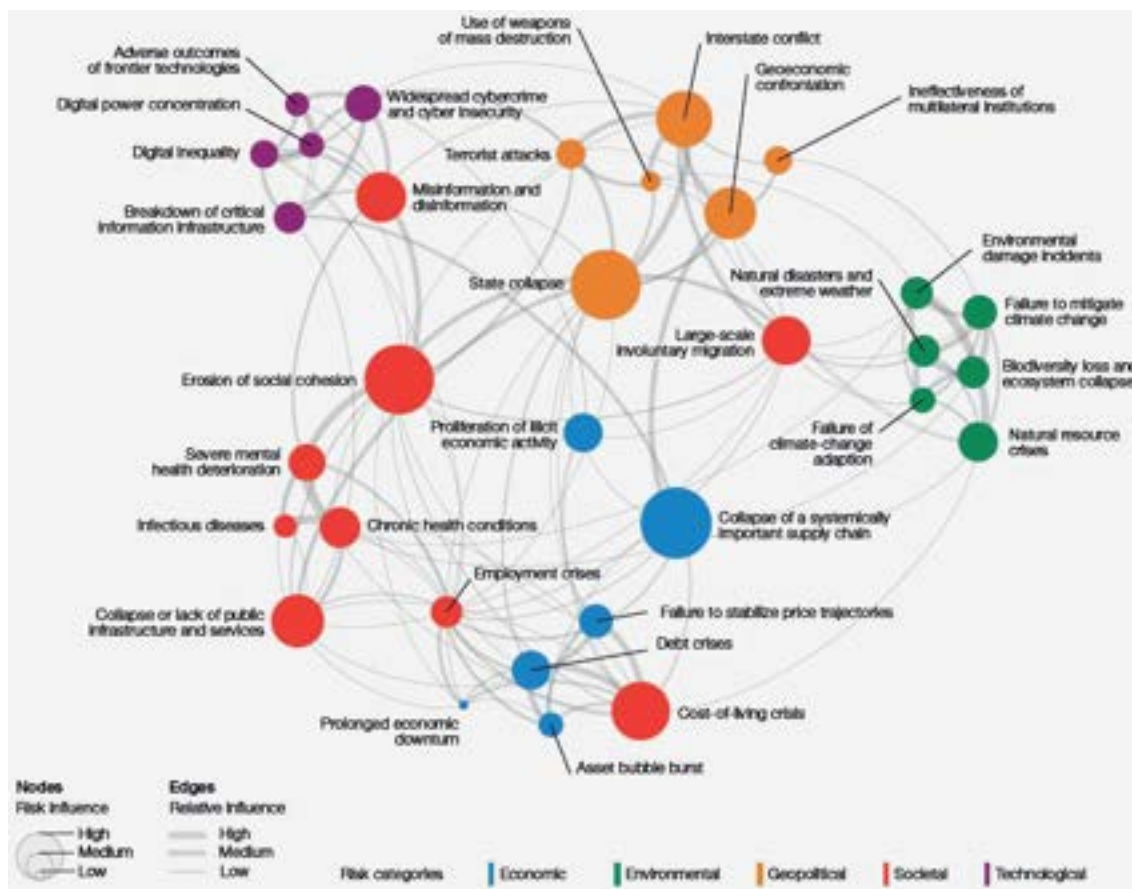
Nota-se que os riscos climáticos e ambientais se destacam na percepção dos principais riscos esperados para a próxima década, sendo aqueles riscos para os quais o planeta está menos preparado. Perdas relacionadas à natureza e às mudanças climáticas se relacionam diretamente, de modo que uma falha em uma afetará a outra.

Considerando que as consequências estão interligadas, as alterações no clima levam à perda de biodiversidade e o consumo de recursos naturais levam ao colapso do ecossistema que, por sua vez, ameaça o suprimento de alimentos e os meios de subsistência em economias mais vulneráveis ao clima (World Economic Forum, 2023). É possível observar a conexão formada entre os diferentes riscos globais existentes na Figura 8.

É fato que os riscos ambientais já são percebidos em mudanças na atmosfera, nos oceanos, na criosfera e na biosfera. As ações antrópicas já afetam o clima do planeta e levam a extremos climáticos em todas as regiões, com danos relacionados à natureza e às pessoas, sendo as comunidades vulneráveis (que

inclusive contribuem menos para as mudanças no clima) as mais afetadas (Calvin *et al.*, 2023).

Figura 8: Relação entre os riscos globais.

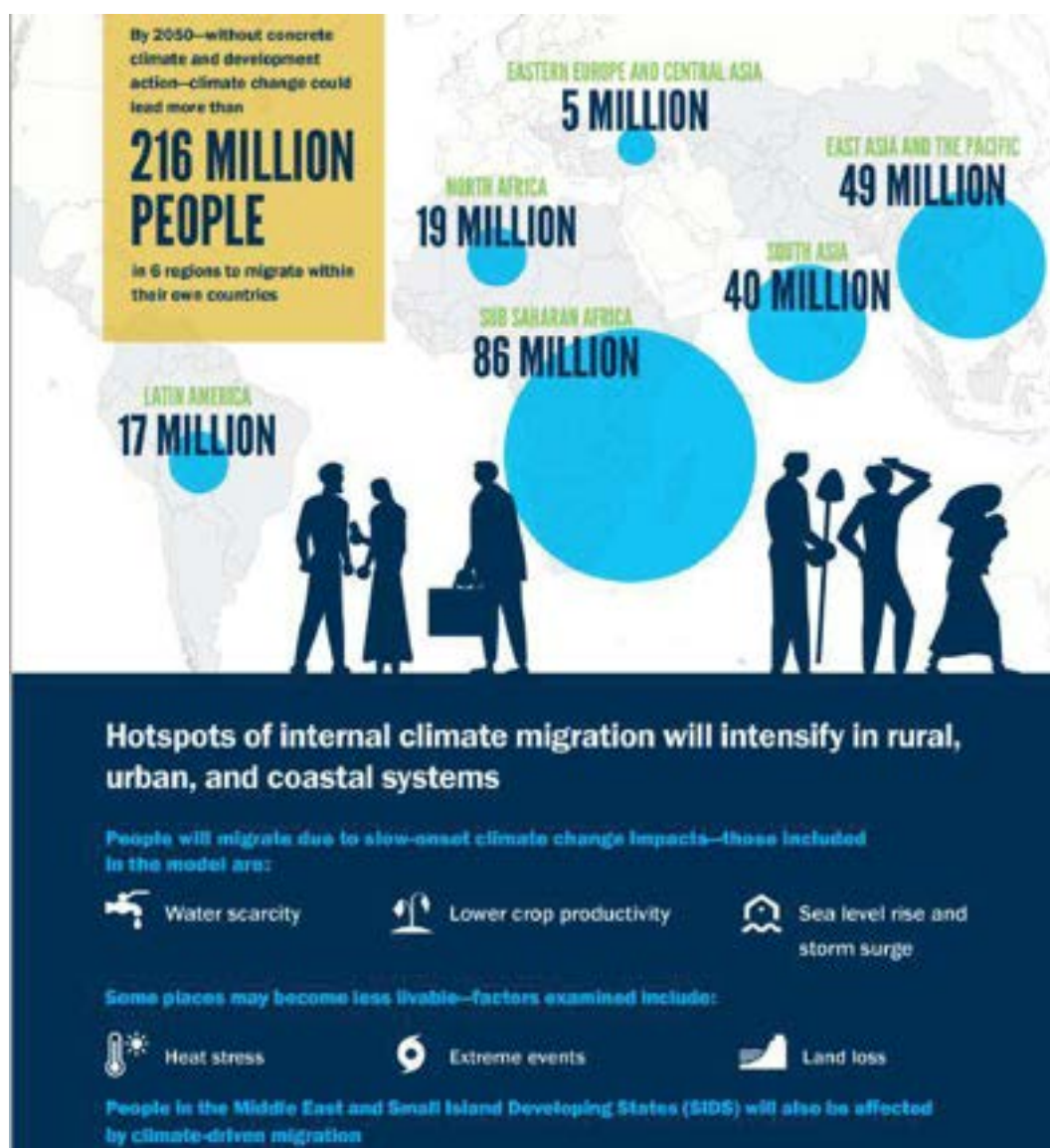


Fonte: World Economic Forum (2023).

Dependendo da intensidade das mudanças climáticas, pode-se levar a questões problemáticas de habitabilidade, fazendo com que determinadas localidades cheguem a um ponto em que se torna necessário o deslocamento da sua população, gerando o que se denomina como “refugiados climáticos”. Essa migração, em função das mudanças no clima, aumentará em todo o planeta, e os mais pobres e vulneráveis serão os mais atingidos (Clement *et al.*, 2021).

Pode-se observar, de acordo com a Figura 9, que se estima para o ano de 2050 que o número de refugiados climáticos pode ultrapassar 216 milhões de pessoas, apenas considerando os territórios que foram analisados pelo relatório do Banco Mundial. Nesse estudo, identifica-se que a região mais afetada por esse fenômeno será a África Subsaariana, com 86 milhões de refugiados (Clement *et al.*, (2021).

Figura 9: Estimativas de refugiados climáticos.



Fonte: Clement et al., (2021).

Identifica-se, ainda, que os principais fatores que levarão a essa migração forçada incluem falta de água, baixa produtividade agrícola, aumento do nível do mar e de tempestades, estresses de calor, eventos climáticos extremos e perdas de terra. Assim, sem uma ação urgente sobre o clima e a modificação dos processos e comportamentos das atividades humanas, haverá partes do mundo que se tornarão em breve inabitáveis, em função dos fatores mencionados (C40 Cities Leadership Group; Mayors Migration Council, 2021).

Em complemento às estimativas apresentadas pelo World Bank, a Figura 10 ilustra o número de pessoas no mundo afetadas por eventos climáticos em

diferentes datas, variando entre os dias atuais e o ano de 2050, segundo seis aspectos de vulnerabilidade.

Figura 10: Números de afetados pelos eventos climáticos.

Vulnerability	Time Period	Population Estimate	City Estimate
EXTREME HEAT	Present Day	Over 200 million people	Over 350 cities
	2050s	Over 1.6 billion people	Over 970 cities
EXTREME HEAT AND POVERTY	Present Day	Over 26 million people	Over 230 cities
	2050s	Nearly 215 million people	Over 490 cities
WATER AVAILABILITY	2050s	Over 650 million people	Over 500 cities
FOOD SECURITY	2050s	Over 2.5 billion people	Over 1,600 cities
SEA LEVEL RISE	2050s	Over 800 million people	Over 570 cities
SEA LEVEL RISE AND POWER PLANTS	2050s	Over 450 million people	Over 230 cities

Fonte: Urban Climate Change Research Network, (2018).

O calor extremo mostra pessoas em cidades regularmente expostas às temperaturas máximas médias iguais ou superiores a 35°C. Observa-se que, em 2050, prevê-se que mais 1,6 bilhões de pessoas em 970 cidades enfrentarão esse estressor (Urban Climate Change Research Network, 2018).

Em relação à água, estima-se que alguns locais terão, minimamente, a redução de 10% da disponibilidade de água doce comparada aos dias atuais.

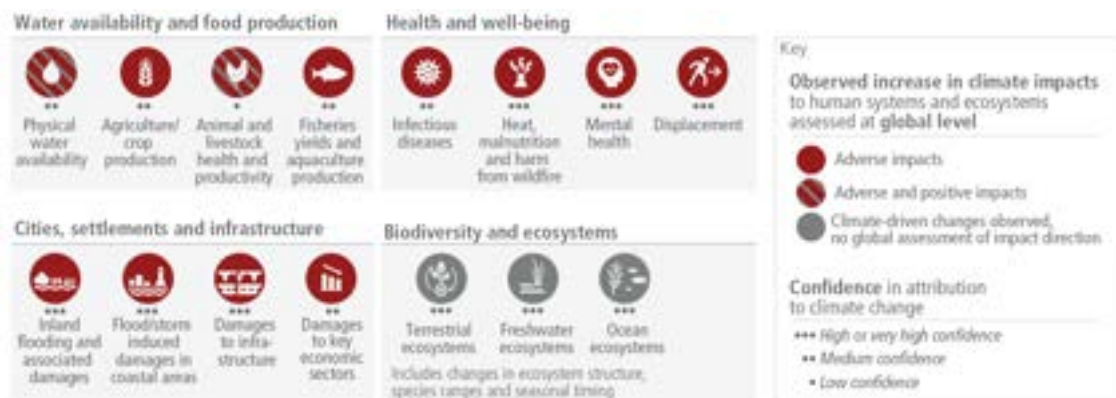
Para a segurança alimentar, tem-se o mesmo percentual de redução em 2050 no que diz respeito à produção de, pelo menos, uma das quatro culturas mais

comuns, ou seja, milho, arroz, soja ou trigo (Urban Climate Change Research Network, 2018).

Quanto ao aumento do nível do mar, a estimativa é de que pelo menos 800 milhões de pessoas serão afetadas pela elevação projetada de pelo menos 0,5 metro até 2050. Quando se estimam problemas energéticos em função do do SLR, mais de 230 cidades estão em locais cujo fornecimento de energia pode ser afetado, prejudicando mais de 450 milhões de pessoas (Urban Climate Change Research Network, 2018).

Observa-se, conforme a Figura 11, que os impactos, perdas e danos atribuídos às mudanças climáticas são variados e que podem estar relacionados, também, a alguns outros fatores como saúde, bem-estar, cidade, água e biodiversidade.

Figura 11: Impactos, perdas e danos atribuídos às mudanças climáticas.

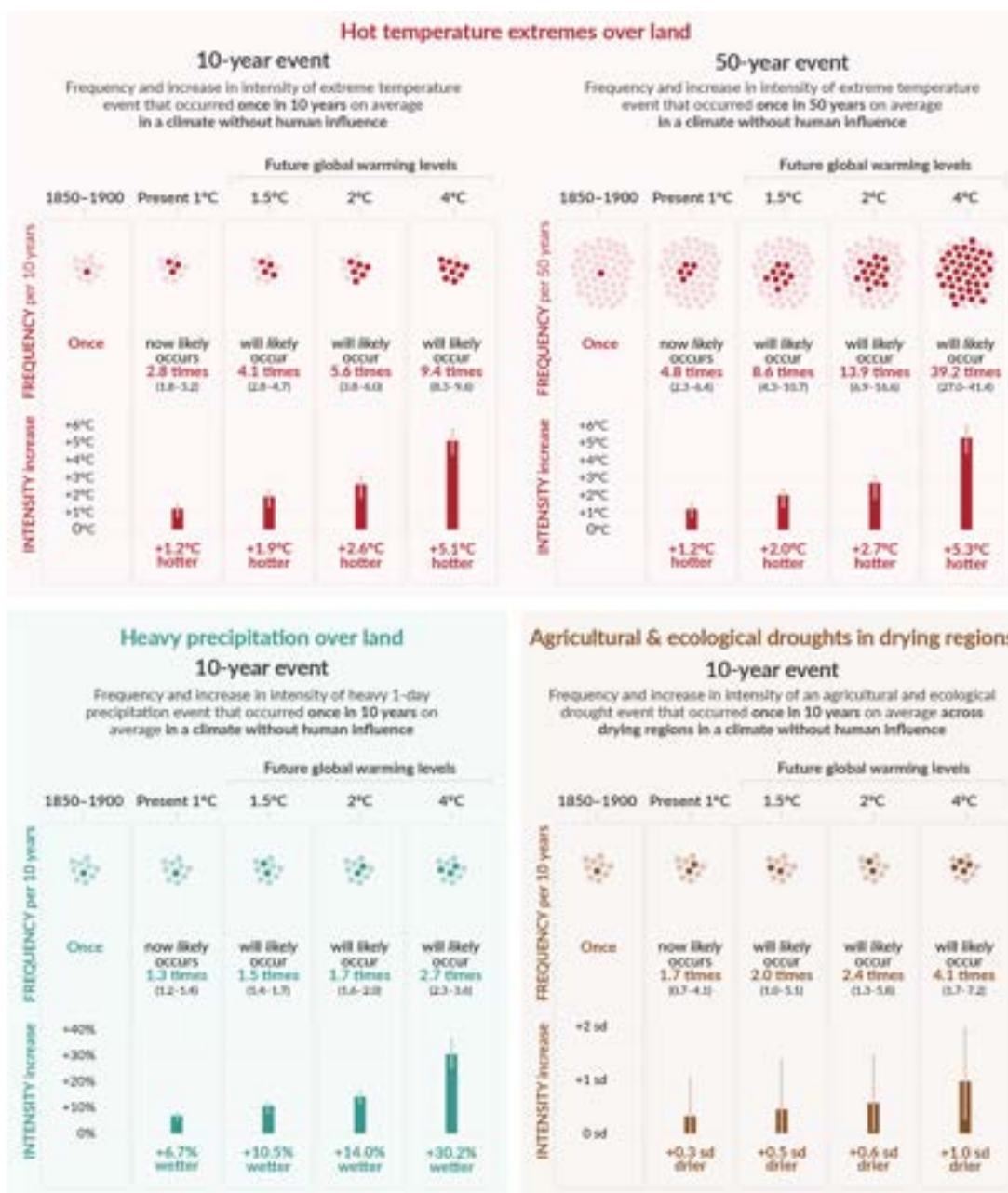


Fonte: Calvin et al. (2023).

O fato é que é um consenso na comunidade científica que os eventos extremos vão ser cada vez mais frequentes e que diversas consequências relacionadas às mudanças climáticas serão sentidas. Pode-se observar na Figura 12 que eventos extremos, tais como recordes de calor, tempestades e secas vão se intensificar.

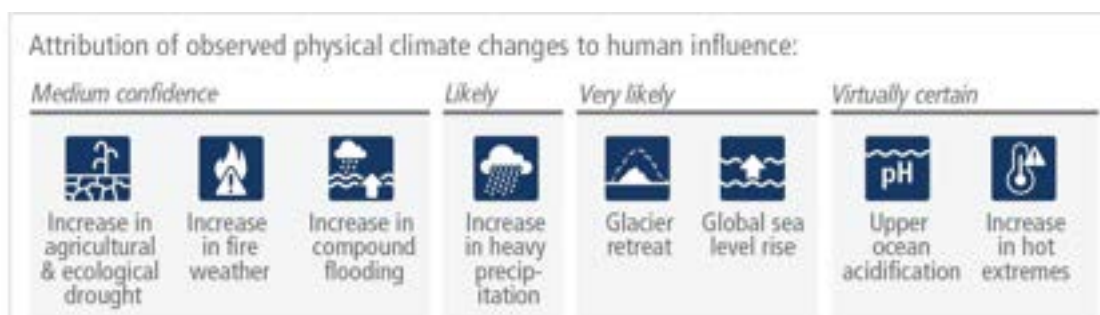
Já a Figura 13 mostra os fatores físicos observados que são atribuídos à ação do homem, onde se observa a acidificação dos oceanos e o aumento dos extremos de calor como certos; o derretimento de geleiras e o aumento no nível do mar como sendo considerados muito prováveis; o aumento nas tempestades como provável; e o aumento nas secas, aumento dos incêndios e aumento nas inundações como fatores de média confiança de serem atribuídos à ação humana.

Figura 12: Projeção no aumento de eventos extremos.



Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (2023b).

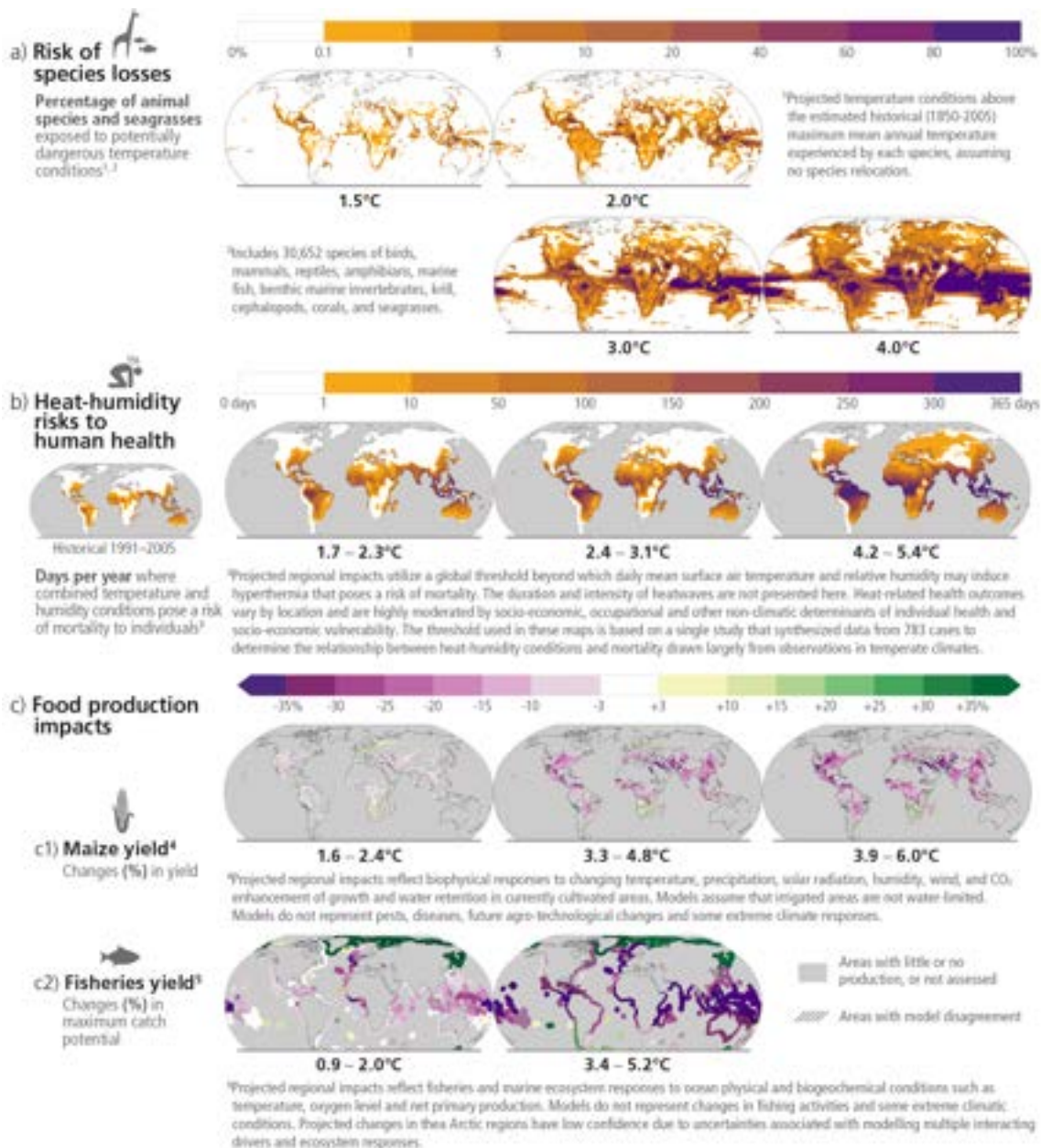
Figura 13: Fatores físicos das mudanças climáticas observados atribuídos às ações antrópicas.



Fonte: Calvin et al. (2023).

Destaca-se, ainda, consequências como a perda de espécies, o aumento da umidade relativa que traz riscos à saúde humana, e impactos na produção de alimentos (Figura 14).

Figura 14: Exemplos de consequências das mudanças climáticas.



Fonte: Calvin *et al.* (2023).

Diante do cenário de aquecimento da temperatura do planeta, ondas de calor e seca combinadas se tornarão mais frequentes e os eventos extremos de aumento do nível do mar, que atualmente ocorrem a cada 100 anos, podem ocorrer anualmente até 2100 diante de todos os cenários climáticos futuros. Há,

ainda, a intensificação de ciclones, tempestades e aumento de aridez (Calvin *et al.*, 2023).

Já Paulik *et al.* (2020) afirmam que as inundações nas regiões de costa devidas aos extremos de nível do mar serão mais frequentes e de maior magnitude, prevendo que os eventos que antes ocorriam com frequência de cerca de cem anos já se tornem anuais em 2050 em boa parte das áreas litorâneas do mundo.

Tem-se, atualmente, cerca de 3,3 a 3,6 bilhões de pessoas vivendo em contextos considerados de alta vulnerabilidade às mudanças climáticas. O aumento de eventos de extremos climáticos já expôs milhões de pessoas à insegurança alimentar e hídrica (Calvin *et al.*, 2023).

Projeta-se, a curto prazo, em todas as regiões do mundo, o enfrentamento de novos perigos climáticos, com riscos múltiplos para ecossistemas e seres humanos. Pode-se exemplificar isso com o aumento de mortalidade e morbidade humana devido ao calor; doenças transmitidas por vetores, alimentos e água; questões de saúde mental; inundações em cidades costeiras; perda de biodiversidade terrestre, de água doce e nos oceanos; e redução na produção de alimentos (Calvin *et al.*, 2023).

2.3 AUMENTO DO NÍVEL DO MAR

Não há dúvidas de que as ações antrópicas estão aquecendo a atmosfera, o oceano e a terra e, com isso, o nível médio dos oceanos ao redor do planeta aumentou 0,20 metros entre 1901-2018, tendo uma taxa média de 1,3 milímetros por ano entre 1901-1971; 1,9 milímetros anuais entre 1971-2006; e 3,7 milímetros a cada ano entre 2006-2018. Além disso, mudanças observadas no clima com extremos de calor, chuvas intensas, secas e ciclones tem se tornado mais frequentes e mais intensas e suas causas também são atribuídas à ação humana (Calvin *et al.*, 2023).

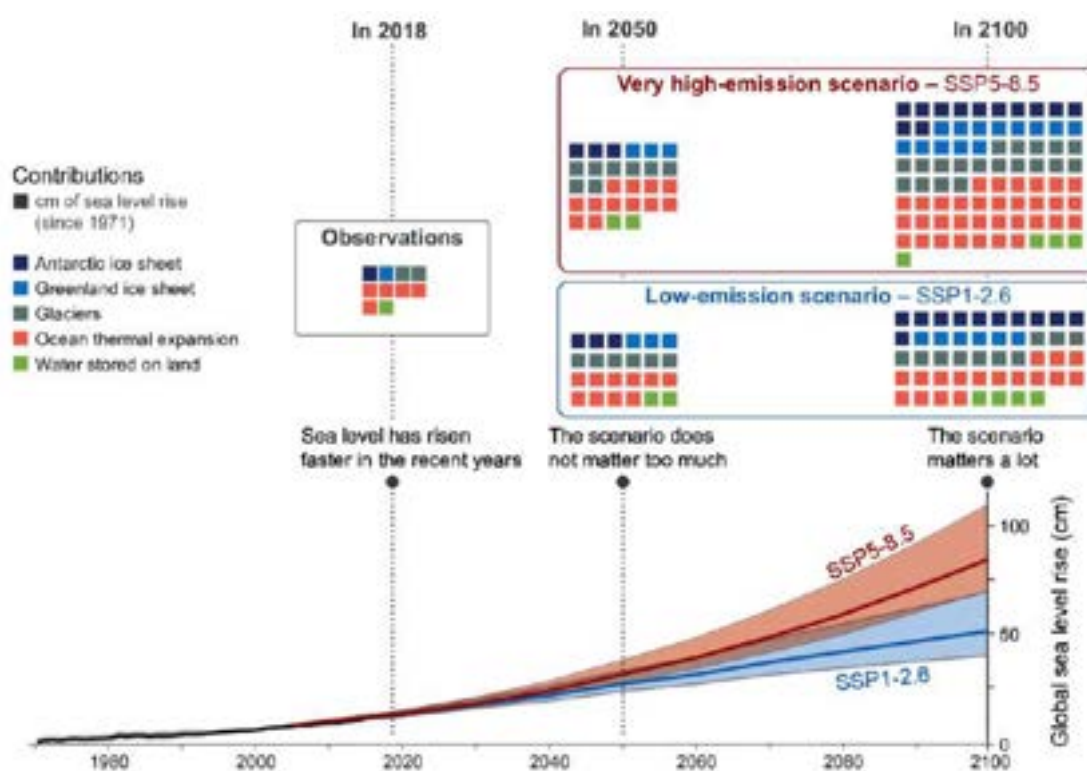
A elevação do nível do mar está ocorrendo em uma velocidade que ameaça as comunidades costeiras, as cidades e as ilhas de baixa altitude. Essa elevação é decorrente do aumento no volume da água do oceano em função do aquecimento, tornando a água mais quente e com menor densidade, ocasionado

pela perda de gelo terrestre ou da perda líquida nos reservatórios de água terrestres (Oppenheimer *et al.*, 2019).

Padrões distintos de mudança no nível do mar nas diferentes regiões são gerados pela redistribuição do gelo e da água no planeta. Além disso, o nível do mar também pode ser influenciado por atividades tectônicas, dinâmica do manto terrestre ou ajuste isostático glacial, que causam movimentos verticais de terra, levando ao aumento do nível do mar (Oppenheimer *et al.*, 2019).

Pode-se observar, conforme Figura 15, o quanto os diferentes fatores mencionados já contribuíram para esse fenômeno e estima-se o quanto ainda contribuirão para o aumento do nível do mar nas próximas décadas em cenários de SSP1-2.6 e SSP5-8.5. É notório que a expansão térmica do oceano, decorrente do aquecimento do planeta em virtude de atividades antrópicas, é o principal responsável pela elevação de nível dos oceanos.

Figura 15: Estimativas de aumento do nível do mar.

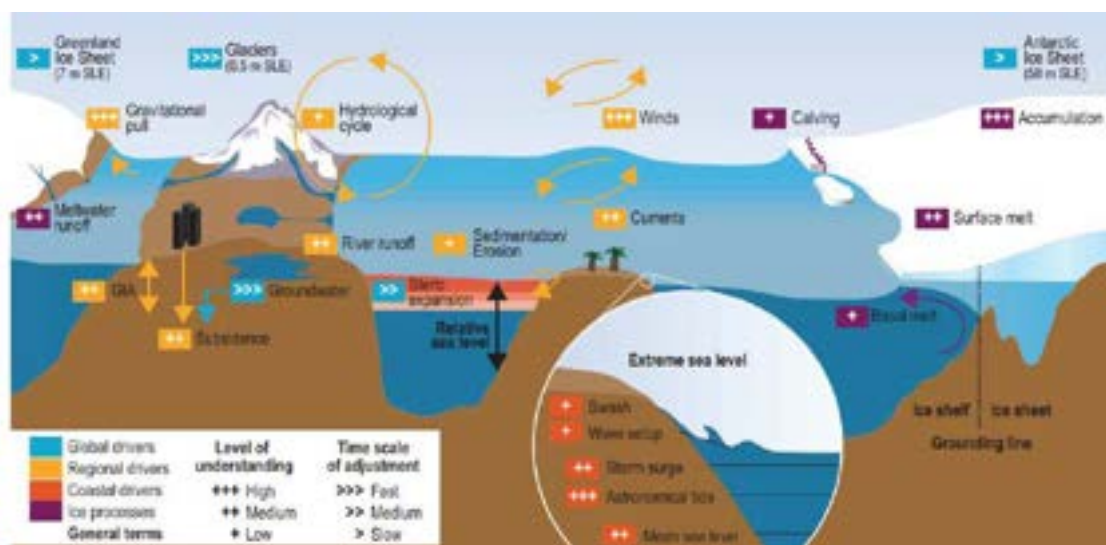


Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (2023b).

Dessa forma, é possível afirmar que os processos que influenciam no aumento do nível do mar são diversificados sendo capazes de atingir magnitudes em

escalas locais, regionais ou globais. A Figura 16 ilustra estes processos e suas implicações.

Figura 16: Processos relacionados ao SLR.



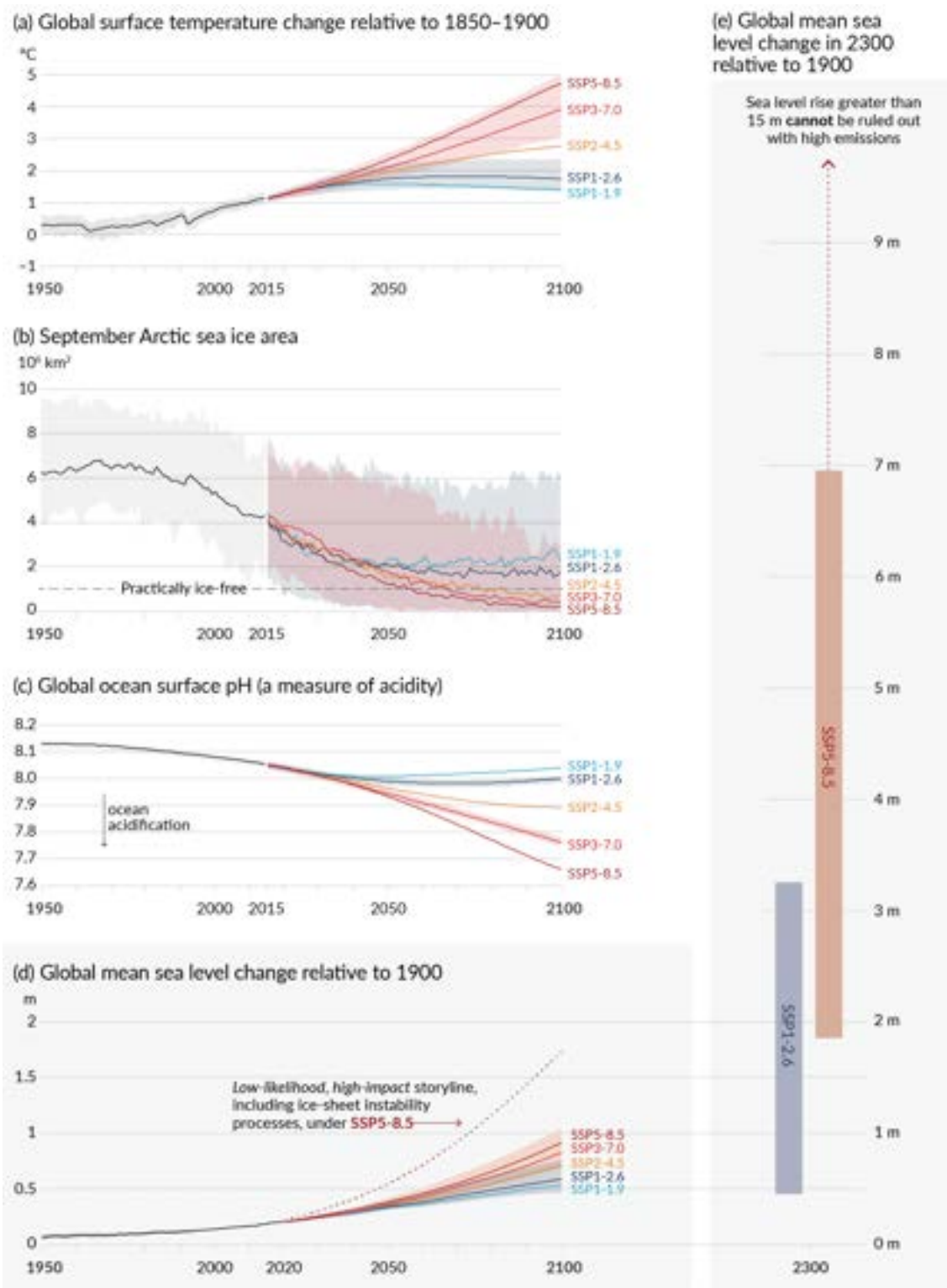
Fonte: Oppenheimer *et al.* (2019).

Observa-se, ainda na Figura 17, as consequências das ações humanas na temperatura, nas geleiras, na acidez dos oceanos e no nível do mar a partir dos diferentes cenários de SSP em relação a valores bases do período 1850-1900. Destaca-se que, fazendo uma projeção até 2300, não se pode descartar um aumento no nível do mar superior a 15 metros em média, se mantidas as altas emissões.

Nota-se que, para o SSP1-1.9, o nível do mar não deve aumentar mais do que 0,20 metros até 2050 e 0,50 metros até 2100. Já em SSP5-8.5, não se deve ter mais do que 0,30 metros até 2050, mas pode-se chegar a 1 metro até 2100 (Calvin *et al.*, 2023).

É um fato que os riscos para as zonas costeiras se intensificam à medida que o mar eleva seu nível e, já se sabe que o SLR será inevitável por séculos – ou mesmo milênios – em função do aquecimento contínuo do oceano profundo e do derretimento das camadas de gelo. O que se pode fazer, entretanto, é reduzir a velocidade com que esse fenômeno ocorre ao diminuir as emissões dos gases causadores do efeito estufa. A estimativa é que o nível do mar, nos próximos 2000 anos, aumente apenas de 2 a 3 metros caso o aquecimento do planeta não ultrapasse 1,5°C e 6 metros com a limitação de 2°C de aquecimento (Calvin *et al.*, 2023).

Figura 17: Alterações climáticas ao longo de séculos.

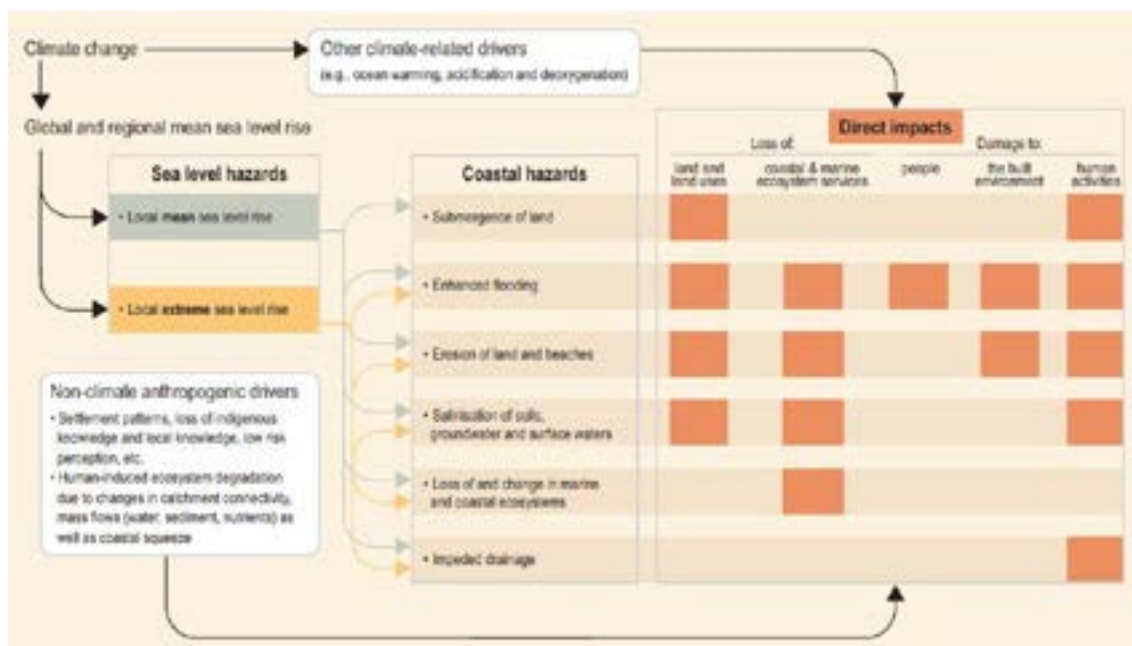


Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (2023b).

O aumento do nível do mar, de certa forma, gera um efeito cascata que leva a diversos perigos, como a submersão de terras; o aumento das enchentes; a erosão de terras e praias; a salinização de solos, aquíferos e rios; perda e

mudança dos ecossistemas marinhos e da região costeira; e obstrução de drenagem, dentre outros ainda não previstos.

Figura 18: Impactos dos vetores relacionados ao SLR.



Fonte: Oppenheimer *et al.* (2019).

Tais condições fazem com que haja uma maior vulnerabilidade das regiões costeiras baixas ao SLR, que é aumentada por fatores antropogênicos relacionados à urbanização. Riscos relacionados à elevação de nível dos oceanos devem aumentar significativamente até o final do século em todas as costas de baixa altitude (Oppenheimer *et al.*, 2019).

Em condições atuais de nível do mar, os riscos de inundação costeira predominantes decorrem dos eventos extremos, porém em cenários futuros, riscos crônicos de inundações repetitivas podem exceder as enchentes extremas. O atraso nas respostas aos riscos costeiros gera prejuízos que podem ser evitados com o emprego de estratégias adequadas para adaptação (Ghanbari; Arabi; Obeysekera, 2020).

Paulik *et al.* (2020) alerta para a necessidade de atitudes adaptativas que visem reduzir os impactos decorrentes da exposição das cidades costeiras às inundações decorrentes do SLR. Kirezci *et al.* (2020^a) afirmam que se nenhuma medida de proteção ou adaptação for tomada, em cenários de altas emissões, 52% da população global estará em risco de inundação até 2100.

2.4 CIDADES COSTEIRAS

Considerando que as cidades localizadas ao longo da costa serão as primeiras a serem atingidas pelas inundações decorrentes do aumento no nível do mar, na medida em que sua urbanização se desenvolve e sua população aumenta, tornam-se ainda mais expostas aos riscos climáticos. Por suas características geográficas, favorecendo o transporte, por exemplo, as cidades costeiras ao longo da história, têm se caracterizado como potencialmente favoráveis à urbanização (Woetzel *et al.*, 2020).

Apenas no contexto brasileiro, já se tem uma extensão costeira superior a 8 mil quilômetros, compreendendo 17 estados, 443 municípios, sendo 280 defrontantes com o mar (Brasil, 2022), e ilhas habitadas. A Figura 19 demarca esses municípios.

Figura 19: Indicação dos municípios que compõem a zona costeira brasileira.



Fonte: Adaptado de Brasil (2022).

Estima-se que cerca de 600 milhões de pessoas habitam atualmente as zonas costeiras de baixa elevação, ou seja, naquelas que se apresentam com menos de 10 metros acima do nível do mar, onde os impactos ambientais e socioeconômicos associados às inundações costeiras podem ser significativos (Kirezci *et al.*, 2020b).

Há estimativas, ainda, de que há 110 milhões de pessoas globalmente vivendo em terras abaixo da atual linha de maré alta e 250 milhões de pessoas abaixo dos níveis de inundação anuais (Kulp; Strauss, 2019).

Mesmo os cenários moderados de futuro para o ano de 2050 já ameaçam zonas que atualmente abrigam cerca de 150 milhões de pessoas, de modo que fiquem permanentemente abaixo da linha de maré alta. Dependendo do cenário estimado para o clima futuro e de fatores como a instabilidade das geleiras da Antártica, pode-se ter 630 milhões de pessoas atualmente vivendo em áreas que podem ser inundadas até 2100 (Kulp; Strauss, 2019).

Considerando cenários futuros, há uma estimativa de que cerca de 800 milhões de pessoas vivem nas mais de 570 cidades costeiras ao redor do planeta que vivenciarão, pelo menos, 0,5 metro de aumento do nível do mar até 2050 diante de cenários de altas emissões. Assim, o SLR pode afetar áreas urbanizadas em todo o planeta (Urban Climate Change Research Network, 2018).

Entretanto, o próprio desenvolvimento urbano dos territórios costeiros das cidades leva à destruição de superfícies naturais, reduzindo a permeabilidade do território, o que dificulta a drenagem, tendendo a acentuar as consequências das enchentes. Há um incentivo ao desenvolvimento urbano em áreas de maior risco de inundação, gerando maior exposição aos riscos climáticos. Esse cenário faz com que, ao serem inundadas, as cidades costeiras tenham prejuízos humanos, imobiliários, de infraestrutura, de energia, de transporte, de comunicações, dentre outros. Além disso, com o aumento dos eventos de extremos climáticos, cada vez mais difícil se torna o reparo e a recuperação das cidades (Woetzel *et al.*, 2020).

De acordo com as projeções futuras que consideram uma elevação do nível do mar entre 1 metro e 2 metros (Figura 20), as cidades costeiras poucos metros acima do nível do mar ficarão vulneráveis às inundações, podendo sofrer sérios danos se seus planos urbanos não considerarem esse fator. Deve-se avaliar a elevação do terreno da cidade, destacando as áreas de baixa altitude e considerá-las para um conjunto de cenários das mudanças climáticas. Conforme mencionado anteriormente, sabe-se que os impactos relacionados ao aumento do nível do mar são lentos, mas definitivos, levando a perdas significativas e, em

alguns casos, obrigando os habitantes das cidades costeiras a se mudarem das áreas mais vulneráveis (C40 Cities Climate Leadership Group, 2020).

Figura 20: Estimativa global de aumento do nível do mar para o cenário de SSP5-8.5 em 2100.



Fonte: National Aeronautics and Space Administration (2023).

Outra preocupação que deve ser considerada com as mudanças climáticas é que, por suas características, as cidades costeiras tendem a atrair migrantes que, em função das dificuldades econômicas e sociais, se instalam em zonas naturalmente vulneráveis, que serão acrescidas dos riscos climáticos futuros e, em algumas situações, se tornarão inabitáveis (C40 Cities Leadership Group; Mayors Migration Council, 2021).

Assim, cidades costeiras sofrem múltiplas pressões, já que há um aumento de demanda por infraestrutura adaptativa e preventiva, mas os riscos climáticos impõem restrições e limitações à sua implementação (C40 Cities Leadership Group; Mayors Migration Council, 2021).

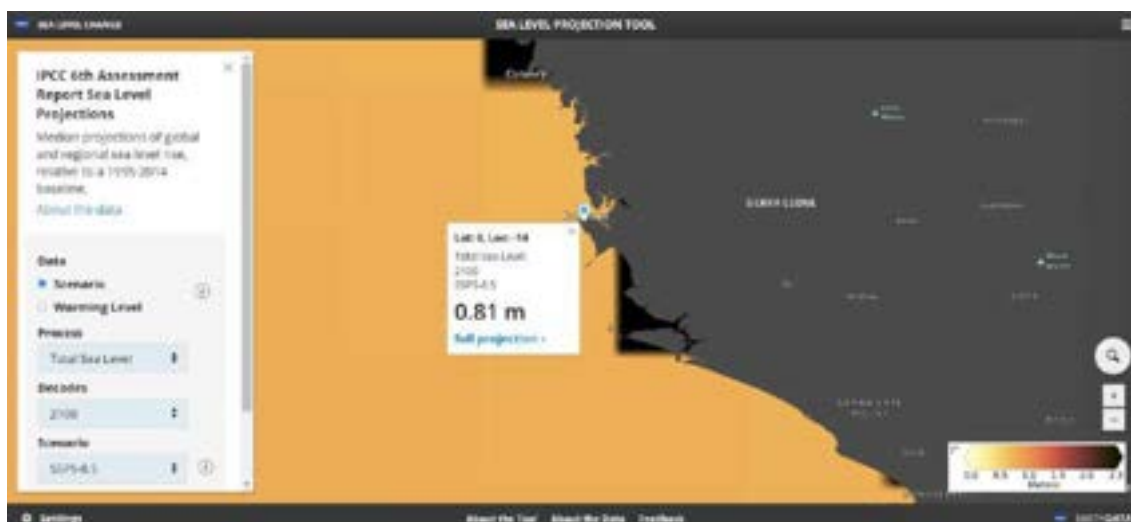
Dessa forma, os gestores municipais precisam tomar medidas que, além da proteção aos seus residentes atuais, também deve considerar os futuros residentes de seu território, preparando-se para um caminho capaz de abrigar os migrantes (C40 Cities Leadership Group; Mayors Migration Council, 2021).

Como exemplo, em Dhaka, Bangladesh, cerca de 2000 pessoas chegam diariamente à cidade oriundas de outras zonas costeiras cada vez mais afetadas por tempestades e pelo aumento do nível do mar. Assim, há uma parceria entre governo e iniciativa privada para melhorar as condições de vida nos

assentamentos informais existentes, onde recém-chegados se instalam (C40 Cities Leadership Group; Mayors Migration Council, 2021).

Já em Freetown, cidade situada em Serra Leoa, espera-se que a população dobre nos próximos dez anos, parcialmente em decorrência de migrantes fugindo de alterações no clima no restante do país. Assim, o conselho municipal da cidade tem tomado atitudes para melhorar os assentamentos informais (C40 Cities Leadership Group; Mayors Migration Council, 2021). Mas, estima-se que em Freetown o aumento do nível do mar passe dos 0,80 metros até o ano de 2100 diante do cenário de SSP5-8.5 conforme as previsões da National Aeronautics and Space Administration (2023), como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21: Previsão do aumento do nível do mar em Serra Leoa.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de National Aeronautics and Space Administration (2023). Dessa forma, entende-se que a adequada gestão das zonas costeiras é de fundamental importância para o enfrentamento das consequências do aumento do nível do mar diante dos diferentes cenários futuros de alterações no clima possíveis.

2.5 TIPOLOGIAS DE CIDADES E DE PRAIA

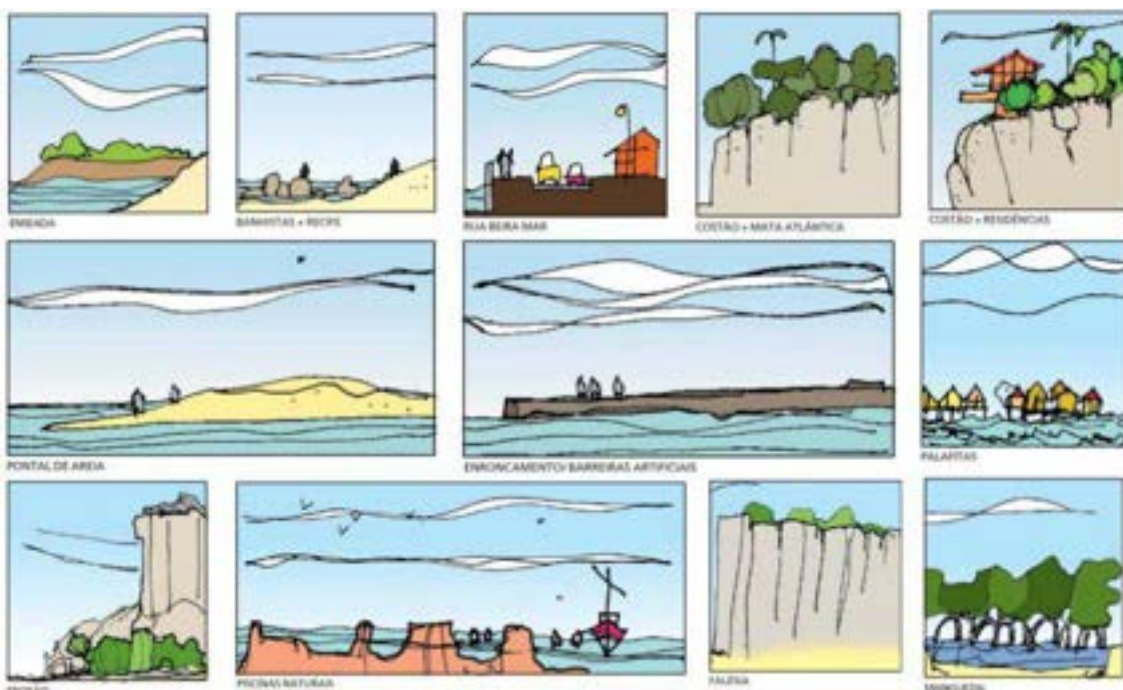
Cidades costeiras enfrentam riscos de inundação e outras consequências oriundas das mudanças climáticas que variam de acordo com suas características, tais como a geografia física, aspectos construídos, taxas de

afundamento da terra sobre a qual a cidade se ergue – denominada de subsidência –, além do quanto o nível do mar aumentará no local em que se inserem. Diferentes perfis de praias e de aspectos tipológicos das cidades nas suas imediações vão gerar diferentes respostas ao enfrentamento do aumento do nível do mar.

A existência ou não de proteções naturais, a proximidade ou distanciamento das construções, as infraestruturas edificadas, as características de ocupação do solo, os perfis da geografia física, dentre outros fatores, são alguns dos aspectos que vão caracterizar tanto as praias como as cidades localizadas nas zonas costeiras.

Podem ser observados na Figura 22 alguns exemplos ilustrativos desses perfis mencionados. Assim, entende-se que a adequada avaliação desses fatores pode moldar a vulnerabilidade às inundações costeiras e ao SLR de cidades em locais litorâneos (C40 Cities Climate Leadership Group; C40 Knowledge Hub, 2022).

Figura 22: Exemplos de perfis geográficos e de ocupação da zona costeira.

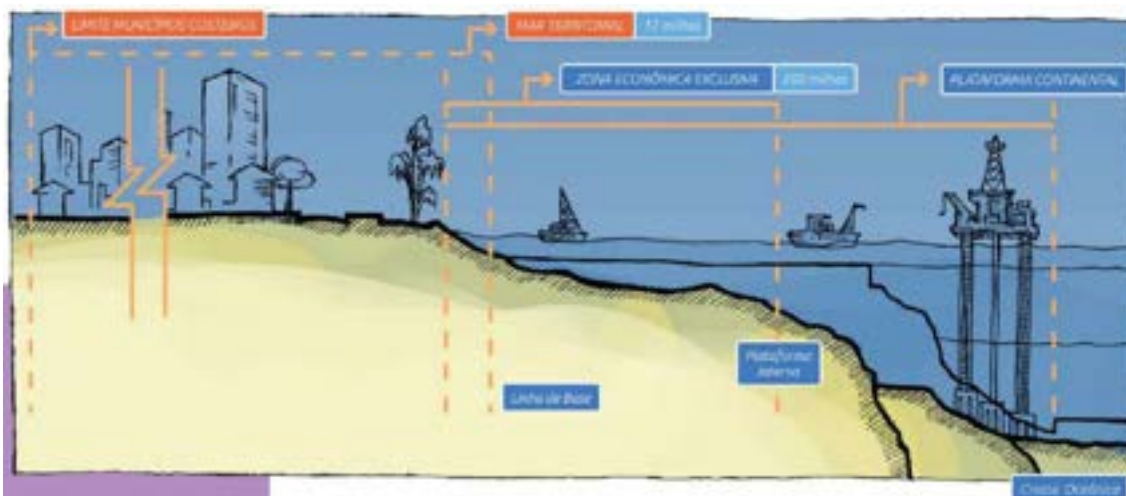


Fonte: Adaptado de Brasil (2006).

As diferentes características das plataformas continentais também podem influenciar os aspectos de análise dos impactos decorrentes do aumento no nível

do mar. A Figura 23: sintetiza o conceito que define a delimitação da plataforma continental.

Figura 23: Perfil da plataforma continental brasileira.



Fonte: Brasil (2022).

Para a efetiva avaliação das consequências de uma eventual elevação do nível do mar, é de fundamental importância identificar o perfil de praia e os fenômenos que nela acontecem, tais como a erosão ou a recuperação da areia, somando-se às suas próprias características de formação e diferentes materiais que as compõem, tais como areia, cascalho, seixos, dentre outros, até as vegetações que as envolvem.

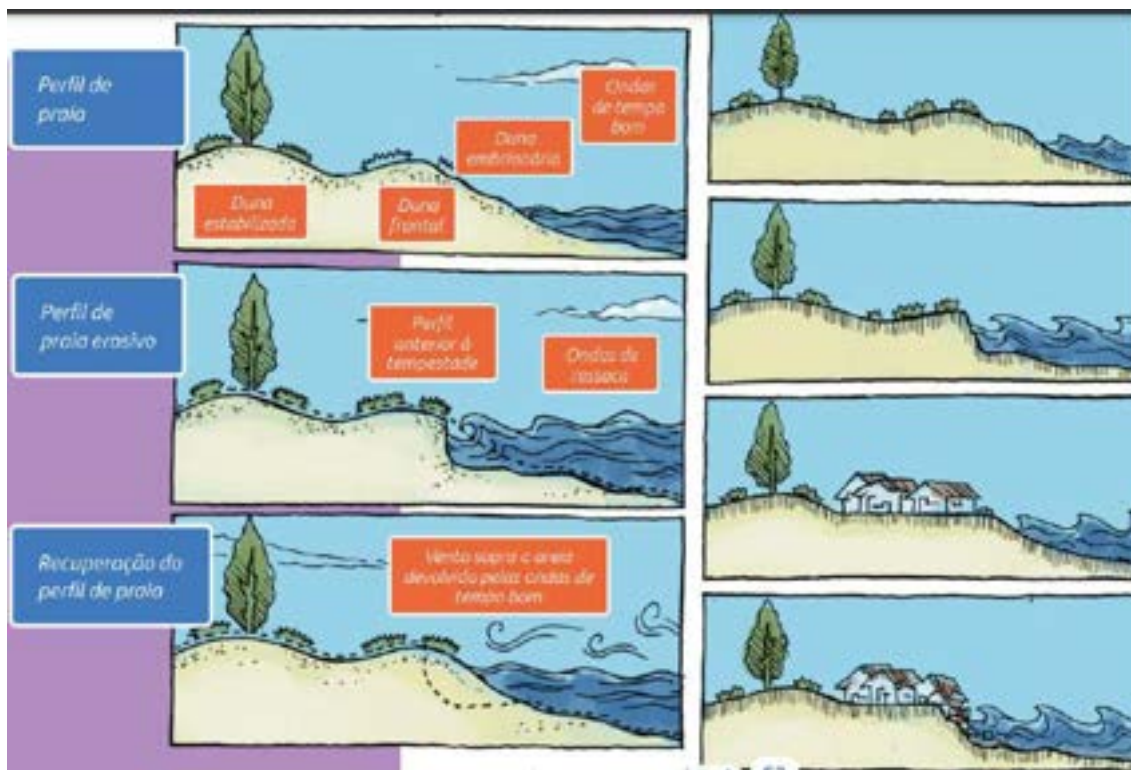
Observa-se, conforme Figura 24, exemplos de diferentes perfis de praia e os efeitos das ações dos fenômenos naturais sobre o seu território. Pode ser observado, ainda, a existência de diferentes respostas à erosão em perfis semelhantes de praia a partir de diferentes características de ocupação das orlas.

Os aspectos que definem a orla também requerem uma avaliação adequada para se determinar quais são os efeitos do aumento do nível do mar em cidades costeiras.

Assim, Brasil (2022) considera 3 tipos básicos de orla: **abrigada**, que são os ambientes litorâneos protegidos da incidência direta das ondas e baixa taxa de renovação da água, como em golfos, baías e enseadas; **exposta**, onde há elevada circulação e renovação de água, como em costões rochosos ou praias

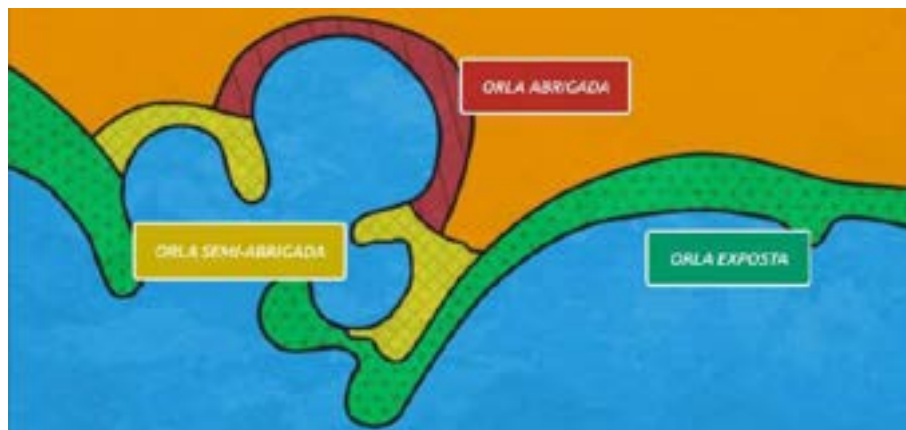
oceânicas; e **semi-abrigada**, com características intermediárias entre os dois perfis de orla anteriores (Figura 25).

Figura 24: Exemplos de perfis de praia.



Fonte: Adaptado de Brasil (2022).

Figura 25: Características dos tipos de orla.



Fonte: Brasil (2022).

Finalmente, é importante também entender os demais fenômenos que acontecem nas cidades litorâneas. Especificamente em relação à subsidência, por exemplo, ela é responsável por significativas perdas econômicas em função de danos estruturais e custos de manutenção, afetando estradas, diques, barreiras contra inundações, edifícios, fundações, dentre outros (Erkens et al.,

2015). A Figura 26 ilustra os processos e os danos que são associados a esse fenômeno.

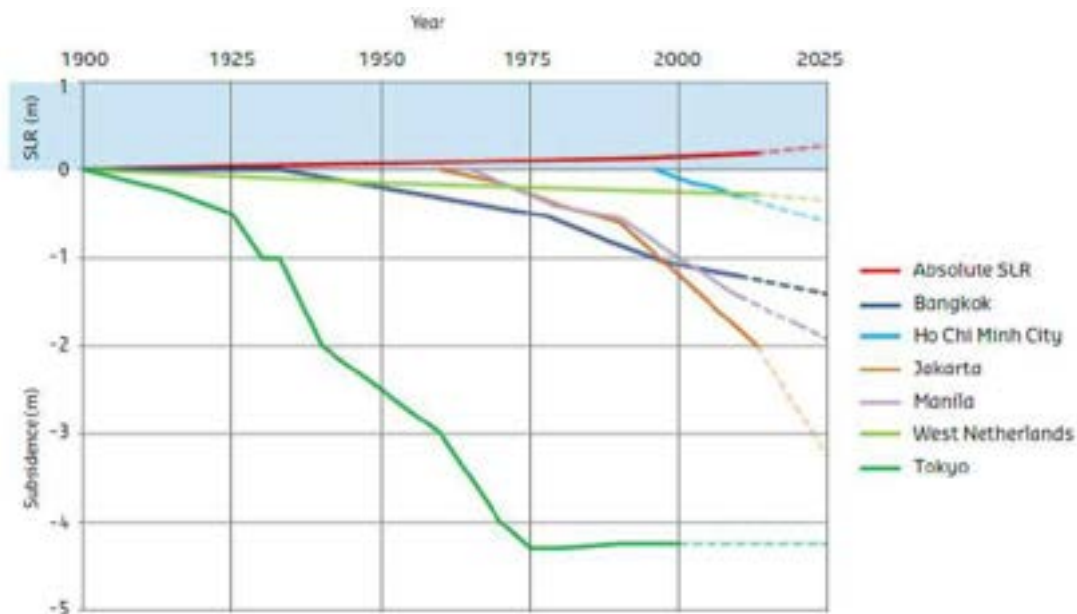
Figura 26: Processos e danos da subsidência nas cidades costeiras.



Fonte: Erkens et al. (2015).

Em alguns lugares, esse fenômeno apresenta taxas até maiores do que as relacionadas ao aumento do nível do mar, como pode-se observar na Figura 27, que exemplifica os valores de subsidência para as cidades de Bangkok (Tailândia), Ho Chi Minh (Vietnã), Jakarta (Indonésia), Manila (Filipinas) e Tokio (Japão) e para a região de West Netherlands, localizada nos Países Baixos. Compara-se, ainda os valores obtidos com o SLR.

Figura 27: Comparação da subsidência em diferentes cidades.



Fonte: Erkens et al. (2015).

2.6 ESCALAS DE RISCO

A partir do entendimento das diferentes tipologias de cidades e perfis costeiros existentes, e do entendimento de que o aumento do nível do mar pode prejudicar esses territórios, o entendimento dos riscos associados a esse estressor, em diferentes escalas, torna-se importante.

Sabe-se que o WEF adota 5 categorias de risco esperados para os próximos anos: sociais, econômicos, geopolíticos, tecnológicos e ambientais (World Economic Forum, 2023). As mudanças climáticas enquadram-se nos aspectos ambientais, mas relacionam-se diretamente com as outras categorias, principalmente com os aspectos sociais, exemplificados, por exemplo, pelas migrações involuntárias em larga escala.

Entretanto, as mudanças climáticas, embora sejam um risco, podem ser desdobrados em diferentes variáveis que se constituem como novos riscos possíveis.

Assim, além das consequências relacionadas ao equilíbrio natural do planeta, as mudanças climáticas também geram impactos na saúde humana, nos seus meios de subsistência e nas infraestruturas construídas. Com a intensificação prevista dos extremos climáticos, sistemas como o transporte, a água e o saneamento serão comprometidos, levando a perdas socioeconômicas concentradas, principalmente nos residentes urbanos marginalizados (Calvin et al., 2023).

Sabe-se da importância de se tomar medidas de enfrentamento na busca pela minimização dos riscos. Calvin et al. (2023) afirmam que há, pelo menos, 170 países, além de diversas cidades, que incluem práticas adaptativas em suas políticas climáticas e no seu planejamento. Entretanto, mesmo com práticas adaptativas, há perdas e danos que não podem ser evitados em alguns ecossistemas tropicais, costeiros, polares e montanhosos, que já atingiram limites para adaptação.

Dessa forma, projetar os riscos climáticos, os cenários futuros e lidar com as vulnerabilidades a partir de fatores sociais, culturais, políticos e econômicos são

artifícios requeridos para a adaptação em diferentes contextos, de modo que a garantia dos direitos humanos básicos e do acesso a moradia segura passa pelas ações de adaptação que visam reduzir a exposição aos riscos climáticos (Orr et al., 2019).

No contexto do aumento do nível do mar, entende-se que os riscos podem ser agrupados em cinco grupos: **vida humana, economia, infraestrutura, patrimônio e ecossistemas.**

A **vida humana** pode ser comprometida por fatores relacionados à saúde ao se tratar, por exemplo, do aumento de vetores transmissores de doenças, principalmente em locais de climas quentes. Observa-se, ainda, a possibilidade de combinação com eventos extremos como inundações, tempestades ou altas de maré, que trazem risco imediato à vida humana.

A **economia** é diretamente afetada, seja pelas perdas imobiliárias ou turísticas relacionadas à desapropriação de áreas alagáveis e, também, pelos custos para adaptação e enfrentamento desse estressor.

As **infraestruturas** ficam sob risco quando inundadas, seja na escala do edifício, que pode precisar de estratégias de acomodação para permanecer existindo, seja na escala dos equipamentos públicos.

Quando se trata de **patrimônio**, tem-se uma relação direta com questões culturais, dado que perdas imateriais também podem ocorrer, quando se considera, por exemplo, a possibilidade de alagamento de espaços tombados com significados simbólicos para a comunidade.

Por fim, os **ecossistemas** em risco apresentam a escala ambiental desse estressor, dado que o avanço do mar pode comprometer o solo, salinizá-lo, promover mudanças no microclima local e evidenciar a incapacidade de algumas espécies animais e vegetais de se adaptarem na velocidade das mudanças do clima.

Rising et al. (2022) defendem que os riscos das mudanças climáticas devem ser incluídos em avaliações e processos de tomada de decisões. Porém, alguns dos impactos climáticos são insuficientemente estudados e difíceis de se quantificar.

Isso evidencia a necessidade de se buscar compreender os riscos envolvidos no aumento do nível do mar, para que se possa avaliar adequadamente as alternativas disponíveis durante o processo decisório dos gestores públicos.

2.7 POLÍTICAS PÚBLICAS

À medida que os eventos climáticos – como ondas de calor, as secas e as inundações – estão se tornando mais graves e frequentes, um maior número de pessoas é afetado. Estratégias de adaptação, mitigação e recuperação de desastres provenientes do poder público, em parceria com a iniciativa privada precisam ser consolidadas (World Economic Forum, 2023).

Ações devem ser implementadas para impedir que as desigualdades sociais sejam ainda mais acentuadas diante das alterações no clima, assim, é inegável que mitigar as emissões dos GEE torna-se imperativo. Deve-se coordenar os esforços no sentido de identificar o que é necessário para que as emissões atinjam o zero líquido, permitindo uma adaptação necessária às comunidades e países que cada vez mais sofrem com as consequências das alterações no clima (World Economic Forum, 2023).

Identifica-se, assim, a necessidade de lideranças nas cidades que estejam comprometidas em limitar o aquecimento do planeta em 1,5°C por meio de ações dos formuladores de políticas públicas, integrados à sociedade à iniciativa privada e à academia. As cidades devem aumentar os esforços para se alinhar com as metas de limitação do aquecimento do planeta, sendo que as ações adotadas em uma cidade podem servir de base para outra, dado que os seus efeitos não se limitam apenas às fronteiras físicas de seu território (Orr et al., 2019).

A implementação de políticas adequadas e alicerçadas no conhecimento científico é necessária para que se atinjam as metas climáticas. No entanto, embora as políticas e leis que visem a mitigação das emissões de GEE tenham se expandido consistentemente, é provável que o aquecimento global vá além de 1,5°C ao longo do século XXI, passando, inclusive, de 2°C (Calvin et al., 2023).

Além de agir para limitar o aumento de temperatura global, as cidades também devem se preparar para lidar com as mudanças climáticas e suas consequências. Ações em todos os níveis de governança, desde a escala nacional até a escala local são importantes.

O planejamento e a implementação de estratégias de adaptação em todos os setores e regiões do planeta tem os seus benefícios documentados e a eficácia das estratégias varia em diferentes contextos. No entanto, especialmente em países em desenvolvimento, os recursos financeiros destinados à prática adaptativa têm sido insuficientes, restringindo as opções de implementação (Calvin et al., 2023).

Ainda segundo Calvin et al. (2023), observa-se que, dentre as principais barreiras à adaptação, podem ser mencionados os recursos limitados, a falta de envolvimento de cidadãos e do setor privado, os financiamentos insuficientes para pesquisa, o baixo conhecimento sobre o clima, a carência de compromisso por parte dos políticos e o baixo senso da urgência na tomada de ações.

Por sua vez, o C40 Cities Climate Leadership Group e o Nordic Sustainability, que visa auxiliar empresas a prosperarem dentro dos limites do planeta, (2019) afirmam que prefeitos e líderes municipais que estão entre os primeiros a reconhecer a dimensão dos desafios que a crise climática traz, tomam a linha de frente no enfrentamento dos extremos climáticos como o aumento no nível do mar, inundações severas, incêndios florestais e secas. Por isso, alguns gestores locais já entregam planos, projetos e políticas climáticas ambiciosas e inovadoras, visando contribuir para limitar o aumento da temperatura global e, assim, se aproximar do conceito de desenvolvimento sustentável.

Muitos benefícios são gerados com o desenvolvimento de planejamento e implementação de estratégias de adaptação nos diferentes setores e regiões. Calvin et al. (2023) afirmam que há, pelo menos, 170 países, além de diversas cidades, que incluem práticas adaptativas em suas políticas climáticas e no seu planejamento. Entretanto, mesmo com práticas adaptativas, há perdas e danos que não podem ser evitados em alguns ecossistemas tropicais, costeiros, polares e montanhosos, que já atingiram limites máximos para adaptação.

Para que as estratégias adotadas pelos propositores de políticas públicas superem os desafios de governança, é preciso que haja participação pública e adoção de práticas para a resolução de conflitos e métodos que facilitem a análise das decisões. O planejamento pode permitir ações em distintas escalas temporais, espaciais e de governança (Oppenheimer et al., 2019).

Em síntese, as políticas públicas são necessárias e podem ser eficazes para que se lide melhor com as consequências do aquecimento do planeta sob diferentes problemas.

Há ações que podem ser tomadas para evitar as migrações climáticas, uma das consequências sociais das mudanças no clima conforme anteriormente mencionado, de modo que uma redução de 80% no número de pessoas forçadas a migrar é possível através de ações imediatas de redução nas emissões de GEE, integração da migração climática por meio planos de desenvolvimento inclusivos, planejamentos para as diferentes fases que garantam possibilidades de adaptação e investimento no entendimento dos condutores do problema (Clement *et al.* 2021).

Ainda sobre a questão das políticas relacionadas à migração, o Comitê de Direitos Humanos da ONU determinou a proibição de deportação dos refugiados climáticos em busca de asilo, enfatizando que a comunidade internacional deve estar integrada para ajudar países mais vulneráveis em relação às mudanças do clima (United Nations, 2020). No entanto, sabe-se que essa “proibição” não será suficiente para a resolução do problema.

Poucos países apresentam estruturas regulatórias que lidam com os custos da adaptação às mudanças climáticas, como por exemplo, na definição de quem é responsável financeiramente por cada ação. É perceptível que a maioria dos países não está organizada a esse respeito (Lawrence et al., 2020).

Evidencia-se, assim, a importância de políticas públicas adaptativas integradas e específicas para os diferentes países e contextos, dado que os impactos das mudanças climáticas afetarão a todos, com diferentes características para cada local e, mesmo efeitos esperados para um determinado território, ainda podem gerar impactos em outros locais.

Acredita-se que, por meio de políticas públicas de adaptação, seja possível reduzir riscos climáticos e, também, a vulnerabilidade. As opções para as suas implementações são diversas e podem ajudar a gerenciar os impactos projetados das mudanças no clima, sendo dependentes de governanças eficazes e de tomadas de decisão para o desenvolvimento resiliente ao clima do planeta (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023a).

Quando se trata, especificamente, do aumento do nível do mar, sabe-se que as decisões de adaptação já podem e devem ser tomadas agora, projetando os cenários que se terá no futuro.

Particularmente nesse caso, o aumento no nível médio do mar apresenta-se como um desafio de adaptação, dado que as mudanças observadas são inicialmente lentas e o aumento significativo na magnitude e na frequência dos eventos extremos relacionados será observado já nas próximas décadas. Acredita-se que as estratégias de adaptação já estariam sendo implementadas mais cedo se o aumento de nível dos oceanos já estivesse comprometendo um número maior de pessoas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023a).

Mas, respostas mais eficazes ao aumento do nível do mar devem ser tomadas combinando diferentes soluções existentes, ou desenvolvendo novas, alinhadas com os valores socioculturais das comunidades costeiras atingidas e priorizando o planejamento com o envolvimento da população (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023a).

Ainda sobre a mudança no nível dos oceanos, por sua natureza complexa, e de acordo com Oppenheimer *et al.* (2019), identificam-se 5 desafios de governança: 1) o horizonte de tempo e as incertezas em estimativas após 2050 dificultam a tomada de decisão e o planejamento; 2) a coordenação das diversas escalas de gestores e níveis jurisdicionais é necessária para respostas eficazes; 3) a vulnerabilidade social e a equidade são afetadas pelo aumento do nível do mar, dificultando o alcance dos ODS (Objetivos do Desenvolvimento Sustentável); 4) tende-se a ter um aumento de conflitos sociais em função da elevação dos oceanos, que podem se tornar de difícil resolução; e 5) a complexidade do fenômeno, somada aos desafios mencionados dificulta a abordagem adequada para o aumento do nível do mar.

Pode-se mencionar, ainda, que dentre os desafios existentes, há a necessidade de se buscar soluções em um curto espaço de tempo, com o intuito de evitar a necessidade de adoção de medidas mais severas no futuro, como a retirada de pessoas.

Assim, a adequada regulamentação dos eixos de desenvolvimento das cidades e as alterações nos seus zoneamentos dos planos diretores entre outros aspectos, torna-se cada vez mais necessário, embora gere controvérsia em alguns setores da sociedade. Assim, é necessário que seja avaliada a relação custo-benefício – entendendo-se no contexto de custo, os aspectos sociais, ambientais e econômicos – de cada abordagem possível, evitando que se criem bairros mais vulneráveis por meio de planos de uso do solo e códigos de zoneamento restringindo construções em áreas expostas a riscos e exigindo alta resiliência a inundações em edifícios das zonas costeiras (C40 Cities Climate Leadership Group, 2020).

A atualização dos códigos de construção e zoneamentos terá impactos nas infraestruturas existentes e futuras. Destacam-se dois exemplos de cidades que utilizaram essas medidas em seus territórios: Christchurch, Nova Zelândia, em seu plano diretor de 2011, que inseriu orientações para evitar o aumento da densidade e utilização de pisos elevados, além de outras medidas, em áreas de risco; e Nova York (EUA), em 2021, que introduziu um zoneamento para resiliência às inundações costeiras, que orienta novos projetos a seguirem um pacote de regras para que os edifícios possam lidar com as projeções de elevação dos oceanos e molda o desenvolvimento da urbanização em áreas de risco (C40 Cities Climate Leadership Group; C40 Knowledge Hub, 2022).

Além disso, outro aspecto que deve ser mencionado em relação às políticas públicas é o aumento no número de litígios contra governos que não adotam estratégias efetivas para lidar com as mudanças climáticas, pautadas em planos e metas concretos. De acordo com Setzer e Higham (2021), cidades que não agem consistentemente, devem enfrentar volumes crescentes de ações litigantes.

Nesse contexto, medidas novas, como taxações de terrenos em áreas alagáveis para que se gere um fundo de investimento para a adoção de estratégias de adaptação, ou mesmo a criação de bolsas de terrenos capazes de abrigar

populações residentes em áreas que podem ser tomadas pelo mar, surgem também como possibilidades de ações a serem implementadas em cidades costeiras.

Dessa forma, diante do cenário apresentado, torna-se indiscutível a importância da adoção de políticas públicas para lidar com as mudanças climáticas visando a redução das vulnerabilidades nas cidades.

2.8 SOLUÇÕES E ESTRATÉGIAS

Embora, atualmente, o aumento no nível médio do mar ainda não esteja causando transtornos para a maior parte das cidades costeiras, no futuro estima-se um cenário diferente, com os principais impactos ocorrendo já nas próximas décadas, de modo que as cidades precisam se preparar imediatamente (C40 Cities Climate Leadership Group, 2020).

Assim, os governos, em suas diversas escalas de atuação, somados ao setor privado e à sociedade têm papel fundamental na tomada de ações integradas visando a sustentabilidade e a resiliência climática, de modo que se alcance tais metas quando se priorize a redução de riscos, integrando os setores, sendo fundamental para melhor adaptação aos cenários de mudanças climáticas (Calvin et al., 2023).

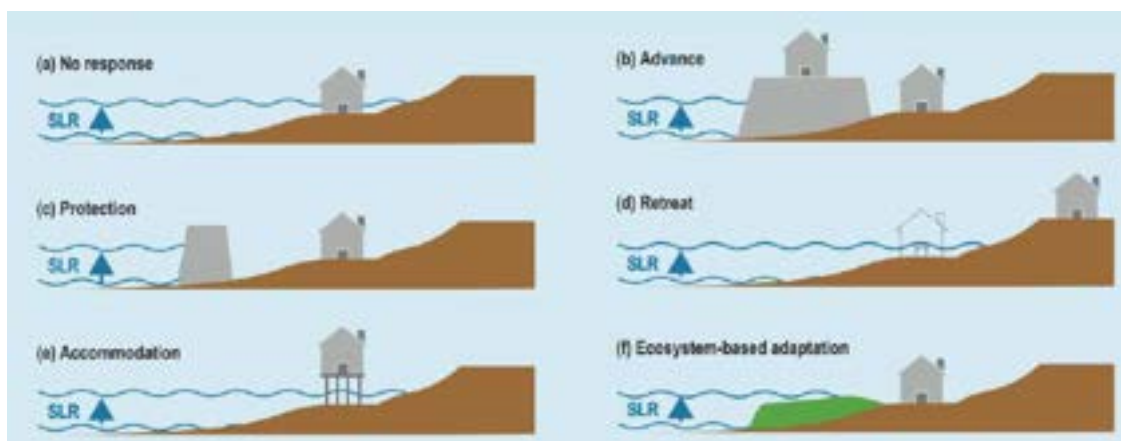
De acordo com C40 Cities Climate Leadership Group (2020), especificamente em relação ao aumento do nível do mar, há 3 abordagens adaptativas possíveis: proteção, acomodação e recuo. Essas abordagens são fundamentais e podem ser empregadas em conjunto, desempenhando uma resposta integrada e sequenciada no enfrentamento das consequências da elevação dos oceanos (Oppenheimer et al., 2019).

A Figura 28 exemplifica as diferentes possibilidades de resposta aos riscos costeiros decorrentes do aumento do nível do mar a partir das três abordagens trabalhadas individualmente.

Dessa forma, pode-se proteger a linha de costa com defesas contra as enchentes, reduzir os impactos de inundações costeiras por meios de

adaptações dos edifícios e demais infraestruturas urbanas, ou promover a retirada da população das áreas de risco. A decisão da melhor estratégia depende da análise dos riscos que a cidade enfrenta, sendo desejável, ainda. A ampla participação dos diferentes setores governamentais, privados e da população local nessas decisões (C40 Cities Climate Leadership Group; C40 Knowledge Hub, 2022).

Figura 28: Exemplos de abordagens para o enfrentamento do aumento do nível do mar.



Fonte: Oppenheimer et al. (2019).

A abordagem adaptativa mais utilizada é a proteção e considera-se que há duas formas principais de proteger o litoral: por meio de **infraestrutura cinza** ou por meio de **soluções baseadas na natureza**, ou ainda a combinação das duas soluções (C40 Cities Climate Leadership Group; C40 Knowledge Hub, 2022).

As denominadas **infraestruturas cinzas** são aquelas que se valem das soluções oriundas da engenharia tradicional, como anteparos, diques, quebra-mares, sistemas de bombeamento e barreiras em geral. Já as **soluções baseadas na natureza** utilizam as denominadas infraestruturas verdes, por meio de estratégias que trabalhem a costa como proteção contra inundações, valendo-se de estratégias como linhas de árvores costeiras, recuperação e aumento de vegetação e proteção de recifes e corais (C40 Cities Climate Leadership Group, 2020).

De acordo com Oppenheimer *et al.* (2019), as infraestruturas cinzas, tanto quando executadas em terra quanto no mar, apresentam mais eficiência econômica na maior parte dos contextos urbanos onde há escassez de terra, porém levam a uma maior exposição aos riscos do SLR a longo prazo. Já as soluções baseadas na natureza são eficientes onde houver espaço disponível,

reduzindo os riscos costeiros e fornecendo ainda outros benefícios, como os relacionados ao conforto térmico.

Já a abordagem de acomodação é baseada na modernização dos edifícios e da infraestrutura urbana para que seja possível se adaptar ao aumento do nível do mar (C40 Cities Climate Leadership Group, 2020). A inserção de edifícios à prova de inundações para os eventos de enchentes é normalmente uma estratégia de menor custo e rentável dentre os diversos contextos possíveis (Oppenheimer et al., 2019).

Por fim, em áreas costeiras onde há grande exposição aos riscos, o recuo pode ser a única solução eficaz (C40 Cities Climate Leadership Group, 2020). Locais de altos riscos costeiros, com baixa elevação e densidade populacional, ou com sequências de desastres na linha de costa são particularmente adequados ao emprego da estratégia de recuo, consistindo na retirada da população da área. Entretanto, questões sociais, culturais e políticas surgem como desafios nesta abordagem (Oppenheimer et al., 2019).

De acordo com Lawrence *et al.* (2020), particularmente em planícies de inundação costeiras e fluviais baixas, o recuo realizado de forma gerenciada pode ser uma resposta de adaptação inevitável em função do aumento do nível do mar e do aumento na intensidade das chuvas.

Para o recuo ser realizado de forma competente, políticas nacionais e processos de planejamento são essenciais, dado que o número e a escala das retiradas gerenciadas necessárias tendem a aumentar ao longo dos próximos 50 anos. Como o mar continua subindo e as chuvas estão se tornando mais extremas, é inevitável a adoção do recuo gerenciado, demandando modificações nas estruturas políticas e a adoção de processos de decisão adequados ao tempo e à magnitude dos impactos (Lawrence et al., 2020).

E, embora assumam-se que essa migração forçada na abordagem de recuo caracterize a incapacidade de um determinado ambiente enfrentar o aumento no nível do mar, tal abordagem reduz as pressões sobre ecossistemas frágeis (The Advisory Group on Climate Change and Human Mobility, 2014).

Porém, afirma-se que há poucos estudos que exploram as questões sociais e políticas de forma mais ampla a respeito do recuo gerenciado, permitindo sua

implementação eficaz. Lawrence *et al.* (2020) afirma ainda deve-se levar em consideração, por exemplo, os vários níveis de decisão governamentais, as ferramentas de análise de decisão, os processos de planejamento que permitem a participação pública e o engajamento da comunidade, os limites de intervenção, a supervisão e condução do retiro, o compartilhamento de custos, a compensação pública pela perda da propriedade, o financiamento dos custos futuros de adaptação, o ordenamento do território e os mecanismos para minimizar os riscos morais.

Além disso, evidenciam-se alguns estressores na implementação do retiro controlado como opção adaptativa, entre eles: liderança política fraca e inconsistente, focada apenas no curto prazo; incertezas sobre a alocação de responsabilidade e direitos de decisão entre os níveis de governo; limitação na coordenação em domínios chave, como infraestrutura e ordenamento do território; limitada capacidade institucional para projetar, negociar, engajar e implementar a retirada gerenciada; atrasos na tomada de decisão; e a relutância por parte dos tomadores de decisão em admitir a derrota diante do perigo identificado (Lawrence *et al.*, 2020).

Modificações nas instituições e nos procedimentos, com a aplicação de ferramentas e métodos analíticos adequados para cada perfil de risco serão demandadas para que, sendo inevitável, se implemente o recuo como uma opção adequada para a adaptação ao aumento do nível do mar (Lawrence *et al.*, 2020).

Portanto, diante das possibilidades de adaptação existentes, as legislações, como os códigos de construção e os planos diretores e de ação climática são fundamentais para buscar um desenvolvimento resiliente aos efeitos do SLR (OECD, 2020).

Existem locais no planeta que já empregam respostas de adaptação aos impactos e riscos costeiros por meio de medidas rígidas ou baseadas em ecossistemas, de acomodação ou de retirada de pequenas comunidades.

Algumas cidades fizeram uso adequado dos planos diretores para poder se planejar melhor e reduzir os riscos à exposição ao aumento do nível do mar. A cidade de Ho Chi Minh, no Vietnã, pode ser um exemplo, elaborou o chamado

“Plano de Ajuste”, adequando seu plano diretor às realidades da transformação da cidade para reduzir os riscos de enchentes. Assim, a cidade tenta mudar a sua economia, tornando-a menos dependente de ativos localizados em áreas mais vulneráveis, readequando seu setor imobiliário (Woetzel et al., 2020).

Em Helsinque, Finlândia, já nos anos 1980, iniciaram as mudanças de padrões projetuais tratando das inundações decorrentes do SLR, elevando, por exemplo, os pisos em determinadas zonas para 3 metros acima do nível do mar (OECD, 2020).

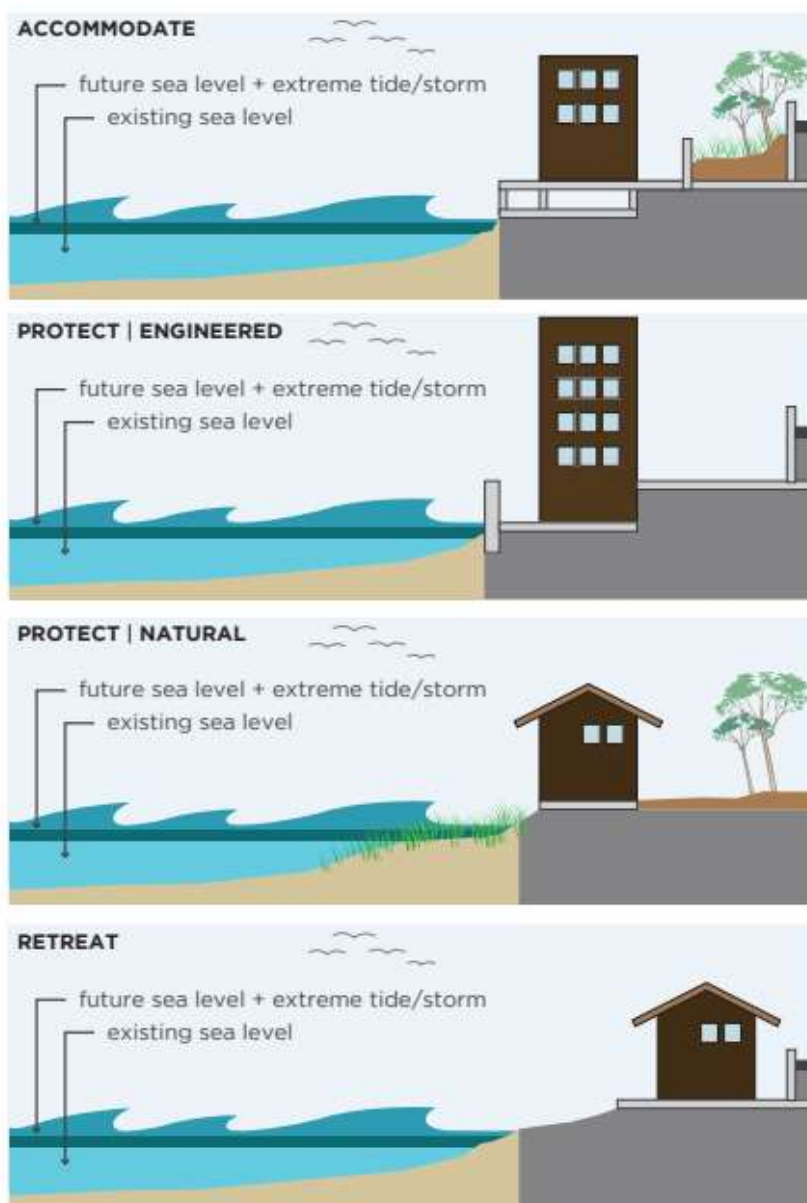
Christchurch, Nova Zelândia, em 2011 atualizou seu plano diretor para tratar das inundações oriundas de mudanças climáticas, inserindo mecanismos de controle do desenvolvimento em áreas vulneráveis, como elevação dos pisos e recuos de cursos d’água (OECD, 2020).

Já Vancouver, Canadá, elevou, em 2014, os níveis mínimos das construções em um metro considerando as projeções estimadas de aumento no nível dos oceanos até o ano de 2100 (OECD, 2020). Os seus gestores municipais utilizaram um *software* para avaliar os riscos da inundação costeira, permitindo esse entendimento de quais áreas corriam mais riscos, buscando desenvolver uma estrutura para ações adaptativas (C40 Cities Climate Leadership Group, 2020).

A Cidade do Cabo, África do Sul, possui um vasto litoral que se constitui como um risco climático, ao passo que também é um de seus maiores patrimônios. Assim, as linhas de gestão da costa garantem que a urbanização não chegue ao ambiente costeiro, incentivando um planejamento que considera o clima atual e o futuro, diante dos cenários de mudanças esperadas (C40 Cities Climate Leadership Group, 2020).

Por fim, menciona-se a cidade de São Francisco, localizada na costa oeste dos Estados Unidos, que mapeou como a elevação dos oceanos afetará a cidade diante do cenário em que não são tomadas medidas para reduzir a emissão dos GEE e, conseqüentemente, não se detém as mudanças climáticas (City and Council of San Francisco, 2016). A Figura 29 demonstra que a cidade baseou-se nas 3 abordagens de enfrentamento do SLR possíveis, por meio de 4 intervenções.

Figura 29: Abordagens de adaptação adotadas em São Francisco.



Fonte: City and Council of San Francisco (2016).

Na abordagem de acomodação, a cidade propõe a elevação ou impermeabilização de partes habitáveis dos edifícios, facilitando a permanência das construções individuais nas áreas de risco por, pelo menos, mais algum tempo. Novas tecnologias permitem que os níveis mais baixos de edificações sejam inundados sem danificar de forma permanente a estrutura (City and Council of San Francisco, 2016).

Para proteger, a cidade emprega barreiras temporárias ou permanentes em diferentes escalas. Vai-se desde uma barreira de inundação específica para um edifício até diques com quilômetros de extensão – o que se constitui como

infraestruturas cinzas –, ou mesmo a restauração de zonas naturais ao redor de um bairro – uma SBN (City and Council of San Francisco, 2016).

Por fim, para recuo, retiram-se elementos como casas, escolas e infraestruturas vitalícias de áreas de risco, permitindo que a área ainda abrigue usos de menor risco, como locais para recreação e habitat natural. A cidade espera usar os recuos apenas ao longo das linhas costeiras menos desenvolvidas ou quando as outras opções forem esgotadas (City and Council of San Francisco, 2016).

2.9 SIMULAÇÕES E MONTAGEM DE MODELOS DIGITAIS

Para um melhor entendimento dos efeitos das mudanças climáticas em relação aos aspectos diretamente relacionados com o aumento do nível do mar, é possível, por meio de dados e *softwares* específicos, realizar simulações a partir de modelos climáticos projetando as transformações futuras que são esperadas.

Com o aquecimento do planeta e a subida do nível do mar, com previsão de continuidade, as projeções futuras são de fundamental importância para que os planejadores costeiros e formuladores de políticas possam entender e contabilizar os impactos do SLR em seus territórios. Dentre os desafios envolvidos nas simulações, observa-se que uma das questões a ser colocada é em relação à determinação de qual projeção utilizar e a escolha dos dados de interesse (National Aeronautics and Space Administration, 2023).

Dentre os dados de entrada que alimentam os modelos climáticos, há variáveis que levam em consideração o derretimento de geleiras, o aquecimento do planeta, as mudanças nas características dos oceanos, dentre outros diferentes fatores possíveis.

Atualmente, a partir do AR6, passa-se a usar arquivos de modelo do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados, o CMIP6, (sigla para Coupled Model Intercomparison Project, no original em inglês), em substituição ao modelo CMIP5, que atendia ao AR5 do IPCC. Diversas ferramentas podem utilizar o modelo para gerar simulações de SLR.

Um exemplo de ferramenta de projeção do nível do mar é a ferramenta da NASA que permite aos usuários a visualização e o *download* de dados a partir do AR6, com o objetivo de facilitar a visualização das diferentes projeções encontradas no relatório, tendo como público-alvo de prováveis usuários uma ampla gama de pessoas, desde cientistas até curiosos (National Aeronautics and Space Administration, 2023). Pode-se observar, a partir da Figura 30, uma visão geral da interface da ferramenta com seus controles de alteração dos diferentes cenários e dados de entrada.

Figura 30: Visão geral da ferramenta de projeção do nível do mar da NASA.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de National Aeronautics and Space Administration (2023). É possível trabalhar com projeções desde 2020 até 2150 em diferentes cenários ou níveis de aquecimento. São fornecidos, ainda, relatórios, gráficos e tabelas (Figura 31) indicando quanto cada fator contribui para o SLR (National Aeronautics and Space Administration, 2023).

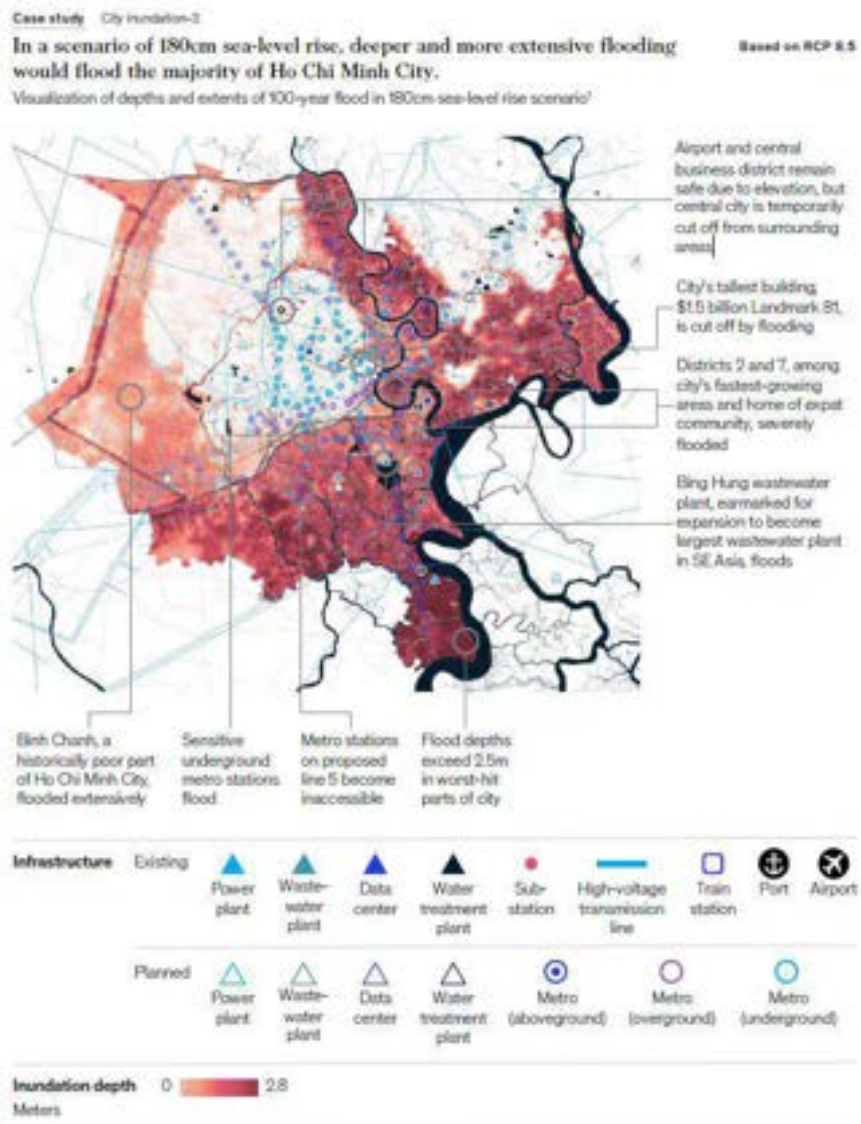
Existe a possibilidade, ainda, de se simular os efeitos do nível do mar a partir de modelagens em *softwares* de mapeamento geográficos, como as ferramentas GIS. Woetzel et al. (2020), por exemplo, usaram simulações hidrológicas, mapas imobiliários de uso da terra, infraestruturas existentes e bancos de dados para examinar os impactos esperados em Ho Chi Minh (Vietnã) e Bristol (Inglaterra) (Figura 32 e Figura 33).

Figura 31: Exemplo de tabela obtida pela ferramenta de projeção do nível do mar da NASA.

	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6 Low Confidence	SSP5-8.5 Low Confidence
Thermal Expansion	0.12 (0.09–0.15)	0.14 (0.11–0.18)	0.20 (0.16–0.24)	0.25 (0.21–0.30)	0.29 (0.24–0.36)	0.14 (0.11–0.18)	0.29 (0.24–0.36)
Glaciers	0.08 (0.06–0.10)	0.09 (0.07–0.11)	0.12 (0.10–0.14)	0.16 (0.13–0.18)	0.18 (0.15–0.20)	0.09 (0.06–0.12)	0.17 (0.11–0.21)
Greenland	0.04 (0.02–0.09)	0.06 (0.01–0.10)	0.08 (0.04–0.13)	0.11 (0.07–0.16)	0.13 (0.09–0.18)	0.09 (0.01–0.30)	0.18 (0.09–0.59)
Antarctica	0.10 (0.03–0.25)	0.11 (0.03–0.27)	0.11 (0.03–0.29)	0.11 (0.03–0.31)	0.12 (0.03–0.34)	0.10 (–0.01–0.27)	0.19 (0.02–0.56)
Land Water Storage	0.03 (0.02–0.04)	0.03 (0.02–0.04)	0.03 (0.02–0.04)	0.04 (0.02–0.05)	0.03 (0.02–0.04)	0.03 (0.02–0.04)	0.03 (0.02–0.04)
Total (2100)	0.38 (0.28–0.55)	0.44 (0.32–0.61)	0.56 (0.43–0.76)	0.68 (0.55–0.90)	0.77 (0.63–1.01)	0.45 (0.32–0.79)	0.88 (0.63–1.60)

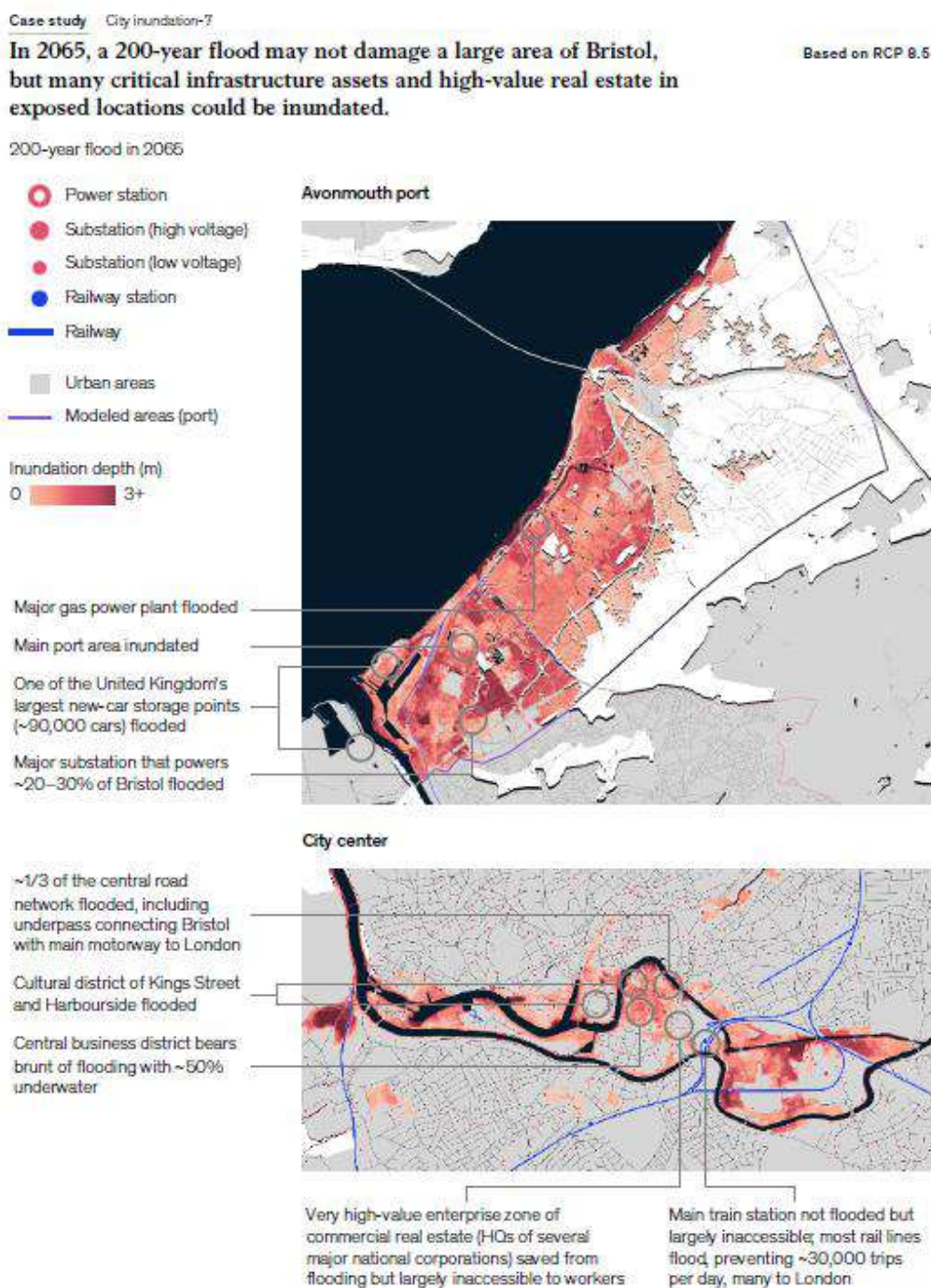
Fonte: National Aeronautics and Space Administration (2023).

Figura 32: Exemplo de simulação para a cidade de Ho Chi Minh.



Fonte: Woetzel et al. (2020).

Figura 33: Exemplo de simulação para a cidade de Bristol.



Fonte: Woetzel et al. (2020).

Os autores selecionaram eventos de inundação adequados ao risco de cada cidade aplicados às suas trajetórias de desenvolvimento a partir do seguinte processo: definição da inundação e seu intervalo de recorrência; aplicação da inundação em diferentes anos, com análise visual, de danos e econômica; e discussão das opções de adaptação.

Woetzel et al. (2020) entendem que as simulações realizadas apresentam perspectivas sobre riscos diante da falta de ação das autoridades responsáveis por gerir os territórios, fornecendo informações sobre a magnitude dos aumentos dos riscos em cada cidade.

A partir dos mapas gerados, pode-se realizar diversos gráficos estimativos das consequências observadas, diante de diferentes aspectos que se deseja analisar, como ilustra a Figura 34.

Figura 34: Gráficos estimativos das consequências do aumento do nível do mar em Ho Chi Minh (Vietnã).

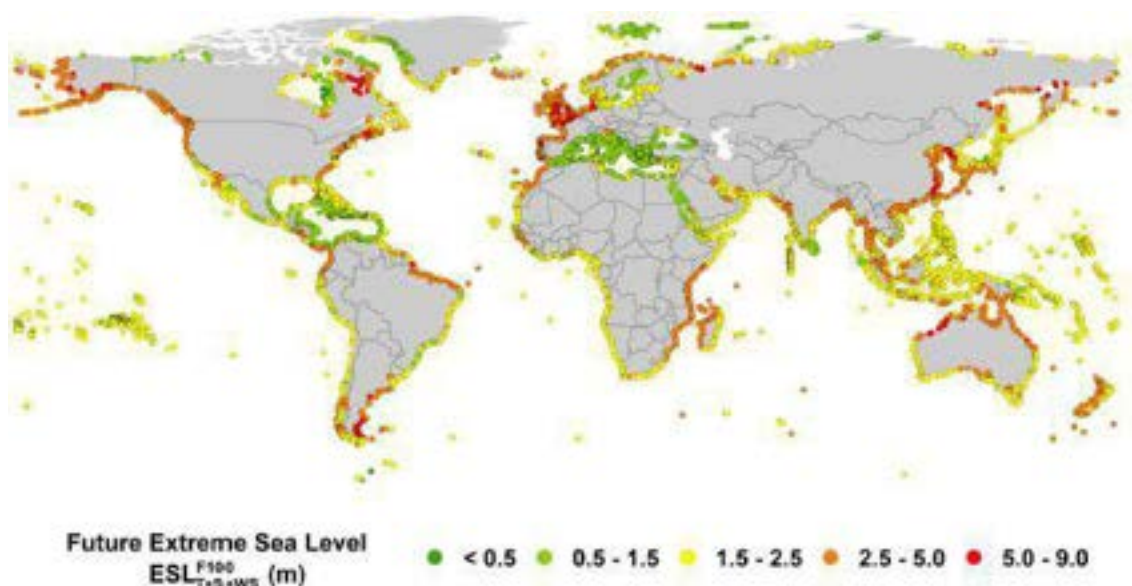


Fonte: Woetzel et al. (2020).

Há, também, a possibilidade de se realizar simulações a partir de fórmulas matemáticas estimativas de eventos extremos aplicadas em ferramentas com

bases em modelos geográficos, como feito por Kirezci et al. (2020b), que utilizaram a ferramenta de avaliação da vulnerabilidade costeira denominada DIVA em uma base de mapa a partir do ArcGIS para medir extremos de aumento do nível do mar. A Figura 35 ilustra uma das simulações realizadas pelos autores segundo esse método.

Figura 35: Exemplo de simulação do nível do mar elaborado a partir do *software* DIVA.



Fonte: Kirezci et al. (2020a).

Exemplifica-se, por fim, o *software* de triagem de risco costeiro (Climate Central, 2021), que faz estimativas das áreas que serão atingidas pelo aumento do nível do mar em diferentes cenários. Nela, é possível simular diferentes trajetórias de poluição, os SSP em diferentes recortes de data, indo até o ano de 2150.

A Figura 36 exemplifica uma simulação realizada a partir da ferramenta de triagem de risco costeiro para a cidade de Vitória, capital do estado do Espírito Santo.

A ferramenta possui, ainda, a possibilidade de adição dos efeitos das enchentes em diferentes periodicidades e da fonte de projeção para simulação, com destaque para o modelo proposto pelo AR6 do IPCC em 2021, o mais aceito na literatura consultada.

Assim, torna-se possível mapear as áreas alagáveis, o que é um passo imperativo para se definir as estratégias de adaptação ao aumento do nível do mar.

Entretanto, diante do cenário de mudanças climáticas, é importante não apenas mapear as áreas alagáveis e definir as estratégias de adaptação. É necessário, também, avaliar se as cidades são capazes de gerar condições térmicas e de conforto aos seus residentes, uma vez que a maior proximidade com a água leva a uma possível variação de umidade e, com isso, mudança na sensação térmica.

Figura 36: Exemplo de simulação a partir do *software* de triagem de risco costeiro para a cidade de Vitória.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Climate Central (2021).

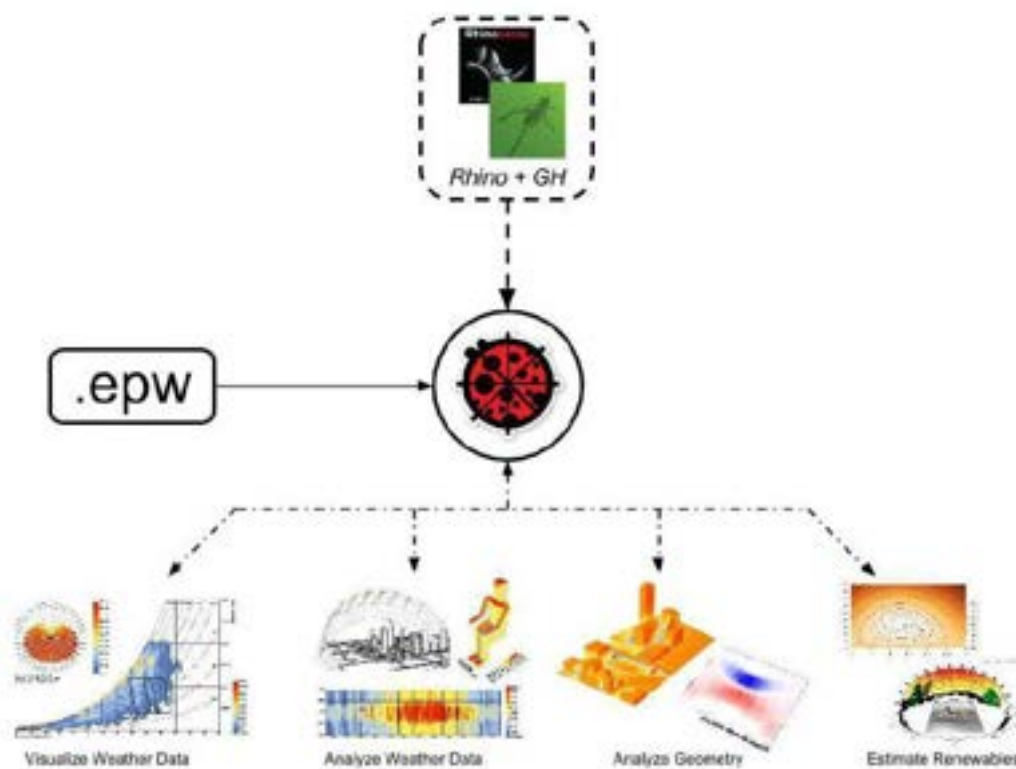
Em um contexto em que a temperatura tende a aumentar, locais que atualmente já estão próximos aos limites de conforto para habitabilidade humana necessitam de uma avaliação e simulação do clima futuro.

Para tanto, *softwares* de análise ambiental surgem como aliados na confecção de modelos para simulações.

Um exemplo é o *plugin* Ladybug, que permite a visualização e análise de dados climáticos a partir da linguagem de programação Grasshopper (Mcneil Europe, 2025), onde são modelados sistemas por meio de pilhas aplicadas no *software* Rhino 3D.

Nele é possível importar arquivos climáticos em formato EPW (sigla para *EnergyPlus Weather files*, no original em inglês) e gera uma variedade de gráficos em 2D ou 3D que podem suportar a tomada de decisão e avaliar as condições de conforto de ambientes internos e externos (Ladybug Tools LLC, 2022). A Figura 37 exemplifica a possibilidade de resultados possíveis de serem obtidos com a ferramenta.

Figura 37: Exemplo de resultados possíveis com o Ladybug



Fonte: Mcnell Europe (2025)

















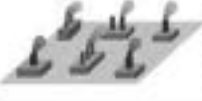
Outro *software* possível de se utilizar é o ENVI-met, que se constitui no principal de modelagem 3D focado em clima urbano e planejamento adaptativo, tendo ferramentas para modelagem climática avançada. Aspectos como a umidade, a análise solar, o conforto térmico em ambientes externos, o emprego de vegetação e o uso de tecnologias verdes e azuis são alguns dos recursos que o software possui (Click Lca, 2025).

Adicionalmente, dadas as escalas das cidades, a limitação quanto à capacidade de processamento dos computadores e o tempo de modelagem podem ser problemas encontrados por profissionais que buscam trabalhar com a análise ambiental na escala urbana.

Assim, pode-se mencionar as Zonas Climáticas Locais, as LCZ (*Local Climate Zones*, no original em inglês), um sistema de classificação que compreende 17 tipos de zona em escala local. Cada um desses tipos combina aspectos de material de superfície, cobertura e atividade humana e seu uso é destinado principalmente aos pesquisadores que trabalham com ilhas de calor urbanas e

com mudanças climáticas (Stewart; Oke, 2012). A Figura 38 ilustra as LCZ existentes e as definições de cada uma delas.

Figura 38: LCZ e suas definições

Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees 	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
2. Compact midrise 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees 	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
3. Compact low-rise 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub 	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
4. Open high-rise 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants 	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
5. Open midrise 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved 	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
6. Open low-rise 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand 	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
7. Lightweight low-rise 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, chatch, corrugated metal).	G. Water 	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
8. Large low-rise 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
9. Sparsely built 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	b. bare trees	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
10. Heavy industry 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	s. snow cover	Snow cover > 10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		d. dry ground	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Fonte: (Stewart; Oke, 2012).

Dessa forma, para que se possa testar a aplicabilidade de metodologias deve-se simular com o aumento do nível do mar em cidades costeiras, empregando os cenários futuros, identificando as áreas alagáveis, simplificando a modelagem

digital por meio das LCZ e avaliando a viabilidade do emprego de estratégias de adaptação, para que se possa definir a eficácia de soluções a serem adotadas.

Com isso, espera-se que os gestores tenham as simulações como uma base auxiliar na tomada de medidas necessárias quanto à adoção de políticas públicas para o enfrentamento do SLR em suas cidades.



PROPOSTA METODOLÓGICA

*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

3 – PROPOSTA METODOLÓGICA

A proposta metodológica desenvolvida visa atender aos objetivos propostos, ou seja, de como determinar qual metodologia deve-se aplicar no planejamento urbano para auxiliar no enfrentamento do aumento do nível do mar, identificar e analisar estratégias de adaptação das zonas costeiras e metodologias existentes de simulação do SLR, sistematizar e identificar os critérios das estratégias de adaptação para informar os gestores e testar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em cidades selecionadas como estudo de caso.

Os procedimentos adotados para o desenvolvimento da tese, considerando a etapa preliminar de revisão da literatura, podem ser divididos nas seguintes cinco etapas: 1. construção da metodologia; 2. definição de critérios e escolha das cidades para realização dos procedimentos; 3. simulações e mapeamentos; 4. tecnologias e soluções implementadas e; 5. aplicação das estratégias em estudo de caso.

3.1 CONSTRUÇÃO DA METODOLOGIA

Tal procedimento consistiu em construir propriamente a metodologia de auxílio aos gestores na adoção de políticas públicas para a adaptação das cidades ao aumento do nível do mar. Tal etapa foi composta por três procedimentos.

Inicialmente, teve-se a definição dos critérios para a metodologia. Neste momento, a partir das revisões de literatura, entendeu-se quais variáveis eram fundamentais para a simulação do aumento do nível do mar.

Foi definido que o recorte temporal a ser adotado foram os anos de 2050 e de 2080, datas que se encontram dentro do limite para as simulações confiáveis e cujos arquivos climáticos futuros podem ser obtidos a partir do aplicativo gerador utilizado. Assim, tanto os arquivos climáticos que alimentaram o *software* de simulação quanto o nível de aumento do mar previsto devem utilizar esta data como base.

Definiu-se, também, que o cenário climático recomendado para utilização correspondia ao SSP5-8.5, uma vez que os planos de ação climática existentes também utilizam o pior cenário previsto na literatura científica como base para a adoção de medidas e que, uma vez que se atendesse ao SSP5-8.5, todos os outros cenários estariam englobados.

Assim, o desenvolvimento da metodologia foi realizado, montando-se sequencialmente os procedimentos para a sua execução, também pautado em revisão de literatura. A metodologia conta com os direcionamentos, as orientações e as recomendações para se auxiliar os gestores na elaboração dos planos de defesa das cidades costeiras, levando em consideração os efeitos das mudanças climáticas.

Para a organização dos procedimentos da metodologia, foram utilizados como referência o que se encontrou como representativo de procedimentos nos planos de ação climática dos municípios costeiros do C40. Foram analisados os passos estipulados em seus conteúdos e adequados de forma empírica à metodologia proposta na tese, com a inserção da análise do desempenho térmico da estratégia adotada.

O plano de ação da cidade de São Francisco, por exemplo, descreve uma série de etapas para tornar a cidade mais resiliente ao SLR. Ele conta com metas e princípios orientadores, criando um roteiro para desenvolver avaliações de vulnerabilidades, riscos e estratégias de adaptação. A estrutura desse plano está ilustrada na Figura 39.

Figura 39: Plano de ação para enfrentamento do aumento do nível do mar da cidade de São Francisco, EUA



Fonte: City and Council of San Francisco (2016).

Tal etapa só foi considerada finalizada após o teste da metodologia, onde se definiu se ela estaria atendendo ao seu propósito e funcionando adequadamente.

Para tanto, os procedimentos metodológicos das demais etapas foram realizados na sequência cronológica da metodologia proposta e, a partir das simulações, avaliou-se se ela estava adequada de acordo com o previsto.

Esta etapa atendeu parcialmente ao terceiro objetivo específico de sistematizar e identificar a viabilidade das estratégias de adaptação para auxílio aos gestores, visando o enfrentamento das consequências urbanas relacionadas ao aumento do nível do mar. Também atendeu ao quarto objetivo específico, que visa testar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em cidades selecionadas como estudo de caso.

3.2 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIO E ESCOLHA DAS CIDADES

Definiu-se que os procedimentos adotados deveriam levar à escolha de estudos de caso para a realização de simulações. Dessa forma, tal etapa metodológica para o desenvolvimento da pesquisa consistiu no estabelecimento de critérios para a escolha das cidades que serviram de estudo de caso para a realização do experimento proposto na tese e sua aplicação.

Assim, tal etapa compreendeu 2 procedimentos: 1 - a definição dos critérios para seleção das cidades; e 2 - a aplicação desses critérios (gerando a lista de cidades escolhidas como estudo de caso). Para isso, foram empregados 7 critérios que estão representados de forma simplificada no fluxograma da Figura 40.

Inicialmente, definiu-se que a escolha dos municípios para a pesquisa seria a partir da lista de cidades costeiras que tivessem plano de ação climática e que estivessem vinculadas à organização C40 Cities Climate Leadership Group (2023). Isso ocorreu por o C40 se tratar uma rede mundial que integra prefeitos de cidades referenciais do mundo, cuja adesão demonstra a disposição para adotar ações visando o enfrentamento da crise climática em seus respectivos territórios.

Figura 40: Critérios para escolha das cidades estudos de caso



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Pode-se observar na Figura 41 a distribuição das cidades inscritas no C40, formadoras do grupo das lideranças com ações efetivas de planejamento em relação aos prováveis impactos das mudanças climáticas. As suas localizações estão identificadas no mapa pelas setas amarelas (comitê diretor) e azuis (demais membros).

Figura 41: Cidades que fazem parte do C40 Cities Climate Leadership Group (amarelo para comitê diretor e azul para as demais).



Fonte: C40 Cities Climate Leadership Group (2023c).

Com este cenário, parte dos esforços da organização se concentra em uma plataforma *online* que disponibiliza ferramentas e informações para auxiliar nas ações relacionadas às mudanças climáticas, tendo como público principal formuladores de políticas públicas e demais profissionais gestores das cidades (C40 Cities Climate Leadership Group; Nordic Sustainability, 2019).

Dessa forma, entende-se que escolher cidades vinculadas ao C40 como estudo de caso da pesquisa significa optar por locais que demonstram interesse em melhorar a gestão do território, desenvolvendo políticas públicas para a adaptação aos efeitos das mudanças do clima.

O fato de essas cidades estarem vinculadas ao C40 é, também, uma demonstração clara de que a questão climática não pode ser enfrentada de forma individual, evidenciando que os seus prefeitos estão, também, dispostos a implementarem ações coletivas.

Assim, foram identificadas as cidades que compõem o C40 entre cidades costeiras e cidades sem acesso ao mar, onde observa-se que 61 municípios estão localizados na zona costeira e 35 estão no interior (Quadro 1).

Nota-se no Quadro 1 que há um predomínio de cidades dos Estados Unidos da América e da China, com 11 e 9 cidades, respectivamente. Os demais países

possuem até 3 cidades cada. Isto pode indicar os dois países como os principais lugares a adotarem estratégias de adaptação a aumento do nível do mar.

Quadro 1: Cidades do C40 que pertencem à zona costeira destacadas

Cidade	País	Zona Costeira
Cape Town	África do Sul	SIM
Durban (eThekweni)	África do Sul	SIM
Ekurhuleni	África do Sul	NÃO
Johannesburg	África do Sul	NÃO
Tshwane	África do Sul	NÃO
Berlim	Alemanha	NÃO
Heidelberg	Alemanha	NÃO
Buenos Aires	Argentina	SIM
Melbourne	Austrália	SIM
Sydney	Austrália	SIM
Dhaka	Bangladesh	SIM
Curitiba	Brasil	NÃO
Rio de Janeiro	Brasil	SIM
Salvador	Brasil	SIM
São Paulo	Brasil	NÃO
Montréal	Canadá	NÃO
Toronto	Canadá	NÃO
Vancouver	Canadá	SIM
Santiago	Chile	NÃO
Beijing	China	NÃO
Chengdu	China	NÃO
Dalian	China	SIM
Fuzhou	China	SIM
Guangzhou	China	SIM
Hangzhou	China	SIM
Nanquim	China	SIM
Qingdao	China	SIM
Shenzhen	China	SIM
Wuhan	China	NÃO
Zhenjiang	China	SIM
Bogotá	Colômbia	NÃO
Medellín	Colômbia	NÃO
Seoul	Coreia do sul	SIM
Abidjan	Costa do Marfim	SIM
Copenhague	Dinamarca	SIM
Dubai	Emirados Árabes	SIM
Quito	Equador	NÃO
Barcelona	Espanha	SIM
Madri	Espanha	NÃO
Addis Ababa	Etiópia	NÃO
Austin	EUA	NÃO
Boston	EUA	SIM
Chicago	EUA	NÃO
Filadélfia	EUA	SIM
Houston	EUA	SIM
Los Angeles	EUA	SIM
Miami	EUA	SIM
Nova Orleans	EUA	SIM
Nova York	EUA	SIM
Phoenix	EUA	NÃO
Portland	EUA	SIM
San Francisco	EUA	SIM
Seattle	EUA	SIM
Washington, DC	EUA	SIM
Quezon City	Filipinas	SIM
Paris	França	NÃO
Accra	Gana	SIM
Atenas	Grécia	NÃO
Amsterdã	Holanda	SIM
Rotterdam	Holanda	SIM
Hong Kong	Hong Kong	SIM
Ahmedabad	Índia	NÃO
Bengaluru	Índia	NÃO
Chennai	Índia	SIM
Deli	Índia	NÃO
Kolkata	Índia	SIM
Mumbai	Índia	SIM
Jakarta	Indonésia	SIM
Londres	Inglaterra	SIM
Tel Aviv-Yafo	Israel	SIM
Milão	Itália	NÃO
Roma	Itália	NÃO
Tóquio	Japão	SIM
Yokohama	Japão	SIM
Amman	Jordânia	NÃO
Kuala Lumpur	Malásia	NÃO
Guadalajara	México	NÃO
Cidade do México	México	NÃO
Lagos	Nigéria	SIM

Oslo	Noruega	SIM
Auckland	Nova Zelândia	SIM
Karachi	Paquistão	SIM
Lima	Peru	SIM
Varsóvia	Polônia	NÃO
Lisboa	Portugal	SIM
Nairobi	Quênia	NÃO
Dakar	Senegal	SIM

Freetown	Serra Leoa	SIM
Singapura	Singapura	SIM
Estocolmo	Suécia	SIM
Bangkok	Tailândia	SIM
Dar es Salaam	Tanzânia	SIM
Istanbul	Turquia	SIM
Hanoi	Vietnã	NÃO
Ho Chi Minh City	Vietnã	SIM

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se, a partir dos arquivos disponibilizados pela plataforma online do C40 Cities, que das 61 cidades costeiras, 42 delas possuem planos de ação contra as mudanças climáticas vinculados às metas do Acordo de Paris, e 19 não possuem, sendo essa mais uma fase para a definição do recorte do estudo. O Quadro 2 apresenta a lista dessas cidades.

Quadro 2: Cidades do C40 que pertencem à zona costeira e possuem plano de ação climática

Cidade Costeira	País	Possui Plano
Cape Town	África do Sul	SIM
Durban (eThekweni)	África do Sul	SIM
Buenos Aires	Argentina	SIM
Melbourne	Austrália	SIM
Sydney	Austrália	SIM
Dhaka	Bangladesh	NÃO
Rio de Janeiro	Brasil	SIM
Salvador	Brasil	SIM
Vancouver	Canadá	SIM
Dalian	China	NÃO
Fuzhou	China	NÃO
Guangzhou	China	NÃO
Hangzhou	China	NÃO
Nanquim	China	NÃO
Qingdao	China	NÃO
Shanghai	China	NÃO
Shenzhen	China	NÃO
Zhenjiang	China	NÃO
Seoul	Coréia do sul	SIM
Abidjan	Costa do Marfim	SIM
Copenhague	Dinamarca	SIM
Dubai	Emirados Árabes	NÃO
Barcelona	Espanha	SIM
Boston	EUA	SIM

Filadelphia	EUA	SIM
Houston	EUA	SIM
Los Angeles	EUA	SIM
Miami	EUA	SIM
Nova Orleans	EUA	SIM
Nova York	EUA	SIM
Portland	EUA	SIM
San Francisco	EUA	SIM
Seattle	EUA	SIM
Washington, DC	EUA	SIM
Quezon City	Filipinas	SIM
Accra	Gana	SIM
Amsterdã	Holanda	SIM
Rotterdam	Holanda	SIM
Hong Kong	Hong Kong	NÃO
Chennai	Índia	SIM
Kolkata	Índia	NÃO
Mumbai	Índia	SIM
Jakarta	Indonésia	SIM
Londres	Inglaterra	SIM
Tel Aviv-Yafo	Israel	NÃO
Tokyo	Japão	SIM
Yokohama	Japão	NÃO
Lagos	Nigéria	SIM
Oslo	Noruega	SIM
Auckland	Nova Zelândia	SIM

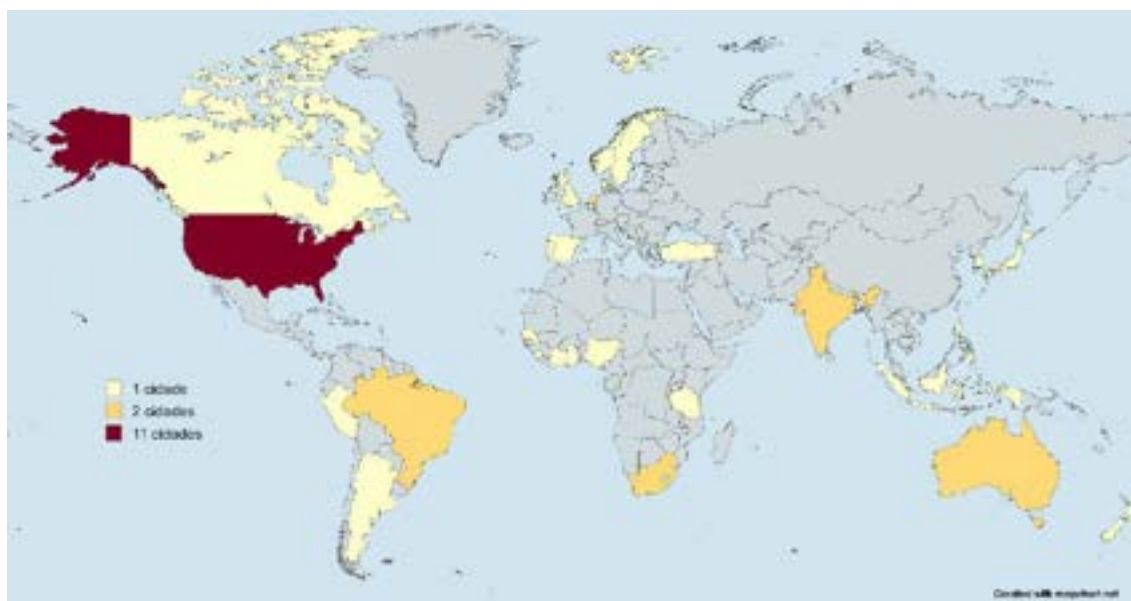
Karachi	Paquistão	NÃO
Lima	Peru	SIM
Lisboa	Portugal	SIM
Dakar	Senegal	SIM
Freetown	Serra Leoa	SIM
Singapura	Singapura	NÃO

Estocolmo	Suécia	SIM
Bangkok	Tailândia	NÃO
Dar es Salaam	Tanzânia	SIM
Istanbul	Turquia	SIM
Ho Chi Minh City	Vietnã	NÃO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar, ainda, que 28 países abrigam as cidades com planos de ação climática, com destaque para os Estados Unidos, que possui 11 cidades. Os demais países apresentam até 2 cidades. Destaca-se que nenhuma das 9 cidades costeiras da China possui plano de ação climática. A Figura 42 apresenta a distribuição desses países no mapa global com a quantidade de cidades do C40 Cities possuidoras de planos para ação climática.

Figura 42: Quantidade de cidades costeiras pertencentes ao C40 Cities com planos de ação climática por país.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Mapchart (2023).

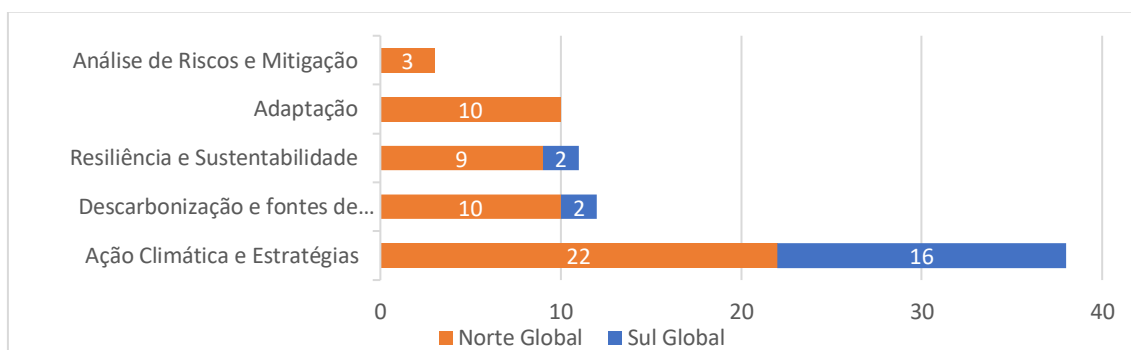
Adicionalmente, ainda é possível observar na Figura 42 que a maior parte dos países costeiros não possui cidades que se enquadram nos critérios estabelecidos. Além disso, ao se considerar que países como Brasil, Austrália, Índia, Argentina e Canadá possuem extensa faixa costeira, mas apenas uma ou duas cidades com os planos de ação, identificam-se ainda mais zonas costeiras não enquadradas no recorte. Ressalta-se que a América Central não possui nenhuma cidade selecionada.

Adicionalmente, passou-se para a categorização e quantificação dos planos quanto ao seu conteúdo, tendo os resultados deste procedimento sido sistematizados e publicados em periódico de alto impacto (Bussolotti et al., 2024).

Assim, identificou-se que as 42 cidades somam um total de 74 planos de ação climática, havendo uma discrepância em relação às publicações de países do Norte e do Sul Global. Tal diferença de quantitativo deve-se ao fato de que uma mesma cidade pode possuir vários planos, como por exemplo, de descarbonização, de adaptação, de mitigação, etc. Apesar de 26 das 42 cidades pertencerem ao Norte Global e 16 ao Sul Global, tem-se, respectivamente, 54 contra 20 planos (Bussolotti et al., 2024).

O conteúdo das 74 publicações pode ser dividido em 5 categorias, conforme pode ser observado na Figura 43, que também classifica os planos entre o Norte e o Sul Global.

Figura 43: Número de planos de ação climática de cada categoria



Fonte: Adaptado de Bussolotti et al. (2024).

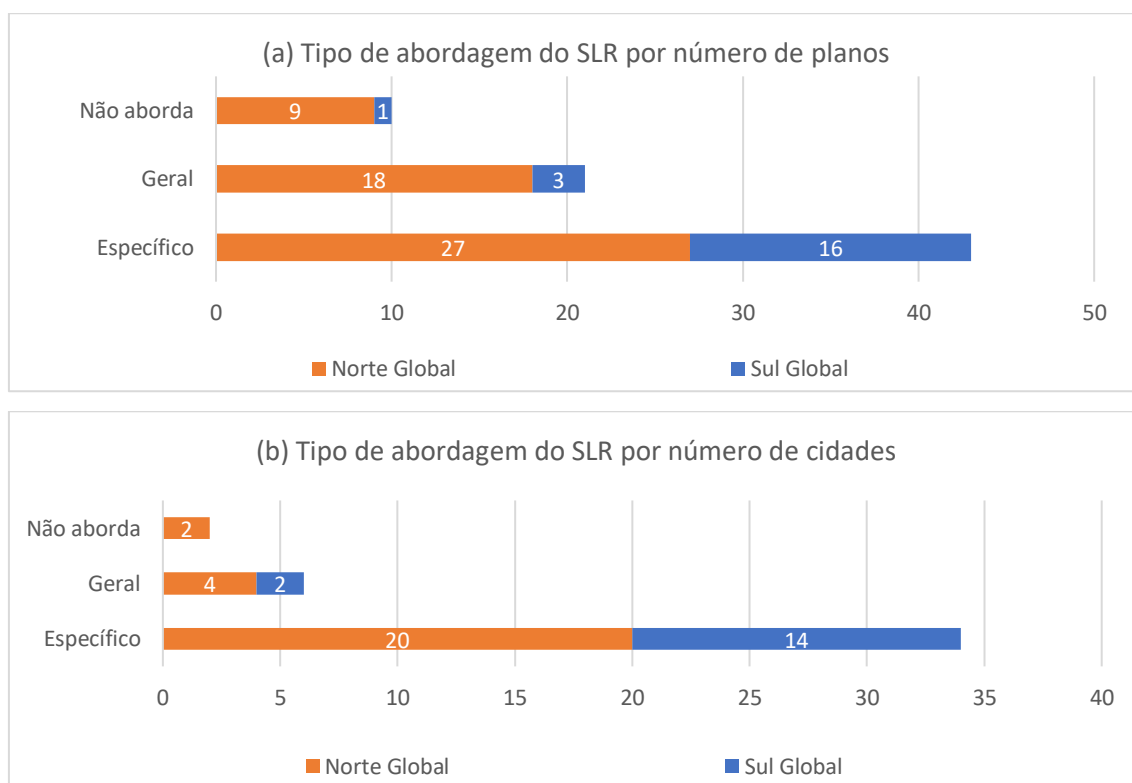
Ao se dividir os países entre Norte e Sul Global, há uma separação na possibilidade de estudos de caso de diferentes contextos geopolíticos. A nomenclatura utilizada por Dados e Connell (2012) substitui termos antigos como “países industrializados”, “desenvolvidos” ou de “primeiro mundo” principalmente para países europeus e norte-americanos, bem como a adoção de termos como “periferia”, “terceiro mundo” ou “países subdesenvolvidos” ao se tratar de regiões na América Latina, África e Ásia.

Como o objetivo da pesquisa está focado diretamente no aumento do nível do mar, foram quantificados quais planos tratam especificamente desse estressor climático em duas categorias: **geral**, quando o assunto é apenas mencionado

como um problema, mas não são apresentadas propostas ou estratégias para enfrentá-lo; e **específico**, quando são apresentadas medidas de enfrentamento. Há ainda os planos que, apesar de serem elaborados por cidades costeiras que enfrentam ou enfrentarão o problema, não há menção ao SLR.

Assim, a Figura 44 apresenta os quantitativos dos 3 tipos de abordagem em relação ao aumento do nível do mar possíveis em relação ao número de planos de ação climáticas e em relação ao número de cidades.

Figura 44: Quantitativos dos tipos de abordagem do SLR nos planos (a) e nas cidades (b)



Fonte: Adaptado de Bussolotti et al. (2024).

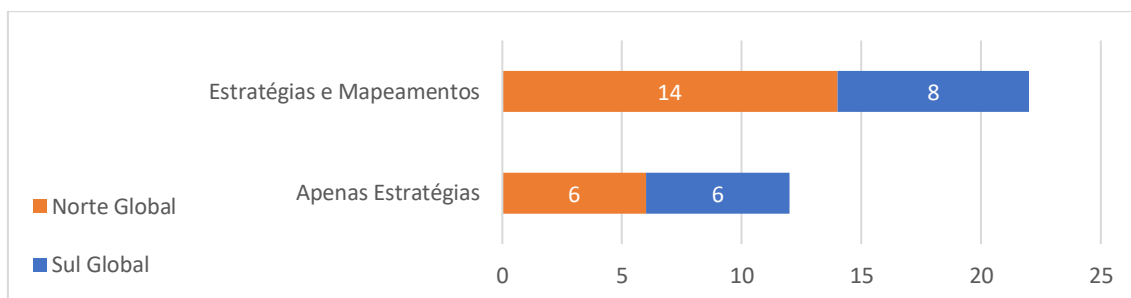
É possível observar que o total de planos que apresentam estratégias para lidar com o problema é de 43, distribuídos por 34 cidades, com números mais equilibrados em relação à proporção de Norte e Sul Global.

Complementarmente, foi feita a quantificação das cidades que já apresentam em seus planos de ação climática. os mapeamentos das áreas alagáveis para diferentes cenários climáticos futuros, o que leva a uma maior assertividade no emprego das estratégias propostas em seus planos de ação.

Assim, a Figura 45 apresenta os números das cidades apenas com estratégias ou com estratégias e mapeamentos, separadas por Norte e Sul Global. Observa-

se que 12 das 34 cidades ainda não apresentaram os mapas das áreas alagáveis em seus planos de ação.

Figura 45: Número de cidades com estratégias e mapeamentos



Fonte: Adaptado de Bussolotti et al. (2024).

Sequencialmente, nas 22 cidades restantes foram identificadas as bases científicas para as simulações e constatou-se que 13 delas utilizam os parâmetros do IPCC como referência para seus planos de ação climática. Utilizar cidades com as mesmas bases teóricas permite uma melhor comparação entre os planos e torna-se mais um aspecto a ser considerado para o recorte das possibilidades de estudo de caso.

Por fim, optou-se por escolher uma cidade de cada continente, para que haja uma abrangência territorial, com diversidade de aspectos climáticos e de infraestrutura, levando também a um equilíbrio entre os estudos de caso do Norte e do Sul Global.

Optou-se ainda por estabelecer como critério adicional, a escolha pelas cidades com o maior nível de aumento do mar previsto em cada continente, segundo as métricas no AR6 do IPCC. Como recorte temporal, foram adotados os anos 2050 e 2100 em função de serem consideradas datas referência pelos planos de ação climática. O Quadro 3 apresenta os valores obtidos para 2050 e o Quadro 4 os valores de 2100. Estão destacados nos quadros os maiores valores para cada continente.

Quadro 3: Aumento do Nível do Mar previsto para as cidades selecionadas em 2050

Cidade	País	SSP1 1.9	SSP1 2.6	SSP2 4.5	SSP3 7.0	SSP5 8.5
Oceania						
Auckland	N. Zelândia	0,19	0,19	0,22	0,23	0,25
Europa						
Copenhagen	Dinamarca	0,18	0,20	0,22	0,21	0,23
América do Norte						

Nova York	EUA	0,33	0,35	0,36	0,35	0,39
São Francisco	EUA	0,17	0,19	0,19	0,20	0,22
Seattle	EUA	0,16	0,18	0,19	0,21	0,21
Vancouver	Canadá	0,06	0,08	0,09	0,08	0,10
América do Sul						
Salvador	Brasil	0,19	0,20	0,21	0,22	0,24
África						
Durban	Á. do Sul	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23
Dar es Salaam	Tanzânia	0,18	0,20	0,22	0,22	0,24
Dakar	Senegal	0,19	0,20	0,22	0,22	0,24
Freetown	Serra Leoa	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
Ásia						
Mumbai	Índia	0,14	0,15	0,17	0,18	0,20
Chennai	Índia	0,14	0,14	0,16	0,17	0,18

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4: Aumento do Nível do Mar previsto para as cidades selecionadas em 2100

Cidade	País	SSP1 1.9	SSP1 2.6	SSP2 4.5	SSP3 7.0	SSP5 8.5
Oceania						
Auckland	N. Zelândia	0,39	0,44	0,57	0,73	0,83
Europa						
Copenhague	Dinamarca	0,34	0,39	0,52	0,61	0,72
América do Norte						
Nova York	EUA	0,59	0,67	0,81	0,93	1,04
São Francisco	EUA	0,38	0,43	0,53	0,63	0,72
Seattle	EUA	0,41	0,44	0,53	0,61	0,69
Vancouver	Canadá	0,22	0,32	0,33	0,41	0,48
América do Sul						
Salvador	Brasil	0,40	0,45	0,58	0,70	0,78
África						
Durban	Á. do Sul	0,37	0,42	0,55	0,68	0,77
Dar es Salaam	Tanzânia	0,40	0,45	0,58	0,72	0,80
Dakar	Senegal	0,39	0,45	0,57	0,69	0,78
Freetown	Serra Leoa	0,43	0,48	0,61	0,72	0,81
Ásia						
Mumbai	Índia	0,28	0,34	0,46	0,58	0,70
Chennai	Índia	0,27	0,34	0,45	0,57	0,69

Fonte: Elaborado pelo autor.

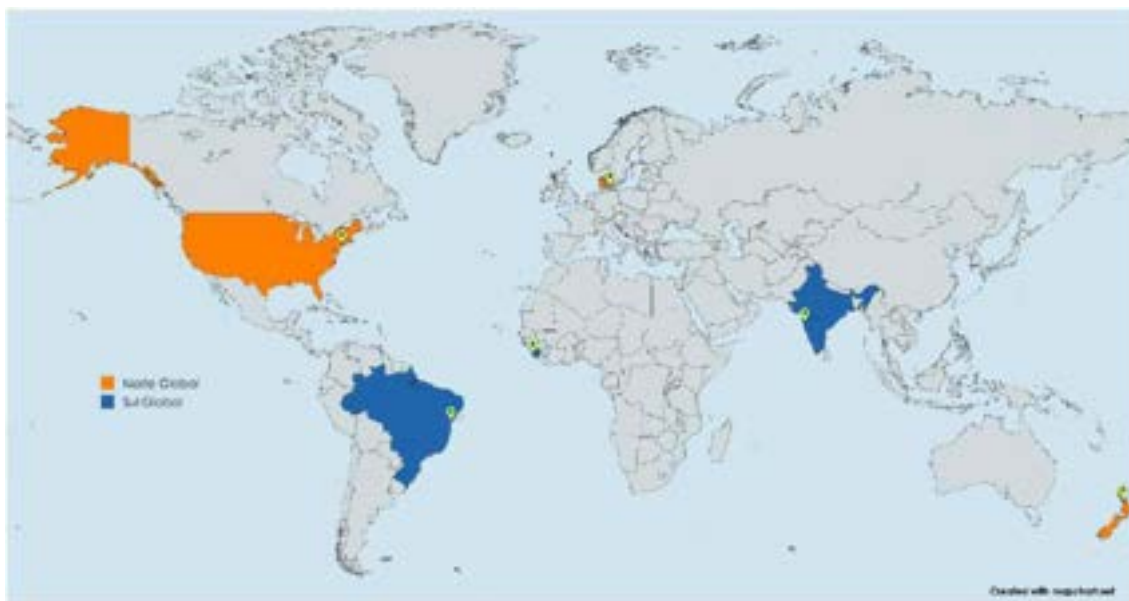
O método de simulação utilizado para obter os valores utilizados na alimentação da tabela segue detalhado no subcapítulo 3.3 Simulações e Mapeamentos.

Observa-se que, tanto no recorte temporal de 2050 quanto no de 2100, as mesmas cidades apresentaram os maiores valores de aumento previsto no nível do mar, sendo assim as selecionadas como estudo de caso da pesquisa. Dessa

forma, no Norte Global, tem-se as cidades de Auckland (Oceania), Copenhagen (Europa) e Nova York (América do Norte) e, no Sul Global, foram escolhidas as cidades de Salvador (América do Sul), Freetown (África) e Mumbai (Ásia).

A Figura 46 ilustra a distribuição geográfica dos países e a localização das cidades selecionadas como estudo de caso da pesquisa.

Figura 46: Países que contém as cidades selecionadas como estudo de caso



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Mapchart (2023).

Considerando que os critérios estabelecidos permitiram a escolha de cidades efetivamente representativas, partiu-se para a etapa de realização das simulações.

3.3 SIMULAÇÕES E MAPEAMENTO

Tal etapa dos procedimentos metodológicos adotados na realização da pesquisa consistiu em realizar simulações para o mapeamento das áreas alagáveis de cidades que foram utilizadas como estudos de caso e para avaliação da eficácia das estratégias possíveis de serem adotadas. São quatro procedimentos que compõem esta etapa, não necessariamente lineares ou cronologicamente sequenciais.

Para o recorte das cidades estudo de caso, inicialmente foram feitas simulações para identificação das áreas que seriam afetadas pelo aumento do nível do mar

nas 13 cidades membros do C40 Cities que possuem planos de ação climáticas com estratégias e mapeamentos, utilizando os cenários previstos no IPCC como base. Os resultados apontaram para as seis cidades que seriam escolhidas como estudos de caso, descritas anteriormente.

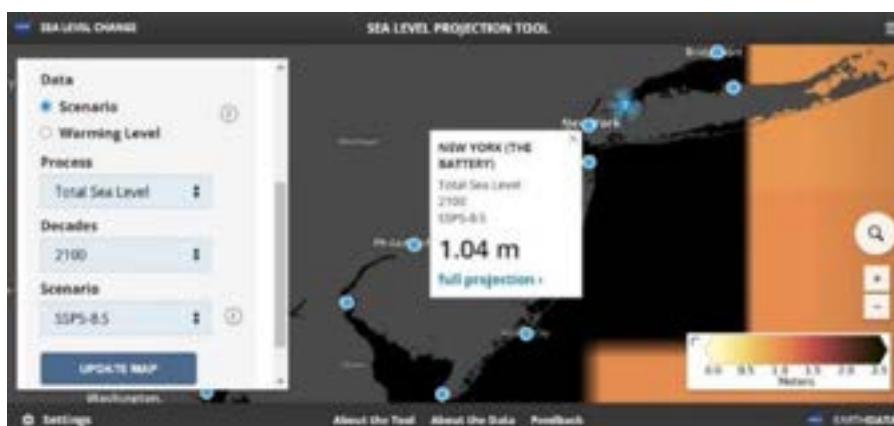
Foram feitas estimativas diante dos cinco diferentes cenários de SSPs propostos pelo AR6 do IPCC: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023c) e diante de 2 diferentes recortes temporais – os anos de 2050 e de 2100 –, dado que até este período entende-se que as estimativas apresentadas nas simulações possuem confiabilidade.

Foi adotada a Ferramenta de Projeção do Nível do Mar (National Aeronautics and Space Administration, 2023) que permite visualizar e fazer *download* dos dados das projeções do nível do mar para os diferentes cenários de SSPs propostos pelo AR6 do IPCC, estimando numericamente o quantitativo de SLR.

A ferramenta permite visualização de projeções entre 2020 e 2150 a partir das contribuições de diferentes fenômenos físicos, que elevam o nível do mar, como expansão térmica ou derretimento de geleiras.

A Figura 47 exemplifica a interface da ferramenta utilizada, com a demonstração da simulação para a cidade de Nova York, nos EUA, em 2100, segundo o cenário de SSP5-8.5, obtendo-se um resultado de 1,04m de aumento do nível do mar. O Apêndice 1 contém as imagens geradas a partir das simulações realizadas.

Figura 47: Exemplo de simulação a partir da Ferramenta de Projeção do Nível do Mar



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de National Aeronautics and Space Administration (2023).

Pode-se observar que, dentro dos diferentes cenários representados nos quadros 3 e 4 e nos apêndices, há uma oscilação de valores obtidos, com variação entre 0,06m e 0,39m no intervalo de 2050 e entre 0,22m e 1,04m para 2100, sendo este último o pior caso do recorte estudado, em Nova York.

Os dados evidenciam os diferentes comportamentos na variação de nível dos oceanos em diferentes situações do planeta, demonstrando a abrangência das cidades selecionadas.

Dando continuidade, o procedimento seguinte desta etapa metodológica já foi empregado com um novo recorte de 6 cidades, que constituem os estudos de caso selecionados, uma vez que após a identificação do quantitativo de aumento do nível do mar previsto para cada território, foi possível selecionar a cidade mais afetada de cada continente. Neste procedimento, os valores de SLR obtidos nas tabelas são inseridos na ferramenta de triagem de risco costeiro (Climate Central, 2021), que consistiu em um mapa interativo que identifica os locais ameaçados pelo SLR.

As simulações de áreas afetadas pela mudança do nível do mar na ferramenta foram realizadas para os diferentes recortes temporais computados nos Quadro 3 e Quadro 4 anteriormente apresentados. Para tanto, foram definidas todas as configurações possíveis para que se chegue ao mapeamento pretendido. As decisões aqui tomadas foram baseadas nas revisões realizadas na terceira etapa metodológica e seguem justificadas nos subcapítulos seguintes.

O uso da ferramenta de triagem de risco costeiro (Climate Central, 2021), justifica-se por se tratar de um mapa interativo capaz de prever as áreas ameaçadas pela elevação do nível do mar por meio de modelos globais topográficos com os cenários climáticos futuros previstos. A ferramenta identifica as áreas submetidas à ameaça do aumento do nível do mar, entendendo que essa exposição pode levar a maiores vulnerabilidades.

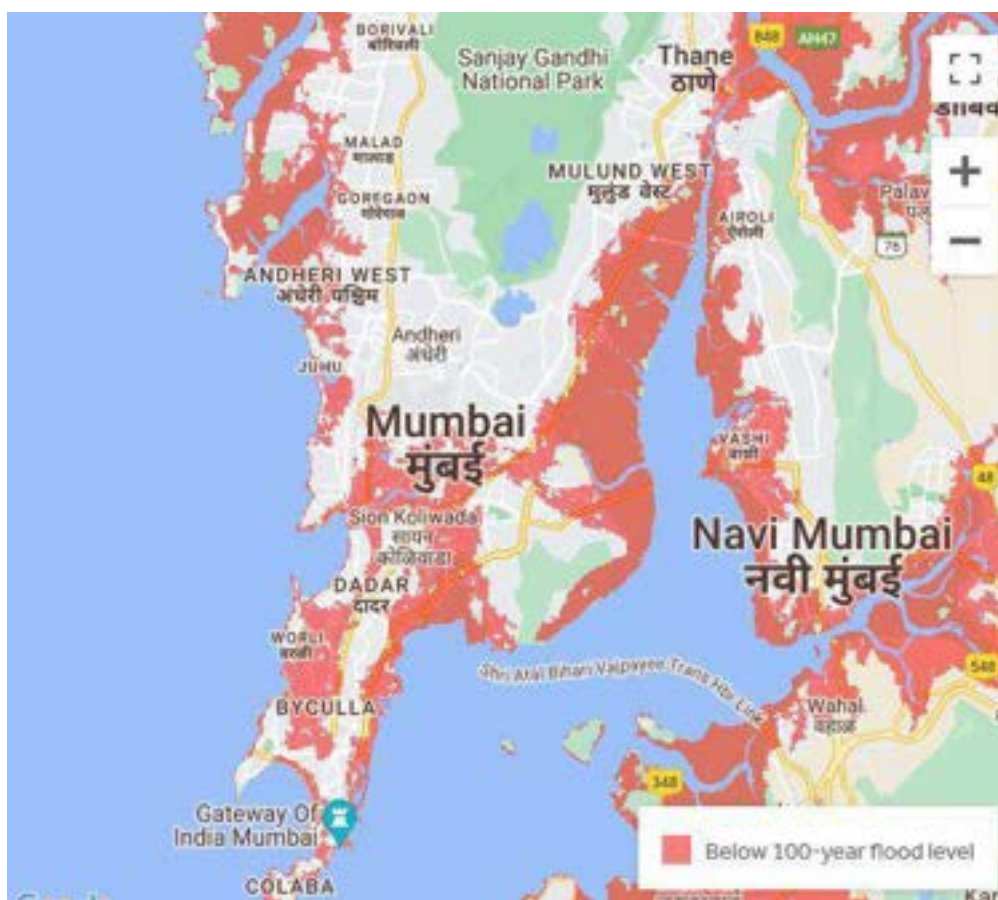
Além disso, revisões de literatura previamente realizadas identificaram que a ferramenta já foi utilizada anteriormente por diferentes pesquisadores e municipalidades, evidenciando a sua confiabilidade e relevância. Observa-se, ainda, que suas bases estão alicerçadas em estudos realizados e publicados

como artigos científicos revisados por pares em periódicos de relevância, como Strauss, Kulp e Levermann (2015).

Assim, dentre as diferentes opções de mapas possíveis de serem geradas pela ferramenta, optou-se por utilizar o de áreas em risco (aquelas afetadas pelo aumento do nível do mar) a partir de um recorte de tempo, que mostra as áreas alagáveis estimadas no ano selecionado.

Os mapas gerados baseiam-se em conjuntos de dados de elevação e de marés somados às projeções de aumento do nível do mar. Observa-se que as áreas abaixo do nível da água, com ligação direta com o mar, são mostradas na cor vermelha, conforme exemplificado na Figura 48. Ressalta-se que os mapas não consideram fatores como erosão, mudanças na frequência ou intensidade de estressores como tempestades ou contribuições de rios, o que pode, inclusive, determinar riscos de inundação ainda mais altos do que seria o caso em algumas áreas (Climate Central, 2021).

Figura 48: Exemplo de simulação de áreas alagáveis na cidade de Mumbai



Fonte: Climate Central (2021).

Observa-se que as influências das elevações de nível do mar nos territórios costeiros também podem ser influenciadas por aspectos como a subsidência, atividades tectônicas ou extração de água e petróleo em larga escala, comportando-se de forma diferente em cada local. Tais aspectos, entretanto, não são considerados nos mapas (Climate Central, 2021).

O que se leva efetivamente em consideração são a combinação de nível do mar, maré e tempestades, levando às inundações por água salgada em terras costeiras. Assim, para o nível do mar apresentado nas projeções, tem-se como base as alturas históricas medidas da superfície do mar, sendo que no caso das marés, usa-se a média histórica recente do nível local diário mais alto. A esse patamar, é feito o acréscimo de altura previsto nos cenários climáticos futuros e a combinação de possibilidades de inundação causadas pela adição de tempestades (Climate Central, 2021).

Observa-se, entretanto, algumas limitações, como o fato das ressacas, que não são consideradas mas que podem levar as cidades a sofrerem com uma elevação do nível do mar muito superior ao que os mapas indicam.

Assim sendo, a ferramenta foi configurada definindo-se o nível do mar adicionado da altura de enchente local com recorrência de 100 anos, ou seja, com 1% de chance de ocorrer a cada ano. Tal justificativa baseia-se no fato de que as mudanças climáticas estão também alterando a frequência e a intensidade de eventos extremos, como as tempestades. Já se entende que eventos que antes ocorriam em intervalos maiores de tempo, tendem a ocorrer com cada vez menos intervalo temporal. Dessa forma, é possível que o tempo de recorrência das tempestades de 100 anos passe a ser até mesmo anual. Portanto, a inserção dessa variável demonstra-se fundamental para mapear áreas passíveis de alagamento.

A cidade de Copenhague, por exemplo, apresenta em seu plano de ação climática a simulação de inundação provocada por enchente com recorrência de 100 anos combinada com o aumento do nível do mar. e indica que os resultados da simulação se assemelham a uma inundação ocorrida em 2010 (CITY OF COPENHAGEN, 2011).

Para o cenário de nível do mar, a partir da quantidade de matéria capaz de reter o calor adicionada à atmosfera, configurou-se a ferramenta segundo o cenário de SSP5-8.5.

Para o item que determina a sensibilidade das temperaturas e do nível do mar à poluição e ao aquecimento – chamado de sorte (a partir do termo “*luck*” do original em inglês) –, manteve-se o parâmetro médio de projeção.

As áreas protegidas por barreiras superiores ao nível do mar, como diques, represas ou cadeias montanhosas foram excluídas, mesmo que suas cotas de nível sejam inferiores às do mar, dado que não haveria comunicação entre o oceano e tais áreas.

Como última configuração, definiu-se que o estudo científico ou relatório utilizado como fonte de projeção do nível do mar é o AR6 do IPCC, cujos valores projetados consideram a sensibilidade às emissões e ao aquecimento, a localização, e o cenário de nível do mar, que são os cenários de SSPs.

A Figura 49 ilustra a interface da configuração da ferramenta, sendo exemplificada na cidade de Mumbai em 2100. Os mapas gerados para as seis cidades definidas como estudo de caso nos recortes de 2050 e 2100 que constituem o Apêndice 2.

Figura 49: Exemplo de configuração das opções para mapeamento das áreas alagáveis



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Climate Central (2021).

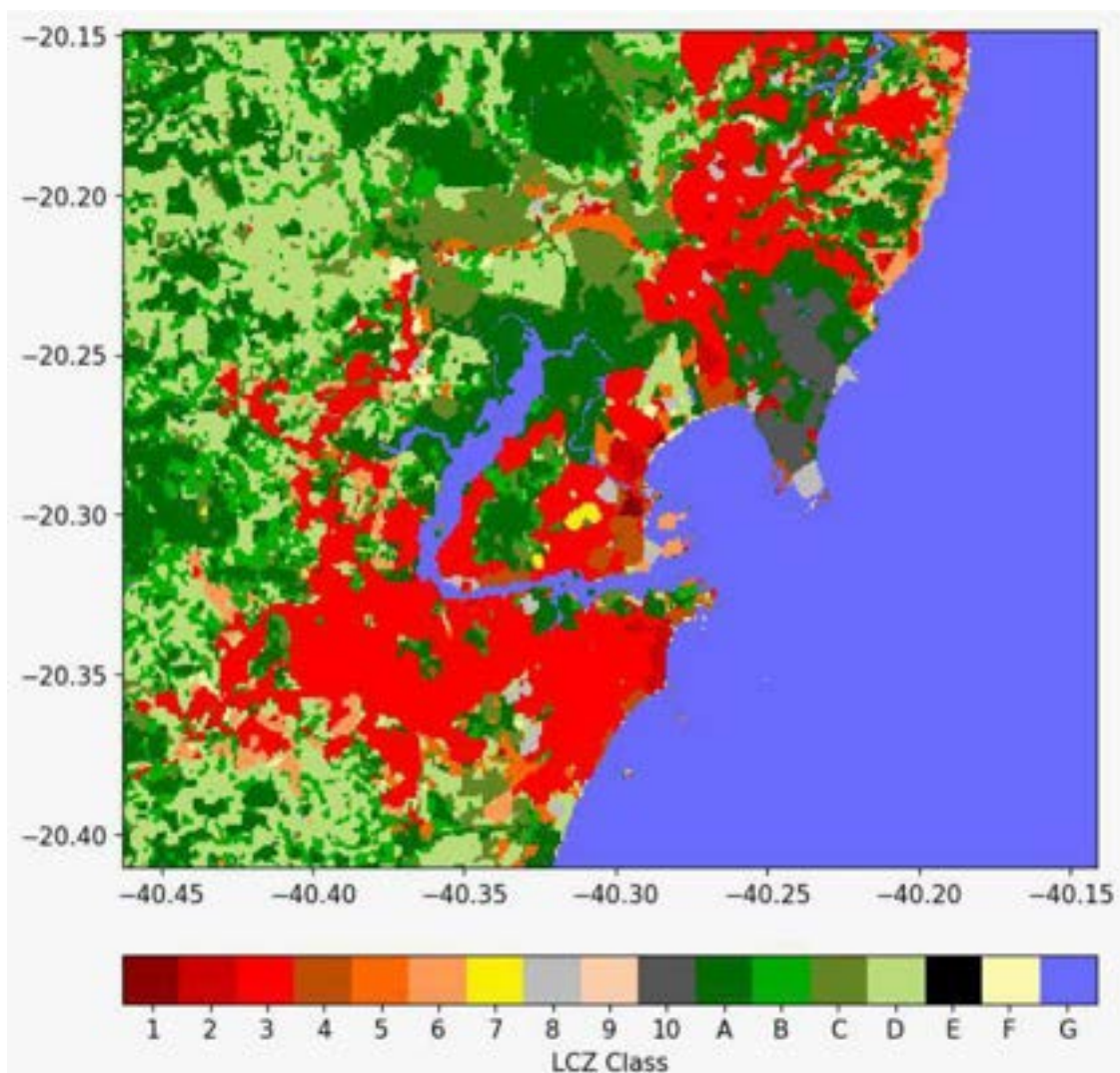
Uma vez realizados os mapeamentos, partiu-se para o terceiro procedimento metodológico desta etapa, que correspondeu à simplificação dos modelos para a realização das simulações e sua caracterização. Assim, foram definidos os

parâmetros e variáveis que seriam considerados para a construção dos modelos digitais utilizados.

Quanto à caracterização física, optou-se pela simplificação por meio do uso de Zonas Climáticas Locais, de modo que foi escolhida uma LCZ em recorte de área medindo 300m x 300m para cada uma das seis cidades estudo de caso. Tal parâmetro de recorte territorial foi definido a partir das limitações do *software* e dos *hardwares* disponíveis.

A definição da LCZ utilizada em cada cidade foi feita a partir dos mapeamentos globais existentes disponíveis em Demuzere; Kittner e Bechtel (2024) elaborado a partir de Demuzere; Kittner e Bechtel (2021). A Figura 50 ilustra um exemplo de mapa gerado pela ferramenta e os mapas das cidades estudadas estão disponíveis no Apêndice 3.

Figura 50: Exemplo de mapa de LCZ



Fonte: Demuzere; Kittner e Bechtel (2021).

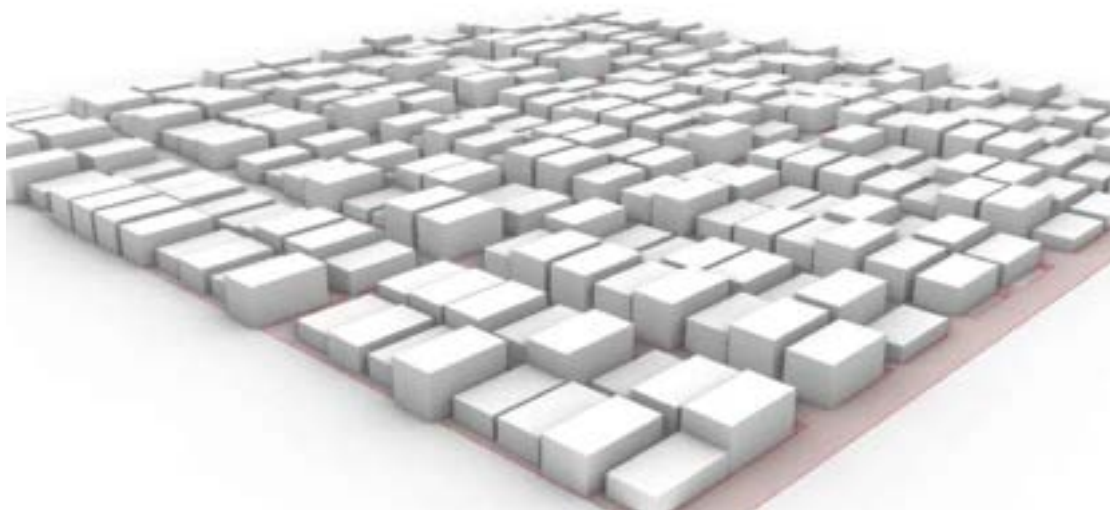
Uma vez identificadas as LCZ presentes nas cidades, foi escolhida para modelagem computacional aquela que possui maior área prevista para ser alagada a partir dos cenários climáticos previamente simulados, por meio de uma comparação entre os mapas do Apêndice 2 e 3.

Assim, a comparação dos mapas identificou que as cidades de Auckland e de Salvador possuem áreas mínimas alagáveis, não possuindo trechos construídos significativos que serão comprometidos pelo aumento do nível do mar.

Já nas demais cidades, observou-se que possuem em comum as LCZ 3 – que corresponde aos edifícios compactos baixos – localizadas em áreas alagáveis. Dessa forma, optou-se por definir tal zona climática local como referência para a modelagem da realização das simulações.

Assim, foram modelados os arquivos digitais a partir da simplificação pelas LCZ em dois *softwares* distintos para análise ambiental: o Rhino 3D por meio do *plugin* Ladybug na linguagem de programação do Grasshopper (Ladybug Tools LLC, 2022); e o ENVI-met (Click Lca, 2025). A Figura 51 ilustra uma das modelagens computacionais realizadas, caracterizada pela simplificação permitida pelos LCZ.

Figura 51: Imagem ilustrativa de modelagem de LCZ realizada



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Com os modelos devidamente caracterizados e construídos, o último passo nesta etapa correspondeu à efetiva simulação para avaliação da viabilidade das estratégias com relação à habitabilidade das áreas afetadas segundo os novos climas previstos, que foram definidas na terceira etapa metodológica.

Para tanto, inicialmente foram realizados testes no modelo construído no Ladybug e no elaborado no ENVI-met. Observando-se que foram identificadas dificuldades e limitações quanto às possibilidades do modelo no Ladybug. Adicionalmente, foi observado que há uma maior quantidade de publicações científicas utilizando o ENVI-met para simulações de microclimas urbanos, assim, optou-se pela utilização apenas deste *software* neste procedimento.

O passo final da configuração do arquivo digital para sua simulação, cujas definições sobre essa questão foram tomadas a partir das revisões realizadas na terceira etapa metodológica, consistiu em selecionar a data futura que se pretendia simular para geração dos arquivos climáticos correspondentes à data e cenário desejados. Optou-se por simular as datas de 2050 e 2080 – os cenários disponíveis no gerador de arquivos climáticos utilizado – em seus solstícios de inverno e de verão para o horário das 12h, por corresponderem à uma situação em que se tem períodos de maior calor.

Para gerar os arquivos climáticos futuros, utilizou-se o *software* Future Weather Generator (Rodrigues; Carvalho e Fernandes, 2025), em sua versão 2.2.0, cujas bases encontram-se testadas em Rodrigues; Fernandes e Carvalho (2023). O *software* é gratuito e de código aberto, utilizando como modelo o CMIP6, já contendo os cenários de SSP constantes no AR6.

Os arquivos climáticos atuais das seis cidades utilizadas como estudo de caso em formato EPW foram obtidos em Ladybug (2025) e alimentados no Future Weather Generator que gerou os arquivos para o clima futuro.

Em síntese, essa etapa metodológica respondeu ao quarto objetivo específico, que visa testar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em cidades selecionadas como estudo de caso.

3.4 TECNOLOGIAS E SOLUÇÕES IDENTIFICADAS

A presente etapa metodológica corresponde à identificação das estratégias, tecnologia e soluções existentes de acordo com os impactos relacionados ao aumento do nível do mar nas cidades costeiras.

Foram adotados três procedimentos metodológicos, desenvolvidos em paralelo à segunda etapa de modo complementar, destacando-se que as ações aqui efetivadas são fundamentais para possibilitar a realização das simulações descritas anteriormente.

Essa etapa também responde ao segundo objetivo específico, que é identificar e analisar as estratégias de adaptação das zonas costeiras frente aos efeitos decorrentes das mudanças climáticas.

Adicionalmente, se responde parcialmente ao primeiro objetivo específico, que visa identificar as formas de simulação do aumento do nível do mar existentes e os planos de ação existentes para a adaptação das zonas costeiras.

Preliminarmente, foram realizadas revisões da literatura sobre as estratégias e soluções de adaptação das zonas costeiras. Tais revisões foram sistematizadas qualitativa e quantitativamente com relação ao seu conteúdo e publicadas em artigos revisados por pares em periódicos e eventos de relevância na área de estudo.

Neste procedimento, foram realizadas buscas em bases de dados nacionais e internacionais, a partir de descritores que relacionem questões das mudanças climáticas ou do aumento do nível do mar com os tópicos específicos de cada artigo.

Na primeira busca, que resultou em uma publicação de artigo, Bussolotti et al. (2023) estudaram estratégias resilientes de mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas, focando em soluções baseadas na natureza implementadas em regiões costeiras diante dos cenários de SLR.

Dessa forma, os autores identificaram poucas publicações sobre o tema nos países em desenvolvimento, sendo evidenciada a necessidade de se contextualizar o local de emprego das soluções, dado que condições físicas, culturais e socioeconômicas influenciam no seu desempenho. Entende-se, ainda, que as soluções baseadas na natureza não são efetivas para todos os locais.

O estudo encontrou dez soluções distintas que estão identificadas no Quadro 5, contendo suas definições e a indicação de quais são os autores que as utilizam em seus artigos.

Quadro 5: Soluções Baseadas na Natureza Identificadas na Revisão de Literatura.

Conceito	Definição	Autores
Barreiras de ilhas Barrier islands	Formas de relevo que podem manter suas dimensões intactas. São sistemas resistentes desde que o aumento no nível do mar não seja excessivo.	(MASSELINK; LAZARUS, 2019)
Dunas Costeiras Coastal Dunes	São resultados da interação entre forças marinhas e os ventos costeiros. Tendem a se recuperar de impactos mais lentamente.	
Zonas úmidas de maré Tidal Wetlands	As vegetações encontradas nas zonas úmidas diminuem a velocidade dos fluxos das marés e auxiliam na acomodação dos sedimentos.	
Sistemas de corais Coral Systems	As ilhas de corais são estruturas capazes de se reorganizar, mesmo diante do aumento do nível do mar.	
Alojamento Accommodation	O termo alojamento é usado para remodelação de estruturas já existentes. Abrangem técnicas e métodos de adaptações arquitetônicas e planejamento urbano para proteger as estruturas em caso de aumento do nível do mar ou outros eventos costeiros adversos. Também incluem aumentar a capacidade de monitoramento e a disseminação de informações por meio de políticas públicas.	(BONGARTS LEBBE et al., 2021)
Retiro Gerenciado Managed Retreat ou Realocação Retreat	Trata-se do processo de realocação de pessoas e estruturas para outras áreas afastadas da costa ou de áreas de potencial risco. Pode apresentar níveis diferentes de complexidade desde mudanças de algumas casas a cidades inteiras.	
Reservas Marinhas Marine reserves	São áreas marinhas protegidas que servem para preservar a biodiversidade contra intervenções antrópicas, possibilitando seus serviços ecossistêmicos, como por exemplo o sequestro de carbono feito pelos prados de ervas marinhas (<i>Seagrass Meadows</i>).	(ROBERTS et al., 2017)
Linhas costeiras vivas Living shorelines	Uma nova linha costeira é projetada com materiais naturais, imitando a linha natural, auxiliando na formação de uma barreira contra inundações.	(SUTTON et al., 2022)
Realinhamento de dique Dyke realignment	Envolve a mudança de posicionamento de diques existentes para melhorar sua capacidade de resposta. Pode causar algum impacto nas cidades próximas às estruturas, principalmente quando já há algum tipo de relação com as instalações existentes.	
Realinhamento gerenciado Managed re-alignment	É um tipo de SBN para adaptação costeira que envolve a conversão de terras agrícolas em áreas que permitem inundações periódicas sem gerar prejuízo à dinâmica urbana.	(LISKI et al., 2019)

Fonte: Bussolotti et al. (2023)

Os autores ainda identificaram as publicações em que foram realizadas simulações que puderam ser classificadas em quatro categorias: simulação por meio de modelos físicos; experimentos realizados nos locais dos estudos de caso; por meio de modelos matemáticos; e por meio de *softwares*. Além disso, analisaram a implantação técnica de uma ou várias SBN, revisaram técnicas ou políticas voltadas a soluções baseadas na natureza e identificaram ferramentas e metodologias criadas.

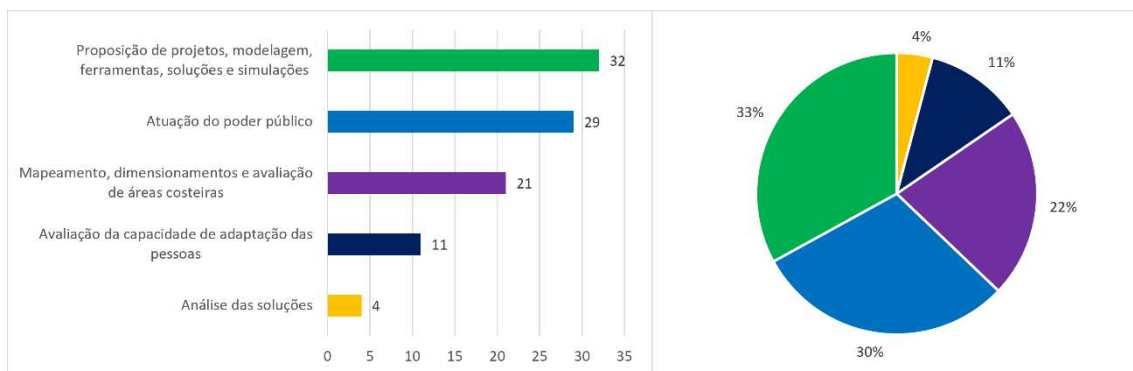
Sabe-se que as estratégias para lidar com o aumento do nível do mar podem ser de adaptação ou de mitigação, podendo ainda ser no campo do planejamento – como as políticas públicas –, como no campo aplicado, onde podem ser divididas em *Hard Solutions*, que são as intervenções que geram construções – como os

diques –, e em *Soft Solutions*, que consistem no emprego de soluções como a infraestrutura verde e a azul.

Sequencialmente, em nova revisão de literatura, também publicada como artigo, Bussolotti, Pellegrini e Engel de Alvarez (2023), identificaram as estratégias de planejamento urbano que podem ser utilizadas como forma de se adaptar às consequências do SLR.

Foram identificadas 5 (cinco) categorias de publicação: atuação do poder público; análise das soluções; proposição de projetos, modelagem, ferramentas, soluções e simulações; mapeamento, dimensionamentos e avaliação de áreas costeiras; e avaliação da capacidade de adaptação das pessoas e cidades. Os quantitativos e percentuais obtidos em cada categoria seguem apresentados na Figura 52.

Figura 52: Categorias de classificação das pesquisas



Fonte: Bussolotti, Pellegrini e Engel de Alvarez (2023).

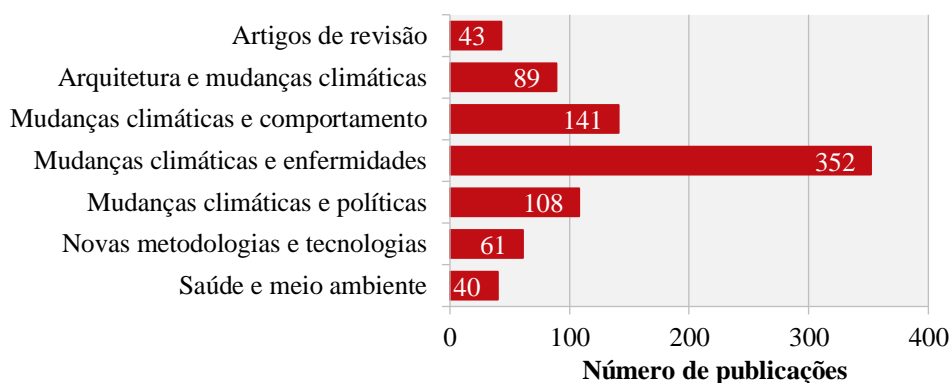
Adicionalmente, buscando-se entender os efeitos das mudanças climáticas em grupos mais vulneráveis, Salvalaio et al. (2023) realizaram uma pesquisa que identifica que nos últimos anos há um avanço no quantitativo de publicações relacionadas ao tema, mas com uma lacuna em pesquisas sobre como as mudanças climáticas vão interferir na qualidade de vida dessa população em ambientes urbanos e sobre o papel das cidades para mitigar suas consequências.

A pesquisa identificou sete principais tópicos de publicação a respeito da temática, cujos quantitativos estão apresentados na Figura 53. Nota-se que a questão das enfermidades que ocorrem em função das mudanças climáticas possui destaque nas publicações científicas sobre grupos mais vulneráveis.

Por fim, a última revisão sistemática de literatura publicada é Pellegrini, Bussolotti e Engel de Alvarez, (2022) que mapearam as publicações relacionadas as SBN como forma de enfrentamento das mudanças climáticas.

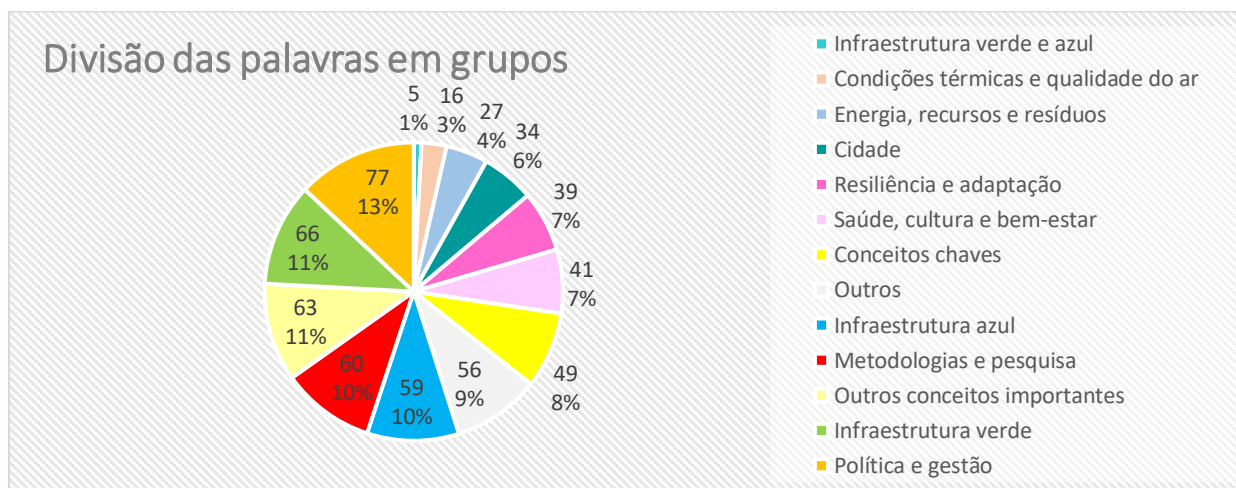
O artigo identificou publicações em 13 eixos temáticos a partir de palavras-chave: conceitos chaves; outros conceitos; resiliência e adaptação; política e gestão; cidade; infraestrutura azul; infraestrutura verde; infraestrutura verde e azul combinadas; saúde, cultura e bem-estar; condições térmicas e qualidade do ar; energia, recursos e resíduos; metodologias de pesquisa; e outras publicações. Os quantitativos e percentuais desses eixos estão na Figura 54.

Figura 53: Tópicos abordados na publicação selecionada



Fonte: Salvalaio et al. (2023).

Figura 54: Quantitativos das palavras-chave



Fonte: Pellegrini, Bussolotti e Engel de Alvarez, (2022).

Objetivando uma complementação à revisão de literatura realizada, partiu-se para o segundo procedimento metodológico da etapa, que é a revisão dos planos de ação climática. Assim, foi realizada a leitura e a análise dos 74 planos disponíveis nos arquivos digitais do C40 Cities (C40 Cities Climate Leadership

Group, 2023c) das 42 cidades costeiras da organização submetidas aos riscos do aumento do nível do mar. Tal procedimento gerou a publicação de Bussolotti et al. (2024), cujos dados também foram utilizados parcialmente na primeira etapa metodológica da escolha das cidades.

Em adição aos dados desta publicação previamente mencionados, nela também se constata que há uma predominância de utilização das bases científicas do IPCC para a elaboração dos planos, com 55% das cidades estudadas. Como algumas delas não mencionam a fonte de algumas informações constantes em seus documentos, é possível que esse número seja ainda maior.

Entre os 23 planos que utilizam as bases do IPCC, 21 deles estão pautados nos modelos do AR5. Como o AR6 ainda estava recém-publicado quando da realização desta pesquisa, entende-se que haja uma tendência natural de os planos se atualizarem à medida em que forem sendo revistos.

Assim, os cenários climáticos futuros estão no sistema de RCPs, sendo que 18 planos utilizam o cenário de emissões RCP 8.5, considerado o pior cenário dentre as possibilidades disponíveis no AR5. Isto demonstra o entendimento das municipalidades de que as ações devem ser tomadas para o cenário mais negativo, uma vez que, adaptando-se a ele, os demais cenários também serão atendidos.

Dessa forma, diante dos resultados encontrados tanto nos planos, quanto nas revisões de literatura realizadas, tem-se o embasamento necessário para a definição das estratégias e das soluções possíveis de serem empregadas para uma metodologia de adaptação das cidades costeiras.

3.5 APLICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS

Na última etapa metodológica, constituída de dois procedimentos, realizou-se a aplicação das estratégias e soluções identificadas anteriormente nos estudos de caso, objetivando avaliar a sua viabilidade, sendo posteriormente elaborados tabelas e gráficos com os resultados obtidos.

As revisões de literatura científica e de planos de ação das cidades demonstraram a existência de três possíveis estratégias: proteção, acomodação e recuo. Observa-se que diferentes publicações apresentam distintas divisões derivadas sempre das mesmas estratégias. Há casos em que, por exemplo, tem-se a proteção subdividida entre proteção natural e proteção artificial. As publicações demonstram, também, que há uma ordem de preferência em relação às três estratégias, sendo que a proteção é a mais utilizada e a que possui menos implicações na vida da população. Quando se consideram os riscos à vida humana, economia, infraestrutura, patrimônio e ecossistemas, tal estratégia também é a que melhor responde a essa questão.

Em seguida, nos casos em que a proteção não é possível, tem-se a acomodação como estratégia recomendada. Há implicações, entretanto, no que diz respeito às infraestruturas e ao patrimônio, principalmente.

Por fim, a estratégia menos recomendada, cuja literatura afirma que deve ser evitada quando possível, é o recuo.

Entende-se que há uma ordem clara relacionada à decisão sobre qual estratégia adotar. Assim, o teste de suas viabilidades quanto ao desconforto térmico dos climas futuros torna-se um balizador de qual decisão tomar.

Logicamente, o fator que influencia os resultados e que possui características diferentes entre as estratégias é a presença ou não de água nos territórios. Dessa forma, entendeu-se que a construção de modelo digital para simulação no *software* de análise ambiental ENVI-met contendo trechos da cidade alagados e trechos não alagados corresponde à caracterização microclimática dos diferentes cenários esperados, e pode auxiliar a definir a viabilidade de uma determinada estratégia ou não.

Nos pontos da cidade em que as simulações não demonstram a presença de água entre os edifícios, haveria uma correspondência com as estratégias de recuo e de proteção. Já nos casos em que se verifica a presença de água, haveria uma correspondência com a acomodação.

A Figura 55 ilustra os modelos digitais construídos com e sem a presença das áreas alagáveis.

Em um contexto global onde há uma expectativa de elevação da temperatura, o aumento da umidade do ar provocado pela presença da água nos territórios urbanos gera uma diferença na percepção térmica das pessoas, que pode ser significativa na alteração do nível de risco quanto ao calor a que os indivíduos se expõem.

Figura 55: Modelos digitais construídos no ENVI-met sem áreas alagáveis (esquerda) e com áreas alagáveis (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Jacobs et al. (2020) consideraram, por meio de simulação realizada no ENVI-met, que os efeitos térmicos de alguns corpos d'água podem ser considerados insignificantes, com efeitos máximos de resfriamento no clima simulado inferiores a 2°C e média inferior a 1°C.

Teshnehdel et al. (2022), em pesquisa semelhante, constataram que a presença de corpos d'água leva ao aumento da umidade e a uma diminuição média da temperatura do ar de 0,5°C gerando efeito positivo no conforto térmico, e quando combinado com estratégias de arborização urbana, torna-se uma estratégia eficaz.

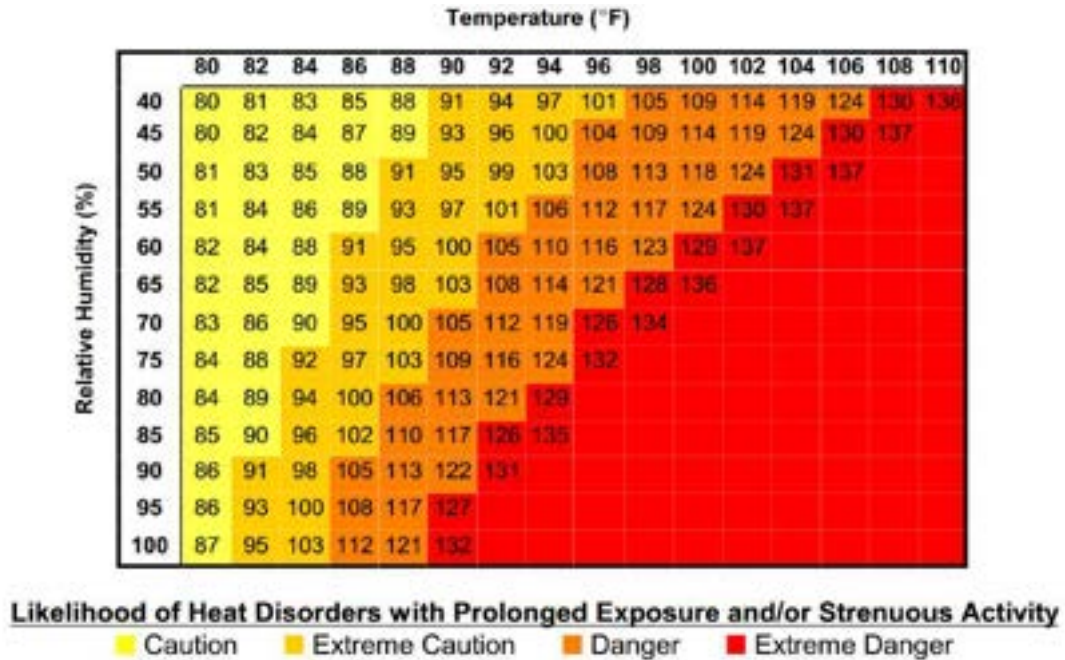
Ao se considerar as estimativas de aumento global de temperatura, especialmente em regiões tropicais, com climas quentes, tal questão da avaliação do impacto da aproximação da água do mar com o contexto urbano pode definir ou não a habitabilidade do local.

Assim, com essa definição, seguida pela realização das simulações, os resultados de temperatura do ar e umidade relativa foram computados e inseridos no gráfico de índice de calor (Figura 56), que identifica a sensação de calor percebida pelo corpo humano.

Há quatro classificações de riscos quando os seres humanos estão expostos por tempo prolongado a esses climas, indo de Atenção; Extrema Atenção; Perigo e

Extremo Perigo. Algumas das consequências relacionadas à essa exposição podem ir desde fadiga até insolação, considerada muito provável na classificação de Extremo Perigo.

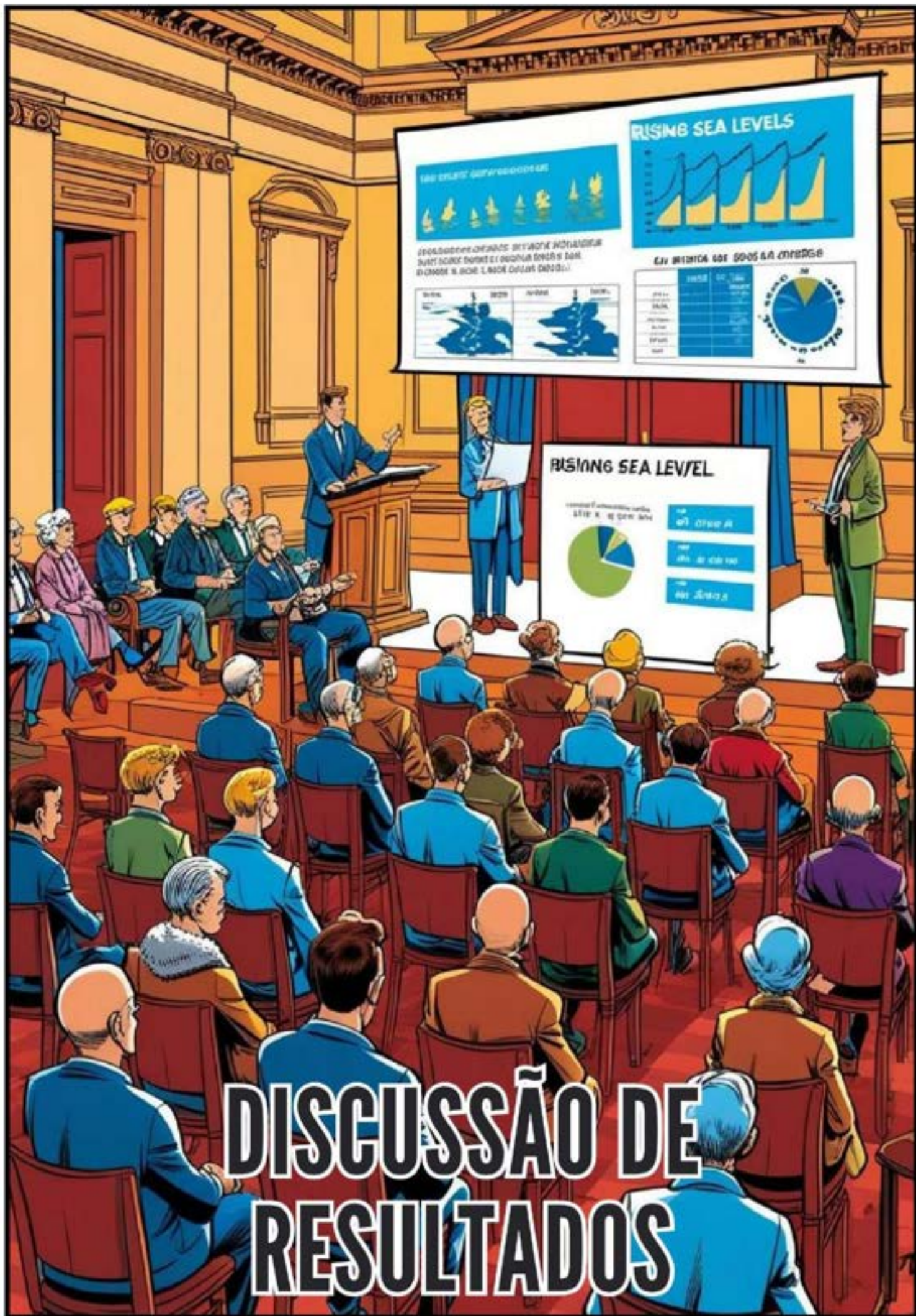
Figura 56: Gráfico do Índice de Calor



Fonte: NOAA (2023).

Uma vez inseridos os resultados no gráfico, os dados foram computados em tabelas e comparados, onde foi possível identificar o impacto da presença ou não da água e identificar efetivamente a viabilidade da solução e gerar um direcionamento aos gestores municipais sobre o uso ou não de determinada estratégia.

Esta etapa atendeu ao quarto objetivo específico, ou seja, de sistematizar e identificar a viabilidade das estratégias de adaptação para auxílio aos gestores, visando o enfrentamento das consequências urbanas relacionadas ao aumento do nível do mar.



DISCUSSÃO DE RESULTADOS

*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

4- DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos com a aplicação dos procedimentos metodológicos são apresentados neste capítulo em suas seções. Inicialmente há a construção e a validação das etapas metodológicas, seguido pela validação do método e do desenvolvimento de metodologia para auxílio aos gestores.

Observa-se que os termos “procedimentos metodológicos”, “método” ou “etapas metodológicas”, referem-se a processos da elaboração da tese. Já o termo “metodologia” corresponde a um resultado da tese.

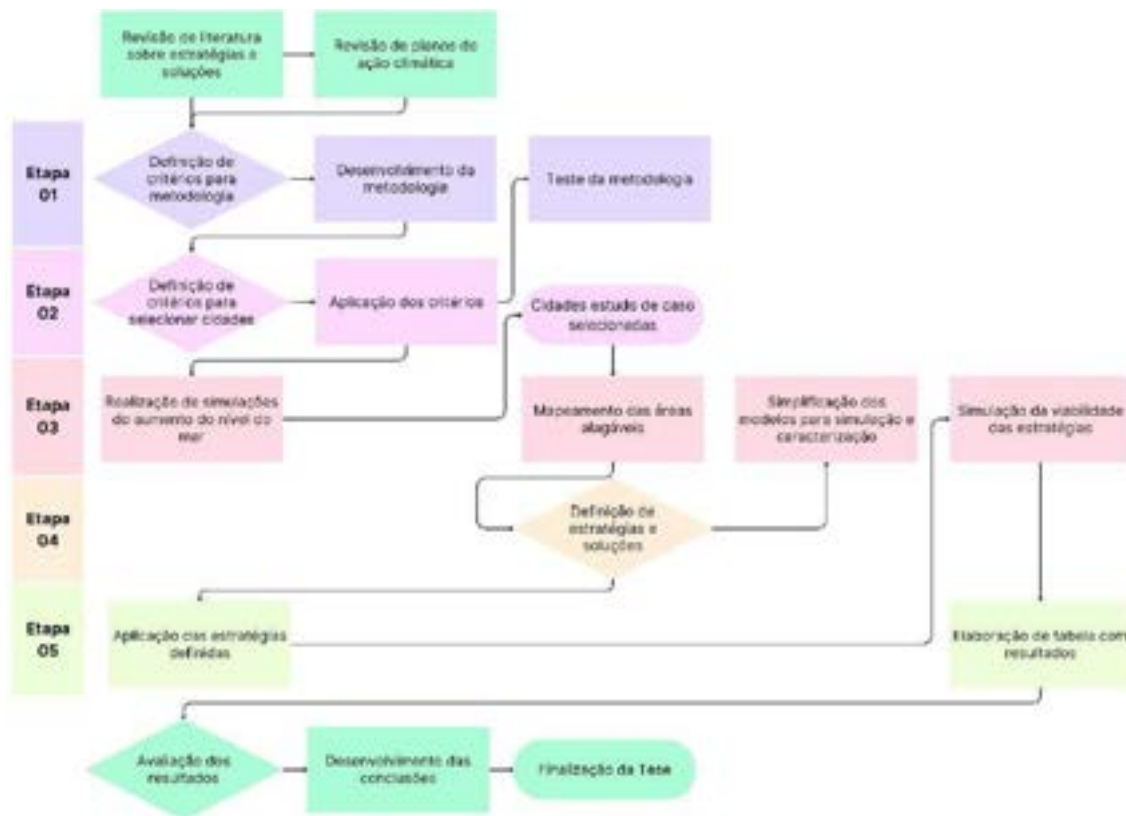
A construção das etapas metodológicas é apresentada em forma de fluxograma, com descrição de seus procedimentos. Já a sua validação, constituiu-se nos resultados obtidos para um dos possíveis problemas relacionados ao aumento do nível do mar – a questão térmica –, avaliado a partir das modelagens e simulações realizadas, com o entendimento de sua eficácia e viabilidade. A partir dos resultados das simulações, identificou-se a importância de se avaliar, também, as condições de desempenho térmico das cidades para definição de estratégia de adaptação ao aumento do nível do mar.

Quanto à metodologia proposta, constituiu-se de um fluxograma contendo todas as etapas e procedimentos necessários para a execução da estratégia de adaptação das cidades costeiras, com suas ordens cronológicas de execução e possibilidades de caminhos a serem adotados em casos em que há mais de uma possibilidade de escolha.

Adicionalmente, há um guia com a explicação de como executar cada procedimento da metodologia, os parâmetros adotados e os direcionamentos que são determinados a partir dos procedimentos anteriormente realizados no desenvolvimento da pesquisa. Há, ainda, as discussões a respeito dos resultados obtidos, dos procedimentos metodológicos adotados.

As etapas metodológicas são construídas a partir dos procedimentos propostos e validadas, tendo suas bases definidas a partir do que foi abordado no referencial teórico. Observa-se, conforme fluxograma ilustrado na Figura 57, as etapas que fazem parte da proposta metodológica proposta e sua respectiva ordem de procedimentos.

Figura 57: Fluxograma das etapas metodológicas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Nota-se que as etapas não seguiram uma ordem cronológica, dado que algumas delas se relacionam diretamente e dependem de outras etapas para serem finalizadas.

Adiciona-se que, preliminarmente às etapas que compõem os procedimentos metodológicos, foi conduzido estudo para identificar os modelos de simulação do aumento do nível do mar presentes na literatura científica. Dessa forma, Bussolotti e Engel de Alvarez (2021) conduziram uma sistematização de conteúdo que visa, entre outros aspectos, identificar a carência na proposição de soluções para o enfrentamento das consequências do SLR em zonas costeiras urbanas.

Como principal resultado, os autores constataram que, embora existam muitos estudos tratando dos impactos relacionados às comunidades e às populações costeiras em relação a aspectos socioeconômicos, as principais análises são voltadas para os aspectos ambientais, com carência de proposições efetivas de enfrentamento das consequências do aumento do nível do mar nos aglomerados urbanos litorâneos.

4.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Quando se trata do aumento do nível médio dos oceanos, diferentes aspectos devem ser considerados no contexto do planejamento urbano, dado que os problemas associados a esse estressor térmico se manifestam em diferentes escalas de risco.

Pode-se mencionar, por exemplo, questões ambientais, aproximação de fauna e flora indesejadas ou mesmo a perda de patrimônio edificado e patrimônio imaterial.

Uma dessas variáveis que se pode considerar quando da avaliação técnica de determinada estratégia para o enfrentamento do aumento do nível do mar é a questão térmica, que foi a escolhida para realizar a validação do método proposto.

Os procedimentos para avaliar a eficácia dos procedimentos metodológicos desenvolvidos e validá-los são exemplificados pelos resultados de simulações para Salvador. Os resultados das simulações das outras cidades constituem o Apêndice 4.

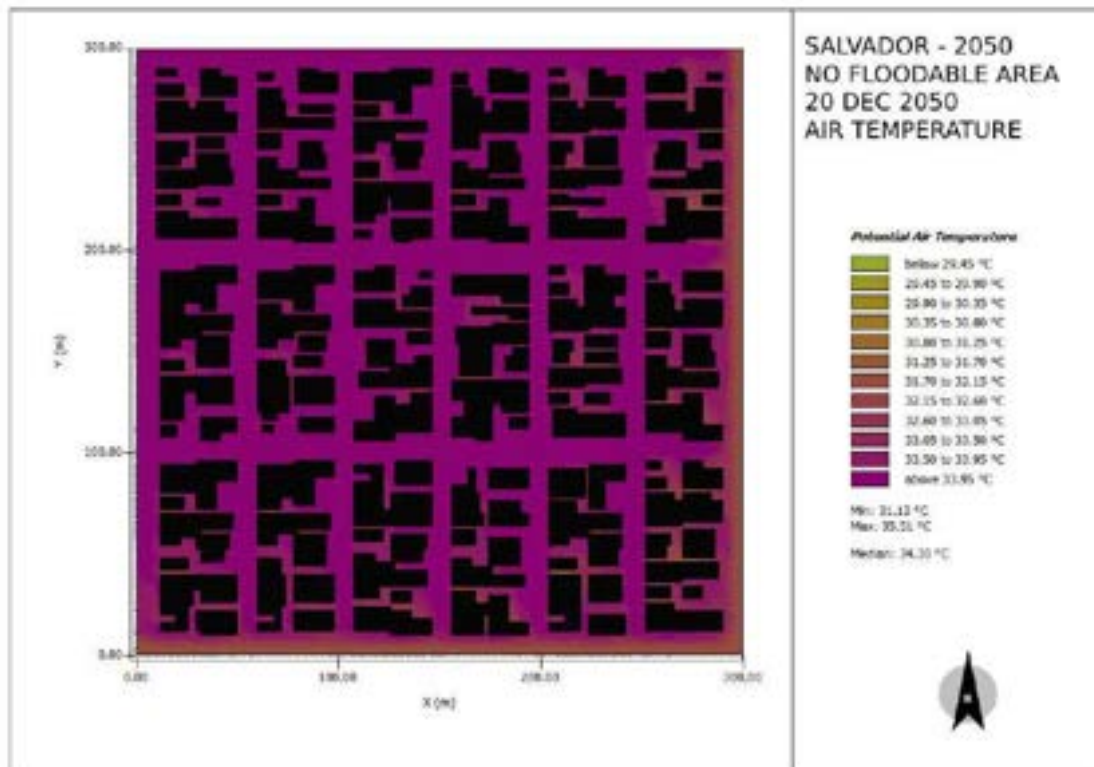
Foram realizadas oito simulações para cada cidade, sendo dois recortes temporais (2050 e 2080), duas datas (solstícios de inverno e de verão) e dois cenários (com e sem área alagável).

Os resultados obtidos foram exportados para temperatura do ar e para umidade relativa. A Figura 58 apresenta o mapa de temperatura com a simulação do ano de 2050 no solstício de verão sem a presença de áreas alagáveis.

A partir da análise do resultado, é possível observar que a temperatura média esperada para o recorte simulado é de 34,30°C, com temperatura mínima de 31,12°C e máxima de 35,51°C.

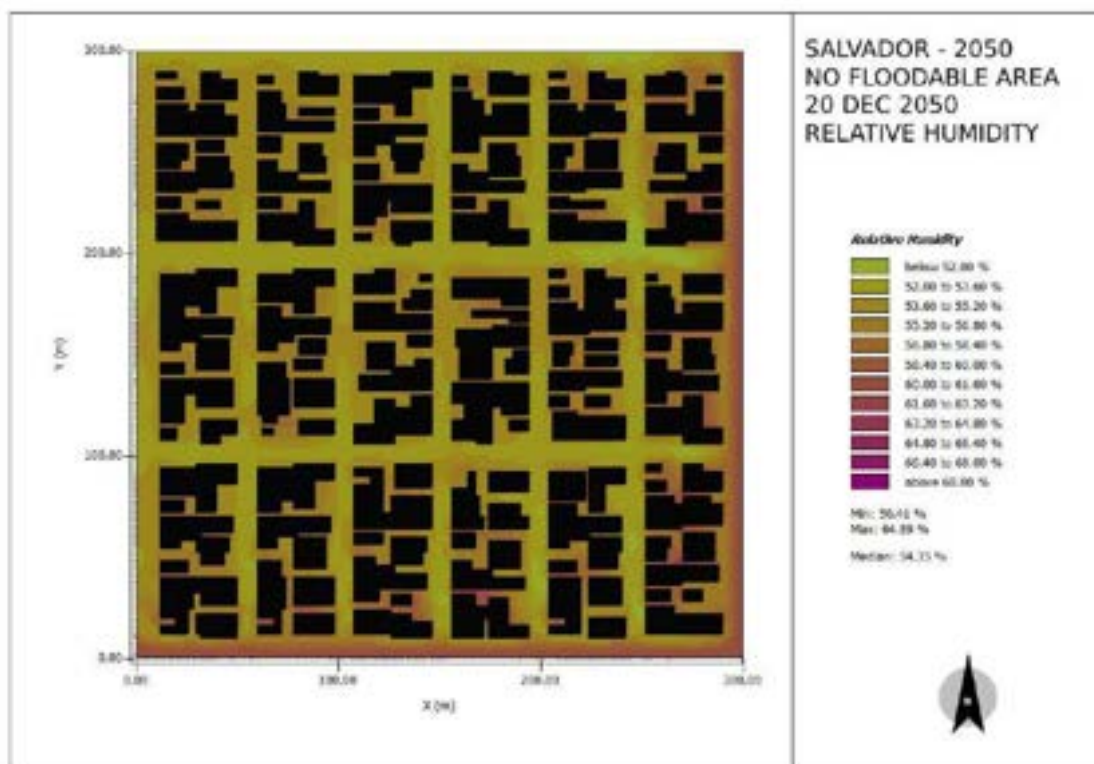
A Figura 59 contém o mapa com a umidade relativa do ar simulado no ano de 2050 sem a presença de áreas alagáveis. Os resultados do mapa indicam a umidade média esperada para o caso simulado de 54,35%, com mínima de 50,41% e máxima de 64,89%.

Figura 58: Simulação de temperatura em Salvador, 2050, verão, sem área alagável



Fonte: Elaborado pelo autor.

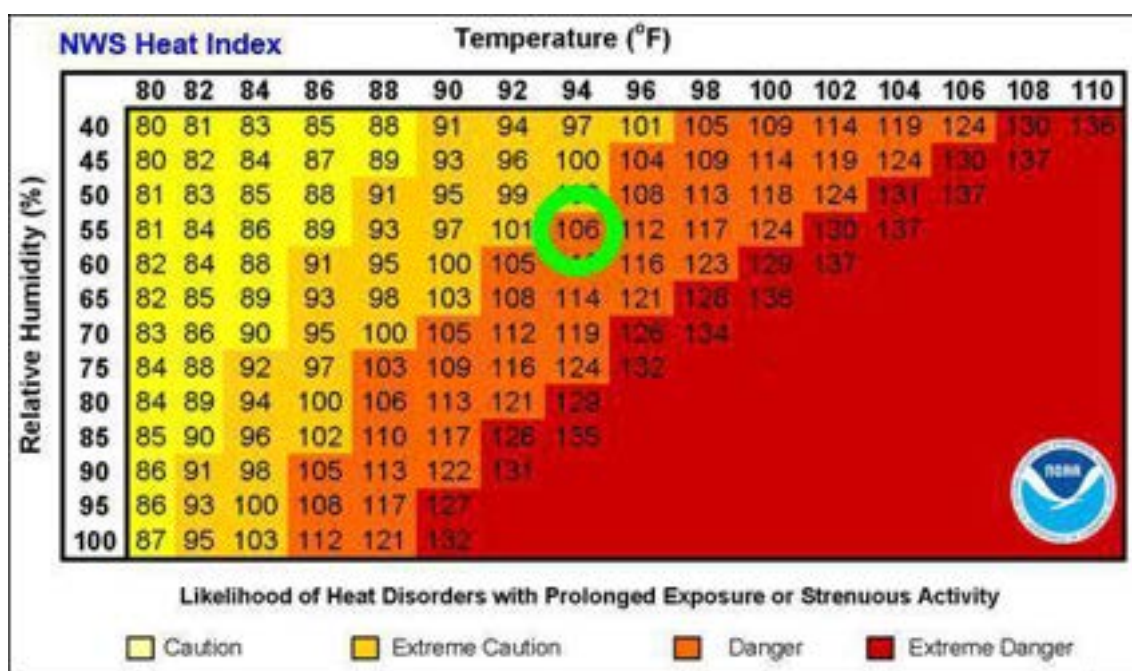
Figura 59: Simulação de umidade relativa em Salvador, 2050, verão, sem área alagável



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inserindo-se esse resultado no gráfico do índice de calor, identifica-se que o índice de calor esperado para a cidade de acordo com a simulação realizada é de 40,70°C. Tal resultado corresponde à classificação de Perigo e está representado na Figura 60. O mesmo procedimento foi repetido para todas as seis cidades utilizadas como estudo de caso e está representado no Quadro 6.

Figura 60: Resultado para 2050, verão, sem área alagável no gráfico do índice de calor



Fonte: Elaborado pelo autor.

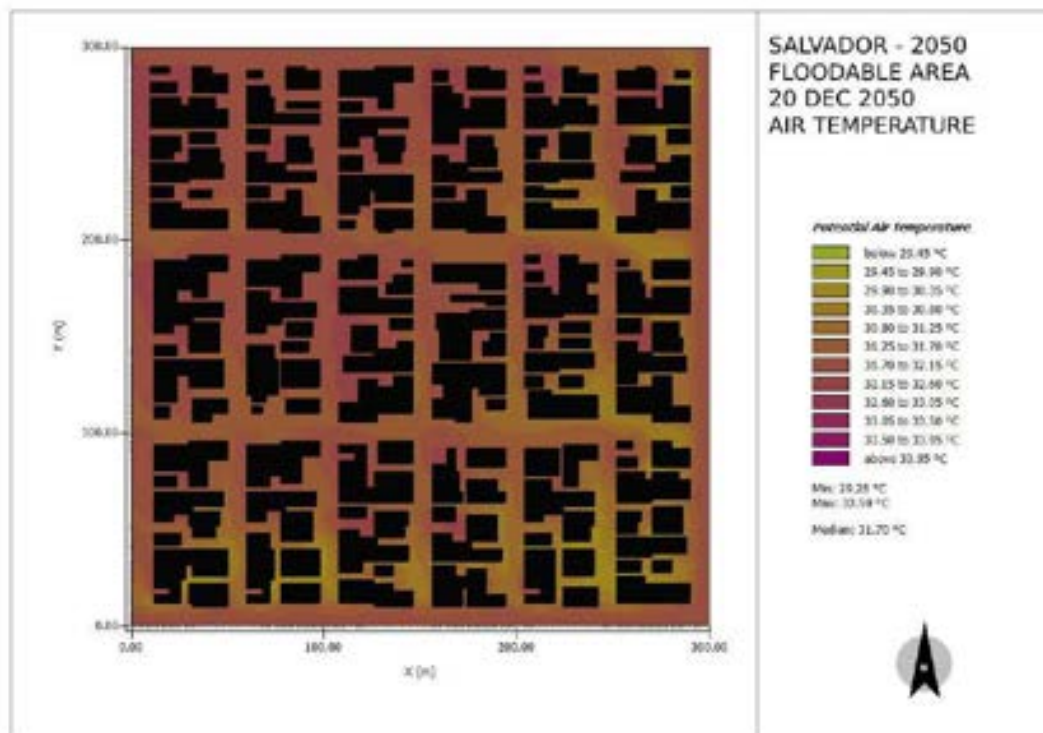
Quadro 6: Resultados de Índice de Calor para 2050, verão, sem área alagável.

Cidade	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Índice de Calor (°C)	Classificação
Auckland	22,61	54,85	22.40	Não se aplica
Copenhagen	24,02	61,38	24,10	Não se aplica
Nova York	25,04	87,29	25.90	Não se aplica
Salvador	34,30	54,35	40,70	Perigo
Freetown	30,89	74,08	38.60	Extrema Atenção
Mumbai	32,45	75,18	43.90	Perigo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os procedimentos foram repetidos para o cenário da cidade de Salvador no ano de 2050, verão, porém, agora simulando com a presença de áreas alagáveis. A Figura 61 apresenta o mapa onde constam os resultados obtidos das simulações de temperatura realizadas para o cenário. Os resultados indicam uma temperatura média de 31,70°C, com mínima de 29,28°C e máxima de 32,59°C.

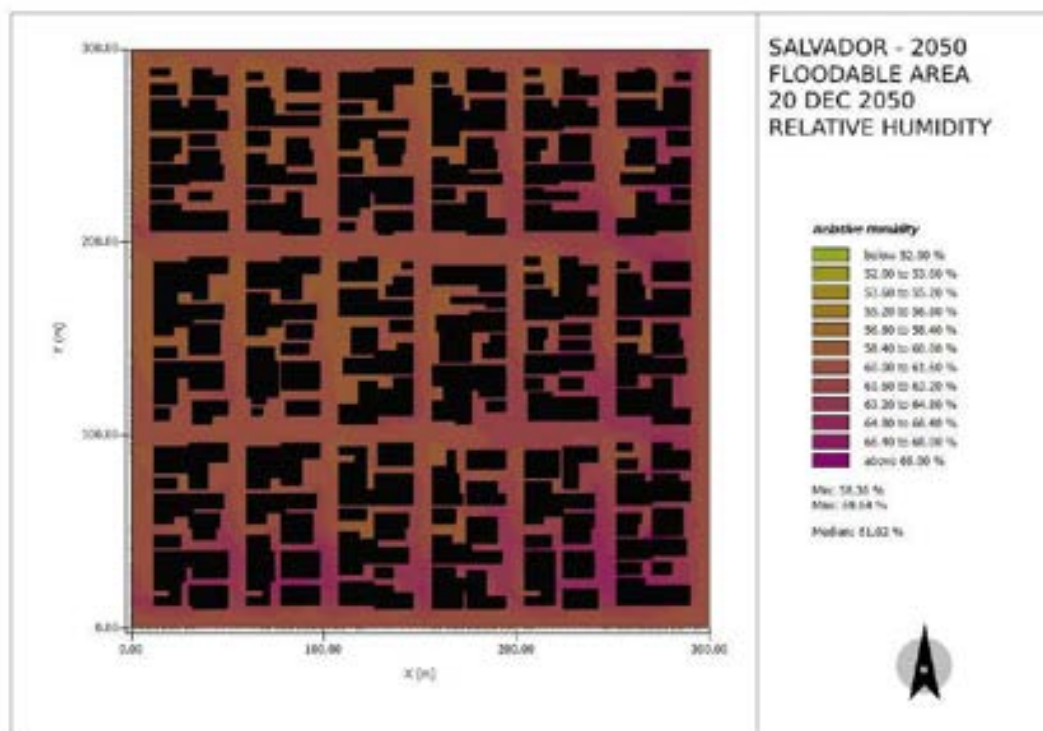
Figura 61: Simulação de temperatura em Salvador, 2050, verão, com área alagável



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 62 indica os resultados para a umidade relativa do ar, onde obteve-se uma média de 61,02%. Mínimo de 58,36% e máximo de 69,94%.

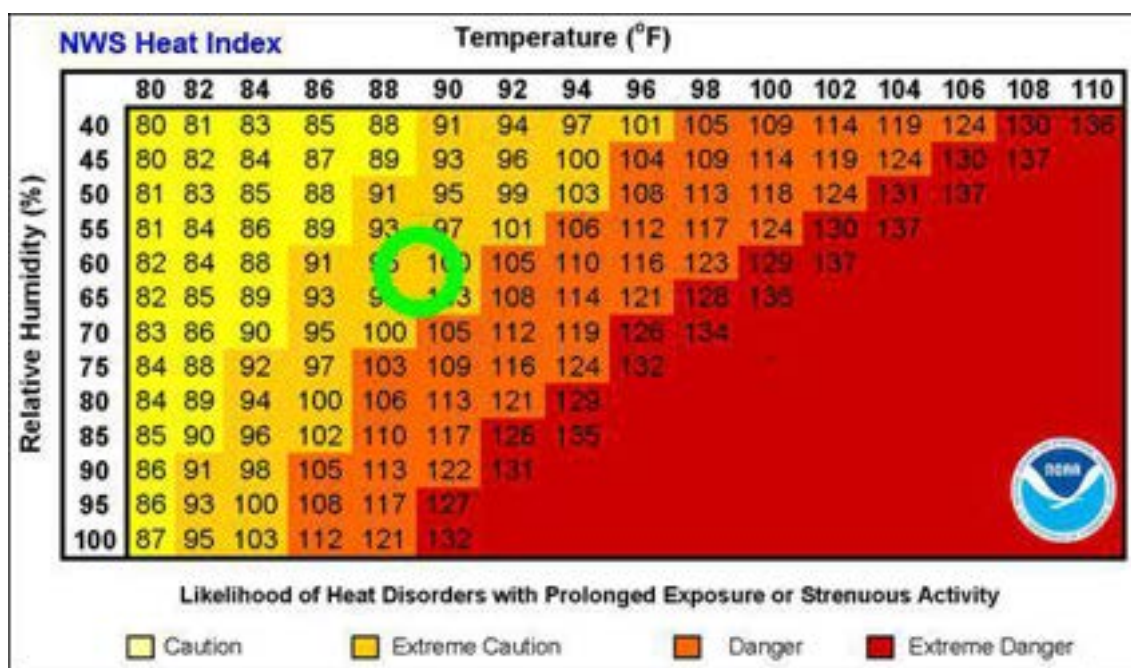
Figura 62: Simulação de umidade em Salvador, 2050, verão, com área alagável



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 63 apresenta a indicação do resultado obtido no gráfico de índice de calor, que resultou em uma situação de Extrema Atenção.

Figura 63: Resultado para 2050 com área alagável, verão, no gráfico do índice de calor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do Índice de Calor com área alagável, no verão, para todas as cidades estudo de caso estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7: Resultados de Índice de Calor para 2050, verão, com área alagável.

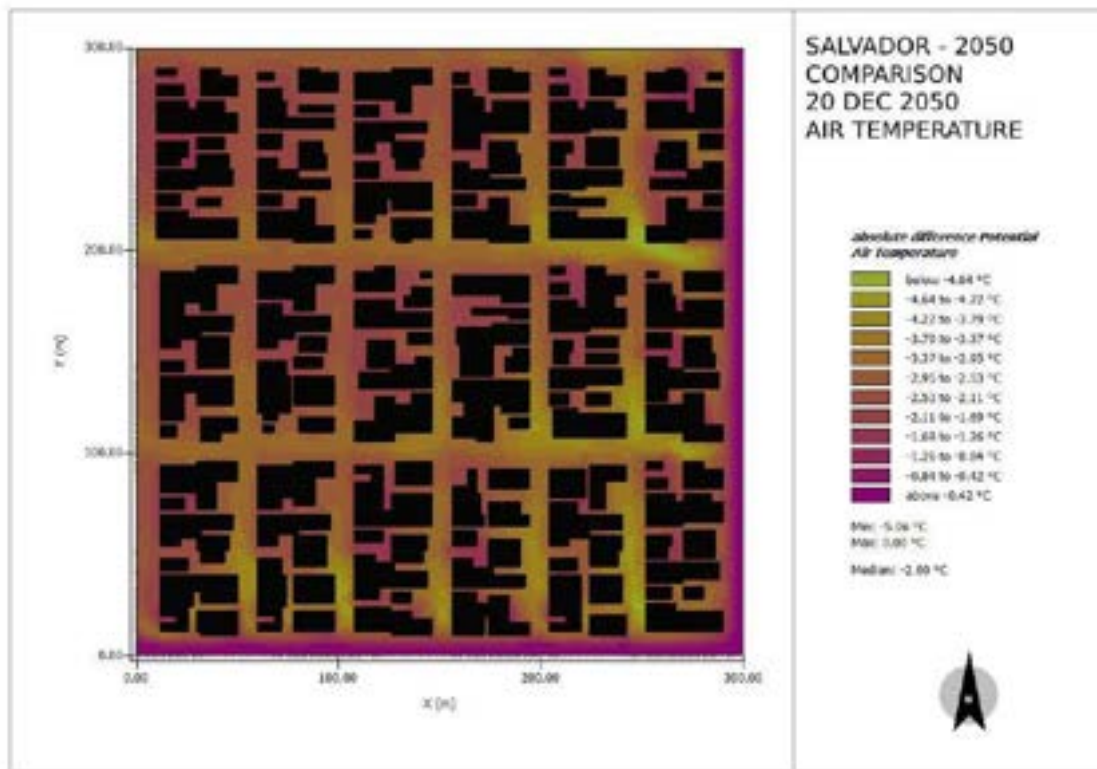
Cidade	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Índice de Calor (°C)	Classificação
Auckland	20,50	66,26	20,40	Não se aplica
Copenhagen	22,27	69,81	22,40	Não se aplica
Nova York	24,11	90,28	25,00	Não se aplica
Salvador	31,70	61,02	36,70	Extrema Atenção
Freetown	28,59	81,20	33,90	Extrema Atenção
Mumbai	30,23	80,19	38,50	Extrema Atenção

Fonte: Elaborado pelo autor.

Complementarmente, foram elaborados mapas contendo a comparação visual de temperatura e de umidade relativa do ar para os dois cenários simulados, indicando o quanto houve de aumento ou de redução em cada parte da área simulada.

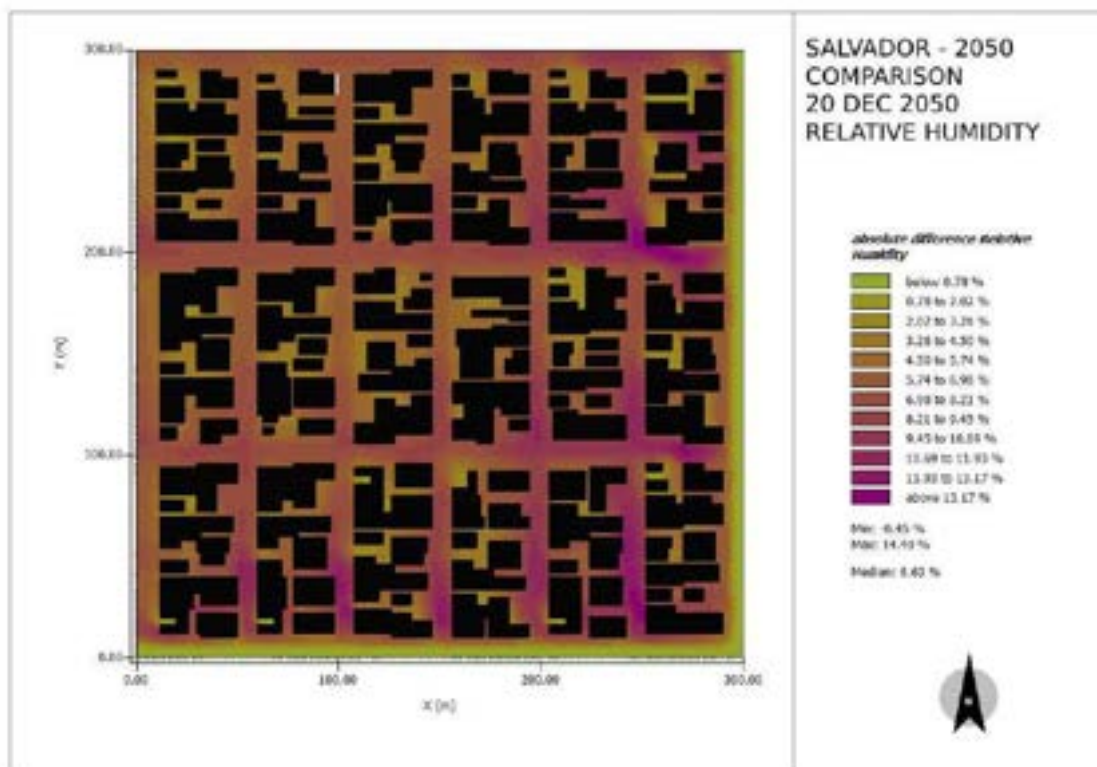
Os resultados estão apresentados na Figura 64 para temperatura e na Figura 65 para a umidade relativa.

Figura 64: Comparação de resultados de temperatura em Salvador, verão, para 2050



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 65: Comparação de resultados de umidade relativa em Salvador, verão, para 2050



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os mesmos procedimentos efetuados para os cenários de 2050 no verão foram repetidos para o inverno e para os cenários futuros de 2080 (verão e inverno) nas seis cidades, com os mapas resultantes constituindo o Apêndice 4.

Observa-se que, quando a simulação do ENVI-met encontra o ar supersaturado, ela pode gerar pontos em que se identifica mais de 100% de umidade relativa, por limitações nos mecanismos do *software*. Por esse motivo, entre os a há situações em que as legendas indicam mais de 100% de saturação como o máximo simulado.

Os demais resultados do Índice de Calor dessas simulações para verão e inverno, sem e com as áreas alagáveis, para todas as cidades estudo de caso estão apresentados nos Quadros de 8 a 13.

Quadro 8: Resultados de Índice de Calor para 2050, inverno, sem área alagável.

Cidade	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Índice de Calor (°C)	Classificação
Auckland	17,24	66,07	16,80	Não se aplica
Copenhague	1,32	72,48	Não se aplica	Não se aplica
Nova York	9,36	66,07	8,10	Não se aplica
Salvador	29,70	61,24	32,50	Extrema Atenção
Freetown	27,75	82,74	31,90	Atenção
Mumbai	32,92	53,66	37,20	Extrema Atenção

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 9: Resultados de Índice de Calor para 2050, inverno, com área alagável.

Cidade	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Índice de Calor (°C)	Classificação
Auckland	16,72	77,00	16,50	Não se aplica
Copenhague	3,51	99,17	Não se aplica	Não se aplica
Nova York	10,04	82,87	9,30	Não se aplica
Salvador	27,45	68,45	29,50	Atenção
Freetown	26,34	87,37	28,80	Atenção
Mumbai	31,56	56,91	35,30	Extrema Atenção

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 10: Resultados de Índice de Calor para 2080, verão, sem área alagável.

Cidade	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Índice de Calor (°C)	Classificação
Auckland	23,42	55,44	23,30	Não se aplica

Copenhague	24,30	62,80	24,40	Não se aplica
Nova York	27,08	84,26	30,40	Atenção
Salvador	33,59	54,08	38,90	Extrema Atenção
Freetown	30,89	74,08	38,60	Extrema Atenção
Mumbai	33,45	75,60	47,70	Perigo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 11: Resultados de Índice de Calor para 2080, verão, com área alagável.

Cidade	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Índice de Calor (°C)	Classificação
Auckland	21,35	65,95	21,30	Não se aplica
Copenhague	22,62	70,67	22,80	Não se aplica
Nova York	26,03	87,01	28,00	Atenção
Salvador	32,97	60,49	39,70	Extrema Atenção
Freetown	29,62	80,79	36,80	Extrema Atenção
Mumbai	30,98	80,90	41,20	Perigo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 12: Resultados de Índice de Calor para 2080, inverno, sem área alagável.

Cidade	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Índice de Calor (°C)	Classificação
Auckland	18,48	67,93	18,20	Não se aplica
Copenhague	4,39	78,43	Não se aplica	Não se aplica
Nova York	10,91	67,96	9,80	Não se aplica
Salvador	30,62	60,87	34,30	Extrema Atenção
Freetown	28,91	81,90	34,90	Extrema Atenção
Mumbai	34,48	54,05	41,00	Perigo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 13: Resultados de Índice de Calor para 2080, inverno, com área alagável.

Cidade	Temperatura do Ar (°C)	Umidade Relativa (%)	Índice de Calor (°C)	Classificação
Auckland	17,82	77,61	17,70	Não se aplica
Copenhague	6,19	96,95	5,40	Não se aplica
Nova York	11,41	82,44	10,80	Não se aplica
Salvador	28,34	67,82	31,00	Atenção
Freetown	27,58	86,18	32,00	Atenção
Mumbai	33,14	57,00	38,80	Extrema Atenção

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao final, compararam-se todos os resultados de classificação de índice de riscos obtidos nas simulações para os quatro cenários simulados. O Quadro 14 contém essa comparação para o verão e o Quadro 15 para o inverno.

Quadro 14: Comparação dos resultados dos cenários simulados no verão.

Cidade	2050 sem área alagável	2050 com área alagável	2080 sem área alagável	2080 com área alagável
Auckland	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Copenhague	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Nova York	Não se aplica	Não se aplica	Atenção	Atenção
Salvador	Perigo	Extrema Atenção	Extrema Atenção	Extrema Atenção
Freetown	Extrema Atenção	Extrema Atenção	Extrema Atenção	Extrema Atenção
Mumbai	Perigo	Extrema Atenção	Perigo	Perigo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 15: Comparação dos resultados dos cenários simulados no inverno.

Cidade	2050 sem área alagável	2050 com área alagável	2080 sem área alagável	2080 com área alagável
Auckland	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Copenhague	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Nova York	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Salvador	Extrema Atenção	Atenção	Extrema Atenção	Atenção
Freetown	Atenção	Atenção	Extrema Atenção	Atenção
Mumbai	Extrema Atenção	Extrema Atenção	Perigo	Extrema Atenção

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados indicam que há uma redução nos riscos aos quais a população se expõe quando submetidas a situações semelhantes à de acomodação, trazendo a água do mar para dentro da cidade, principalmente durante o período do verão.

Durante o inverno, embora haja uma situação de menor risco no índice de calor para a maioria das cidades, observa-se que há uma elevação das temperaturas percebidas pelos usuários nos climas frios, reduzindo a sensação de desconforto térmico.

Observa-se, ainda, que, com exceção de Nova York em um dos cenários estudados, apenas as cidades localizadas em zonas tropicais apresentam cenários de riscos de acordo com o índice de calor.

Como tais cidades constituem-se, ainda, como as pertencentes ao Sul Global, fica evidenciada uma característica das mudanças climáticas, onde entende-se que as populações mais vulneráveis estão submetidas aos maiores riscos.

O Quadro 16 apresenta os resultados numéricos dos Índices de Calor para os cenários simulados no Verão.

Quadro 16: Comparação dos resultados numéricos dos Índices de Calor simulados no verão.

Cidade	2050 sem área alagável	2050 com área alagável	2080 sem área alagável	2080 com área alagável
Auckland	22.40	20,40	23.30	21,30
Copenhagen	24,10	22,40	24,40	22,80
Nova York	25.90	25,00	30,40	28,00
Salvador	40,70	36,70	38.90	39,70
Freetown	38.60	33,90	38.60	36,80
Mumbai	43.90	38.50	47.70	41,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que em apenas uma das simulações não houve redução no índice ao se comparar o mesmo período entre área alagável e não alagável. Nos outros 11 casos, houve redução, com o efeito mais significativo sendo observado em Mumbai com 6,5°C de redução em 2080.

Para os cenários de inverno, o Quadro 17 apresenta os resultados numéricos dos Índices de Calor obtidos nas simulações.

Quadro 17: Comparação dos resultados numéricos dos Índices de Calor simulados no inverno.

Cidade	2050 sem área alagável	2050 com área alagável	2080 sem área alagável	2080 com área alagável
Auckland	16,80	16,50	18,20	17,70
Copenhagen	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	5.40
Nova York	8,10	9.30	9.80	10.80
Salvador	32,50	29,50	34,30	31,00
Freetown	31.90	28.80	34.90	32,00
Mumbai	37.20	35.30	41,00	38,80

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que nos locais com predomínio de baixas temperaturas durante o inverno (Auckland, Copenhagen e Nova York), não houve mudanças significativas entre cenários alagáveis e não alagáveis. Mas, ainda há

predomínio de aumento do índice de calor, o que, nestes cenários, contribui para o aumento da sensação de conforto térmico. Apenas em Auckland os resultados demonstraram queda de até 0,5°C.

Já nas cidades costeiras tropicais, todos os casos demonstraram redução do índice de calor na presença de áreas alagáveis, com resultado mais expressivo em Salvador, para o ano de 2080, com redução de 3,3°C.

Isso demonstra que a presença de áreas alagáveis nas cidades costeiras pode contribuir para a redução do desconforto térmico entre os seus habitantes tanto em climas frios quanto em climas quentes.

4.2 METODOLOGIA PARA AUXILIAR GESTORES MUNICIPAIS

A metodologia desenvolvida para o auxílio de gestores municipais quanto à tomada de decisões para a adequada adaptação dos territórios das cidades costeiras é apresentada em forma de fluxograma indicando a ordem da tomada de decisões e ações necessárias. Complementarmente, foi produzido um guia em forma de quadro contendo as explicações de como proceder na realização de cada passo. A metodologia consiste em cinco etapas independentes: 1. simulação com mapeamento; 2. escolha da estratégia; 3. aprovação; 4. definições e 5. execução da estratégia escolhida.

A primeira etapa, **simulação com mapeamento** conta com quatro procedimentos: simulação dos cenários climáticos futuros, mapeamento das áreas alagáveis, identificação e quantificação das escalas de risco, escolha das áreas de intervenção.

A segunda etapa é formada pelo **estudo da viabilidade técnica das três estratégias** de enfrentamento do aumento do nível do mar disponíveis em ordem sequencial de prioridade: proteção, acomodação e recuo. Isso leva à escolha da estratégia, que deve ser confirmada a partir do estabelecimento de uma estratégia de envolvimento da população atingida.

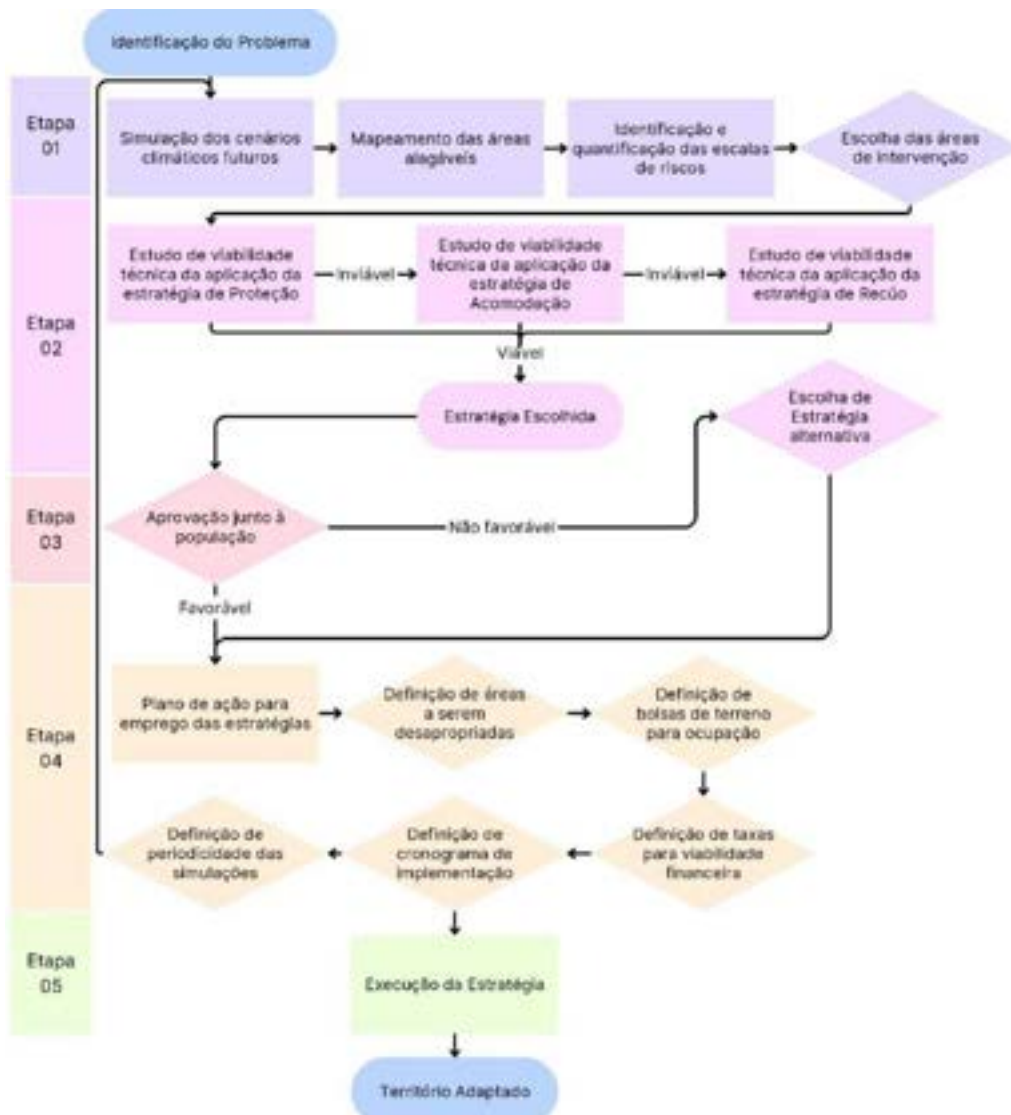
A terceira etapa consiste na consulta à população para prosseguimento à etapa seguinte, que se refere ao desenvolvimento efetivo do plano. Destaca-se que os

procedimentos de consulta devem seguir metodologia própria, de acordo com a eficiência na obtenção de respostas e conveniência dos gestores em relação à viabilidade técnica e econômica.

Com a quarta etapa, tem-se a construção efetiva do plano de ação e sua sequência de **definições** quanto a áreas a serem desapropriadas, bolsas de terreno para ocupação, taxas ou impostos para viabilidade financeira, cronograma de implementação e periodicidade da realização das simulações para elaboração de planos futuros.

A quinta etapa consiste na efetiva **execução da estratégia** escolhida. O fluxograma ilustrativo da metodologia para adaptação das cidades costeiras ao aumento do nível do mar segue sintetizada na Figura 66.

Figura 66: Metodologia para adaptação das cidades costeiras ao aumento do nível do mar



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como complemento da metodologia, tem-se a explicação de todos os seus procedimentos no Quadro 18.

Quadro 18: Orientação quanto aos procedimentos da metodologia

ETAPA 01
Simulação dos cenários climáticos futuros:
Os cenários climáticos futuros devem ser simulados considerando-se os padrões de emissões SSP5-8.5 para o ano de referência de 2100 considerando a adição dos efeitos das chuvas.
Mapeamento das áreas alagáveis:
As áreas alagáveis devem ser mapeadas considerando-se a topografia existente e adicionando-se o valor previsto de aumento do nível do mar acrescido do efeito das chuvas.
Identificação e quantificação das escalas de riscos:
As escalas de risco devem ser avaliadas sob cinco aspectos: vida humana, economia, infraestruturas, patrimônio e ecossistemas.
Escolha das áreas de intervenção:
As áreas de intervenção devem ser definidas a partir da identificação dos riscos associados às áreas alagáveis identificadas.
ETAPA 02
Estudo de viabilidade técnica da aplicação das estratégias de Proteção, Acomodação e Recuo:
As estratégias devem ser avaliadas quanto à possibilidade de sua execução técnica e comparadas com os resultados das avaliações dos cinco riscos identificados.
Escolha de Estratégia alternativa:
Caso a estratégia inicialmente escolhida seja recusada pela população, deve-se escolher a segunda estratégia de acordo com a sua viabilidade técnica. Caso haja nova inadequação, parte-se para a terceira opção.
ETAPA 03
Aprovação junto à população:
Uma vez aprovada a estratégia quanto à sua viabilidade, a população deve ser consultada quanto à sua implementação.
ETAPA 04
Plano de ação para emprego das estratégias:
O plano de ação para emprego da estratégia definida deve prever todas as ações necessárias para seu emprego, seus cronogramas e orçamentos.
Definição de áreas a serem desapropriadas:
Caso a estratégia definida caracterize-se como de recuo, deve-se indicar no plano as áreas que serão desapropriadas.
Definição de bolsas de terreno para ocupação:
Caso haja a necessidade de deslocamento populacional, deve-se indicar no plano os bolsões de terra que serão utilizados para inserção da população deslocada.
Definição de taxas para viabilidade financeira:
Uma vez definida a necessidade de esforços de adaptação, o plano deve demonstrar como sua implementação será feita sob o aspecto econômico, identificando de onde vêm os recursos e se há a necessidade de adição de alguma taxa ou imposto específico.

Definição de cronograma para implementação:
As datas previstas para a implementação da estratégia devem estar descritas no cronograma considerando todas as etapas.
Definição de periodicidade das simulações:
O plano deve definir suas metas cronológicas, indicando quando será atualizado e os procedimentos refeitos.
ETAPA 05
Execução da Estratégia:
A estratégia deve ser executada seguindo as definições das etapas anteriores.

Fonte: Elaborado pelo autor.

CONCLUSÕES



*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

5 - CONCLUSÕES

As políticas públicas das cidades costeiras voltadas para a adaptação de seus territórios ao aumento do nível do mar, provocado pelas mudanças climáticas, podem ser fortalecidas pelo emprego de uma metodologia adequada.

A avaliação de riscos e análise das potenciais estratégias adaptativas quando da definição do plano de ação das cidades demonstrou ser eficiente na busca por áreas que reduzam ou apresentem riscos aos seus usuários na questão do desempenho térmico, gerando situações menos desfavoráveis no índice de calor.

A hipótese proposta pôde ser confirmada, pois se demonstrou a possibilidade de redução das consequências decorrentes do aumento do nível do mar a partir do emprego de estratégias adequadas vinculadas a um planejamento urbano que as considere.

Entende-se que a metodologia desenvolvida atende ao objetivo geral proposto na tese, uma vez que os resultados das simulações evidenciaram a sua importância. As orientações para a construção de política pública relacionada ao SLR contidas na metodologia criada auxiliam no enfrentamento desse estressor climático.

Os objetivos específicos também foram atendidos visto que: 1. as estratégias de adaptação existentes globalmente para a proteção da zona costeira foram identificadas e analisadas, tendo a proteção, a acomodação e o recuo sido utilizadas na construção da proposta desenvolvida; 2. a identificação de metodologias de simulação do SLR e planos de ação climática para adaptação das zonas costeiras frente aos efeitos decorrentes das mudanças climáticas também foi alcançada; 3. os critérios das estratégias de adaptação para auxílio aos gestores, visando o enfrentamento das consequências urbanas relacionadas ao aumento do nível do mar foram avaliados; e 4. a aplicabilidade da metodologia desenvolvida em seis cidades selecionadas como estudo de caso foi testada por meio das simulações efetuadas sob o ponto de vista da questão térmica.

Este trabalho identificou que há soluções potenciais na adaptação territorial de zonas costeiras ao se considerar o enfrentamento do aumento do nível do mar.

E, pensar as cidades futuras a partir da ótica desse estressor climático constitui-se em uma mudança em relação à forma contemporânea de se pensar as cidades que buscam ser resilientes e adaptáveis.

A identificação de benefícios térmicos existentes na aproximação da água com a realidade urbana pode constituir uma mudança de paradigma na concepção arquitetônica. Além disso, incluir infraestruturas azuis, alimentadas pelo aumento do nível do mar, pode trazer benefícios para a cidade em diferentes aspectos.

Porém, o fenômeno das mudanças climáticas expressa-se de diferentes maneiras e abordagens holísticas demonstram-se fundamentais para um melhor enfrentamento de suas consequências. O aumento do nível do mar constitui-se em apenas uma das consequências das variações no clima e deve ser abordado no planejamento urbano relacionando-se com diferentes estressores, como o estresse térmico, utilizado de exemplo nesta pesquisa.

Aspectos físicos como as ressacas ou as tempestades e aspectos ambientais, como proliferações de doenças e mudanças de biodiversidade são também exemplos de consequências que se relacionam com o aumento do nível do mar. Entende-se que quanto maior a capacidade de se avaliar e propor soluções que considerem diferentes variáveis possíveis, maior tende a ser a eficácia de um planejamento urbano.

Algumas limitações na pesquisa são observadas.

Os cenários climáticos futuros são constantemente revistos e atualizados, de modo que os planos de ação climática devem acompanhar as atualizações nas previsões dos órgãos científicos e se adequar, sempre que necessário, de modo que a própria metodologia desenvolvida possa ser revista.

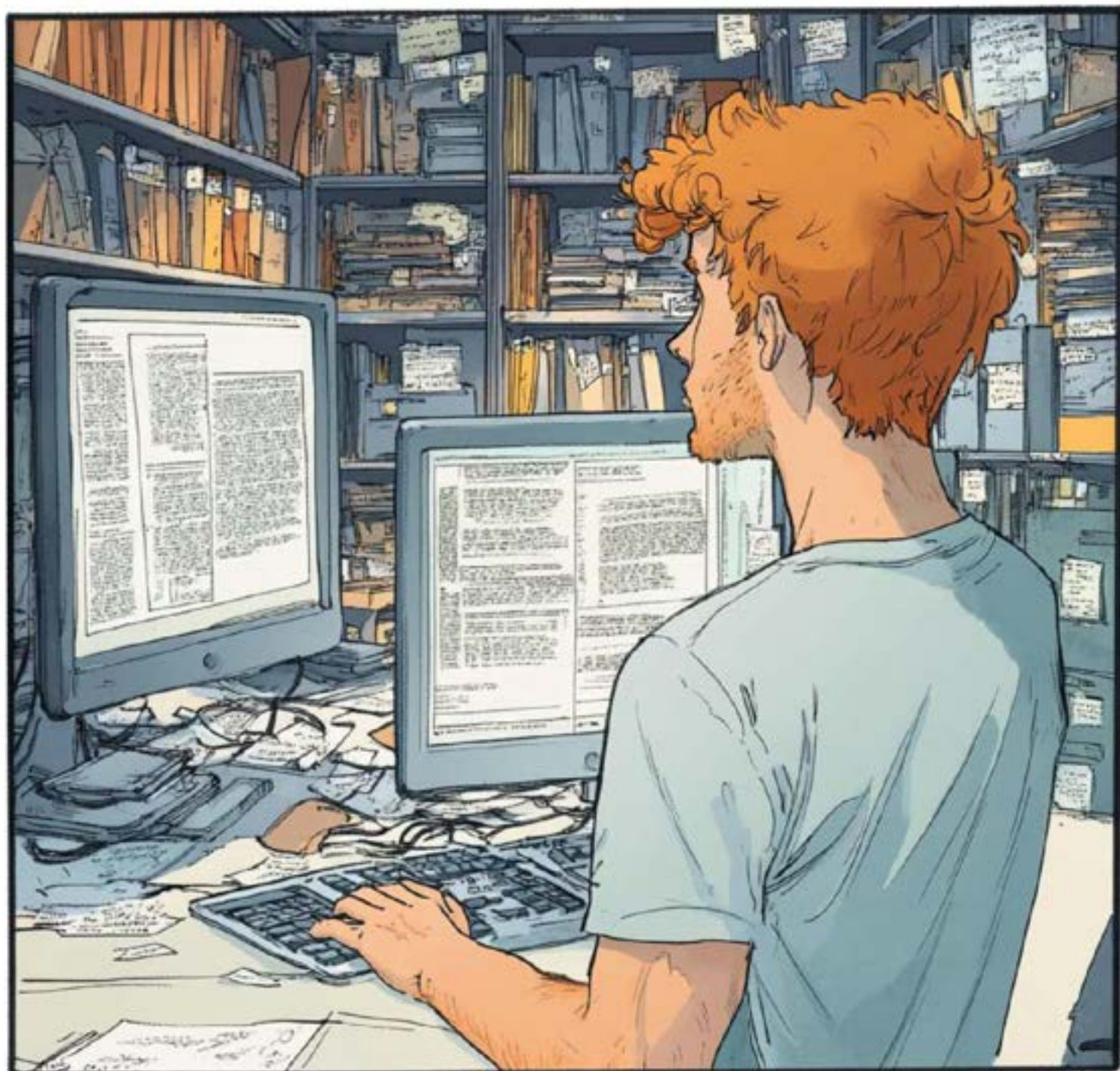
Embora os estudos de caso utilizados correspondam a diferentes contextos climáticos, os resultados obtidos nas simulações quanto aos aspectos de desempenho térmico e classificação no índice de calor não podem ser considerados para todas as cidades. É necessário que se simule individualmente cada cidade em que se pretende aplicar a metodologia para obter os próprios resultados.

Combinar os resultados das simulações com diferentes soluções complementares para melhorar o desempenho térmico dos locais estudados –

tais como arborização urbana e outras soluções baseadas na natureza –, pode identificar a possibilidade de se reduzir a escala de riscos em determinadas situações.

Como sugestões para a complementação da pesquisa, identifica-se a possibilidade de se empregar as estratégias definidas em modelagem de locais reais, sem a simplificação por meio das LCZ. Isso permitirá a definição das áreas que efetivamente sofrerão com o aumento do nível do mar, já com a estratégia de adaptação para cada uma delas, e o emprego efetivo do método para definição em planos de ação existentes.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO



*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

6- REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

BONGARTS LEBBE, T. et al. Designing Coastal Adaptation Strategies to Tackle Sea Level Rise. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, 3 nov. 2021.

BRASIL. **Projeto orla: manual de gestão**. Brasília. 2006. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/777/254>>.

BRASIL. **Manual Projeto Orla**. Brasília: 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/patrimonio-da-uniao/destinacao-de-imoveis/gestao-de-praias/projeto_orla_manual-para-elaboracao-do-plano-de-gestao-integrada-da-orla.pdf>.

BUSSOLOTTI, V. et al. Action plans to combat sea level rise: how plans can accentuate climate injustices. **Bitácora Urbano Territorial**, v. 34, n. 2, 7 jul. 2024.

BUSSOLOTTI, V. M. et al. Soluções Baseadas na Natureza para a Adaptação ao Aumento do Nível do Mar: Uma Revisão Sistemática (no prelo). **Paranoá**, 2023.

BUSSOLOTTI, V. M.; ENGEL DE ALVAREZ, C. **Análise da Literatura Referente ao Aumento do Nível do Mar Oriundo das Mudanças Climáticas**. (A. M. C. Barroso, A. N. Yuba, A. P. Kern, Eds.) ANAIS DO IV ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS. **Anais...** Salvador: UFBA, 2021.

BUSSOLOTTI, V. M.; PELLEGRINI, I. U.; ENGEL DE ALVAREZ, C. **Estratégias de planejamento urbano para a adaptação aos efeitos do aumento do nível do mar: uma sistematização de conteúdo (no prelo)**. PNUM 2023. **Anais...** Sintra: 2023.

C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP. **Integrando a Adaptação Climática. Kit de ferramentas para planejadores urbanos e profissionais de adaptação**. 2020. Disponível em: <https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Integrating-Climate-Adaptation-A-toolkit-for-urban-planners-and-adaptation-practitioners?language=en_US>.

C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP. **C40 Annual Report 2022**. 2023. Disponível em: <https://www.c40.org/wp-content/uploads/2023/03/C40-Cities-Annual-Report-2022_Published-Online-31-Mar-2023.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2023a.

C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP. **About C40**. 2024. Disponível em: <<https://www.c40.org/about-c40/>>. Acesso em: 28 jul. 2023b.

C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP. **Our Cities**. 2024. Disponível em: <<https://www.c40.org/cities/>>. Acesso em: 28 jul. 2023c.

C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP; C40 KNOWLEDGE HUB. **How to adapt your city to sea level rise and coastal flooding**. Disponível em: <https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-adapt-your-city-to-sea-level-rise-and-coastal-flooding?language=en_US>. Acesso em: 27 jul. 2023.

C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP; NORDIC SUSTAINABILITY. **Cities100 2019**. Londres: 2019. Disponível em: <https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Cities100-2019?language=en_US>. Acesso em: 27 jul. 2023.

C40 CITIES LEADERSHIP GROUP; MAYORS MIGRATION COUNCIL. **GLOBAL MAYORS ACTION AGENDA ON CLIMATE AND MIGRATION**. 2021. Disponível em:

https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Global-mayors-action-agenda-on-climate-and-migration?language=en_US>.

CALVIN, K. et al. **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.** (P. Arias et al., Eds.). Geneva: 2023.

CITY AND COUNCIL OF SAN FRANCISCO. **SAN FRANCISCO SEA LEVEL RISE ACTION PLAN.** San Francisco. 2016.

CITY OF COPENHAGEN. **COPENHAGEN CLIMATE ADAPTATION PLAN.** Copenhagen: 2011.

CLEMENT, V. et al. **Groundswell Part 2: Acting on Internal Climate Migration.** Washington, DC: 2021. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/2c9150df-52c3-58ed-9075-d78ea56c3267>>. Acesso em: 27 jul. 2023.

CLICK LCA. **ENVI-met.** 2025. Disponível em: <<https://envi-met.com/>>.

CLIMATE ANALYTICS AND NEXCLIMATE INSTITUTE. **The CAT Thermometer.** 2022. Disponível em: <<https://climateactiontracker.org/global/cat-thermometer/>>.

CLIMATE CENTRAL. **Coastal Risk Screening Tool.** 2024 Disponível em: <<https://coastal.climatecentral.org/>>. Acesso em: 28 jul. 2023.

DEMUZERE; KITTNER; BECHTEL. **LCZ Generator.** 2025. Disponível em: <<https://lcz-generator.rub.de/>>.

DEMUZERE, M.; KITTNER, J.; BECHTEL, B. LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, 2021.

ERKENS, G. et al. Sinking coastal cities. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 372, p. 189–198, 12 nov. 2015.

GHANBARI, M.; ARABI, M.; OBEYSEKERA, J. Chronic and Acute Coastal Flood Risks to Assets and Communities in Southeast Florida. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 7, jul. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [s.l.] Cambridge University Press, 2023a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [s.l.] Cambridge University Press, 2023b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis.** [s.l.] Cambridge University Press, 2023c.

JACOBS, C. et al. Are urban water bodies really cooling? **Urban Climate**, v. 32, p. 100607, 2020.

KIREZCI, E. et al. Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 11629, 30 jul. 2020a.

- KIREZCI, E. et al. Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 11629, 30 jul. 2020b.
- KULP, S. A.; STRAUSS, B. H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 4844, 29 out. 2019.
- LADYBUG. **EPW Map**. 2025. Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/epwmap/>>.
- LADYBUG TOOLS LLC. **Ladybug**. 2022. Disponível em: <<https://www.ladybug.tools/>>.
- LAWRENCE, J. et al. Implementing Pre-Emptive Managed Retreat: Constraints and Novel Insights. **Current Climate Change Reports**, v. 6, n. 3, p. 66–80, 3 set. 2020.
- LISKI, A. H. et al. Governance and stakeholder perspectives of managed re-alignment: adapting to sea level rise in the Inner Forth estuary, Scotland. **Regional Environmental Change**, v. 19, n. 8, p. 2231–2243, 22 dez. 2019.
- MANABE, S.; WETHERALD, R. T. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 24, n. 3, p. 241–259, maio 1967.
- MAPCHART. **Create your own custom map**. 2024 Disponível em: <<https://www.mapchart.net/>>. Acesso em: 28 jul. 2023.
- MASSELINK, G.; LAZARUS, E. Defining Coastal Resilience. **Water**, v. 11, n. 12, p. 2587, 8 dez. 2019.
- MCNELL EUROPE. **Ladybug Tools**. 2025. Disponível em: <<https://www.food4rhino.com/en/app/ladybug-tools>>.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Sea Level Projection Tool**. 2025. Disponível em: <<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>>. Acesso em: 28 jul. 2023.
- NOAA. **Heat Index**. 2025. Disponível em: <<https://www.noaa.gov/jetstream/synoptic/heat-index>>.
- OECD. **Incorporating resilience to sea-level rise in urban building codes**. 2020. Disponível em: <<https://www.oecd.org/stories/ocean/incorporating-resilience-to-sea-level-rise-in-urban-building-codes-0808492b/>>. Acesso em: 27 jul. 2023.
- OPPENHEIMER, M. et al. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. Em: PÖRTNER, H.-O. et al. (Eds.). **IPCC Special Report on The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. p. 321–446.
- ORR, J. et al. **For cities by cities: Key takeaways for city decision makers from the IPCC 1.5°C report and Summary for Urban Policymakers**. 2019. Disponível em: <https://www.c40knowledgehub.org/s/article/For-cities-by-cities-Key-Takeaways-for-City-Decision-Makers-from-the-IPCC-1-5-C-Report-and-Summary-for-Urban-Policymakers?language=en_US>.
- PAULIK, R. et al. National-Scale Built-Environment Exposure to 100-Year Extreme Sea Levels and Sea-Level Rise. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1513, 18 fev. 2020.

PELLEGRINI, I. U.; BUSSOLOTTI, V. M.; ENGEL DE ALVAREZ, C. **Soluções Baseadas na Natureza e as Mudanças Climáticas: uma Revisão de Literatura**. (L. Bragança, C. Engel de Alvarez, Eds.)2º CISU 2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE SUSTENTABILIDADE URBANA. **Anais...**Vitória: 2022.

RIahi, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153–168, jan. 2017.

RISING, J. et al. The missing risks of climate change. **Nature**, v. 610, n. 7933, p. 643–651, 2022.

ROBERTS, C. M. et al. Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 24, p. 6167–6175, 13 jun. 2017.

RODRIGUES, E.; CARVALHO, D.; FERNANDES, M. S. **Future Weather Generator**. 2025. Disponível em: <<https://future-weather-generator.adai.pt/>>.

RODRIGUES, E.; FERNANDES, M. S.; CARVALHO, D. Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. **Building and Environment**, v. 233, p. 110104, 2023.

SALVALAIO, R. et al. Mudanças Climáticas e Envelhecimento Populacional: Uma Revisão Necessária (no prelo). **PARC**, 2023.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 1 dez. 2012.

STRAUSS, B. H.; KULP, S.; LEVERMANN, A. Carbon choices determine US cities committed to futures below sea level. **PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA**, v. 112, n. 44, p. 13508–13513, 2015.

SUTTON, K. et al. Coastal resident perceptions of nature-based adaptation options in Nova Scotia. **The Canadian Geographer / Le Géographe canadien**, 29 nov. 2022.

TESHNEHDEL, S. et al. Improving Outdoor Thermal Comfort in a Steppe Climate: Effect of Water and Trees in an Urban Park. **Land**, v. 11, n. 3, p. 431, 16 mar. 2022.

THE ADVISORY GROUP ON CLIMATE CHANGE AND HUMAN MOBILITY. **HUMAN MOBILITY IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE RECOMMENDATIONS FROM THE ADVISORY GROUP ON CLIMATE CHANGE AND HUMAN MOBILITY COP 20 LIMA, PERU**. Lima: 2014. Disponível em: <<https://environmentalmigration.iom.int/resources/human-mobility-context-climate-change-recommendations-advisory-group-climate-change-and-human-mobility-cop20-lima-peru>>. Acesso em: 27 jul. 2023.

UNITED NATIONS. **UN human rights ruling could boost climate change asylum claims**. 2020. Disponível em: <<https://news.un.org/en/story/2020/01/1055671>>.

UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE. **What is the Paris Agreement?** 2023.

URBAN CLIMATE CHANGE RESEARCH NETWORK. **THE FUTURE WE DON'T WANT - How Climate Change Could Impact the World's Greatest Cities**. 2018. Disponível em: <https://www.c40knowledgehub.org/s/article/The-future-we-don-t-want-How-climate-change-could-impact-the-world-s-greatest-cities?language=en_US>.

WOETZEL, J. et al. **Can coastal cities turn the tide on rising flood risk? Climate risk and response: Physical hazards and socioeconomic impacts**. 2020.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Risks Report 2023**. Cologny/Geneva: 2023. Disponível em: <<https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/>>. Acesso em: 26 jul. 2023.

APÊNDICES



*Imagem desenvolvida com inteligência artificial.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: Estimativas de Aumento do Nível do Mar

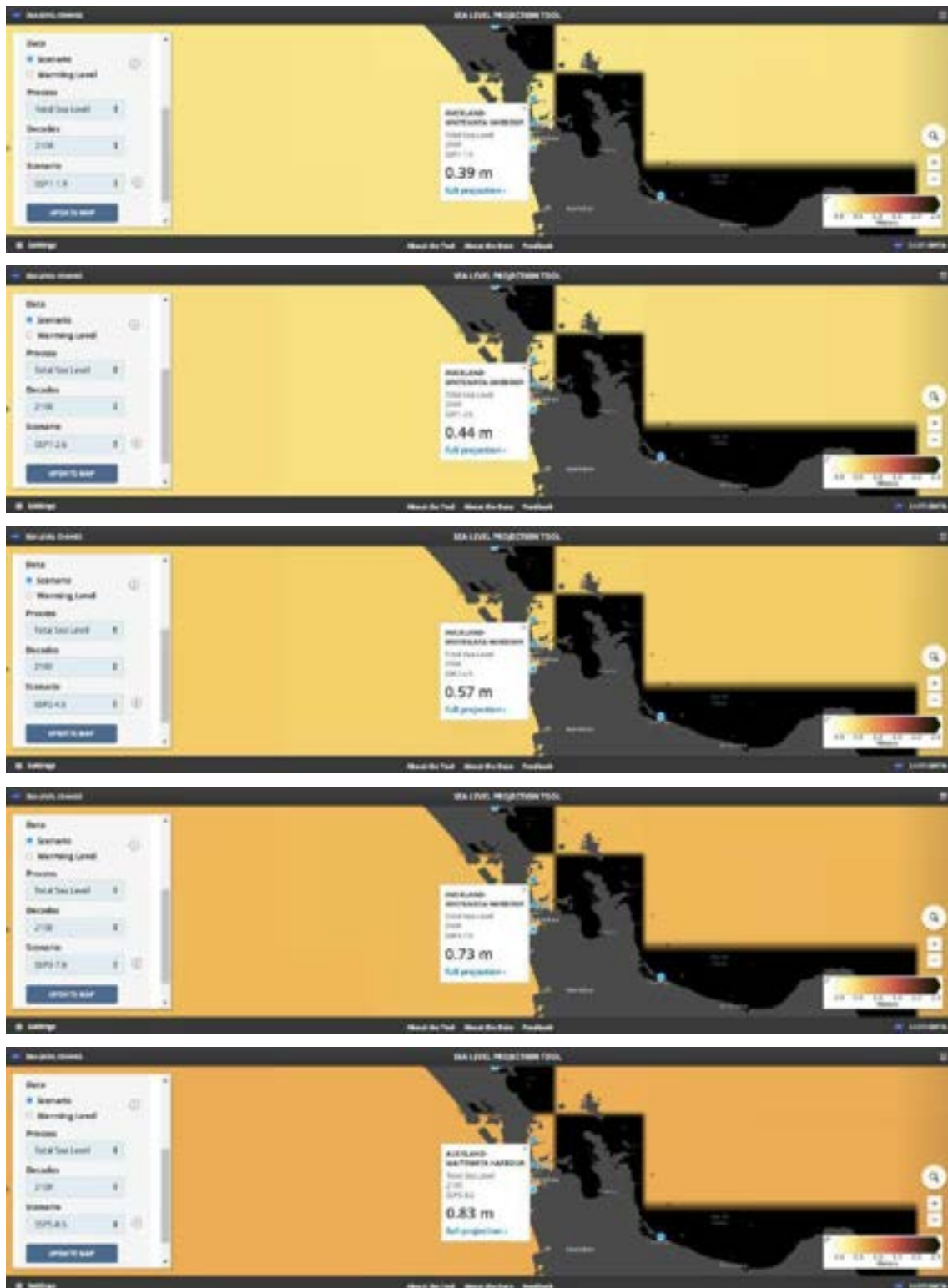
As simulações foram realizadas utilizando a Ferramenta de Projeção do Nível do Mar para as seguintes cidades:

1. Auckland;
2. Copenhagen;
3. Nova York;
4. São Francisco;
5. Seattle;
6. Vancouver;
7. Salvador;
8. Durban;
9. Dar es Salaam;
10. Dakar;
11. Freetown;
12. Mumbai;
13. Chennai.

1 – Auckland (2050):



1 – Auckland (2100):



2 – Copenhagen (2050):



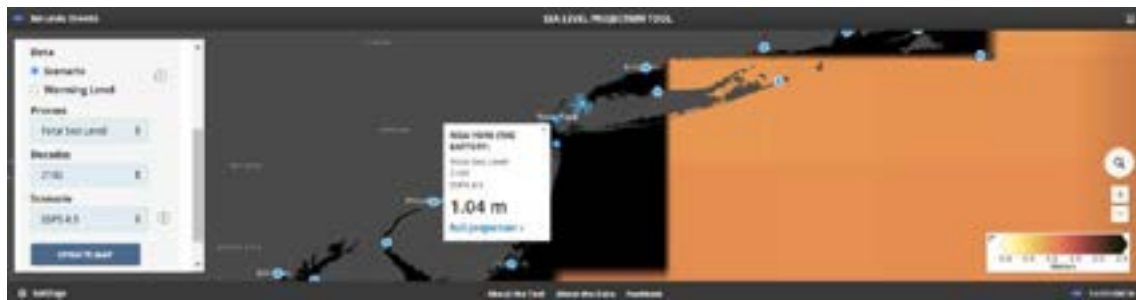
2 – Copenhagen (2100):



3 - Nova York (2050):



3 - Nova York (2100):



4 - São Francisco (2050):



4 - São Francisco (2100):

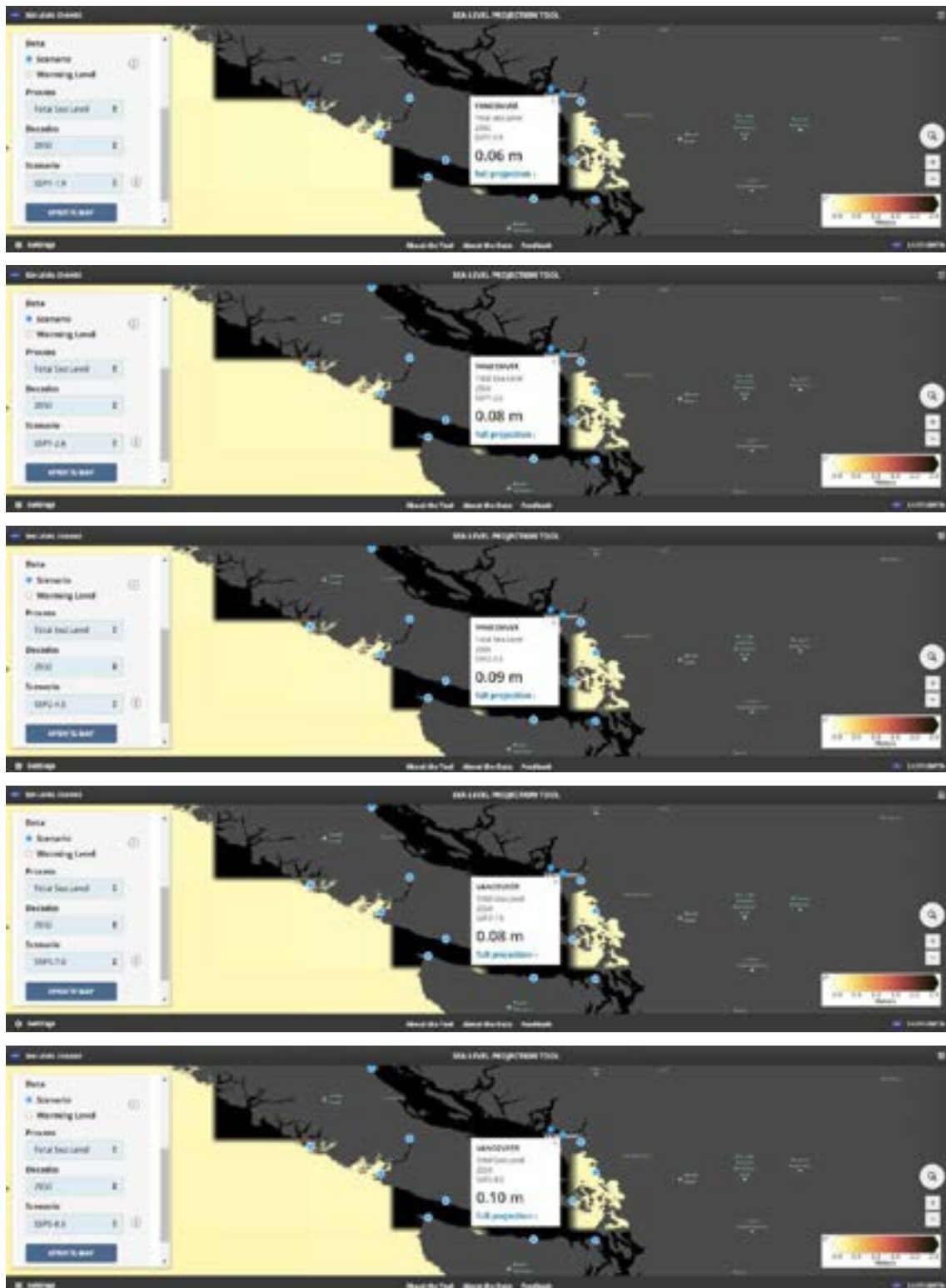


5 - Seattle (2050):



5 - Seattle (2100):



6 - Vancouver (2050):

6 - Vancouver (2100):



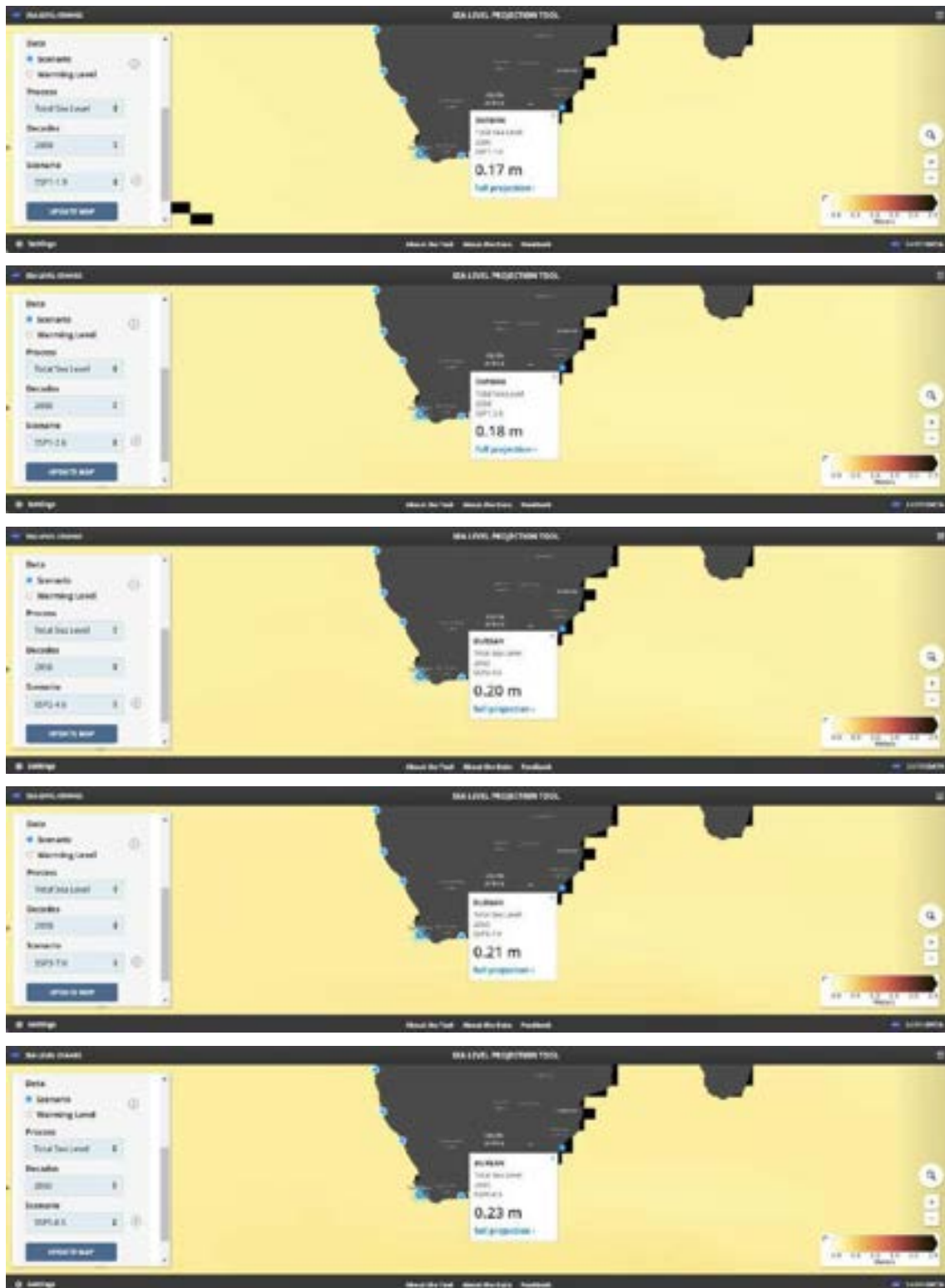
7 - Salvador (2050):



7 - Salvador (2100):



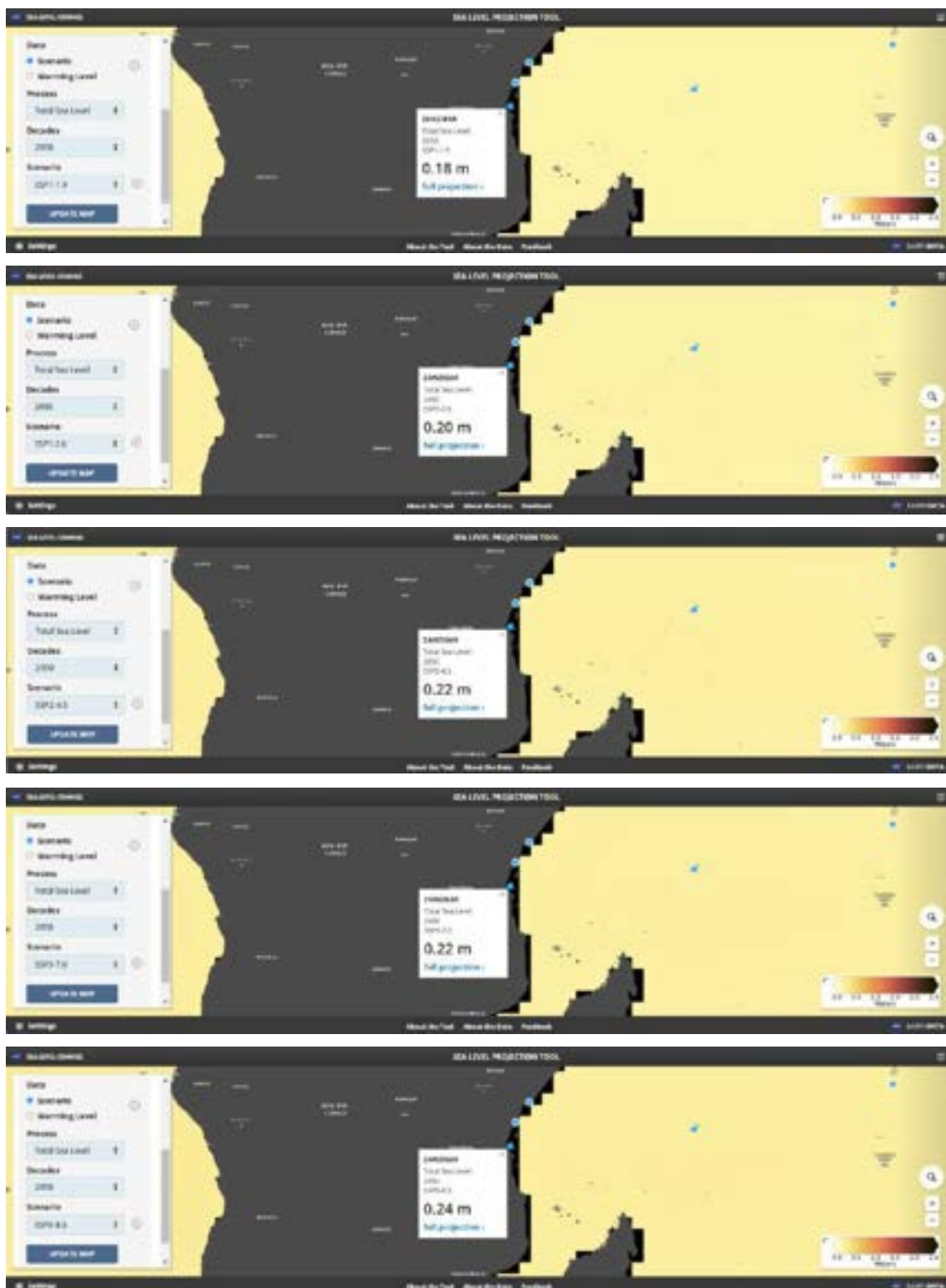
8 - Durban (2050):



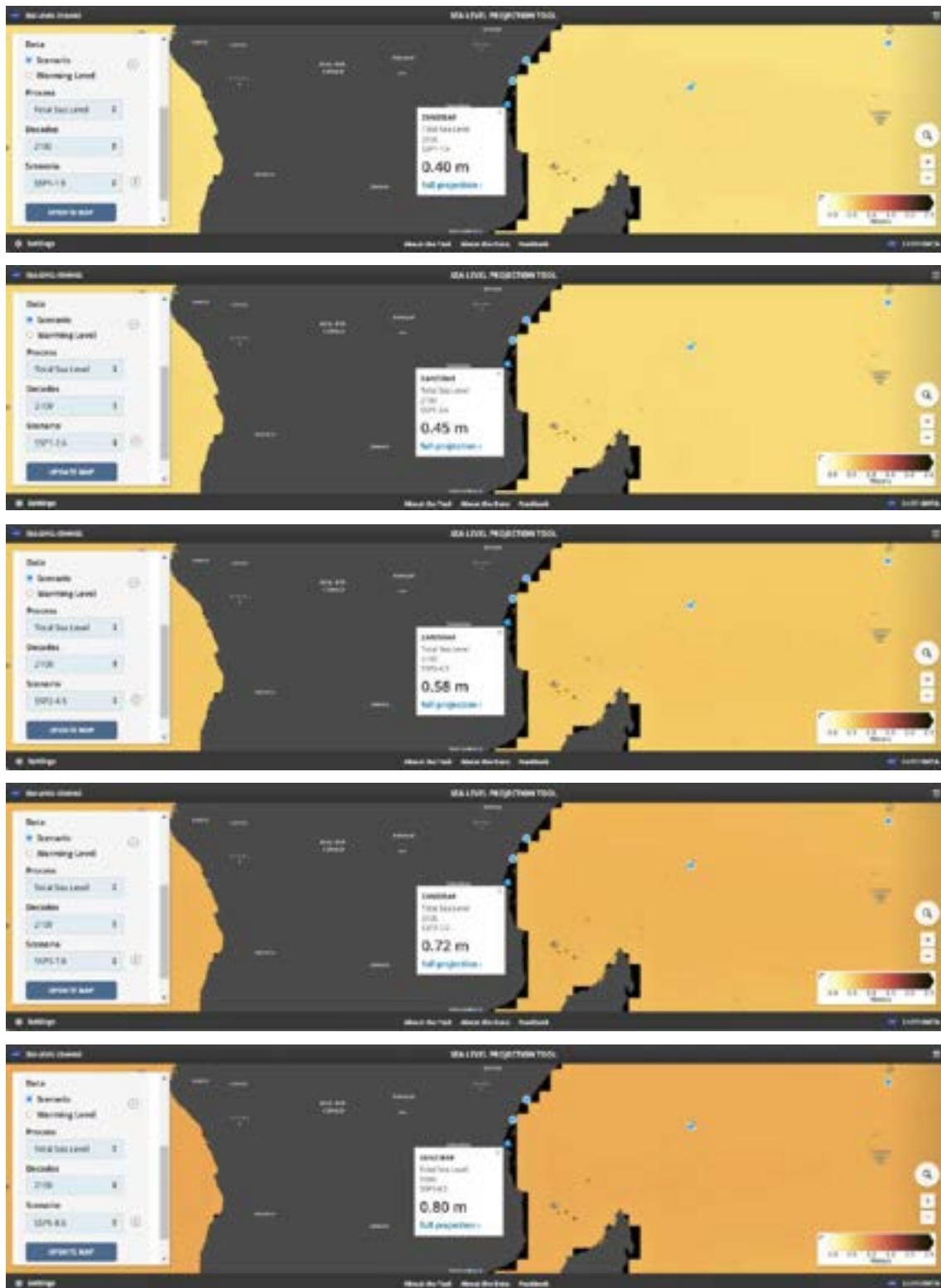
8 - Durban (2100):



9 – Dar es Salaam (2050):



9 – Dar es Salaam (2100):



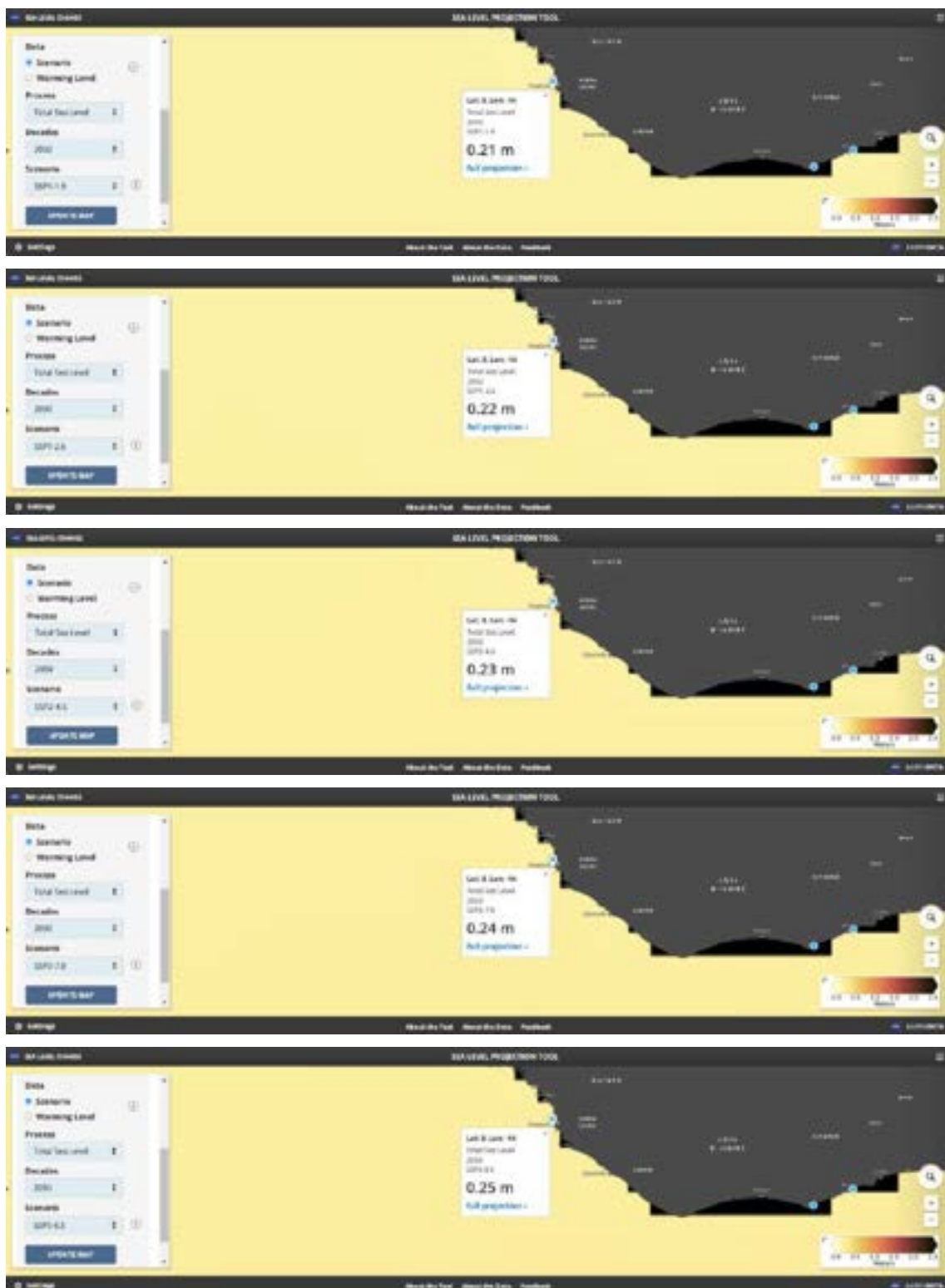
10 – Dakar (2050):



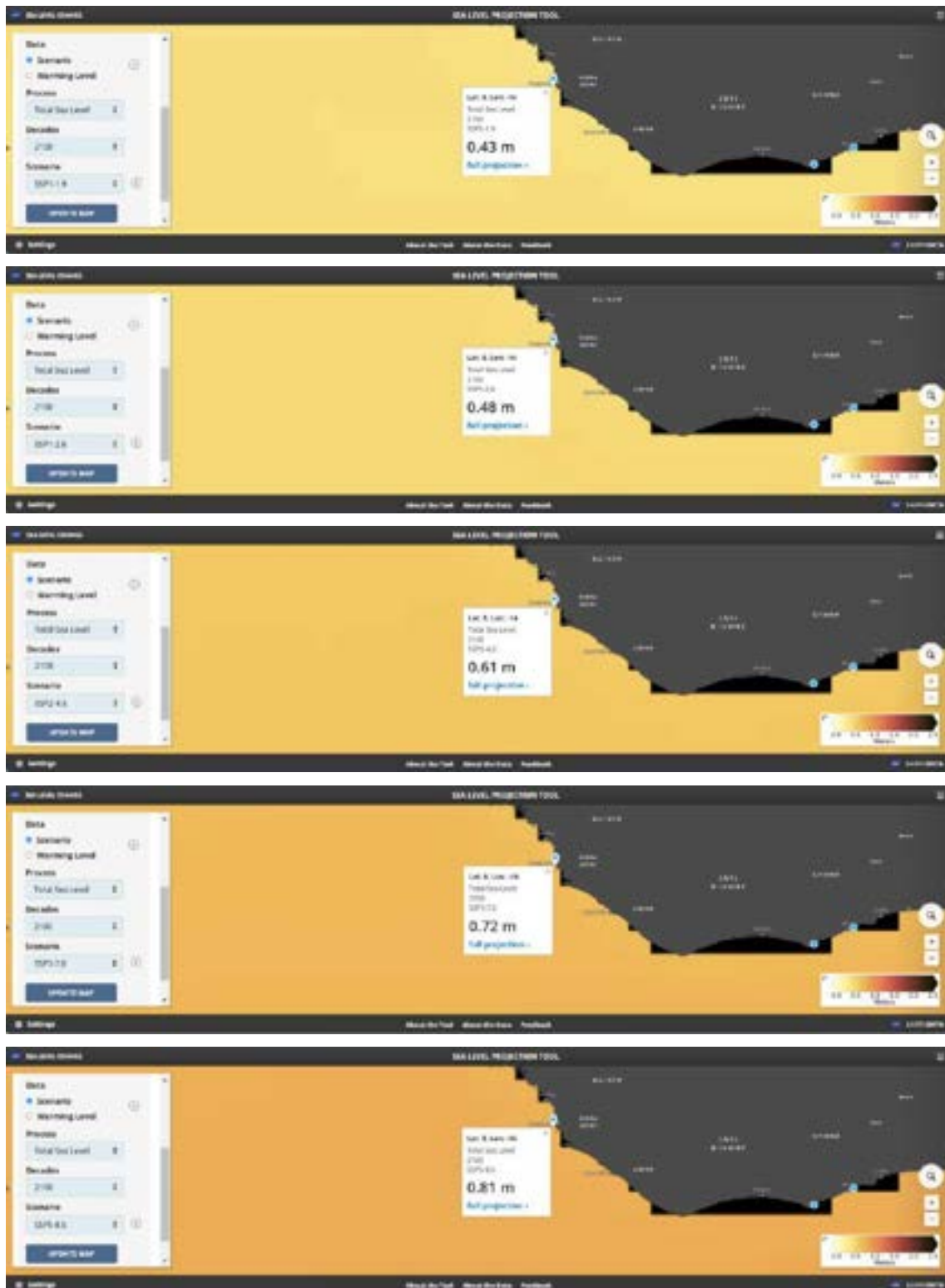
10 – Dakar (2100):



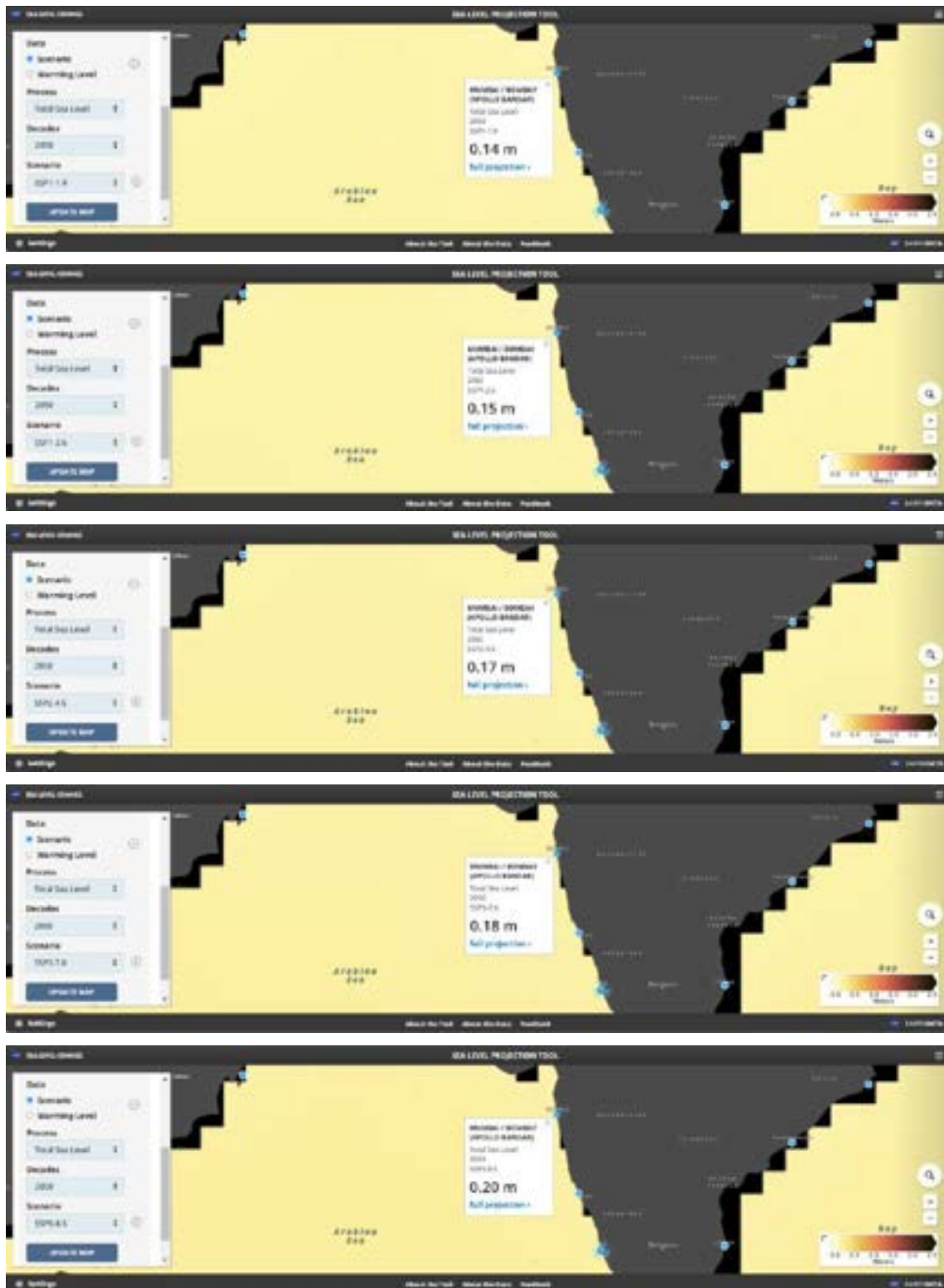
11 – Freetown (2050):



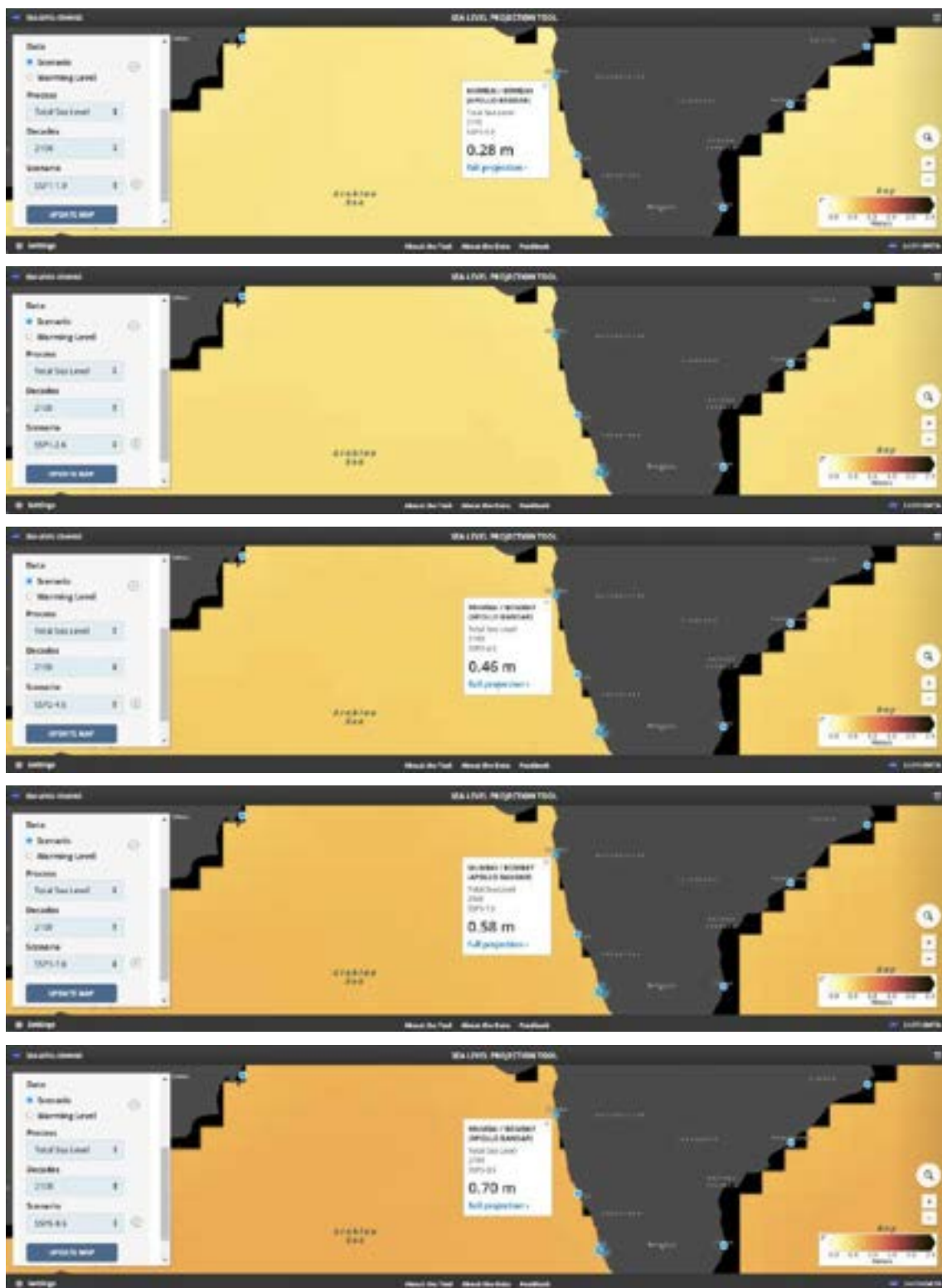
11 – Freetown (2100):



12 – Mumbai (2050):



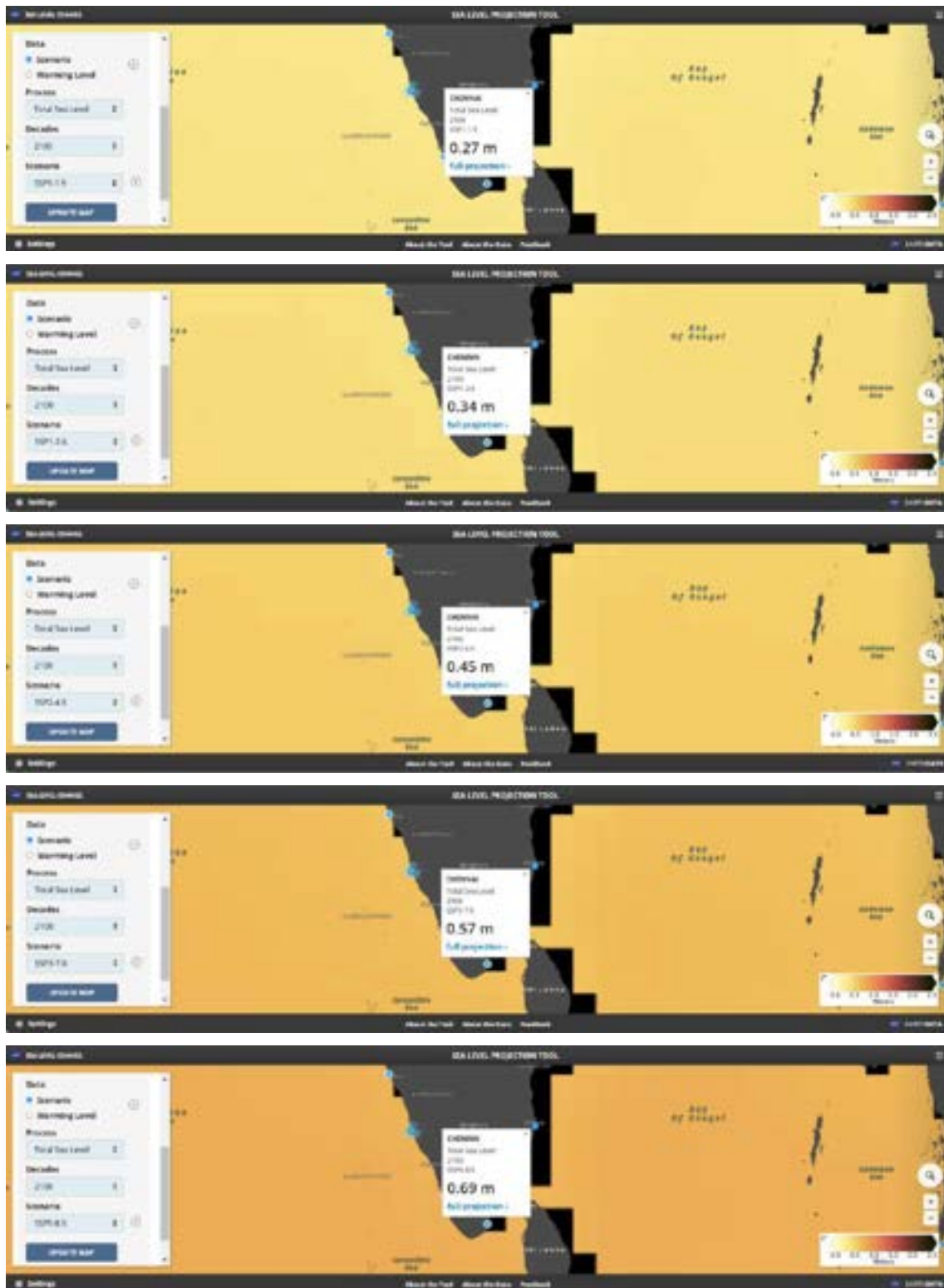
12 – Mumbai (2100):



13 – Chennai (2050):



13 – Chennai (2100):



APÊNDICE 2: Mapeamento das Áreas Alagáveis

Foram realizados os mapeamentos das áreas projetadas para ficarem abaixo do nível do mar a partir da ferramenta de triagem de risco costeiro para as seguintes cidades:

1. Auckland;
2. Copenhague;
3. Nova York;
4. Salvador;
5. Freetown;
6. Mumbai.

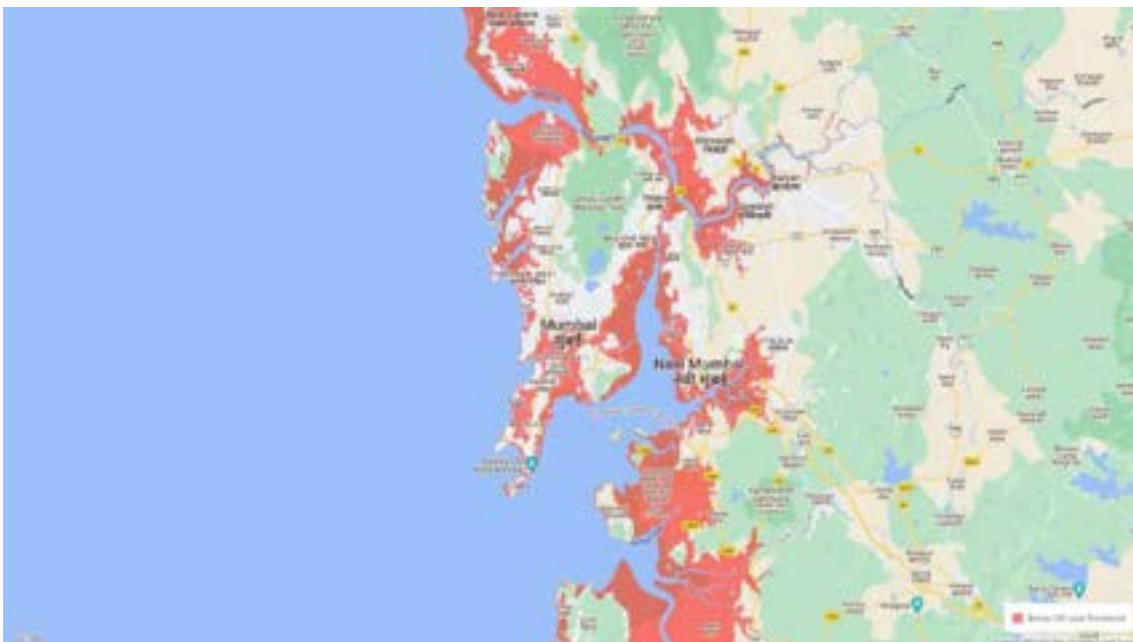
1 – Auckland (2050):**1 – Auckland (2100):**

2 – Copenhagen (2050):**2 – Copenhagen (2100):**

3 – Nova York (2050):**3 – Nova York (2100):**

4 – Salvador (2050):**4 – Salvador (2100):**

5 – Freetown (2050):**5 – Freetown (2100):**

6 – Mumbai (2050):**6 – Mumbai (2010):**

APÊNDICE 3: Mapeamento das LCZ

Foram realizados os mapeamentos das LCZ para as seguintes cidades:

1. Auckland;
2. Copenhague;
3. Nova York;
4. Salvador;
5. Freetown;
6. Mumbai.

1 – Auckland:



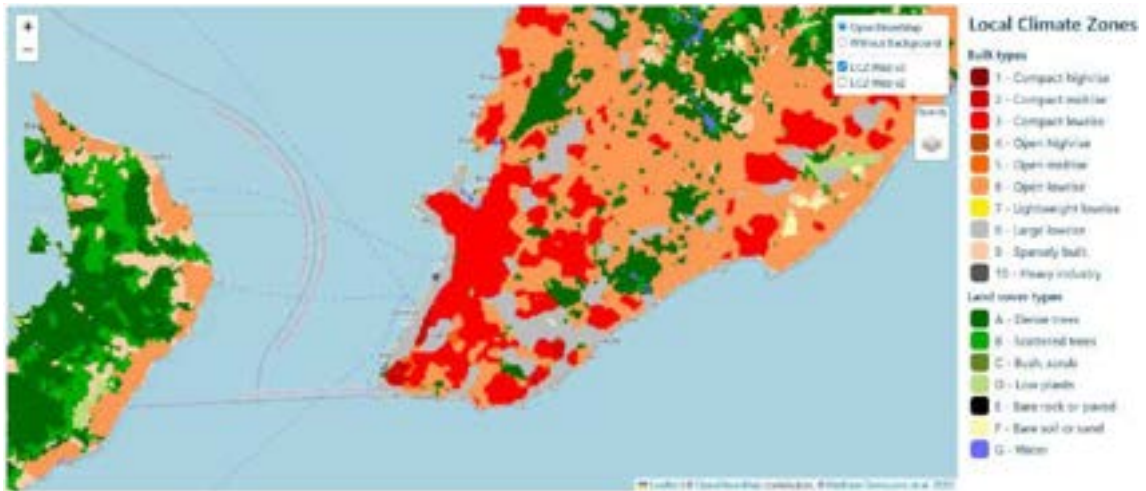
2 – Copenhagen:



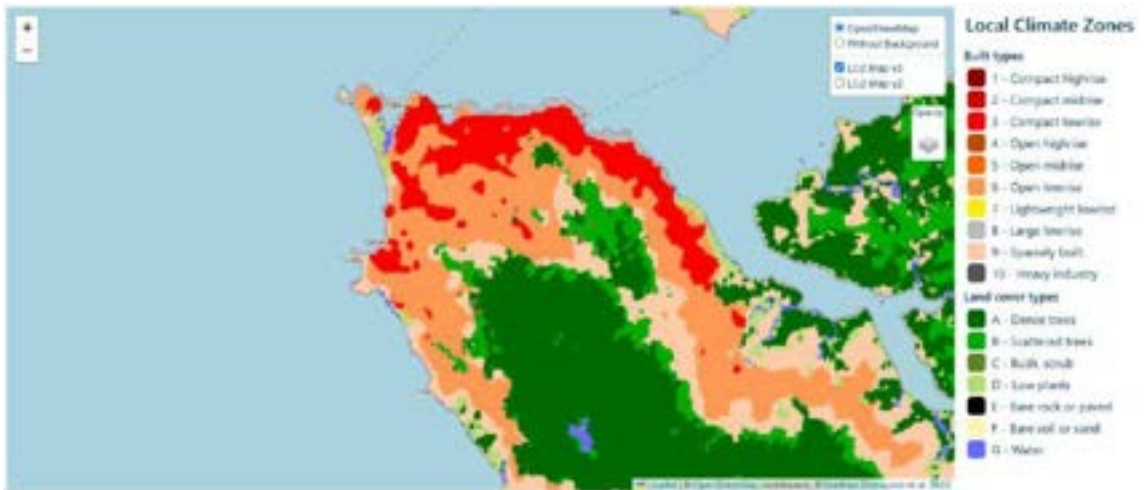
3 – Nova York:



4 – Salvador:



5 – Freetown:



6 – Mumbai:

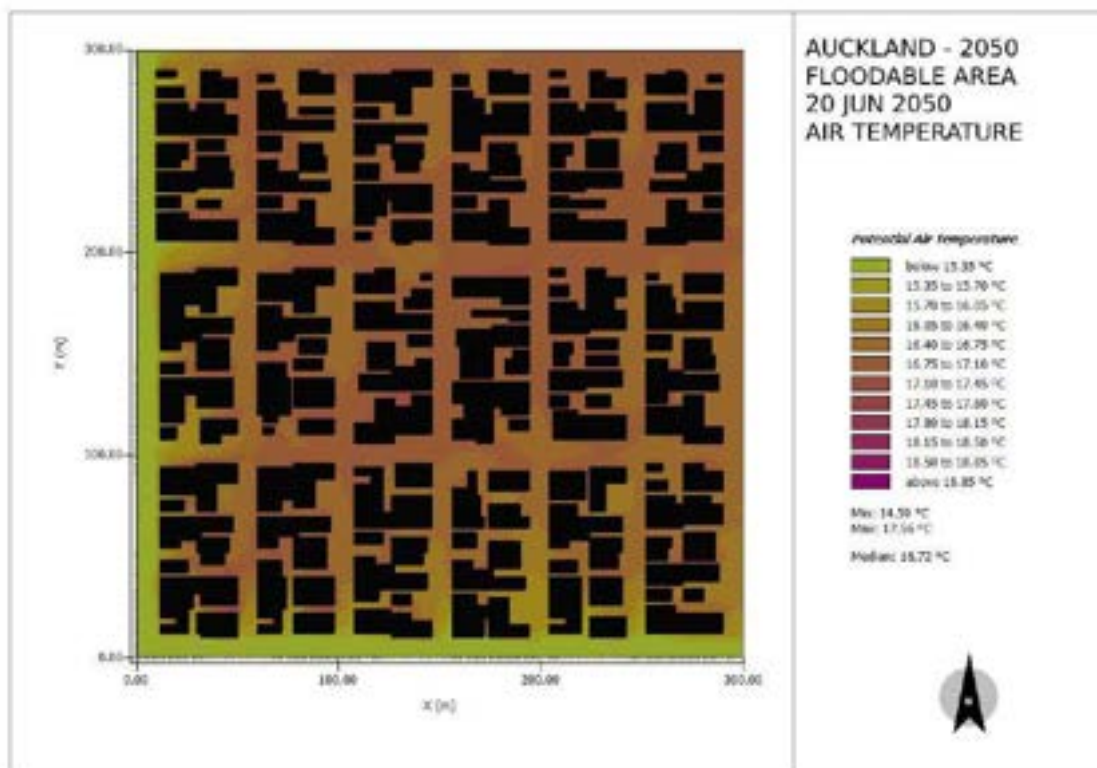
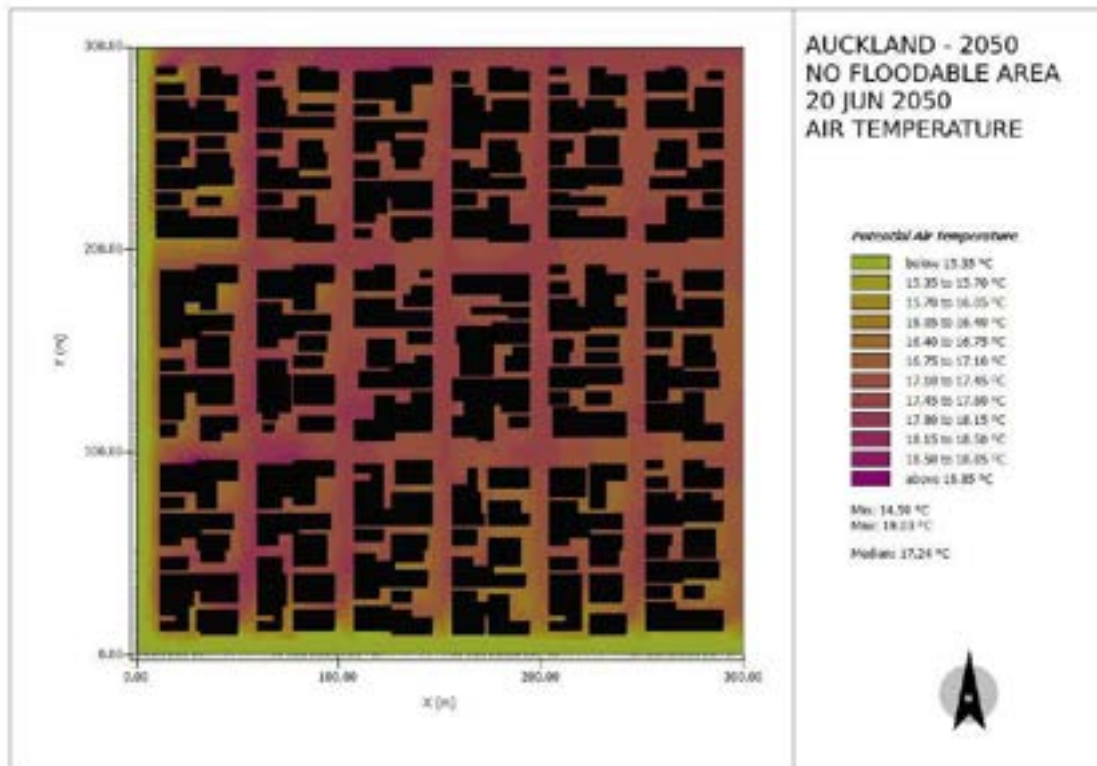


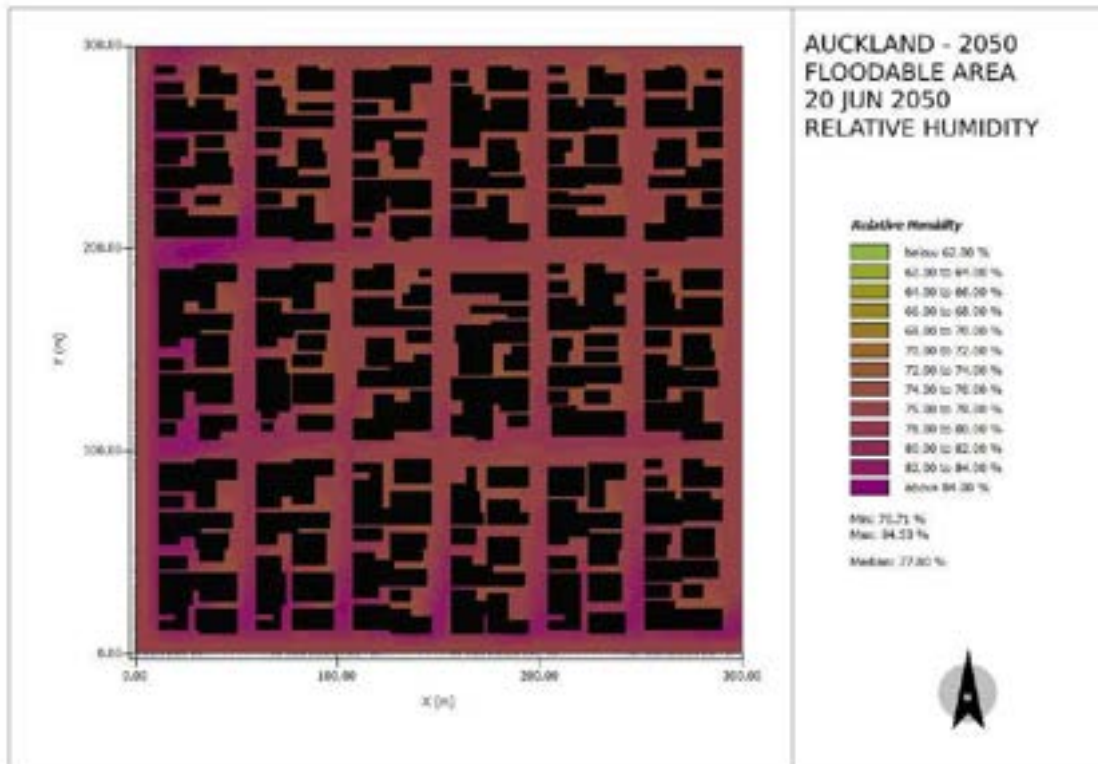
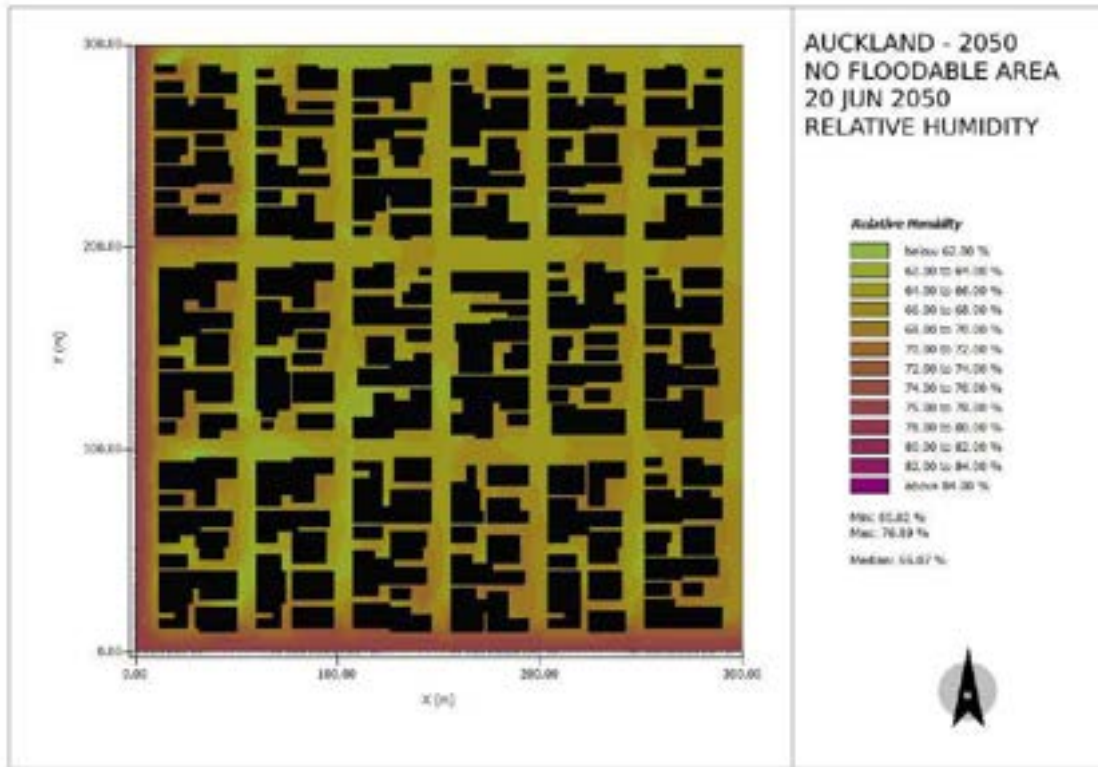
APÊNDICE 4: Resultados das Simulações

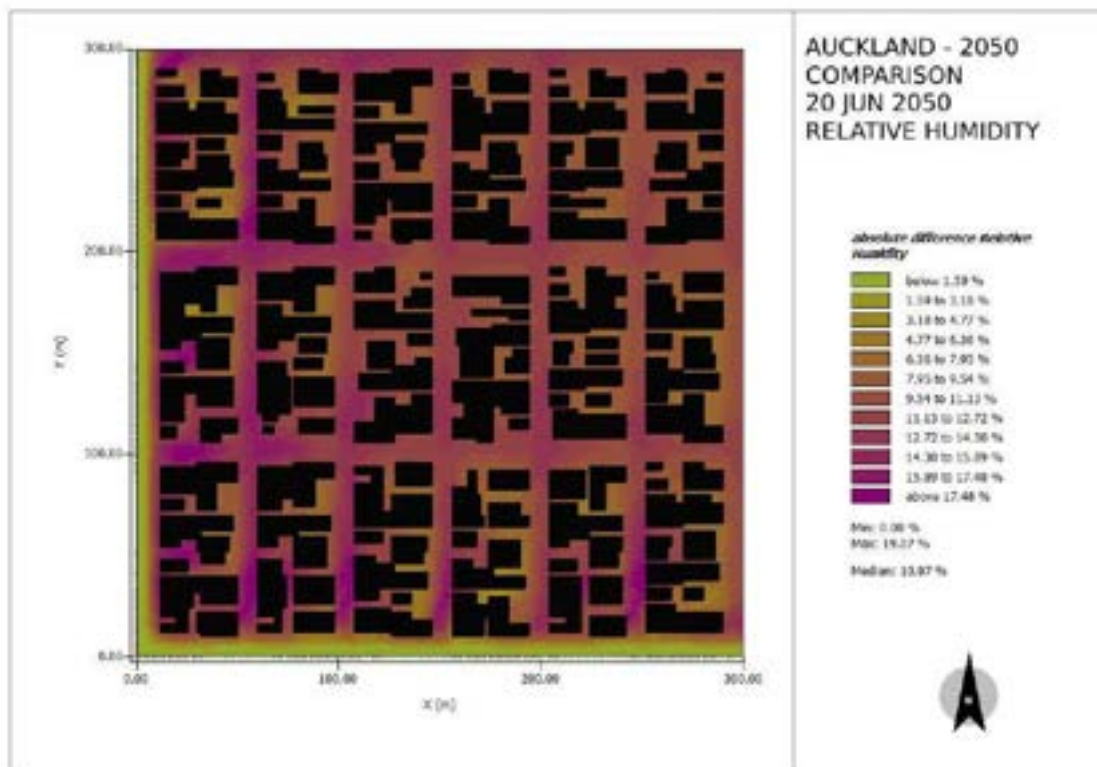
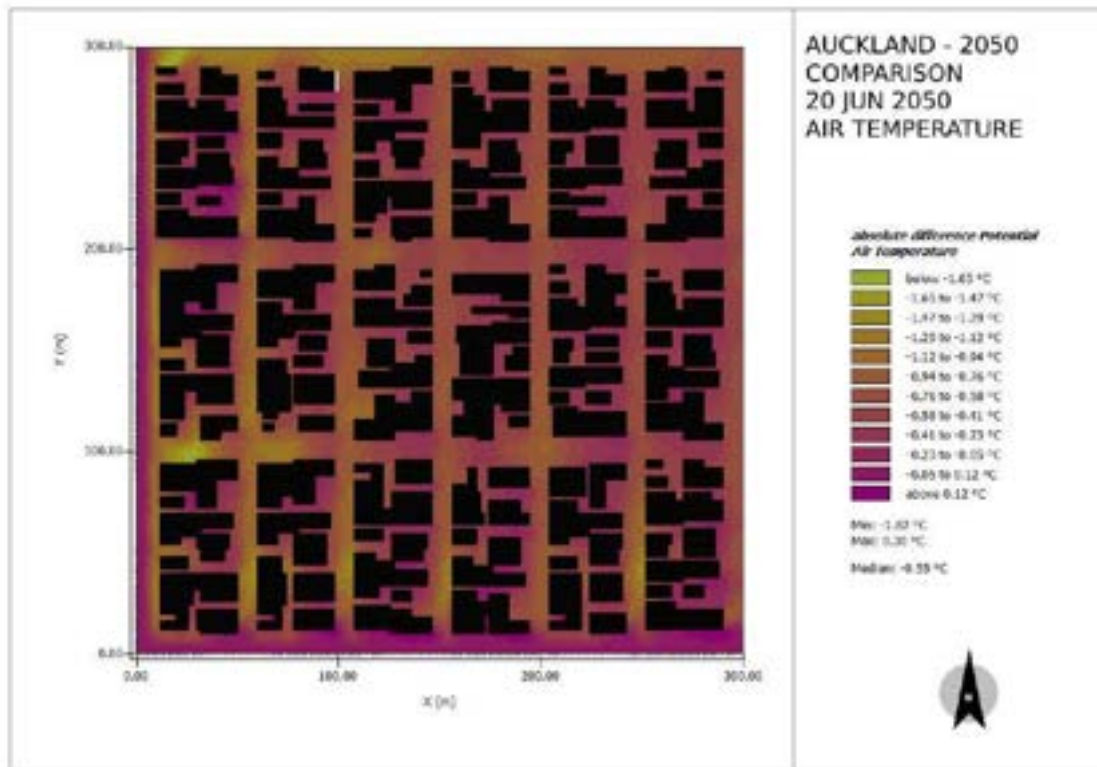
Os resultados das simulações estão representados para as seguintes cidades:

1. Auckland;
2. Copenhagen;
3. Nova York;
4. Salvador;
5. Freetown;
6. Mumbai.

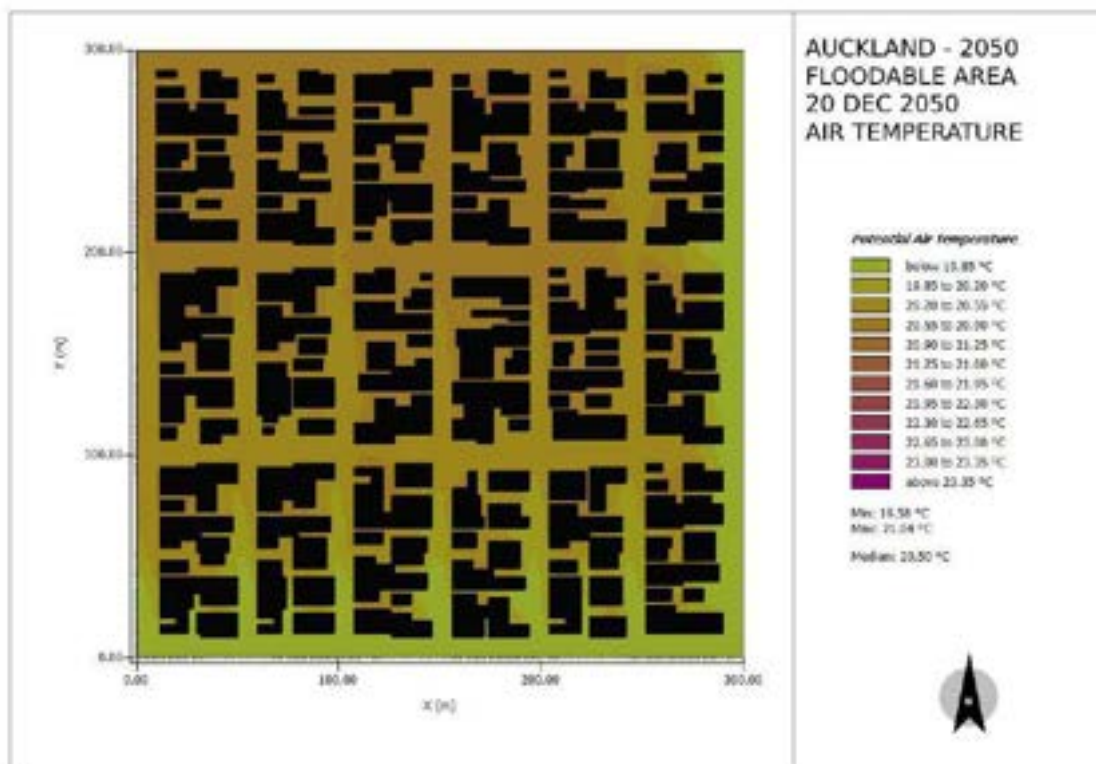
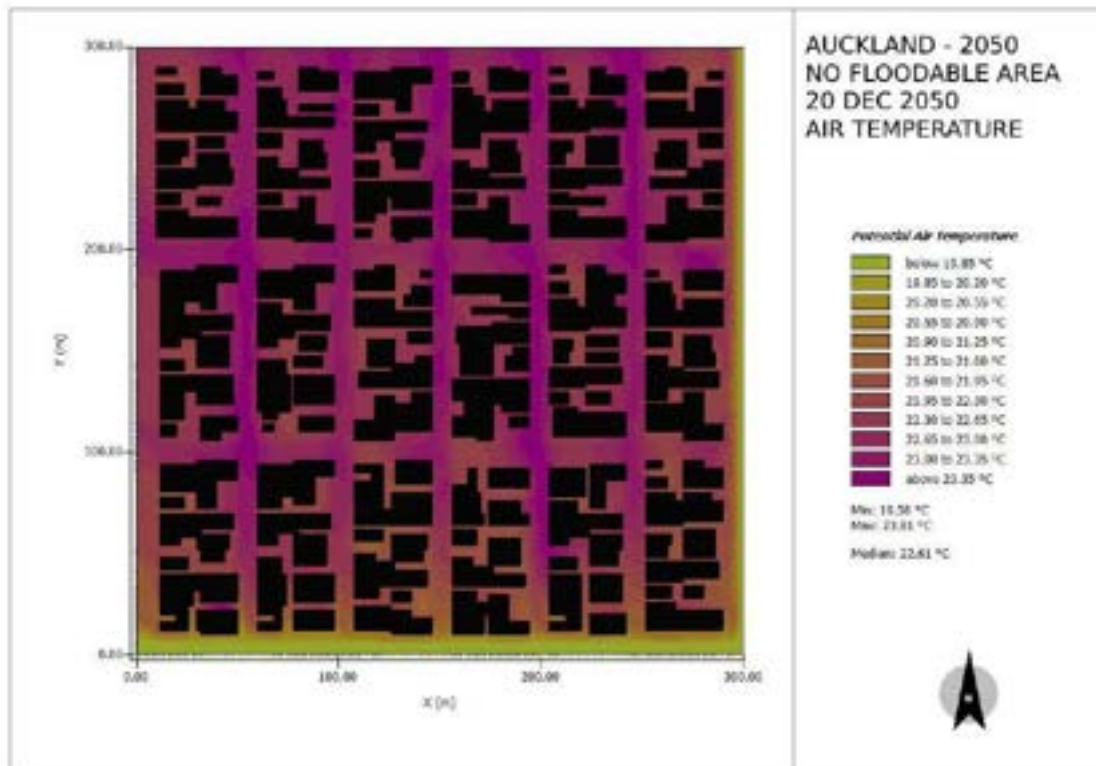
1 – Auckland (2050 – Inverno):

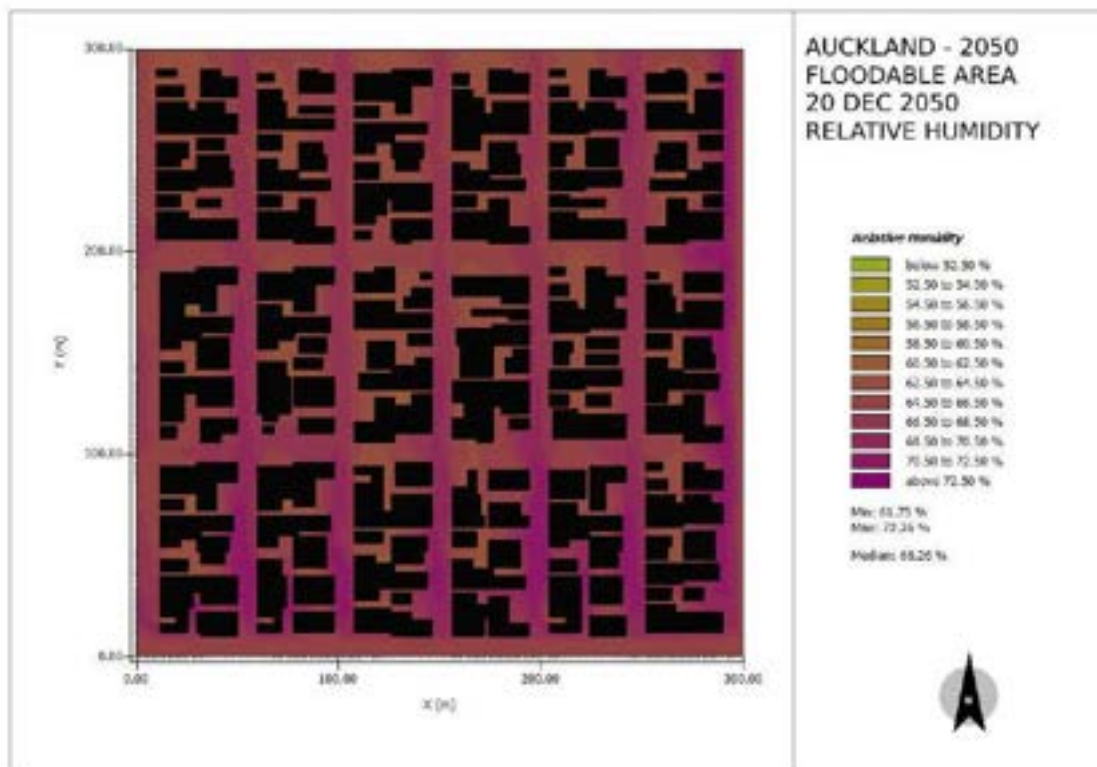
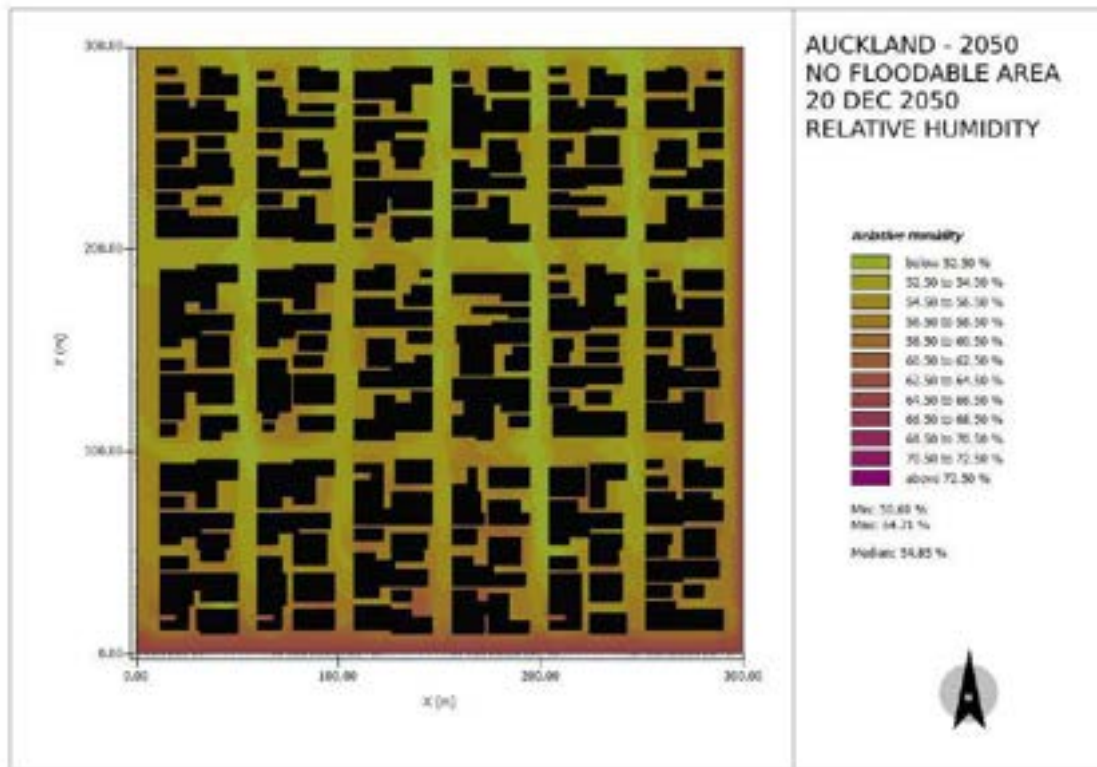


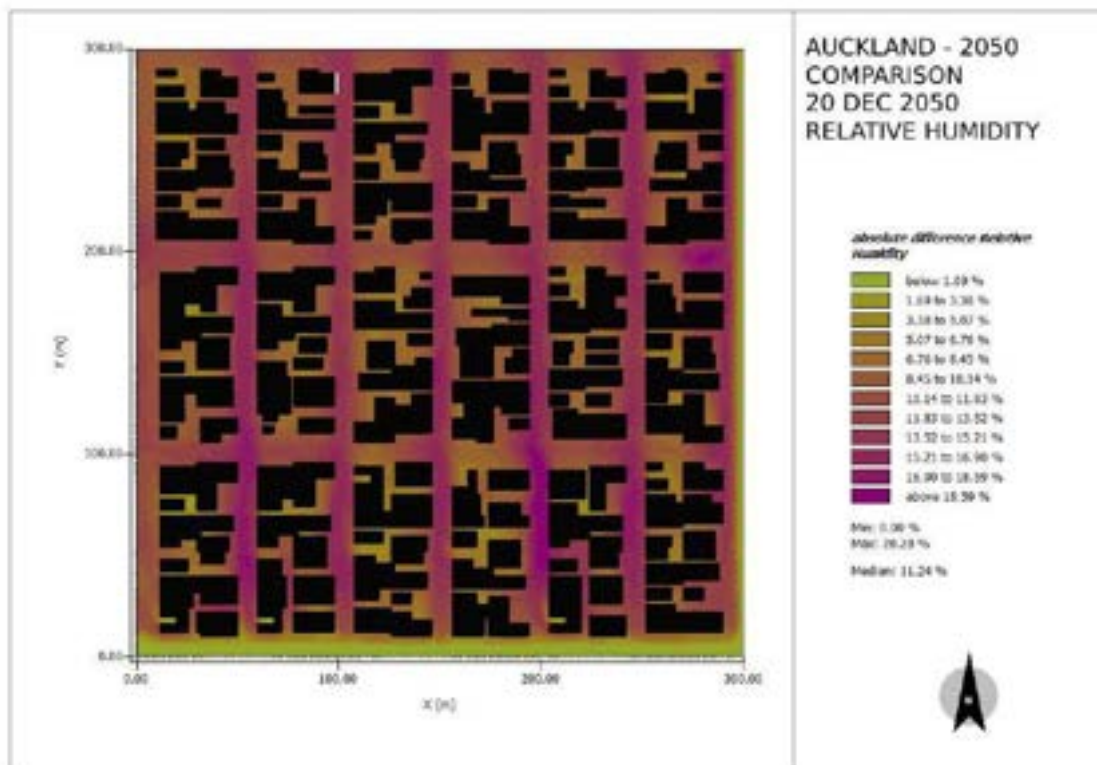
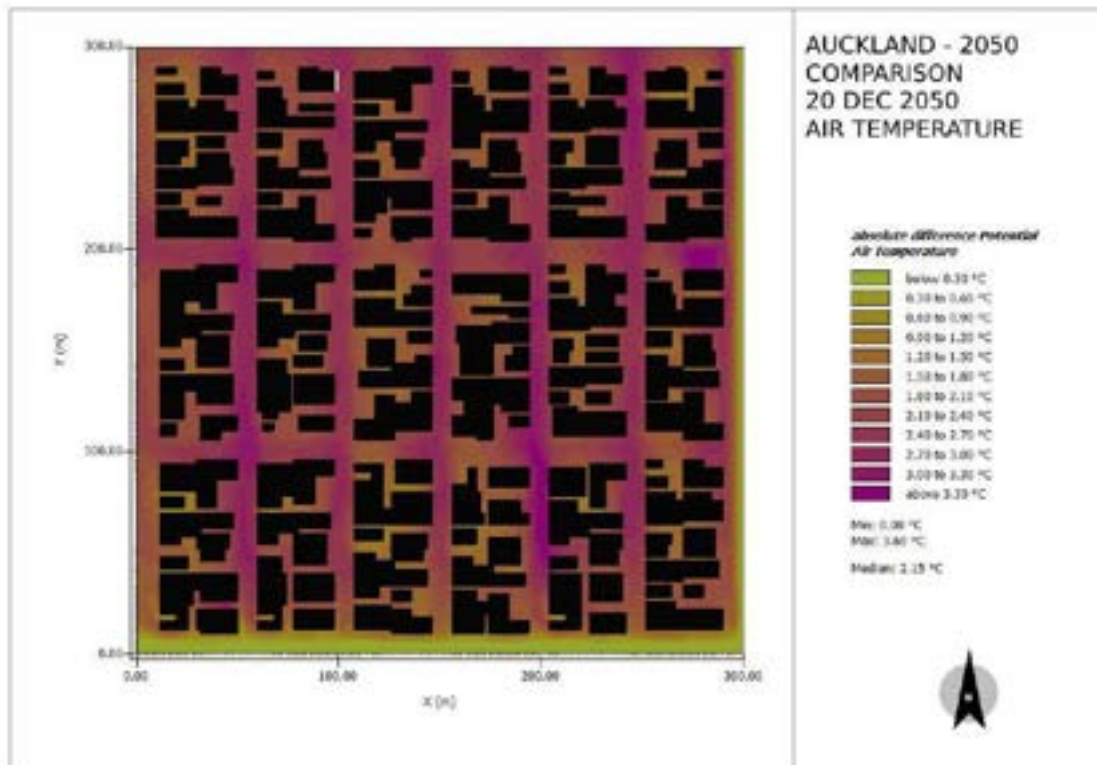




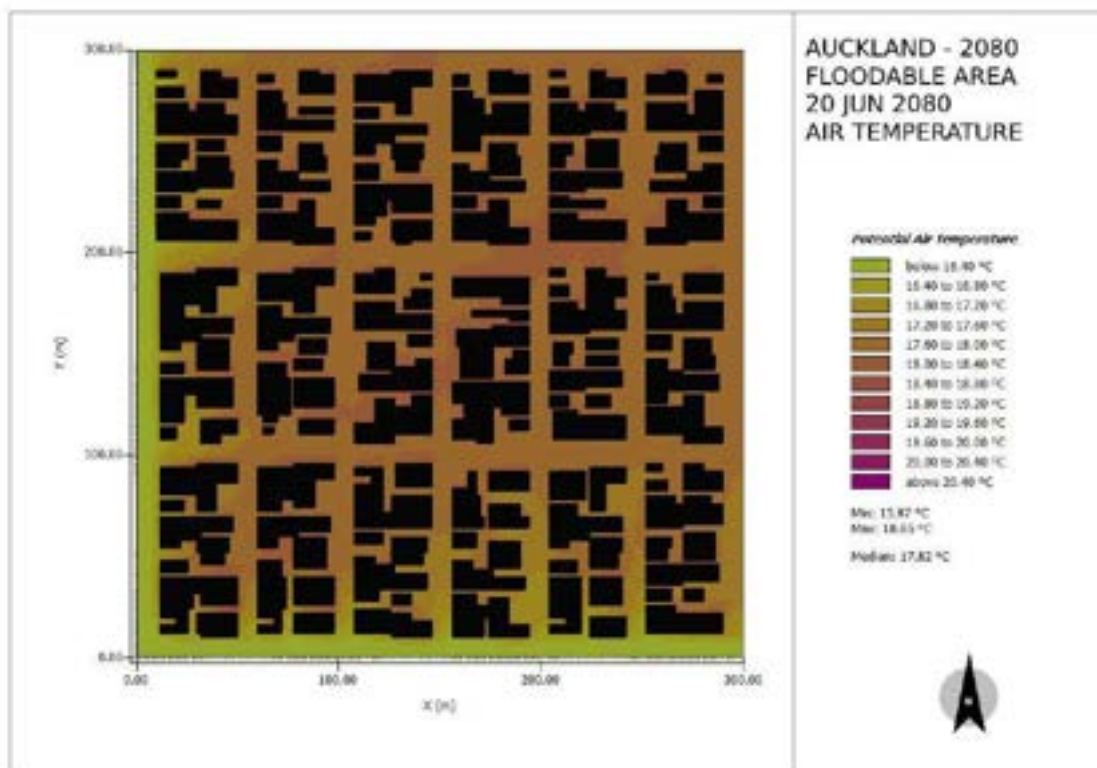
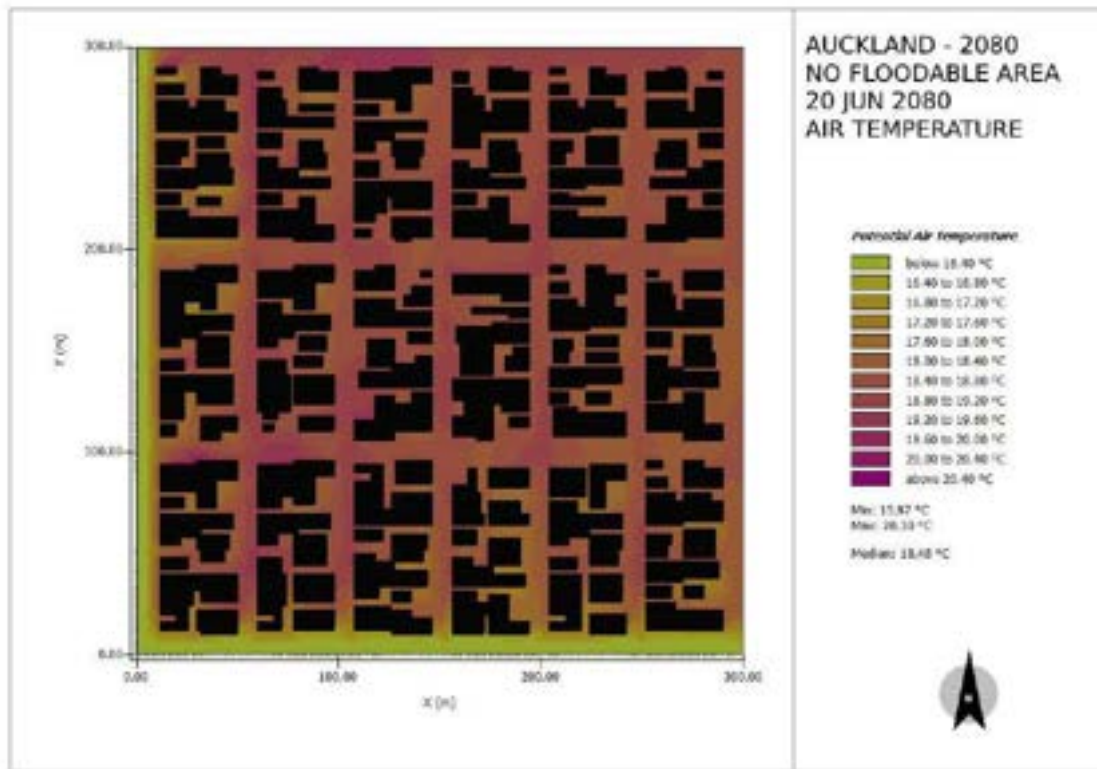
1 – Auckland (2050 – Verão):

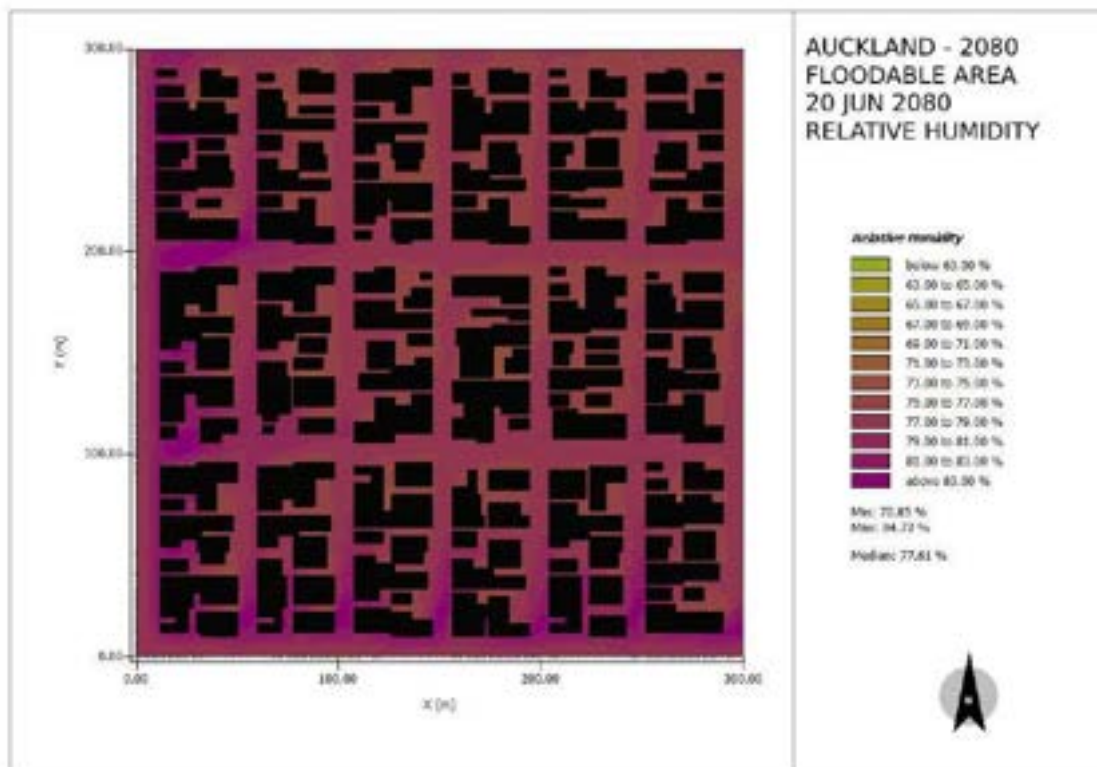
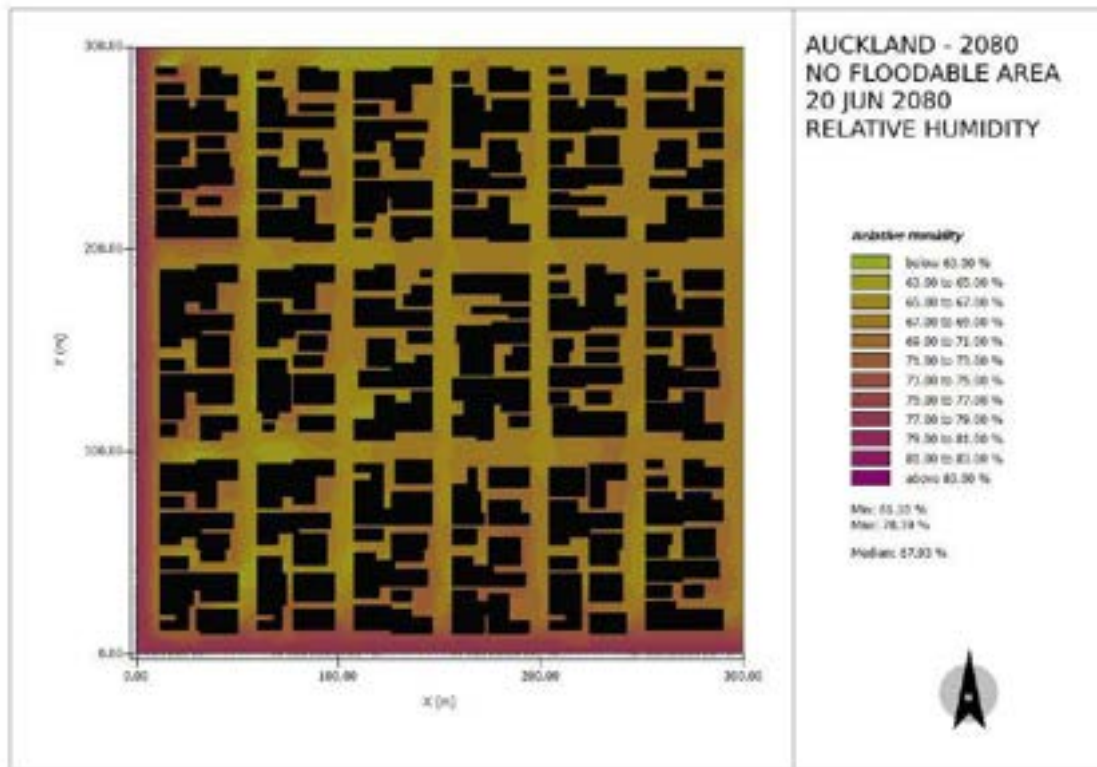


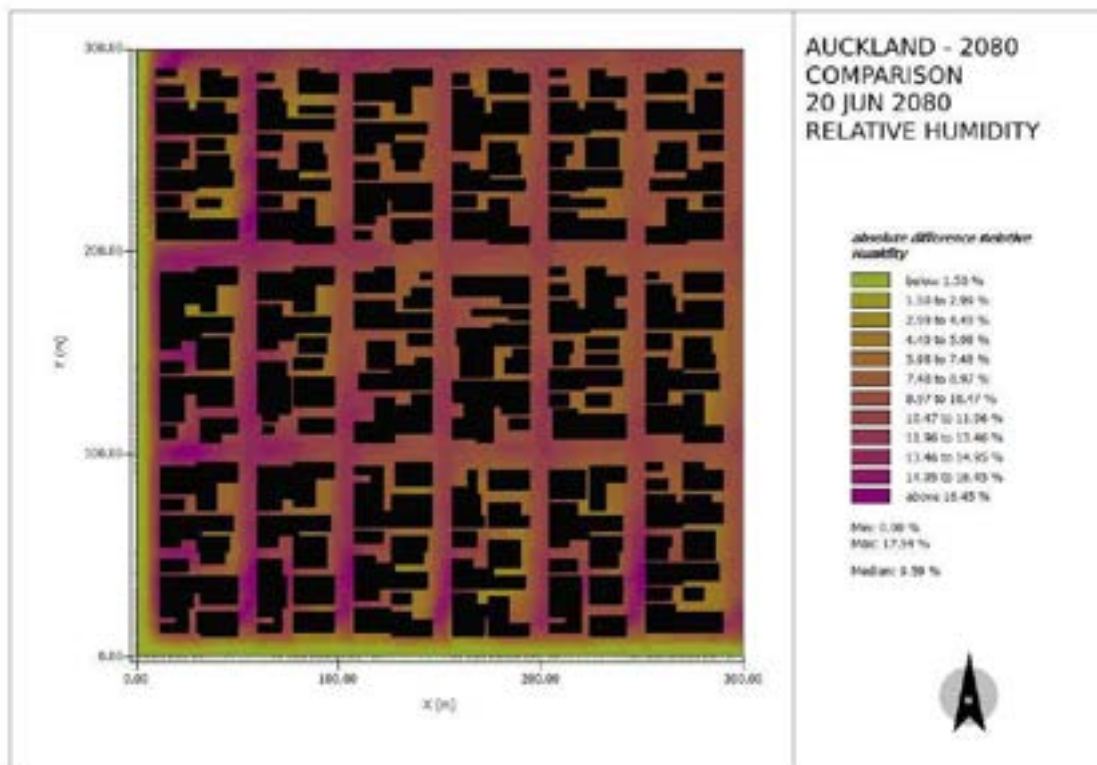
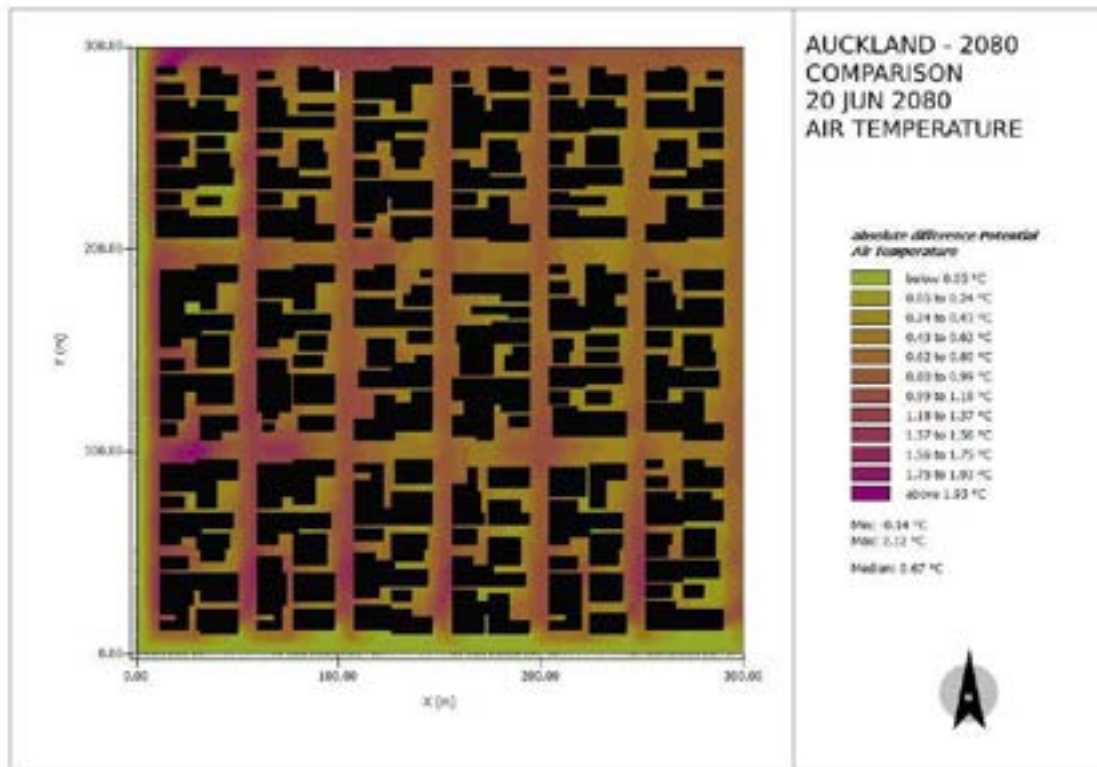




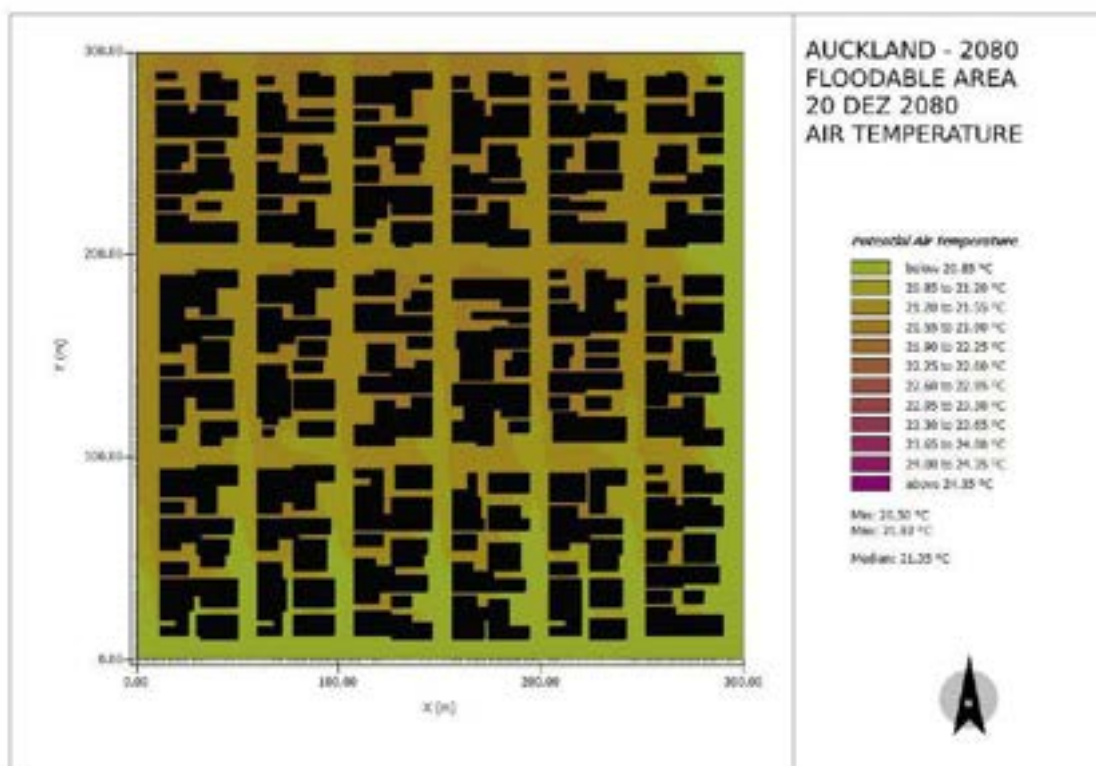
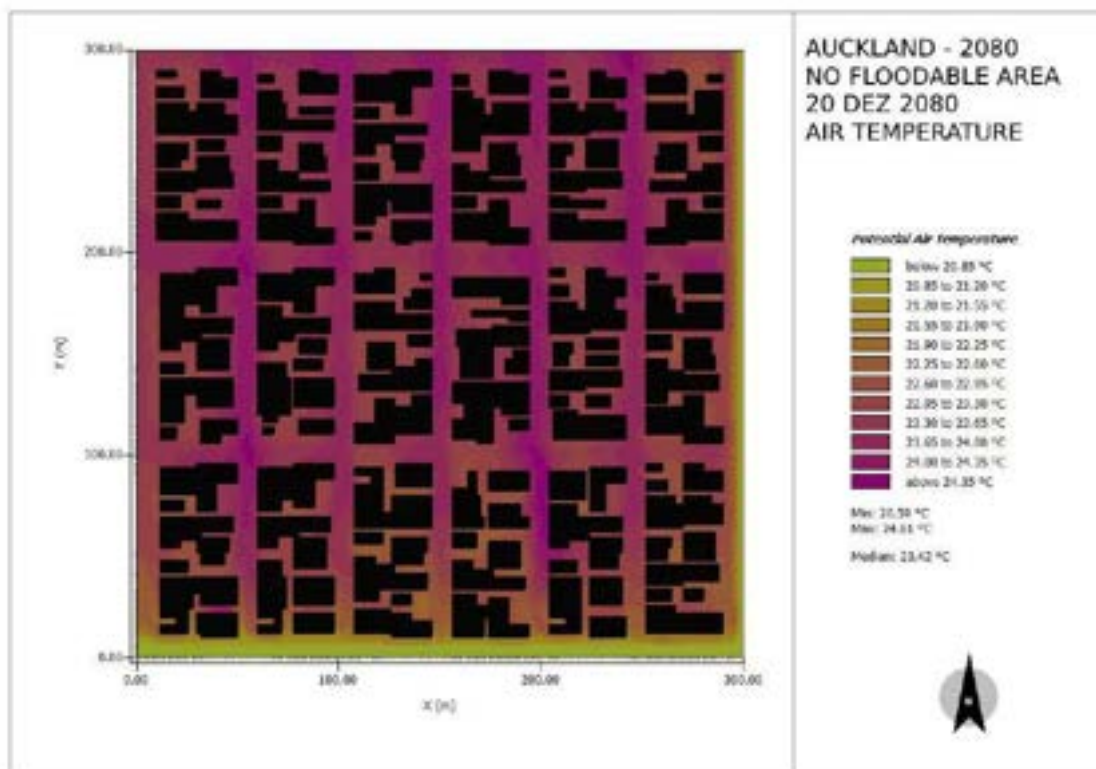
1 – Auckland (2080 – Inverno):

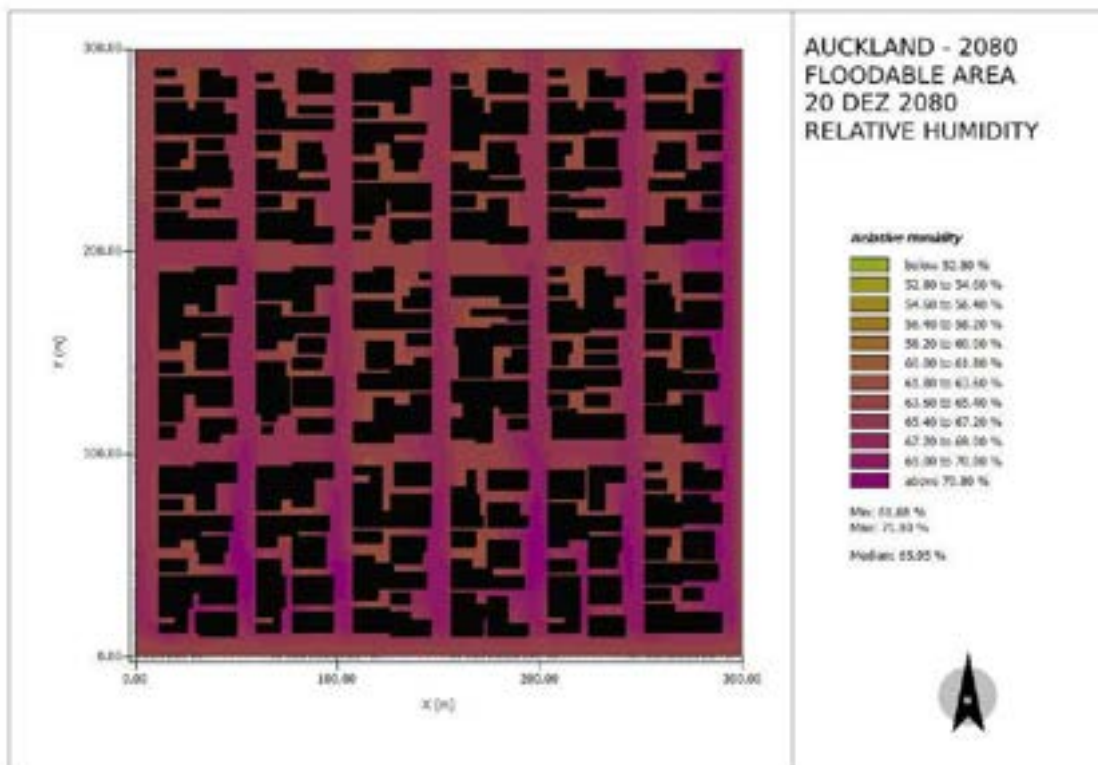
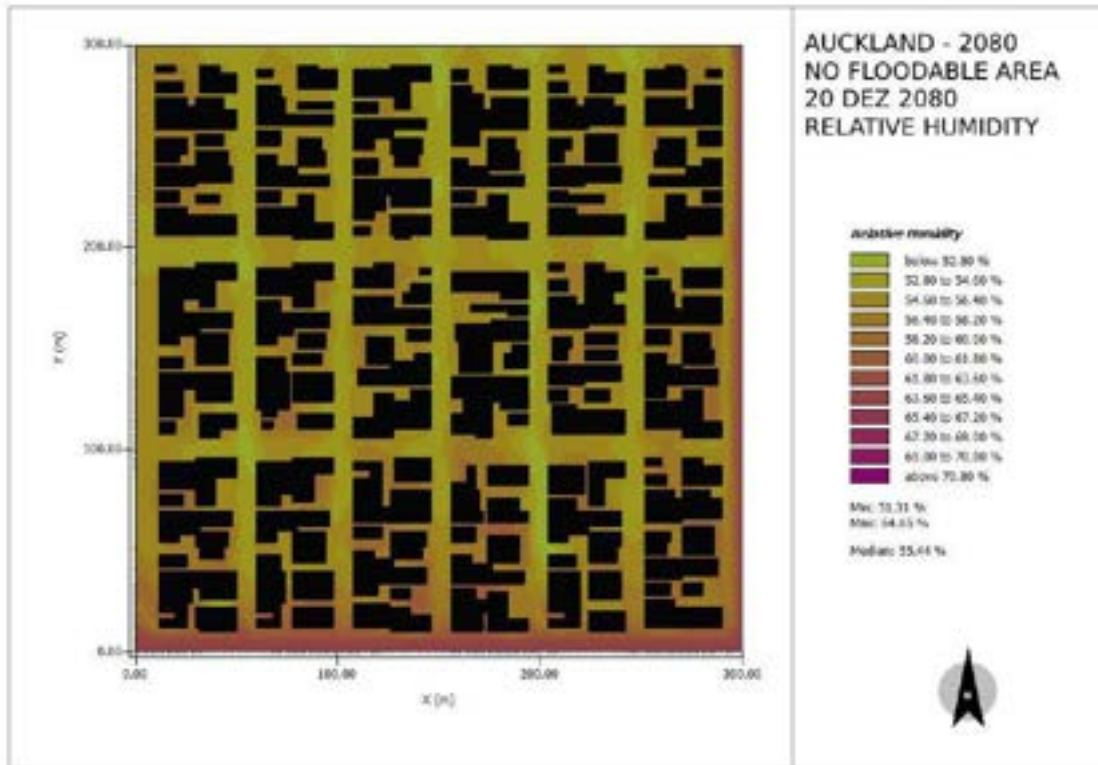


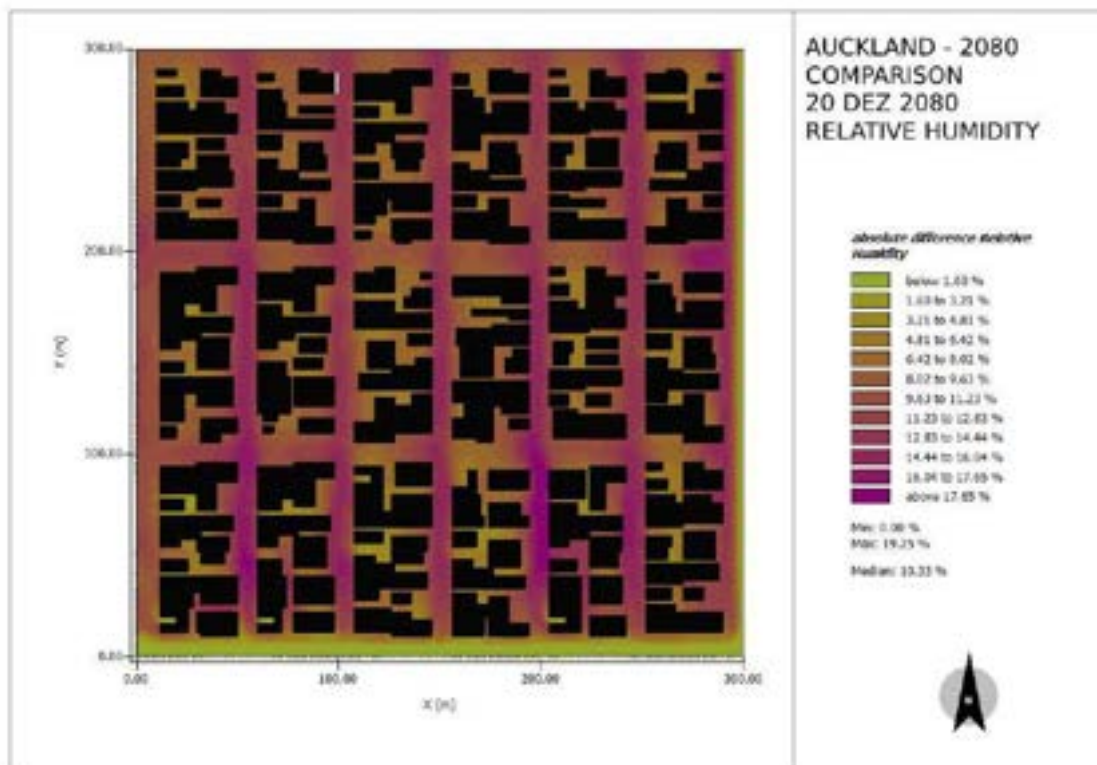
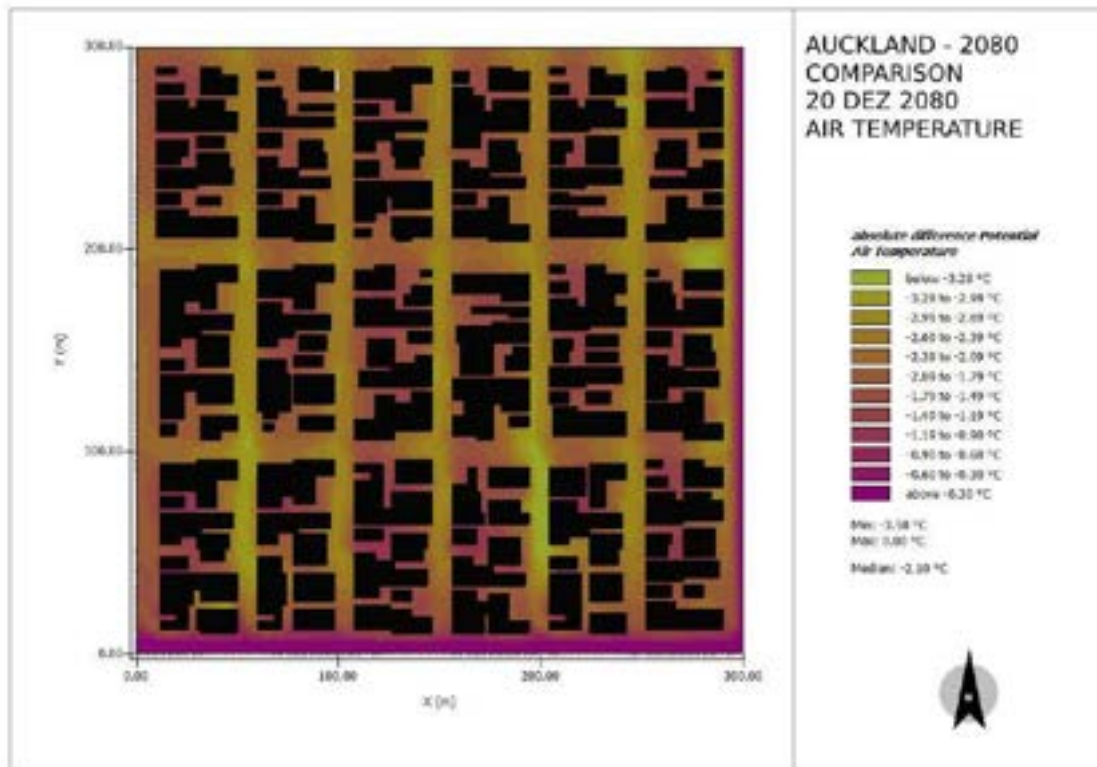




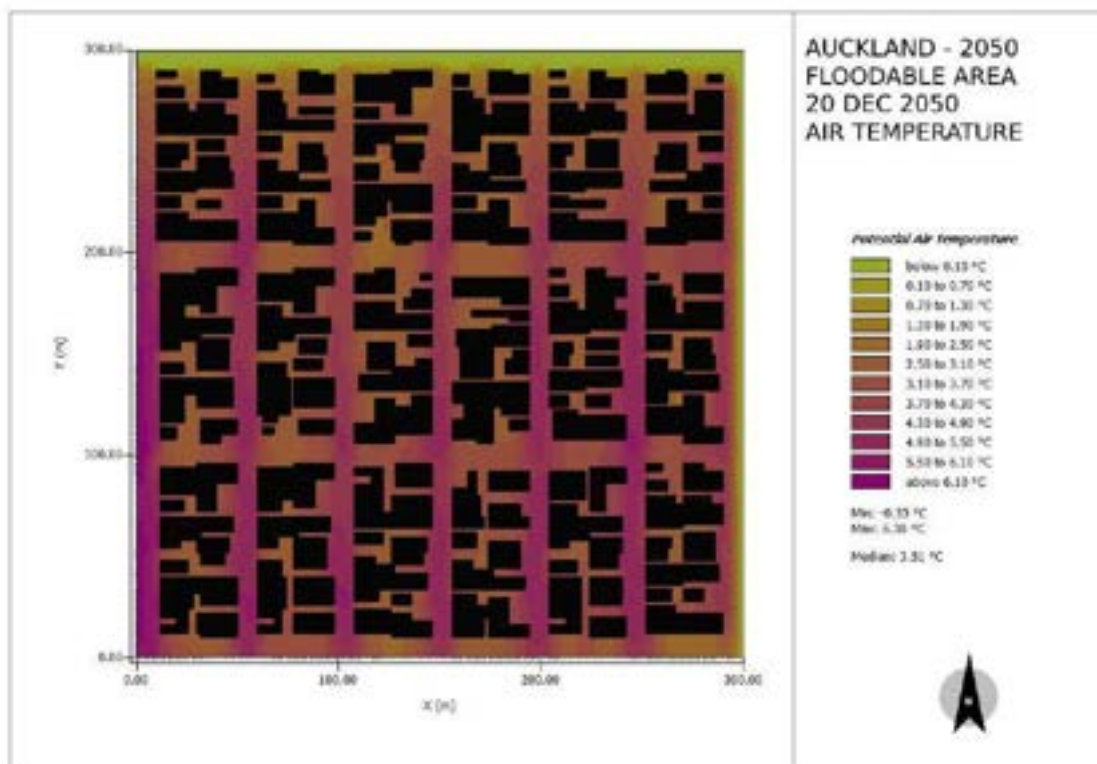
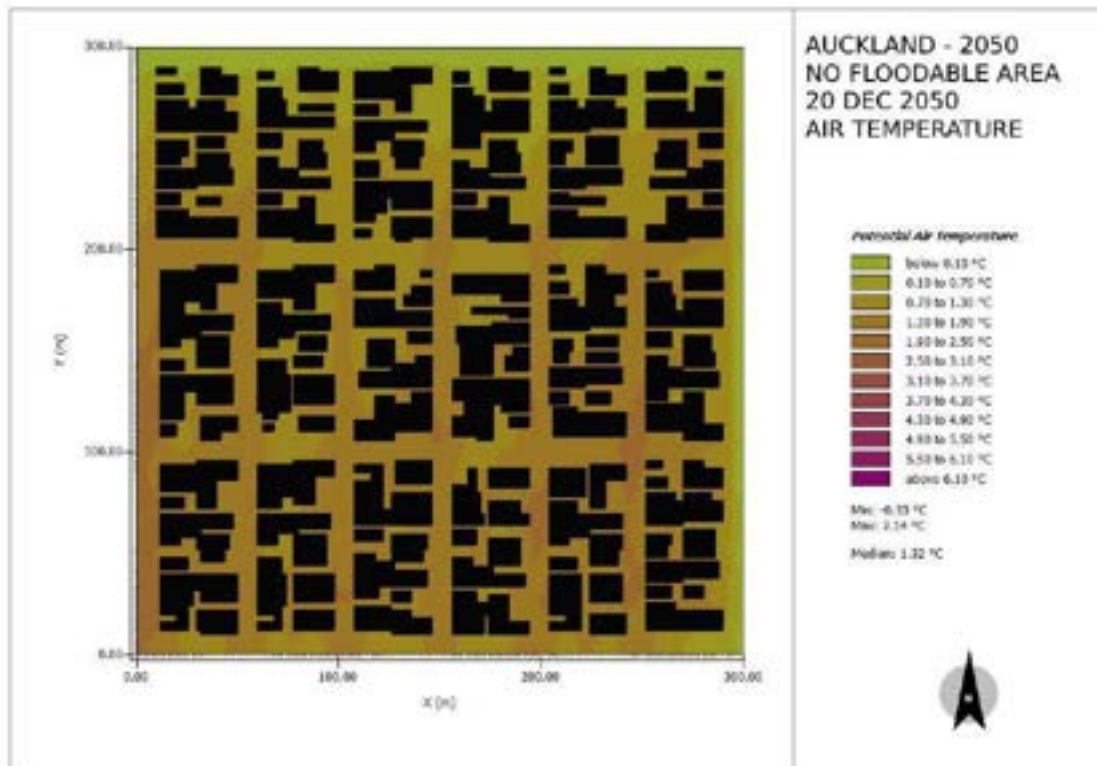
1 – Auckland (2080 – Verão):

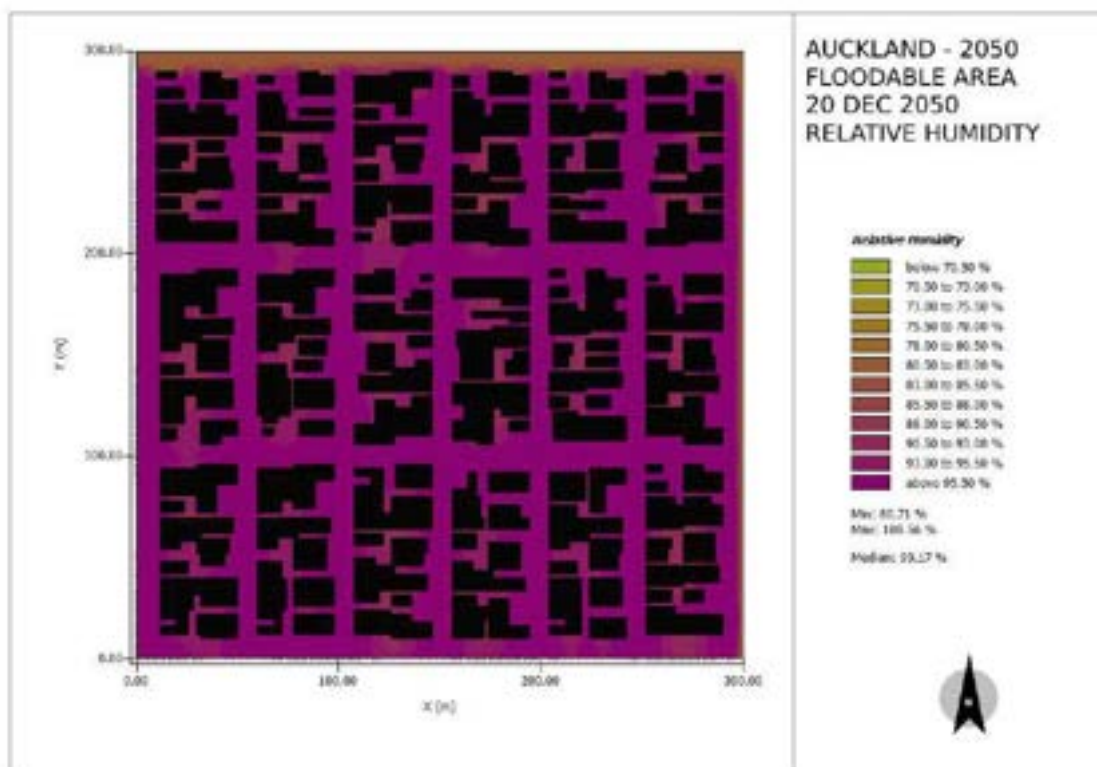
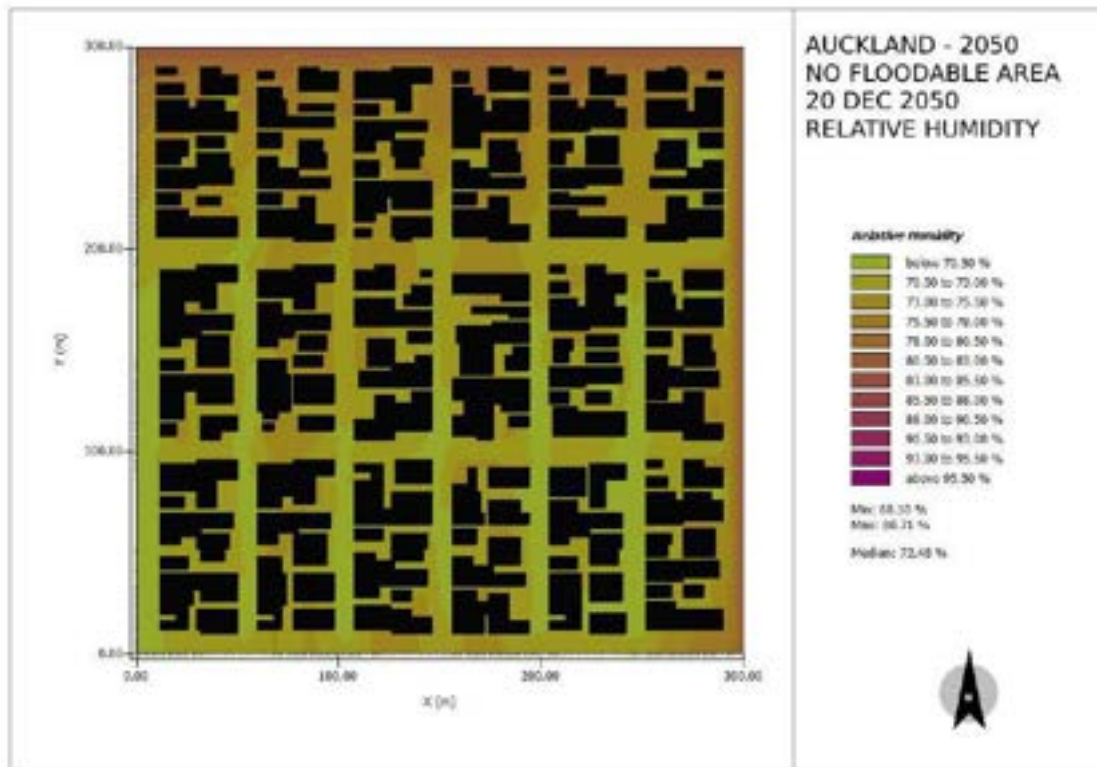


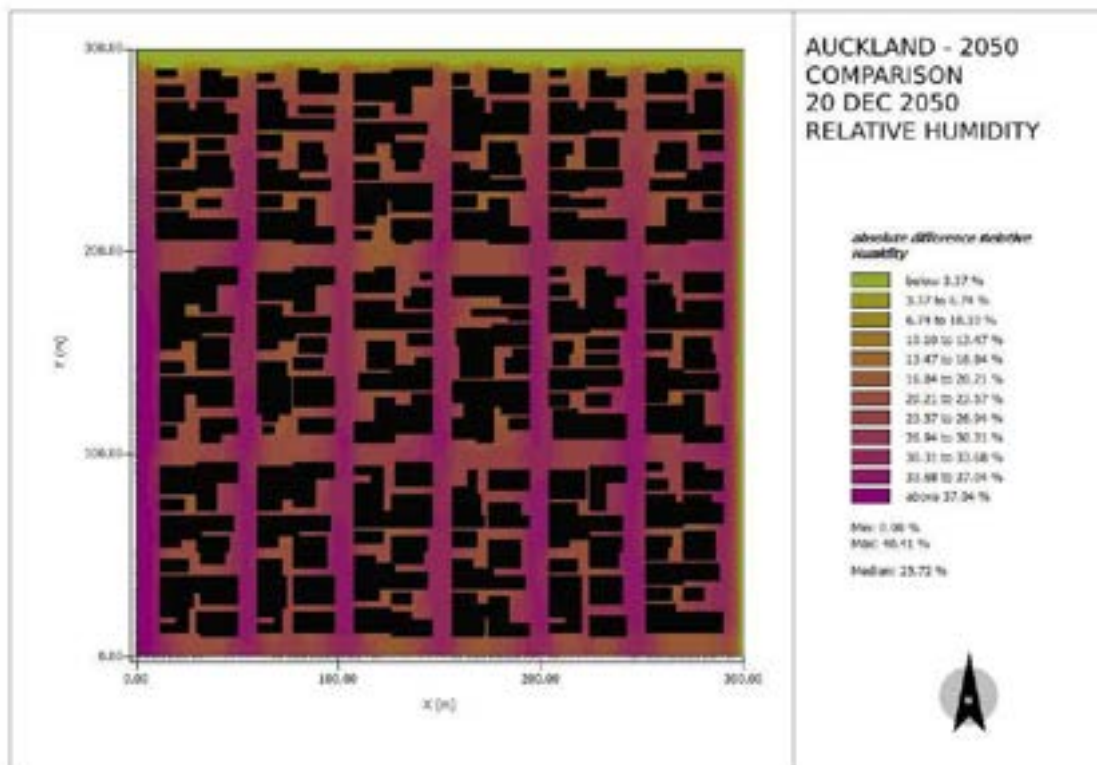
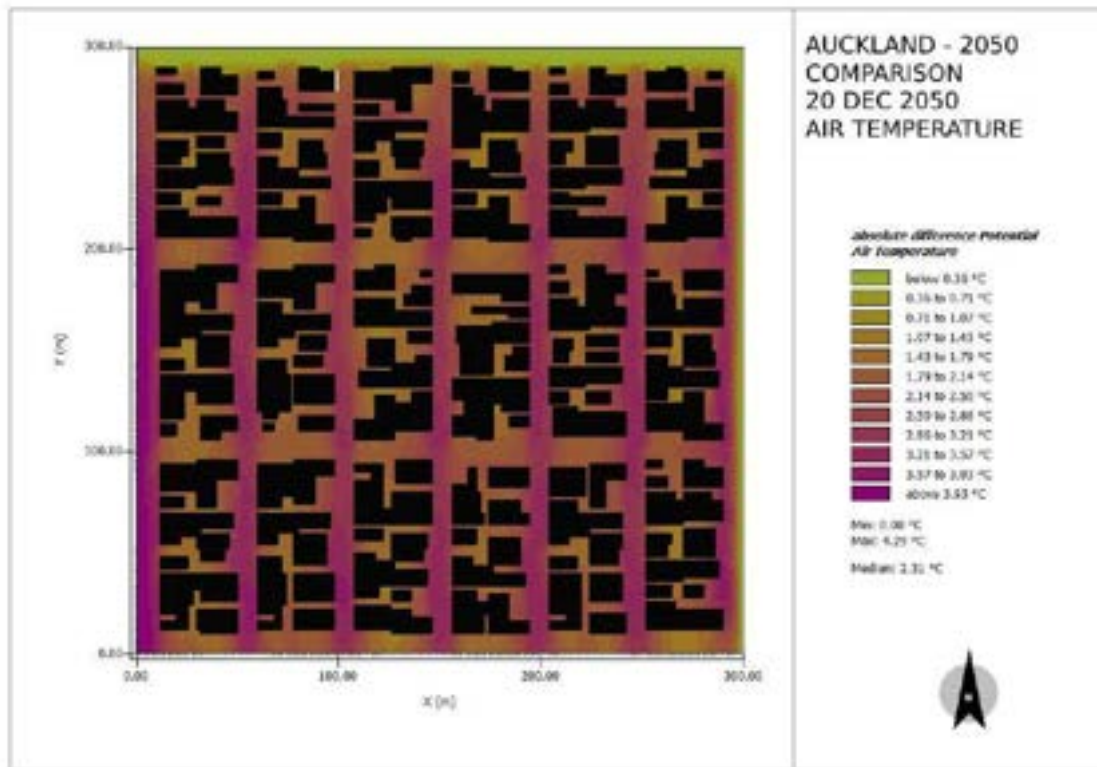




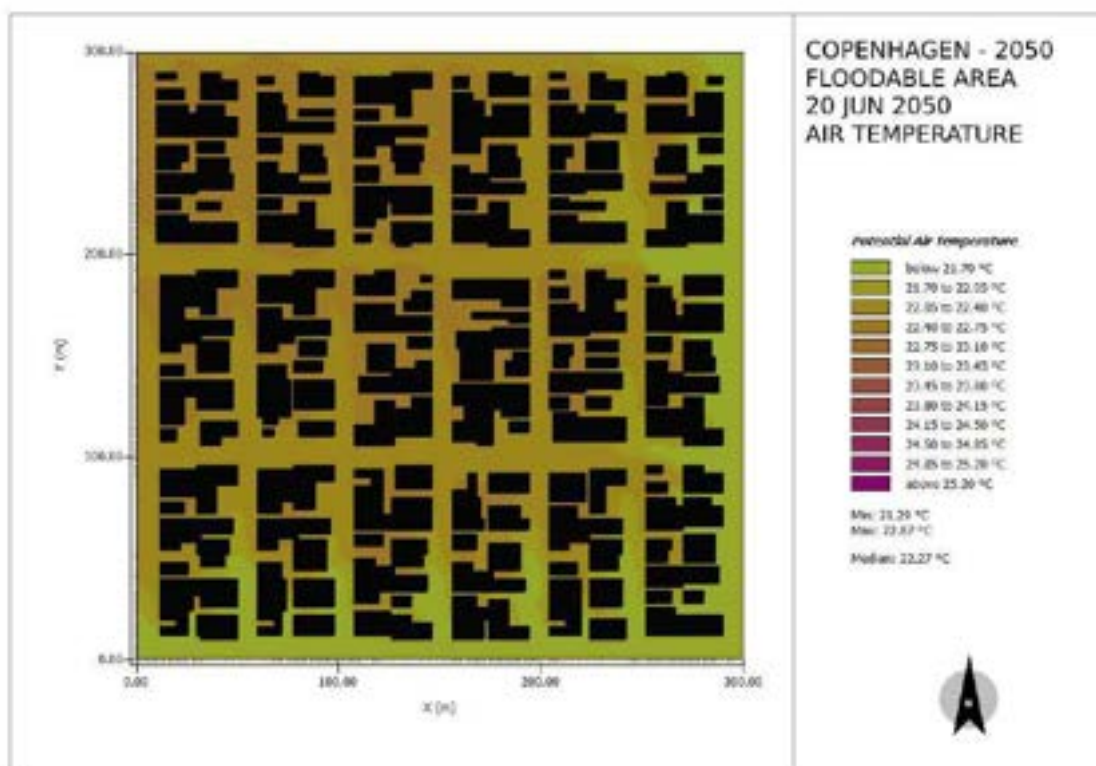
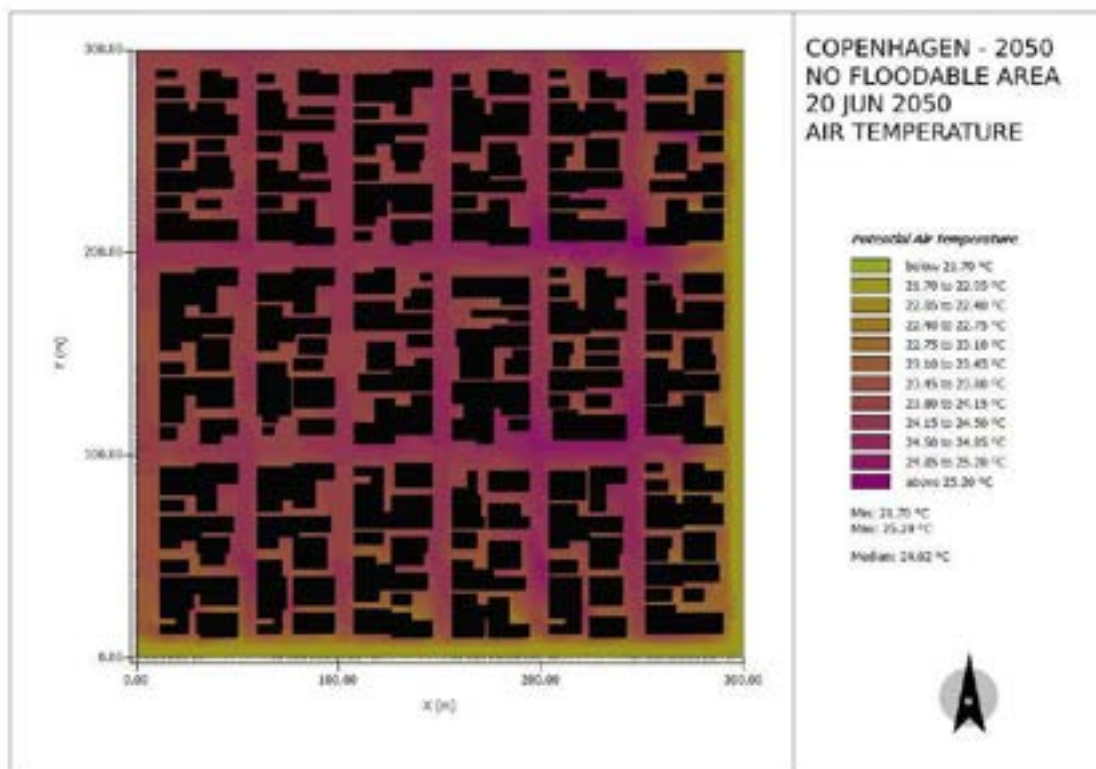
2 – Copenhagen (2050 – Inverno):

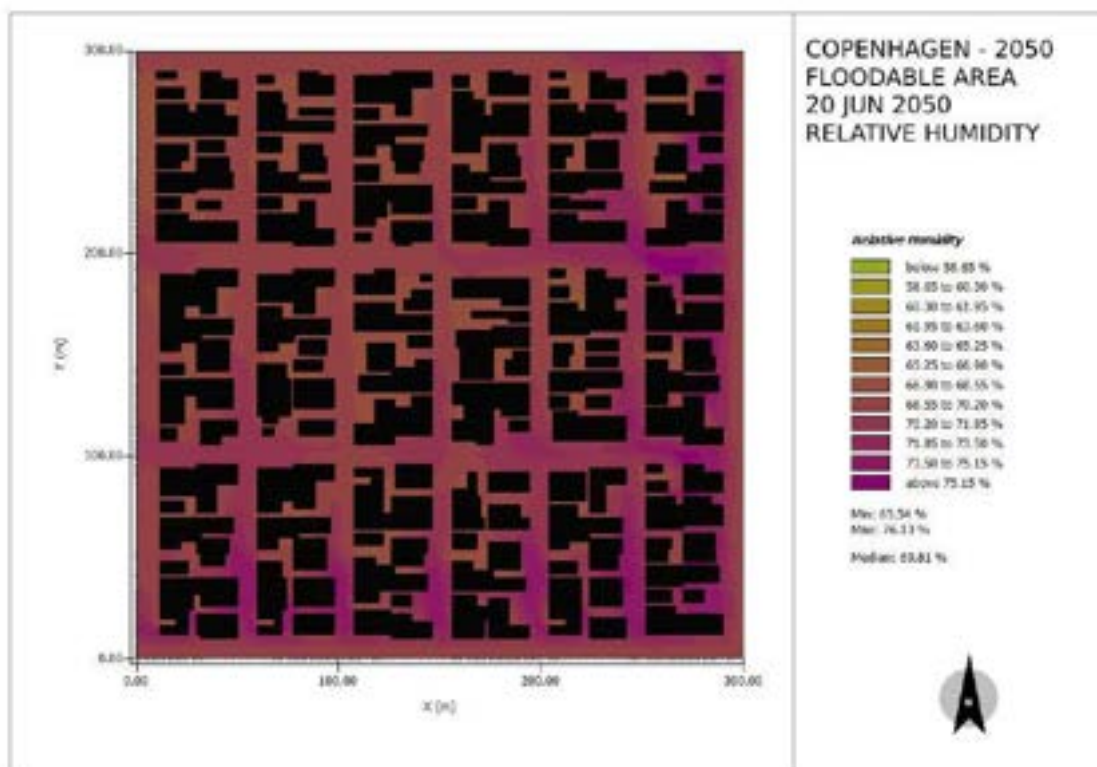
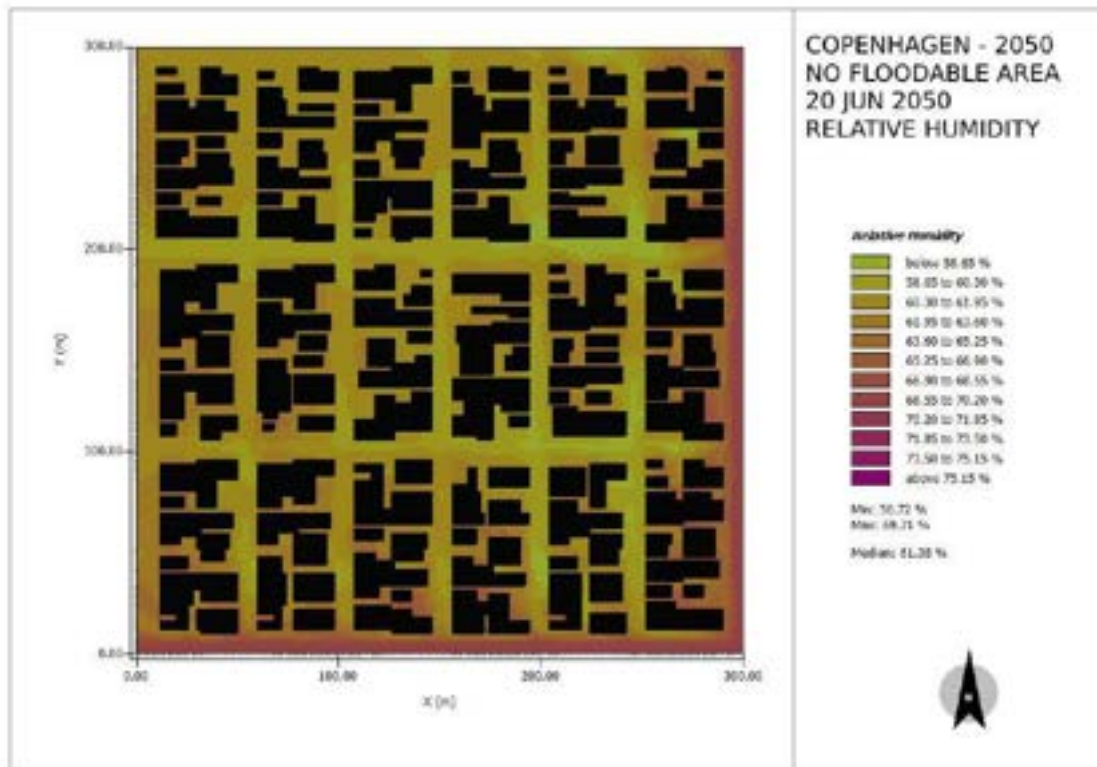


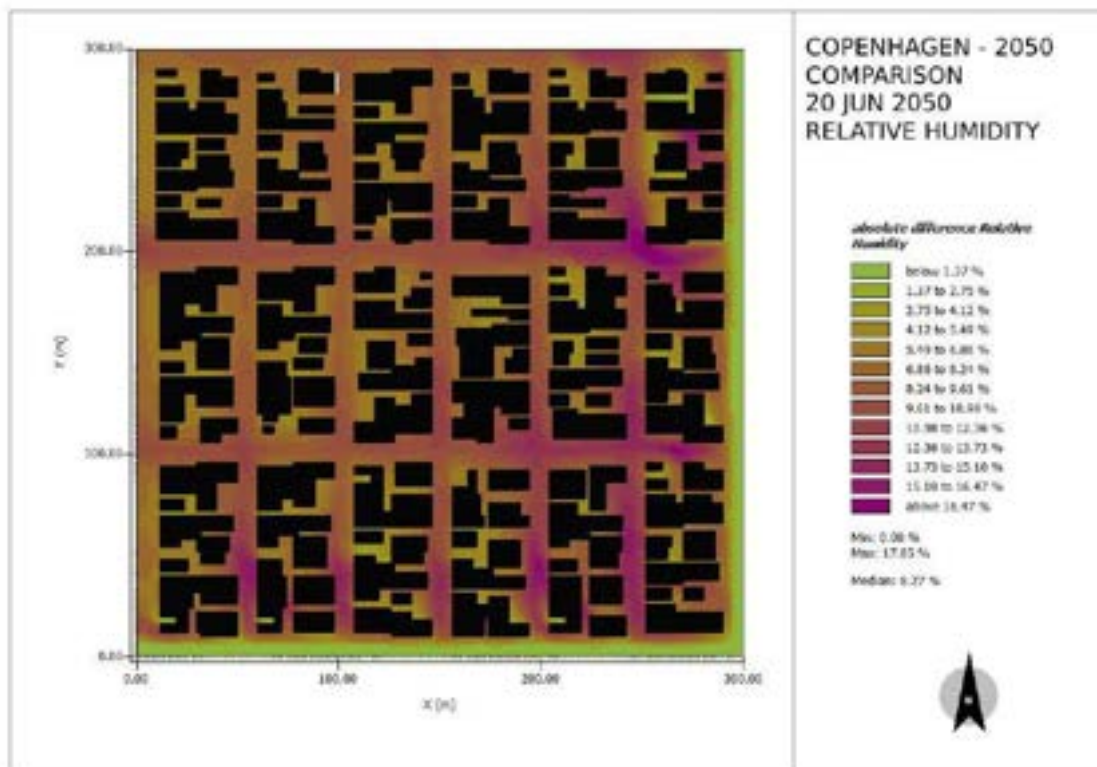
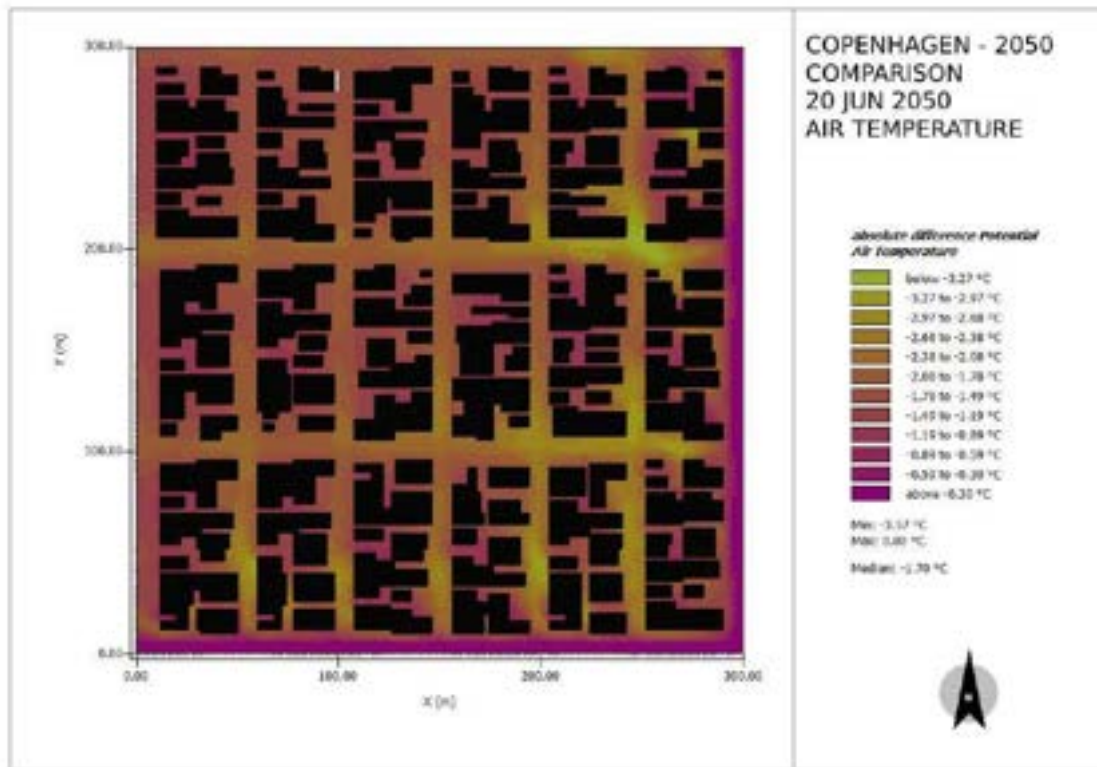




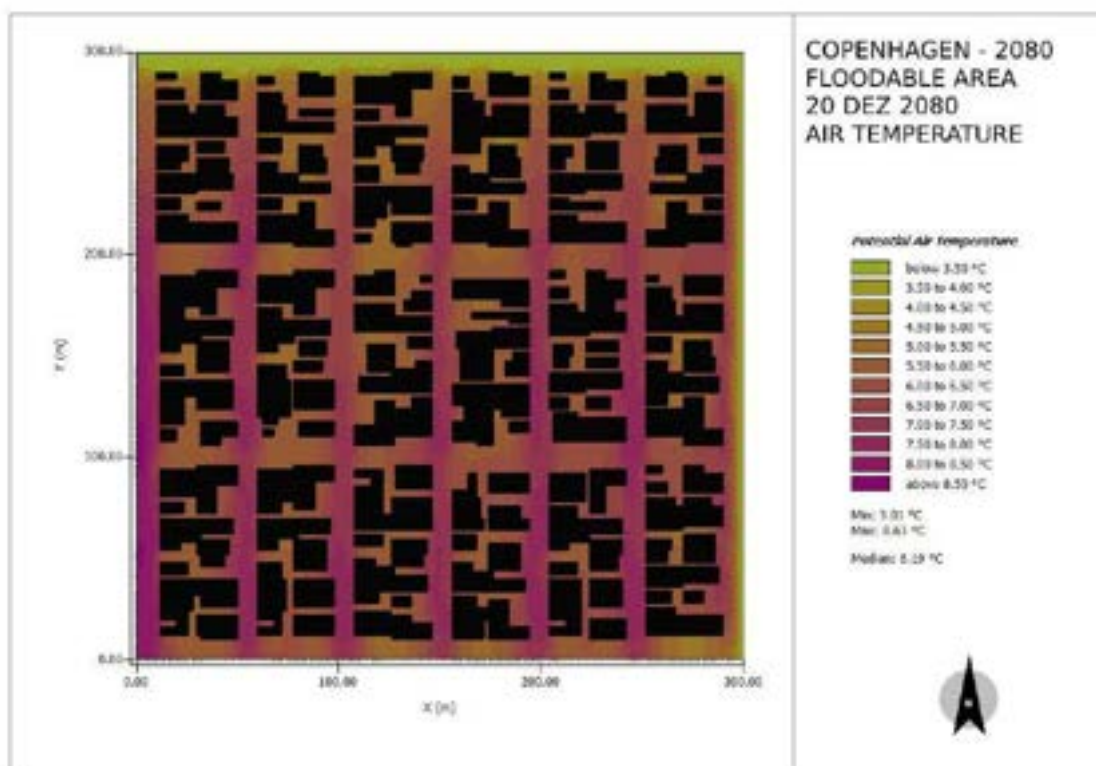
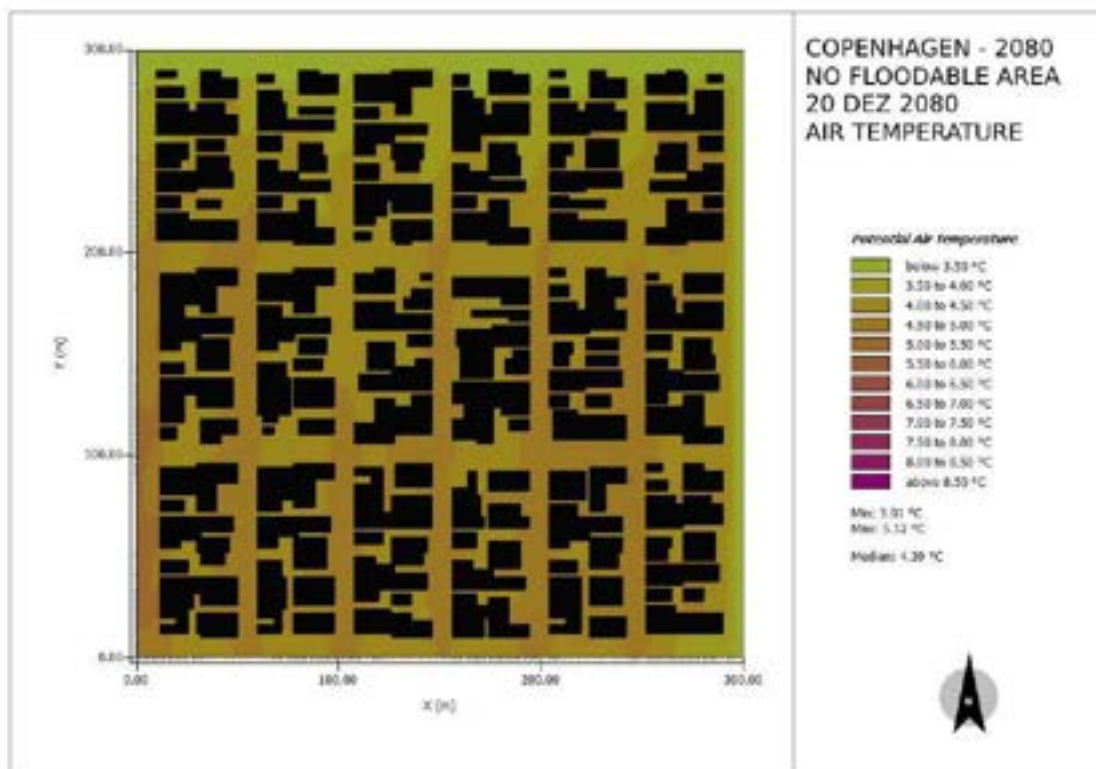
2 – Copenhagen (2050 – Verão):

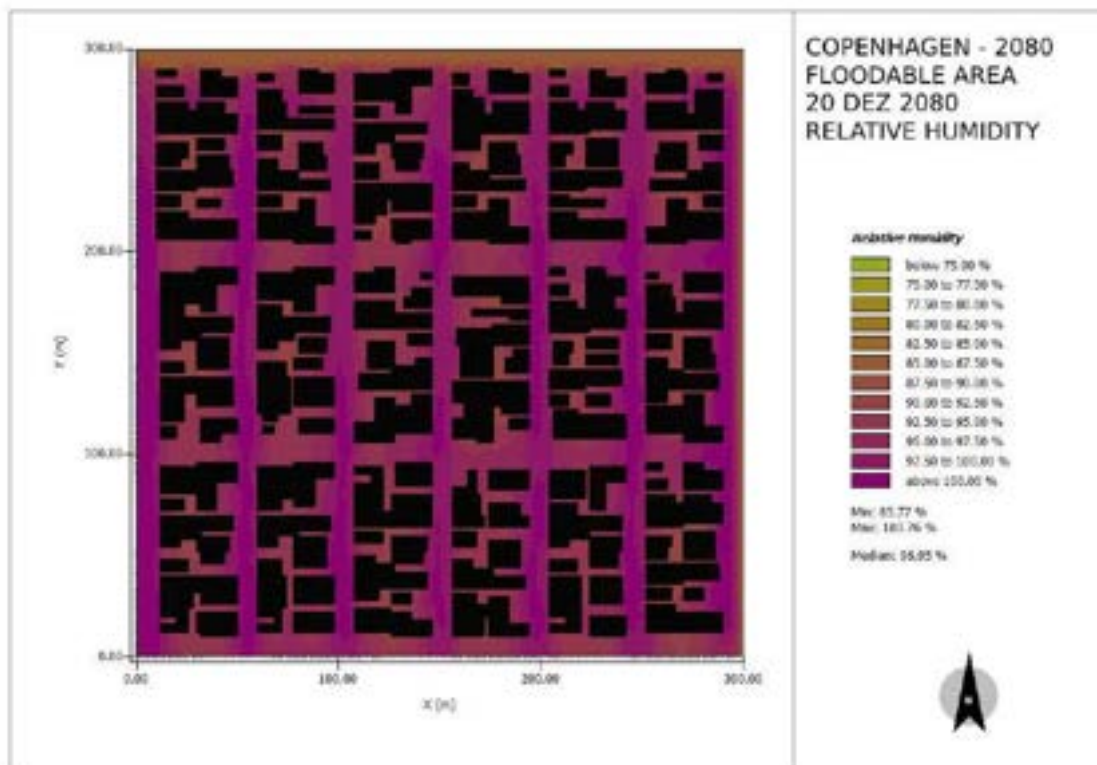
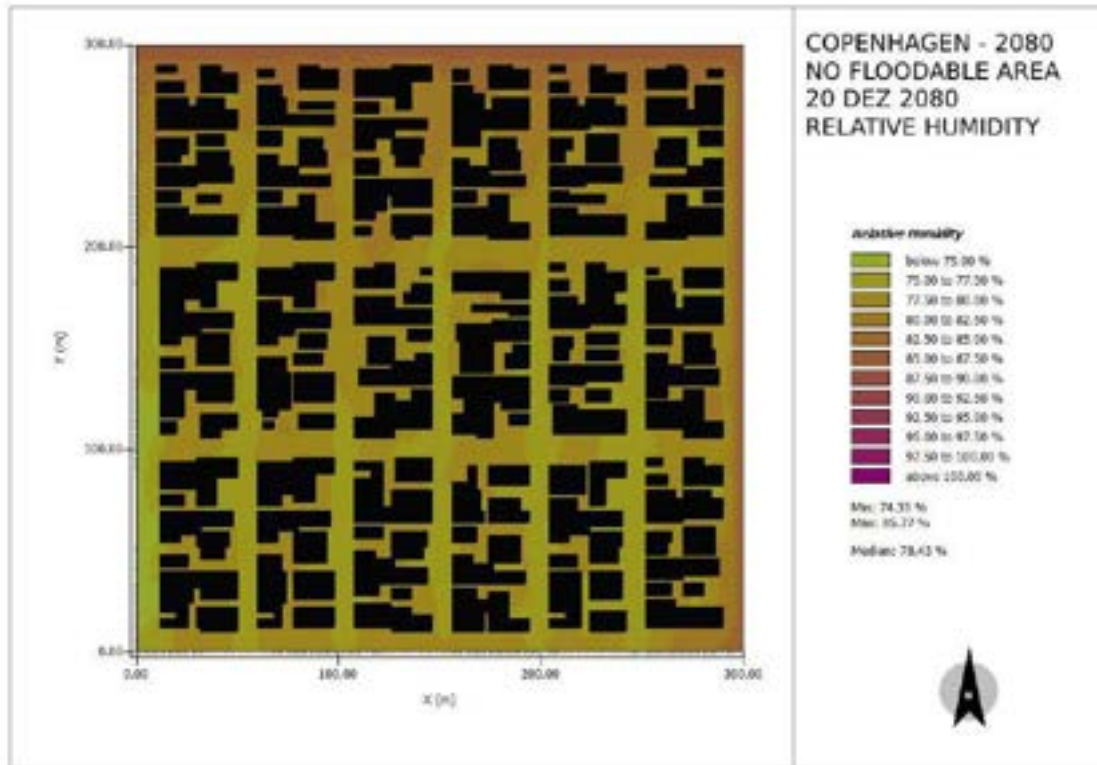


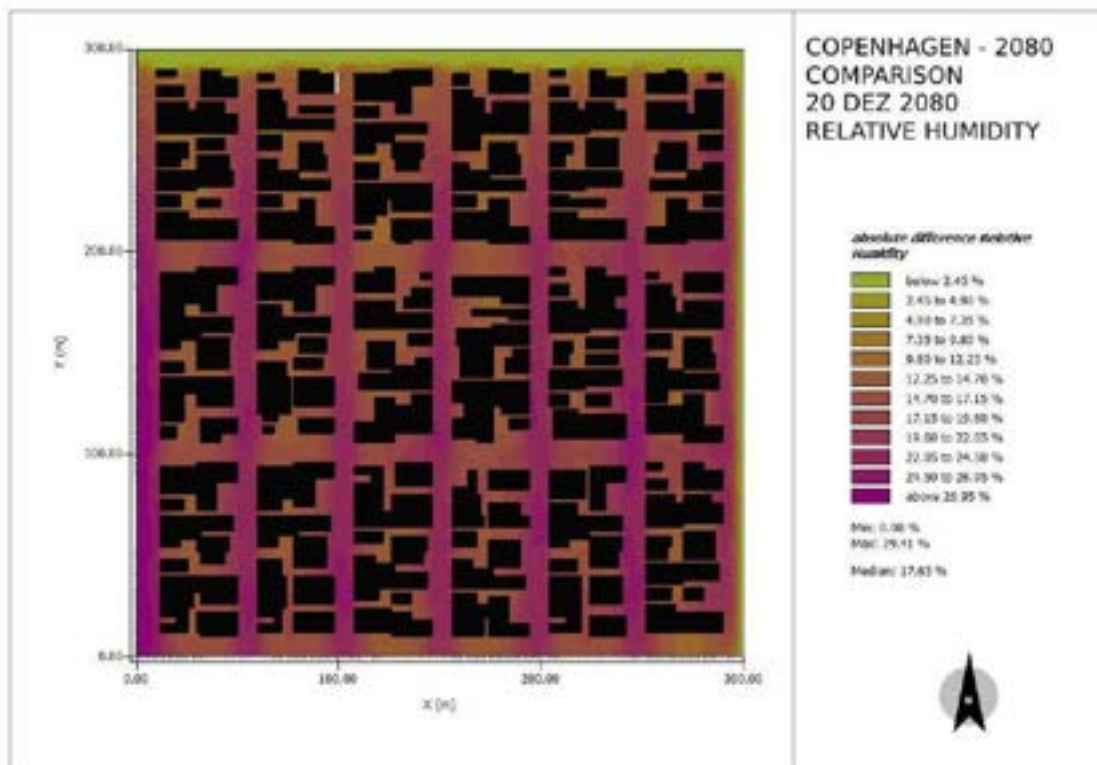
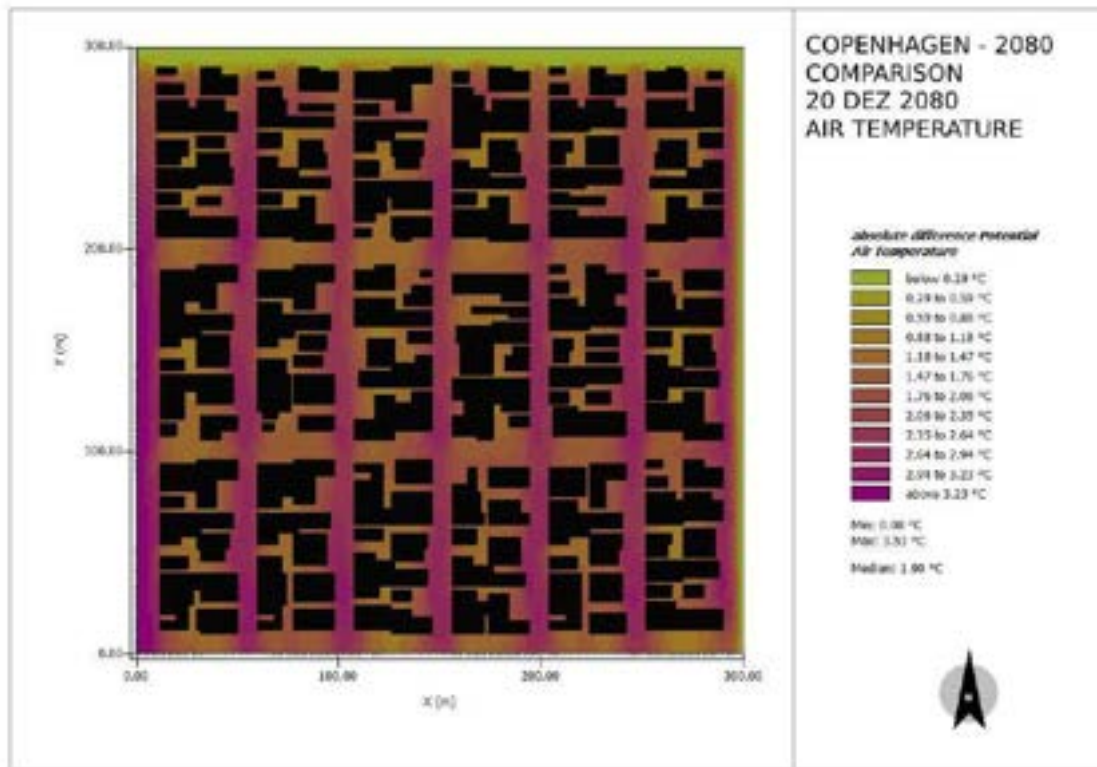




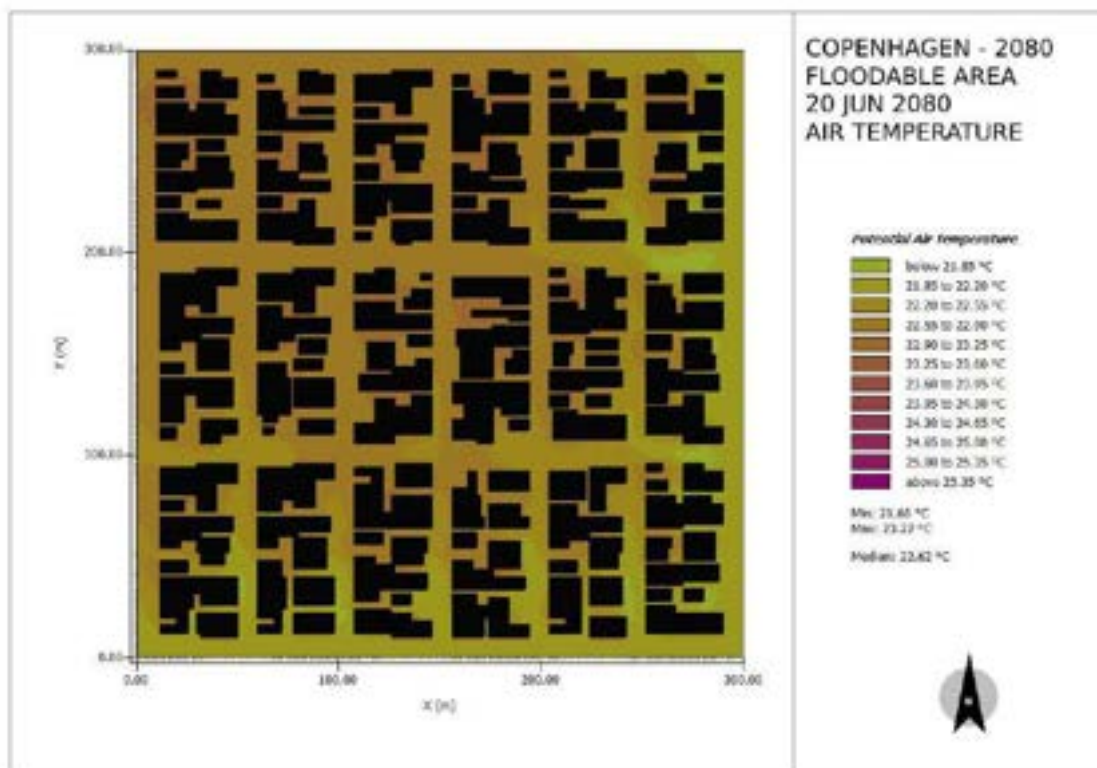
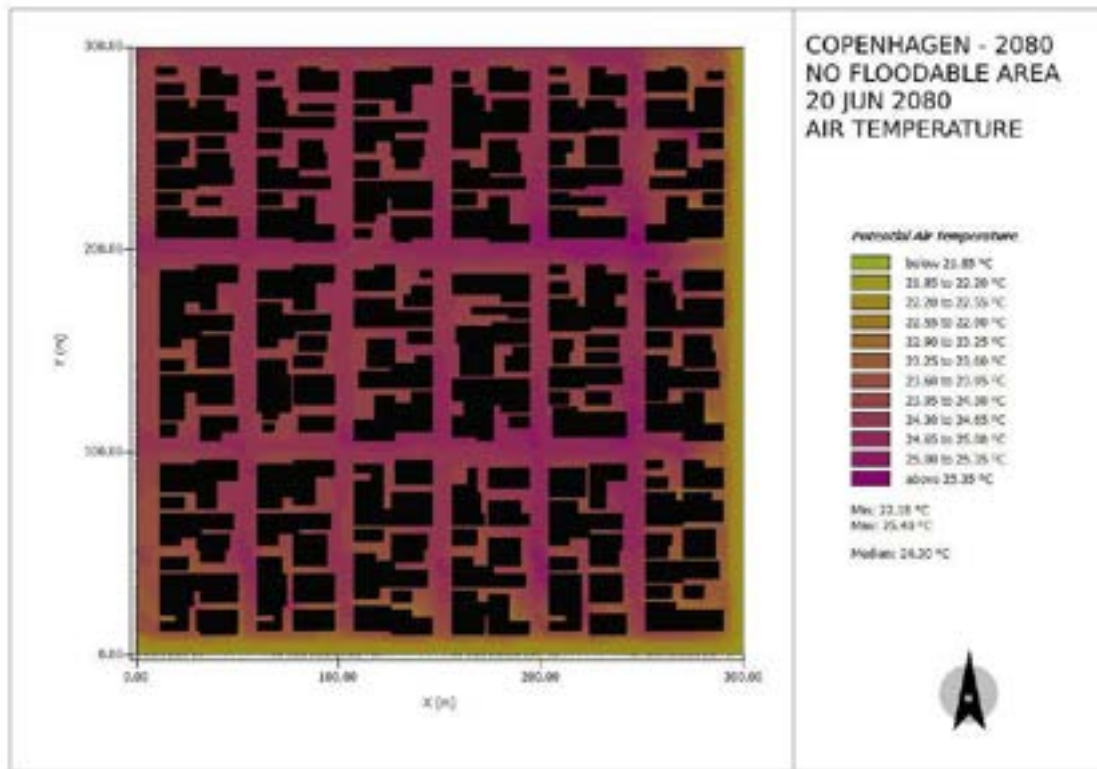
2 – Copenhagen (2080 – Inverno):

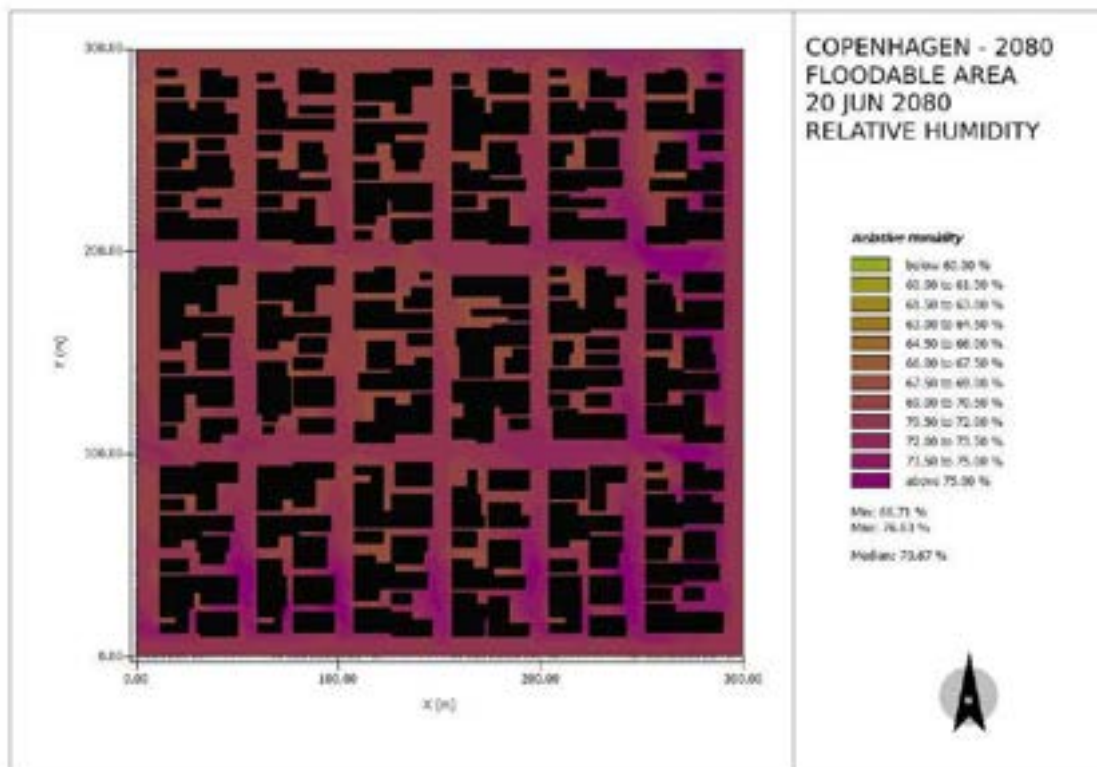
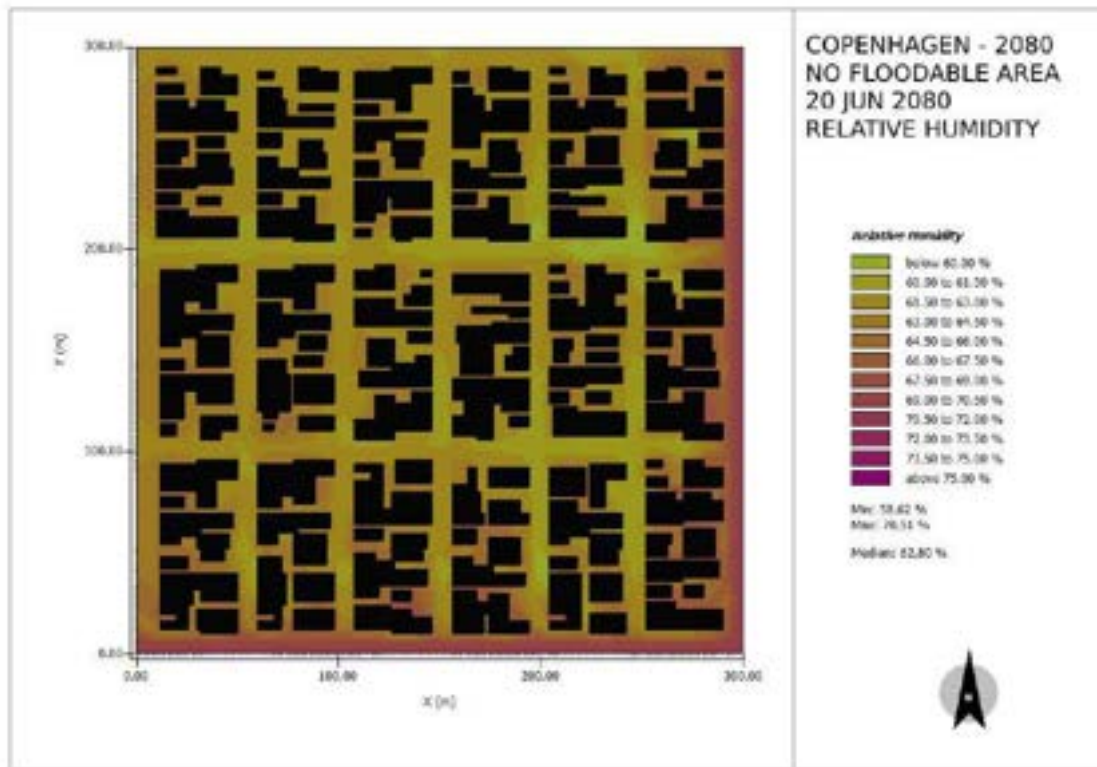


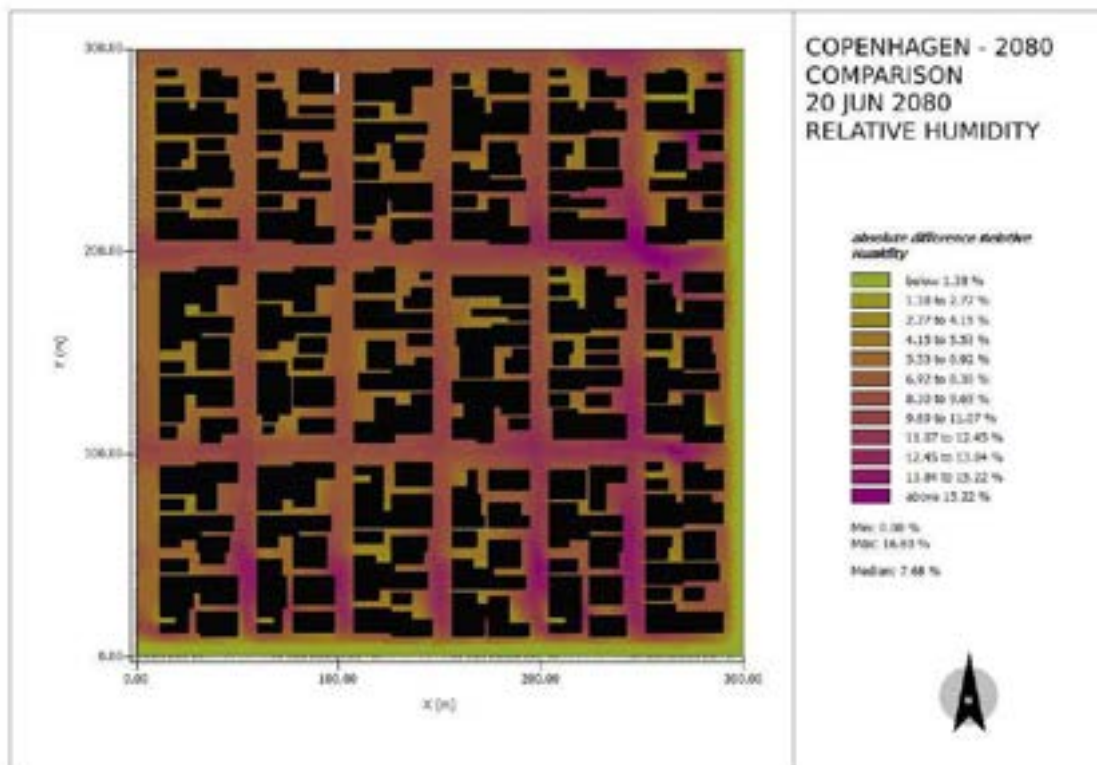
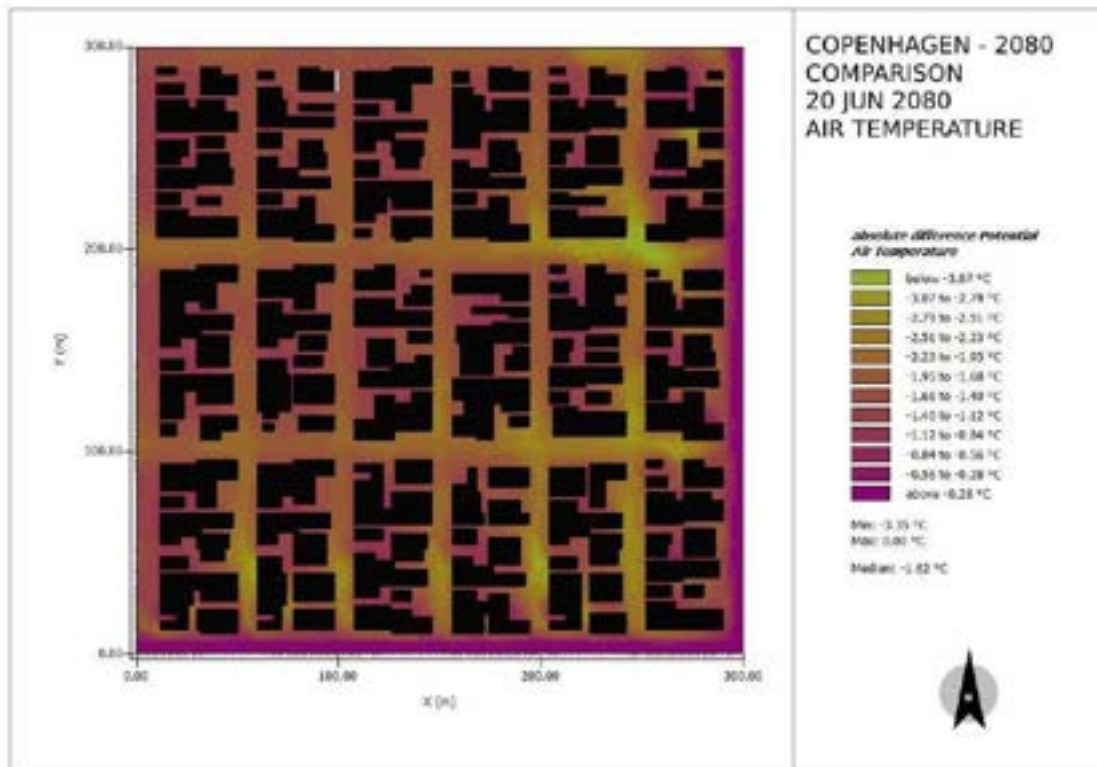




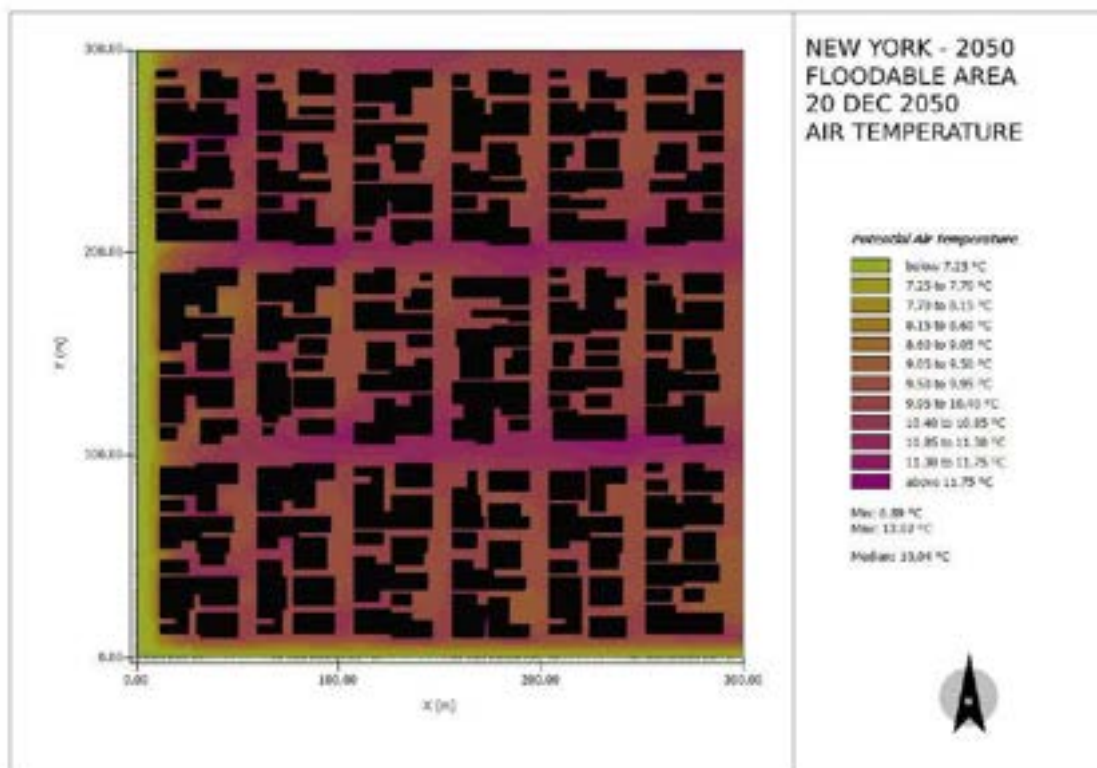
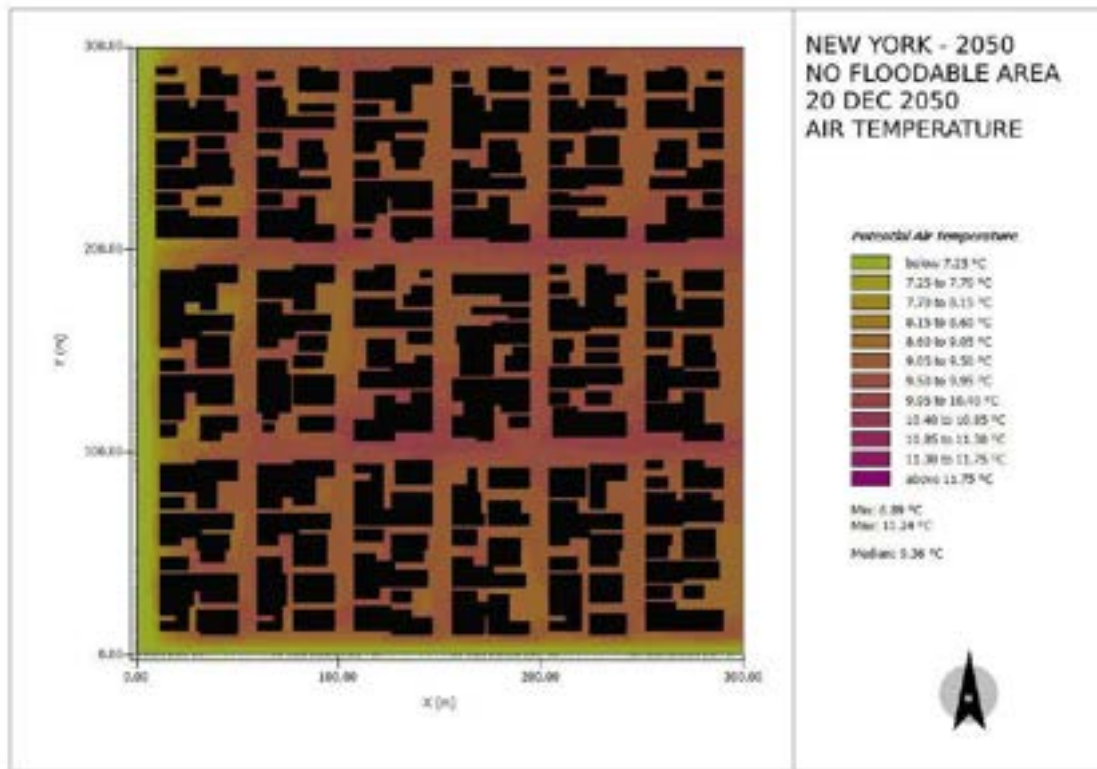
2 – Copenhagen (2080 – Verão):

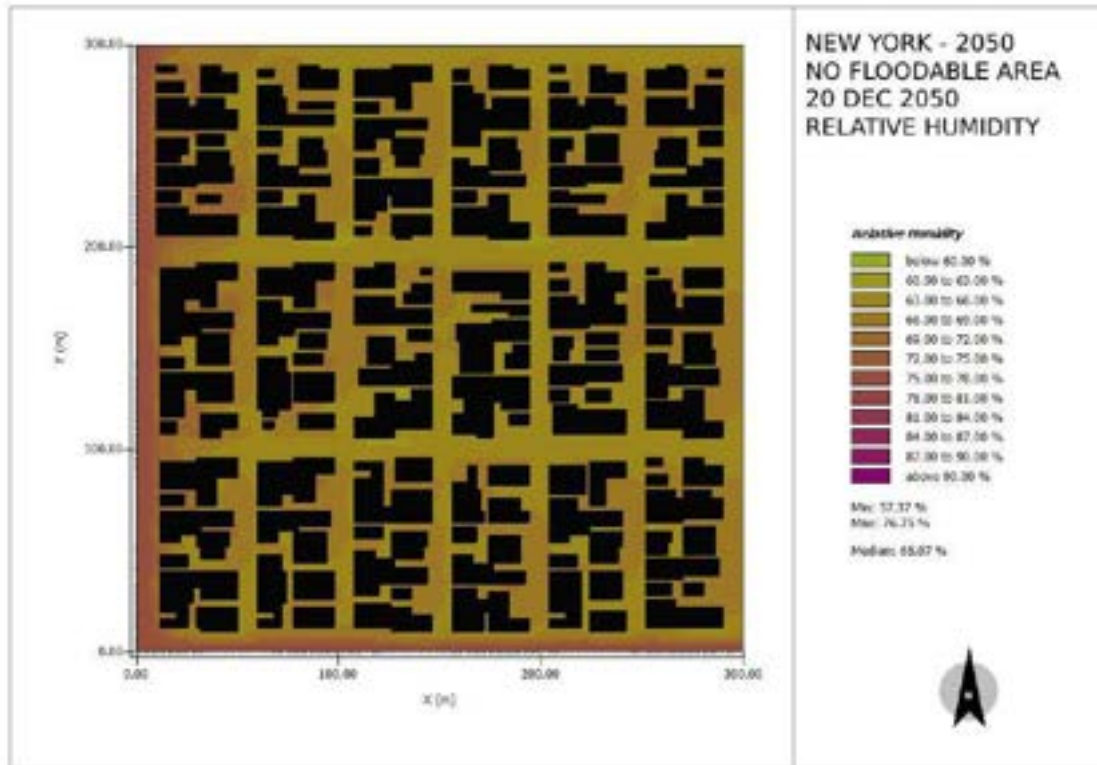


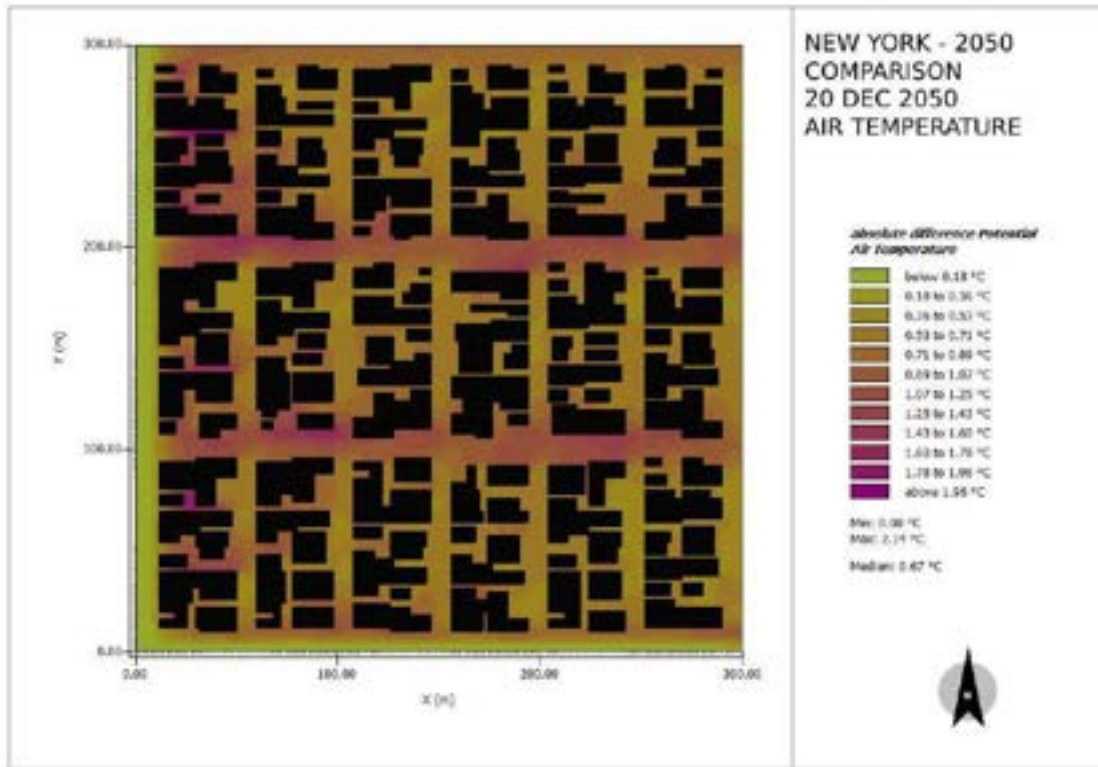




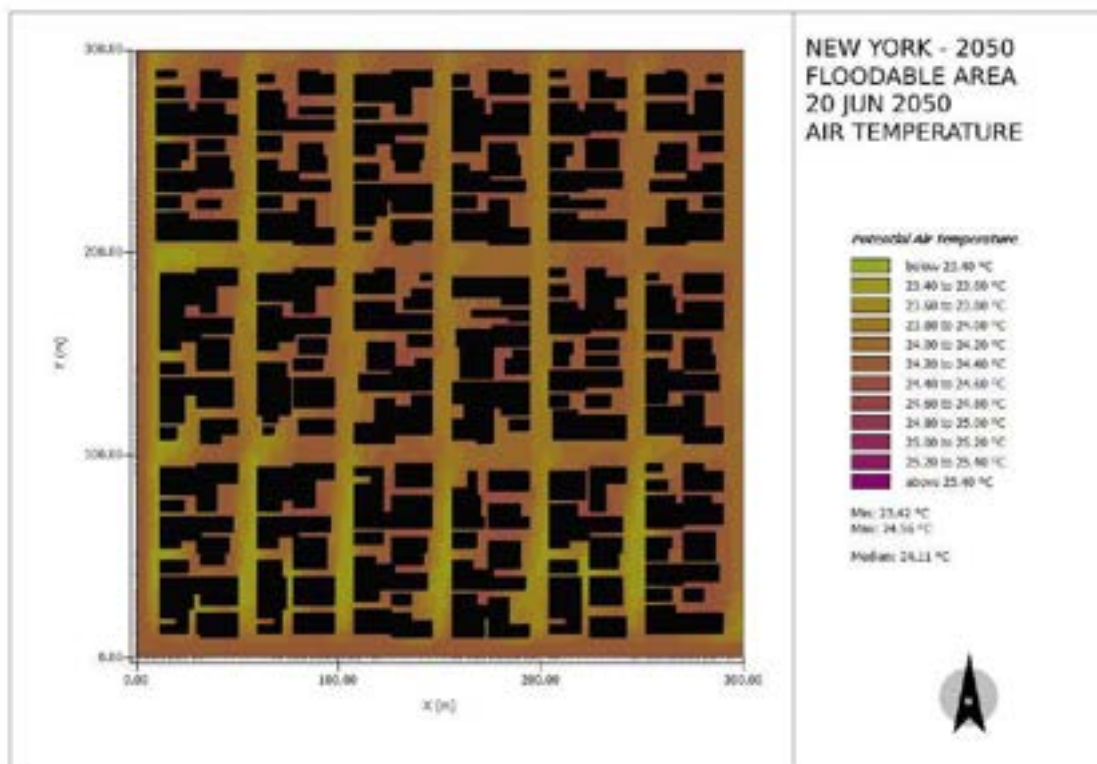
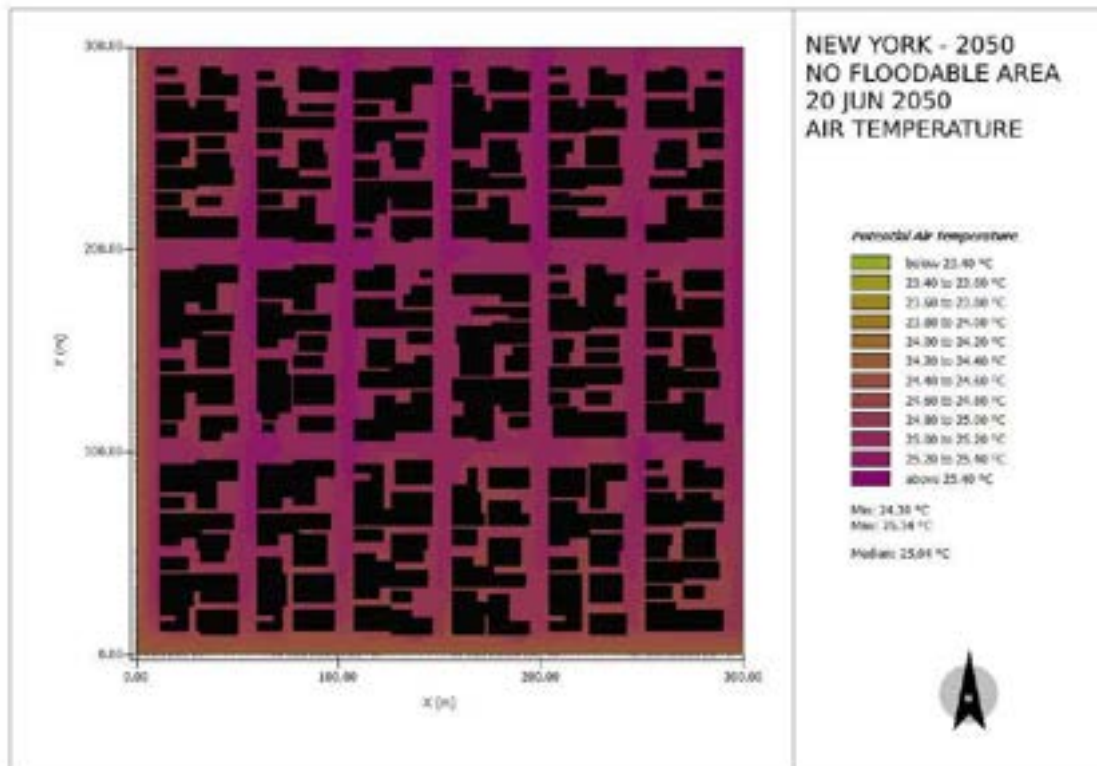
3 – Nova York (2050 – Inverno):

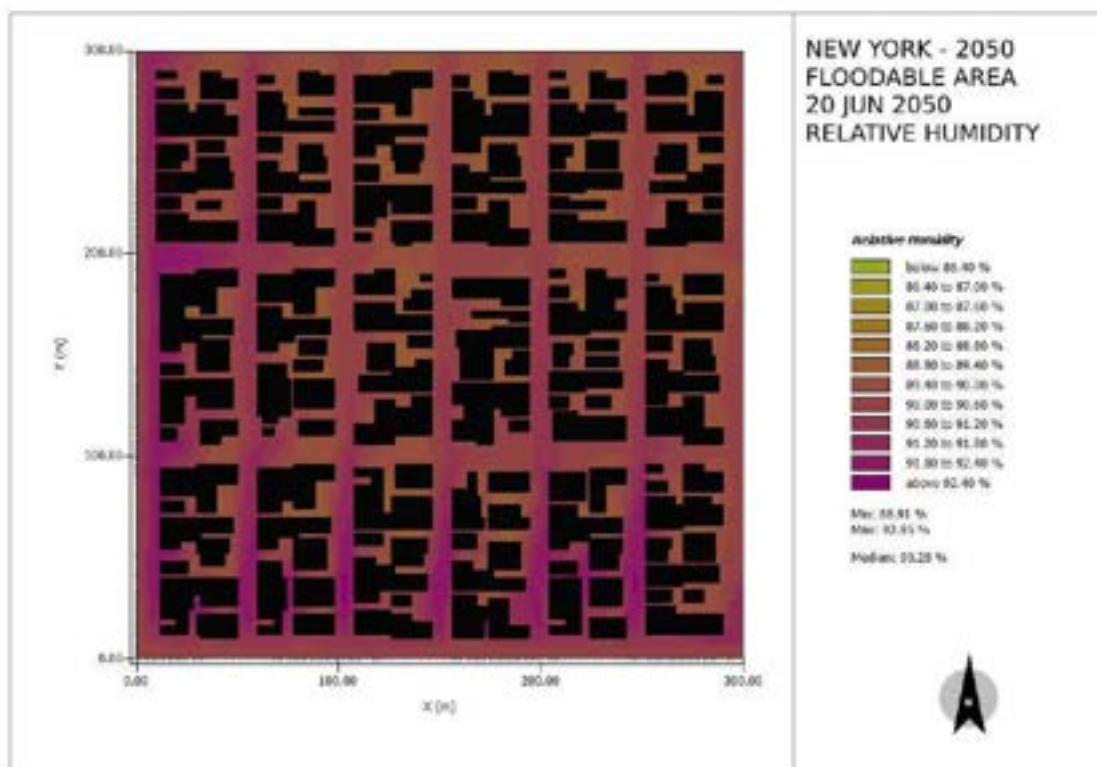
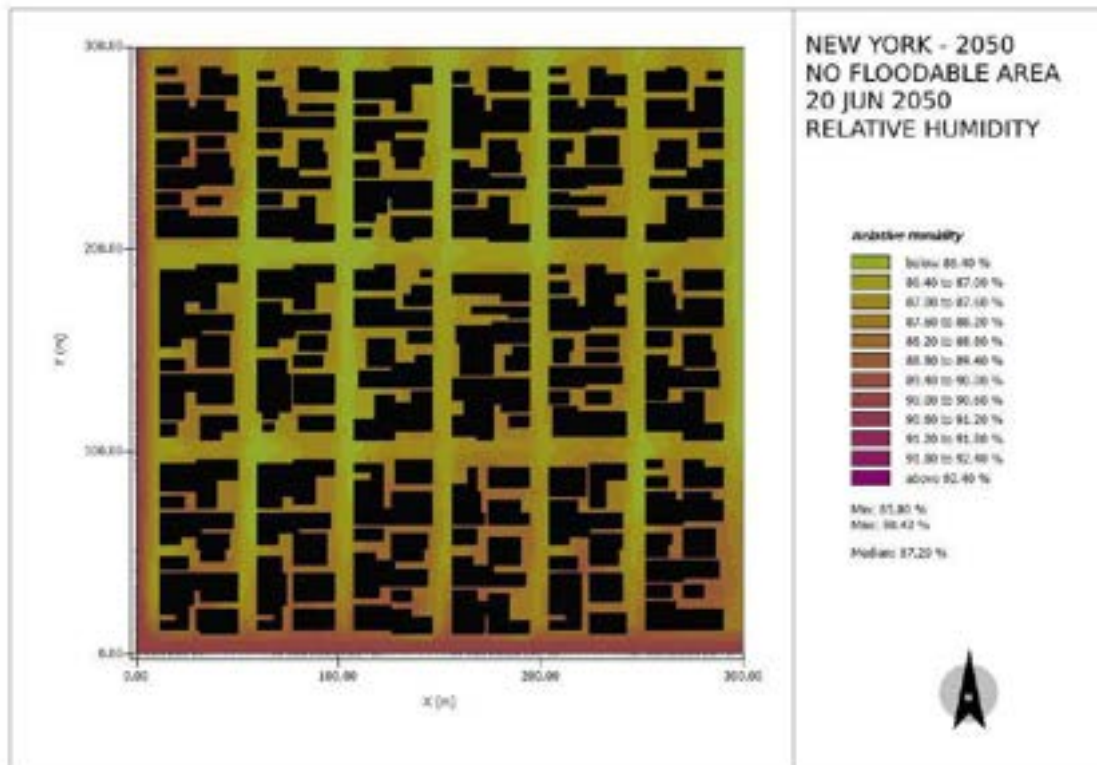


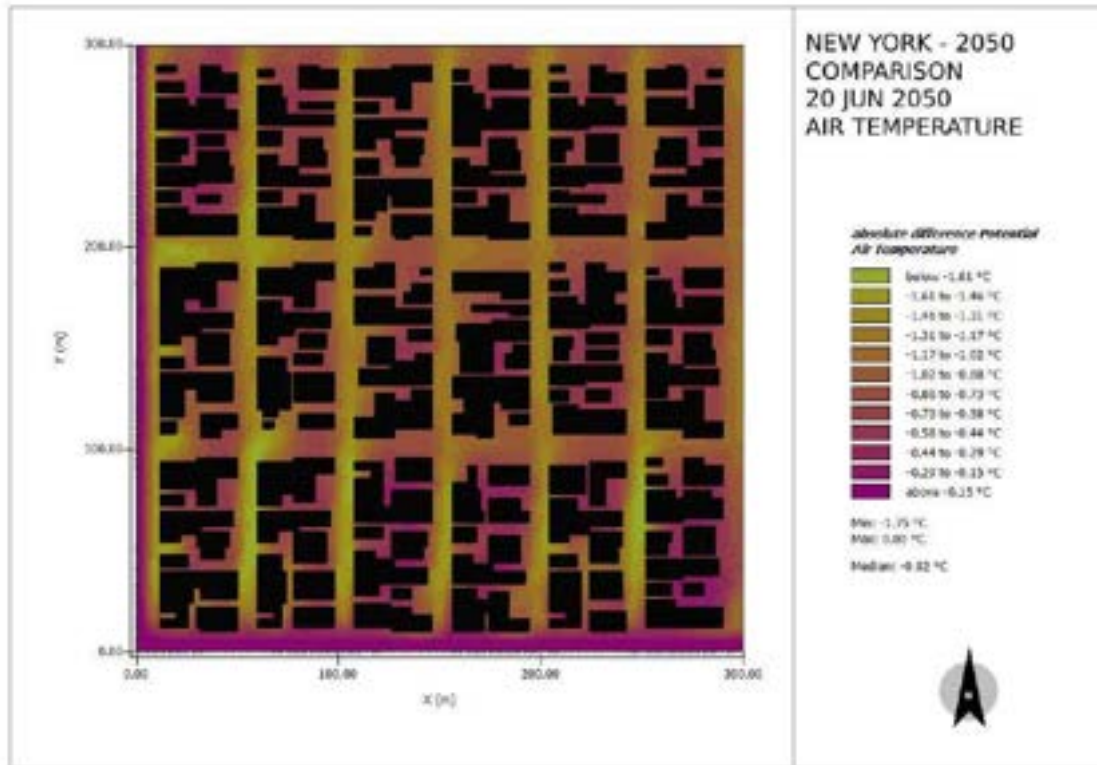




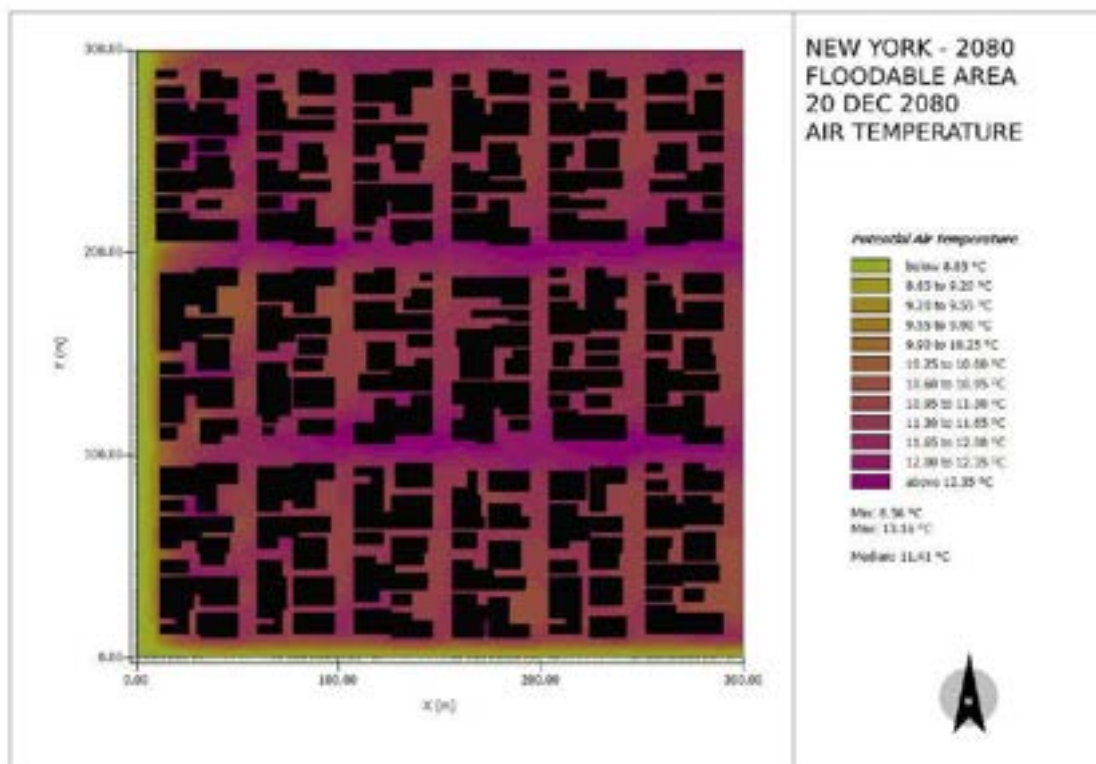
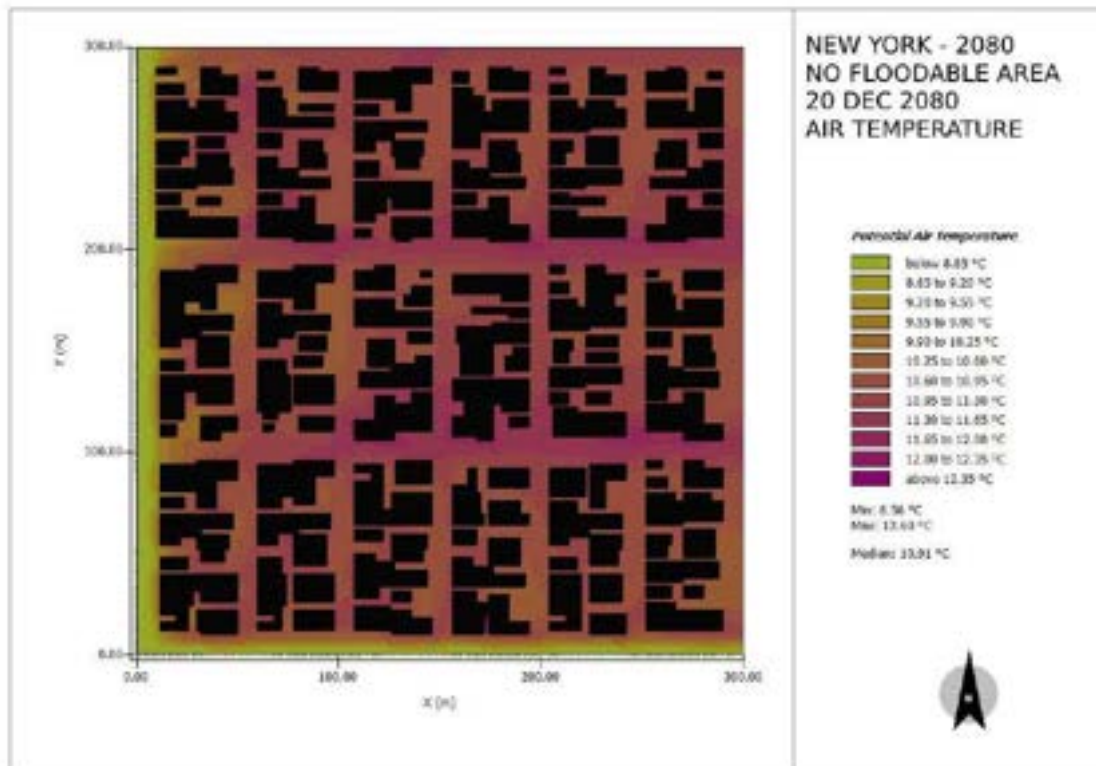
3 – Nova York (2050 – Verão):



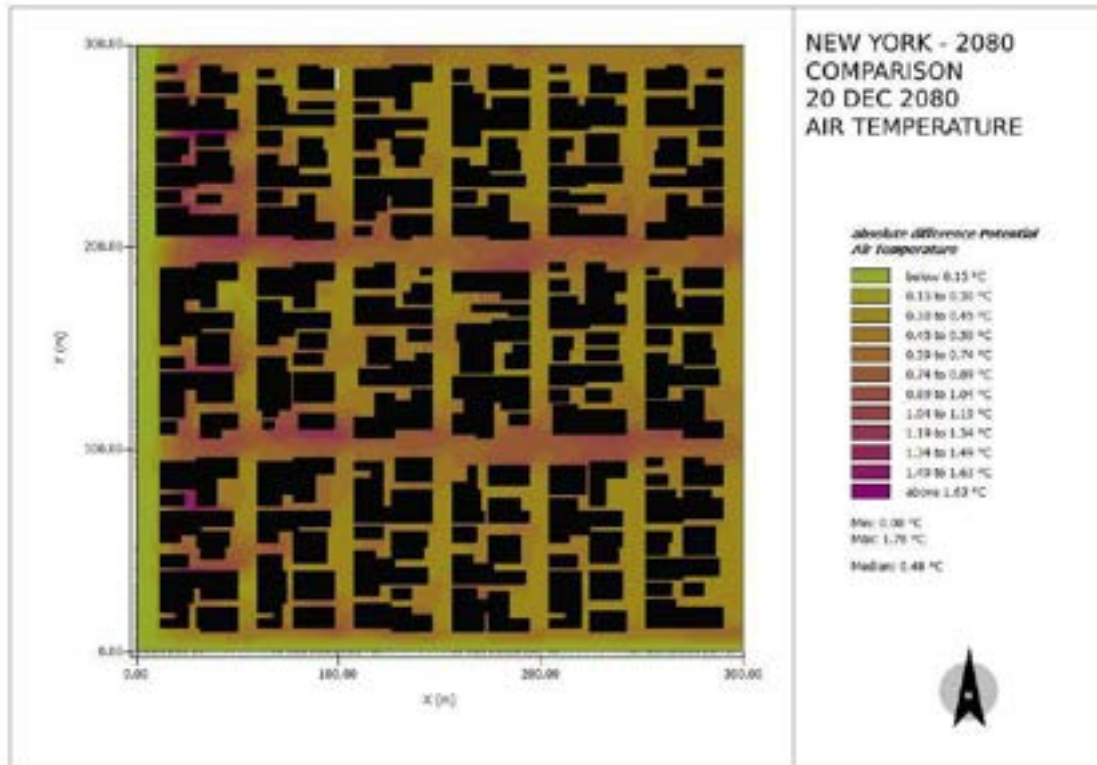




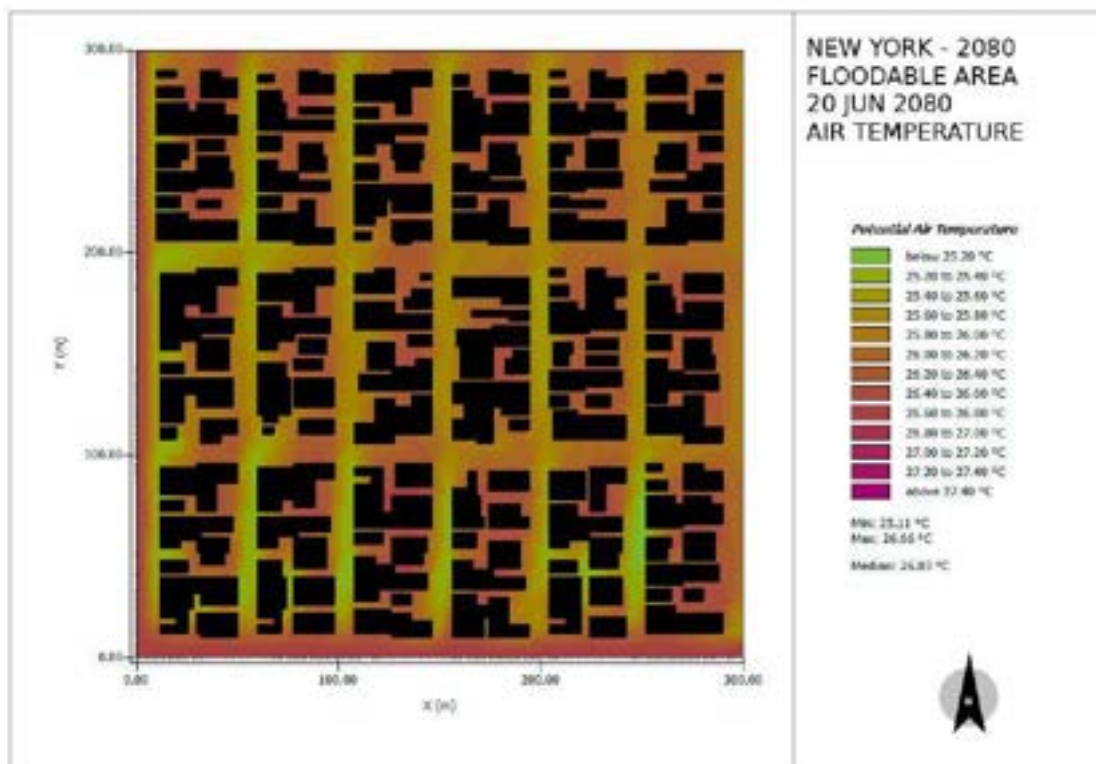
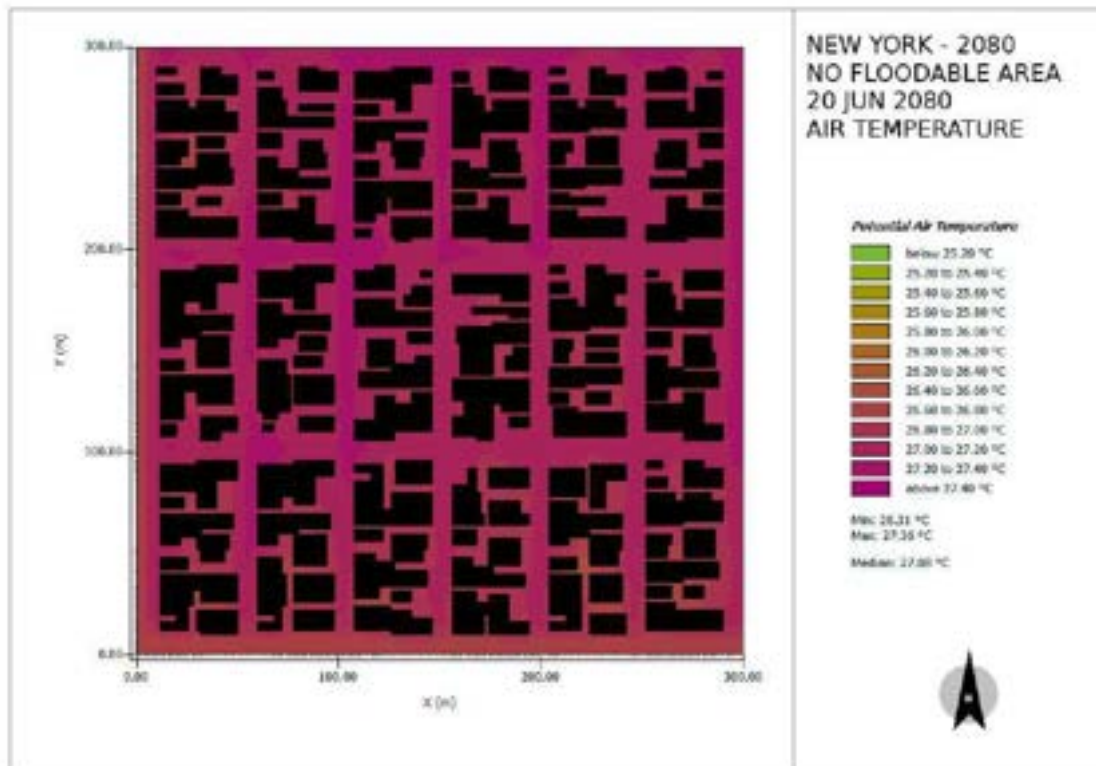
3 – Nova York (2080 – Inverno):



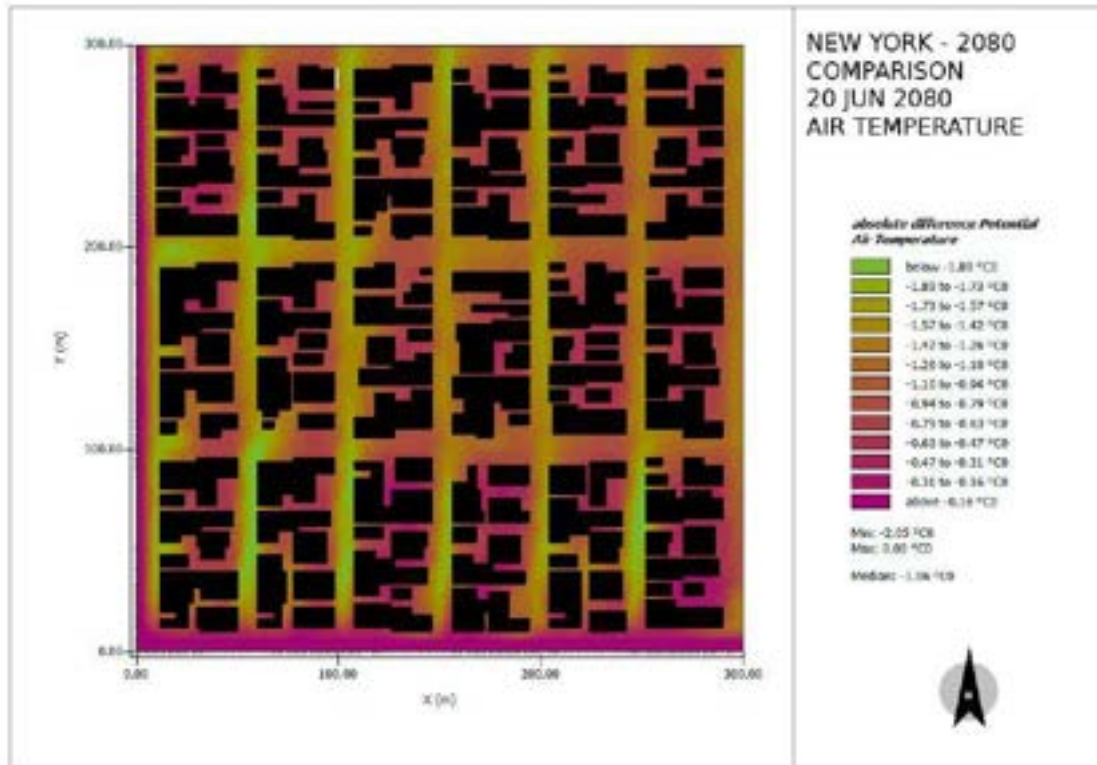




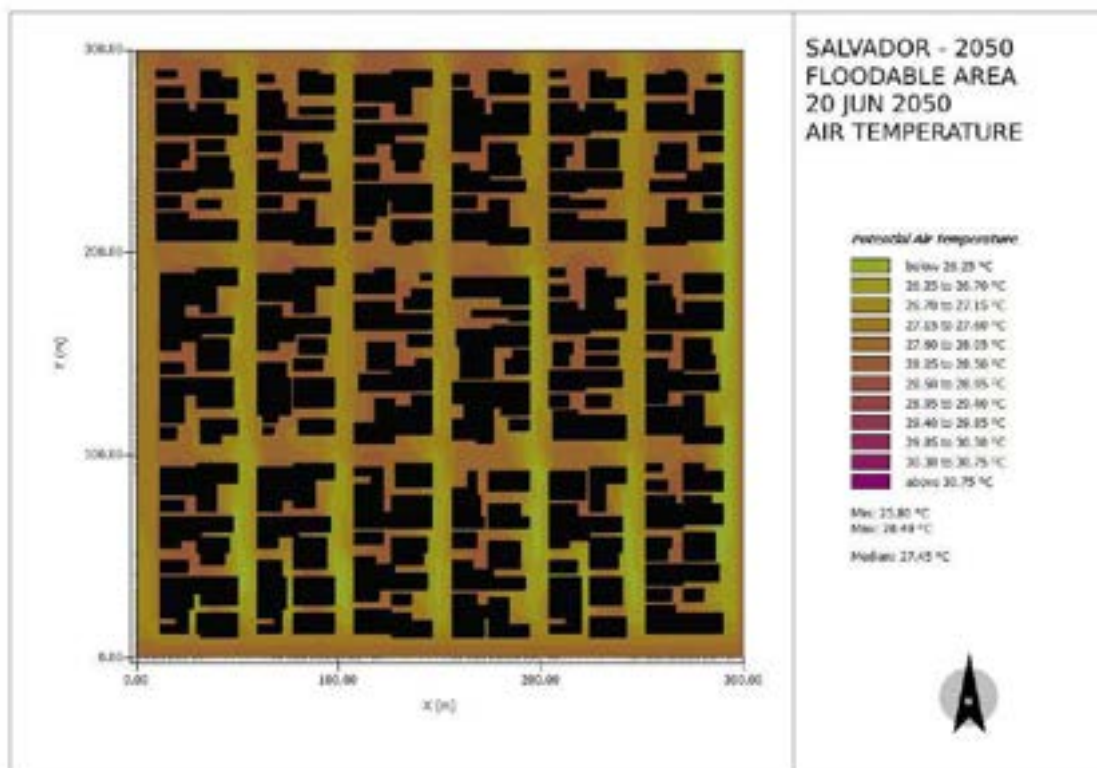
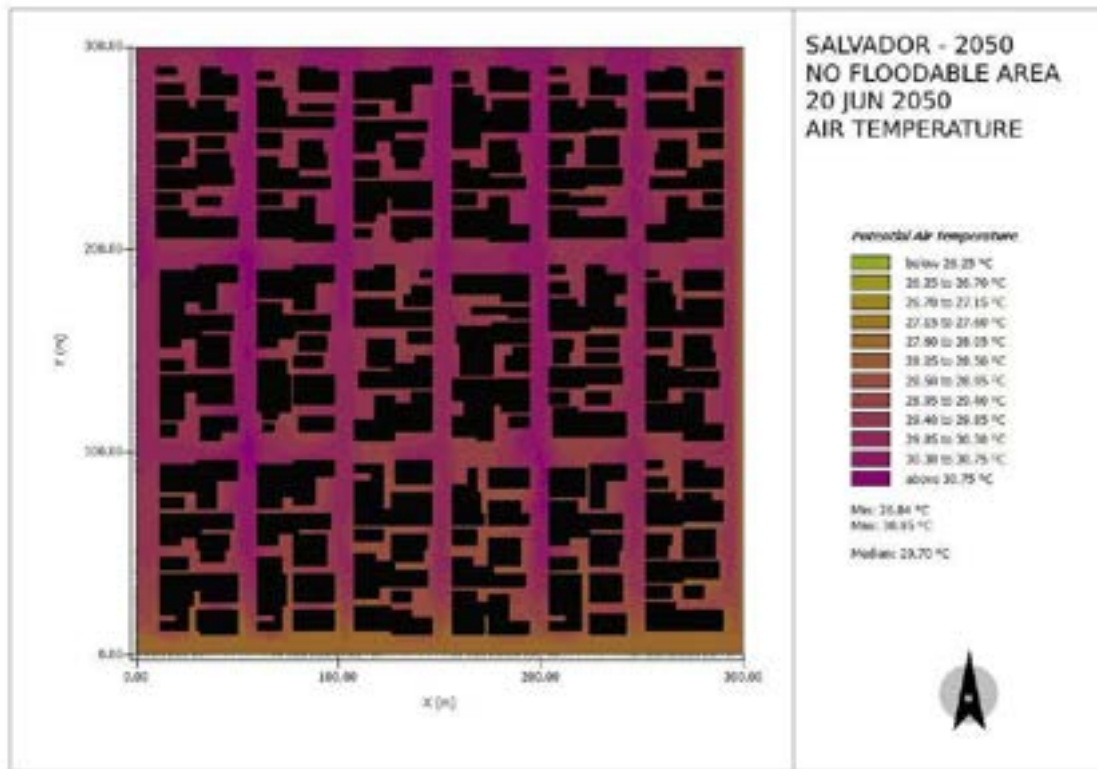
3 – Nova York (2080 – Verão):

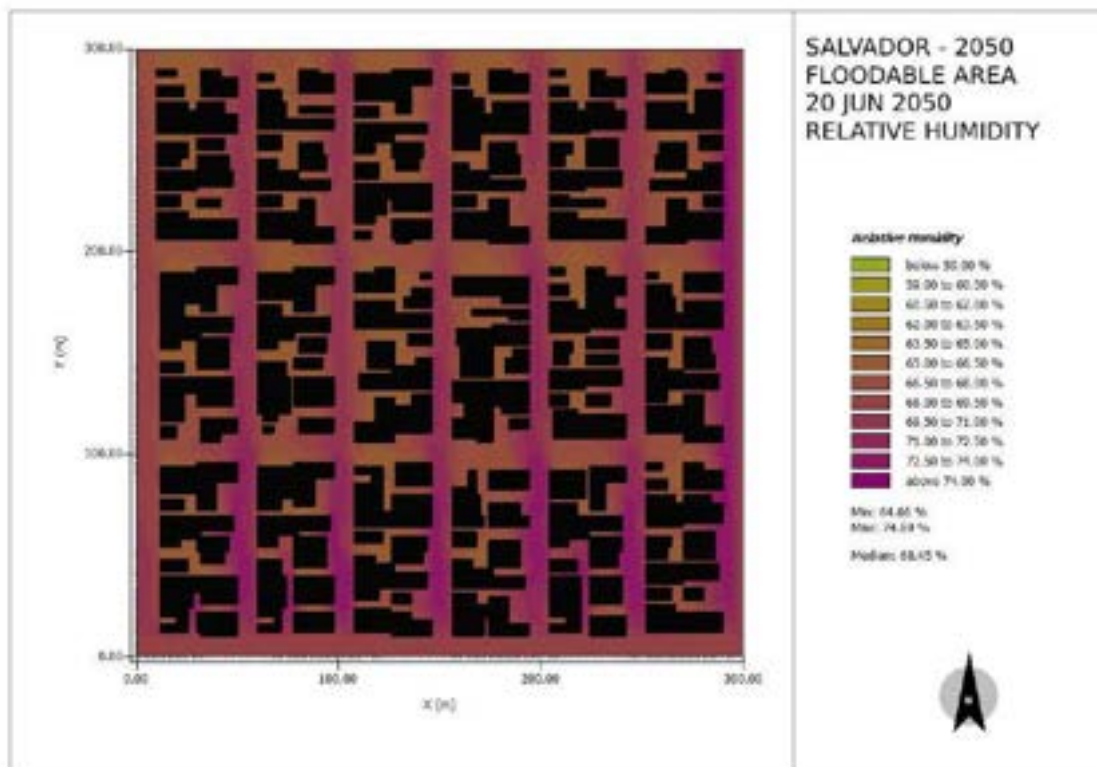
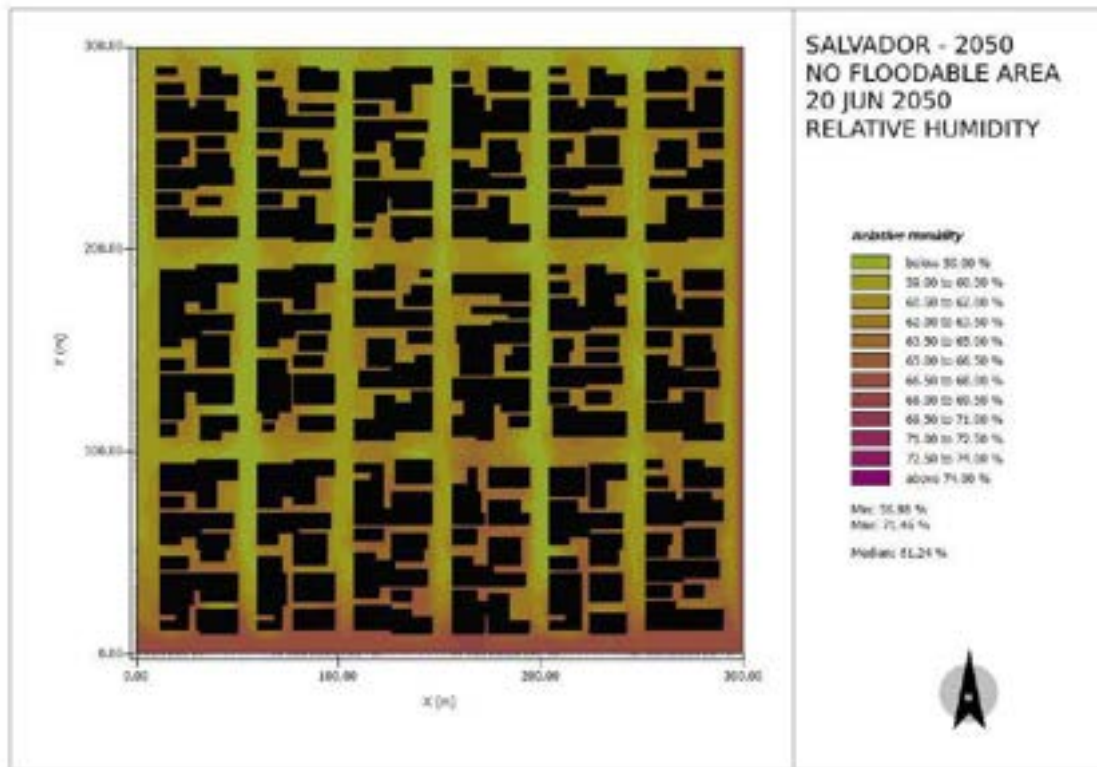


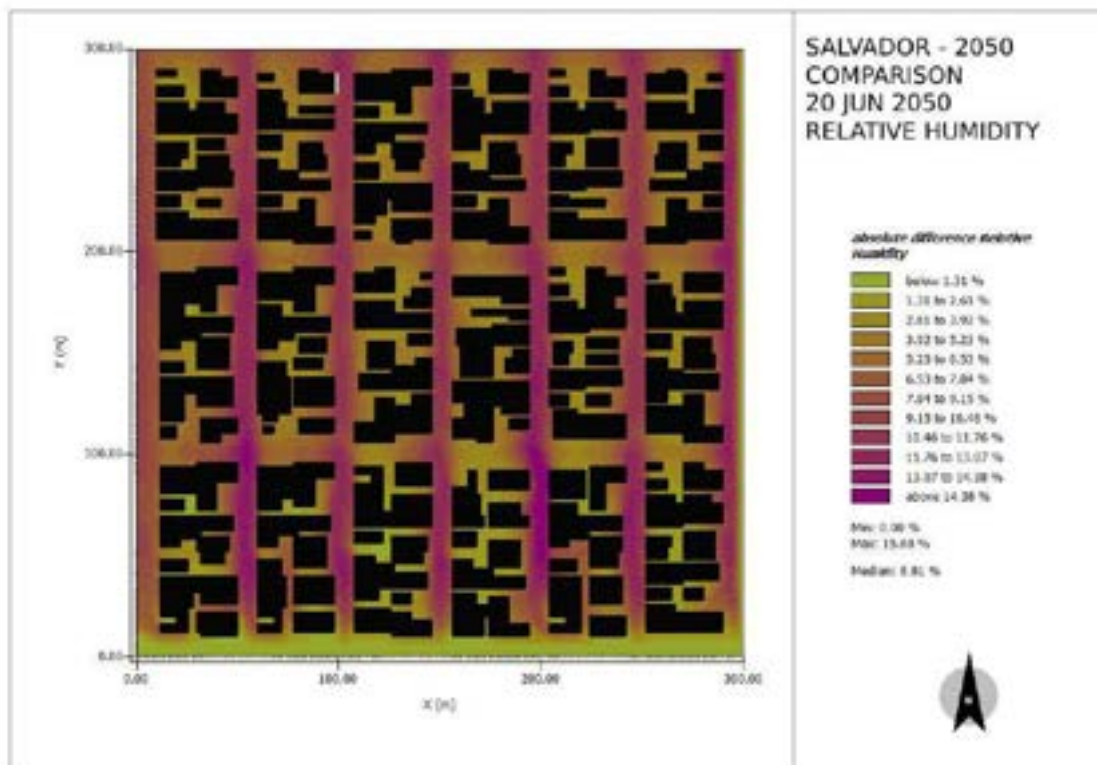
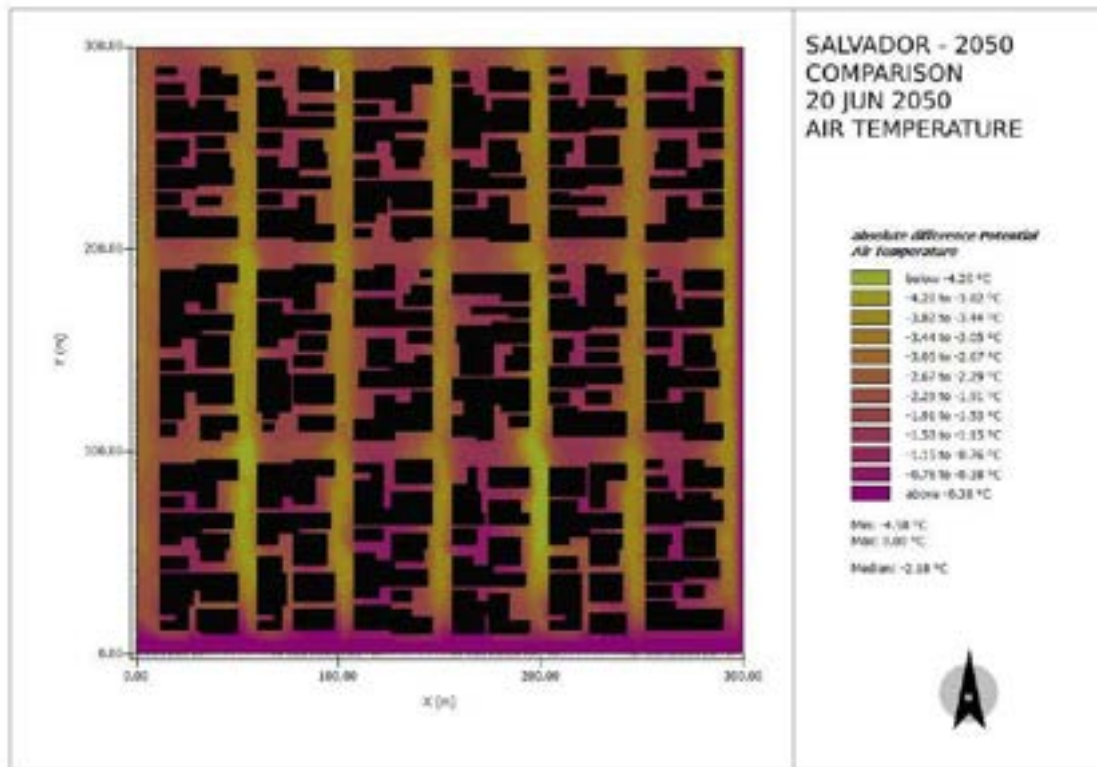




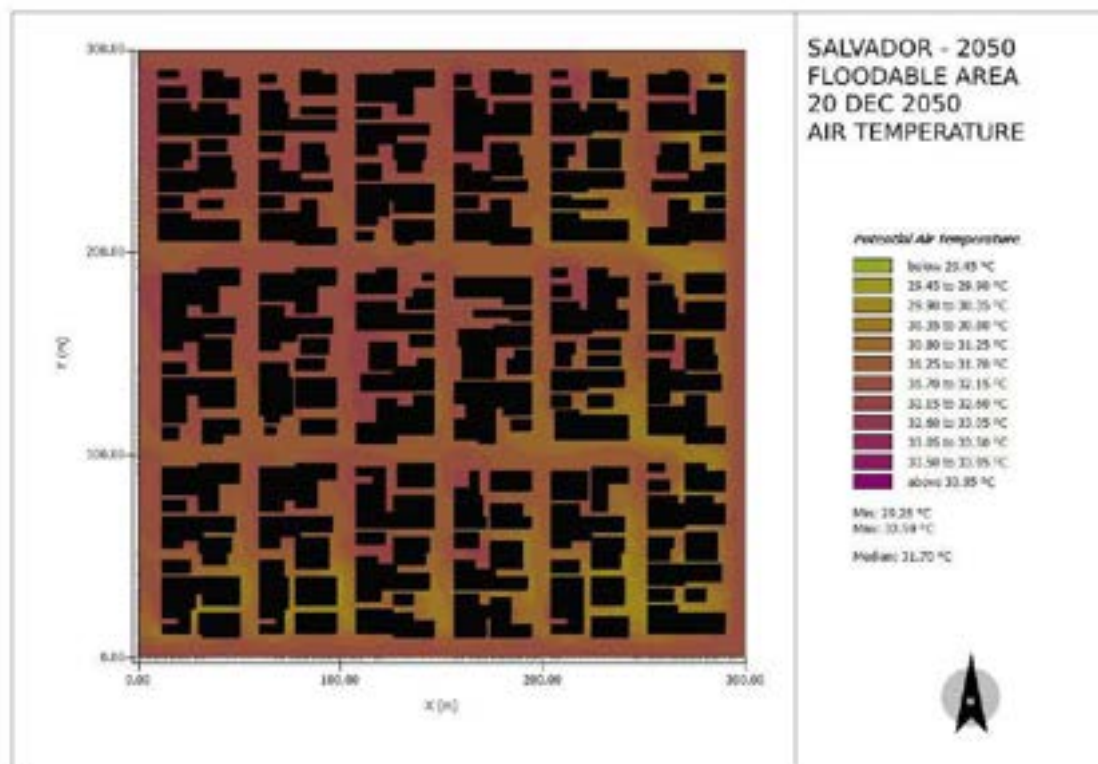
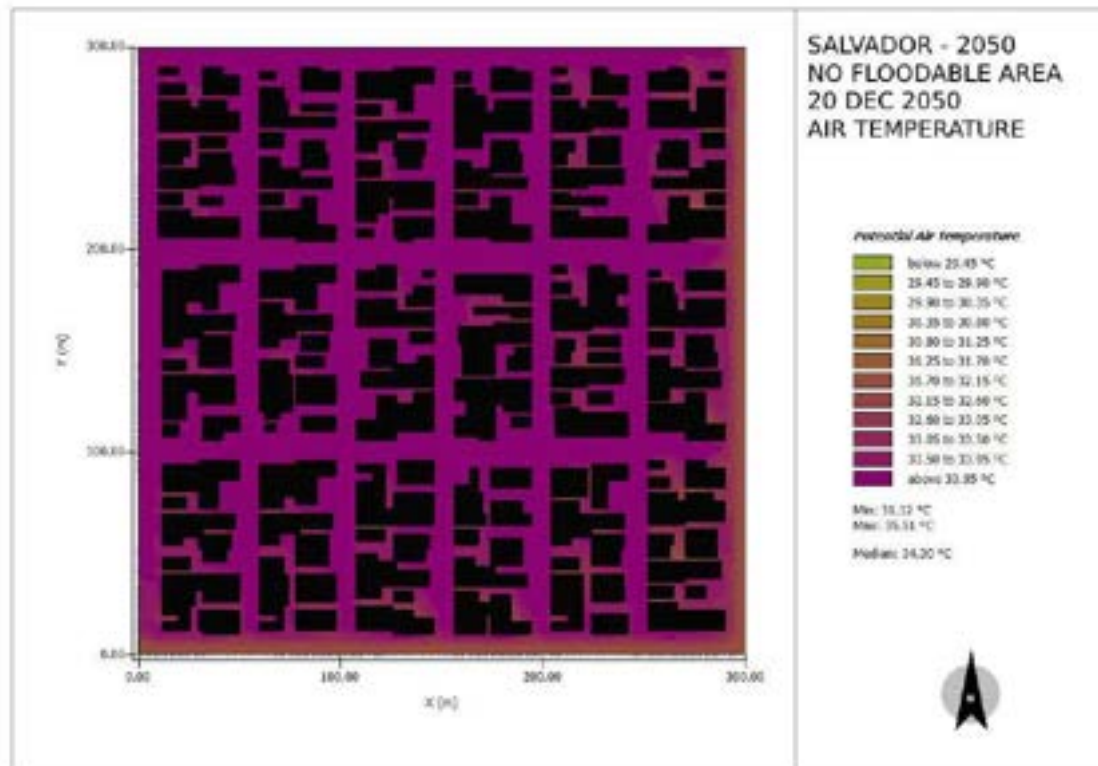
4 – Salvador (2050 – Inverno):

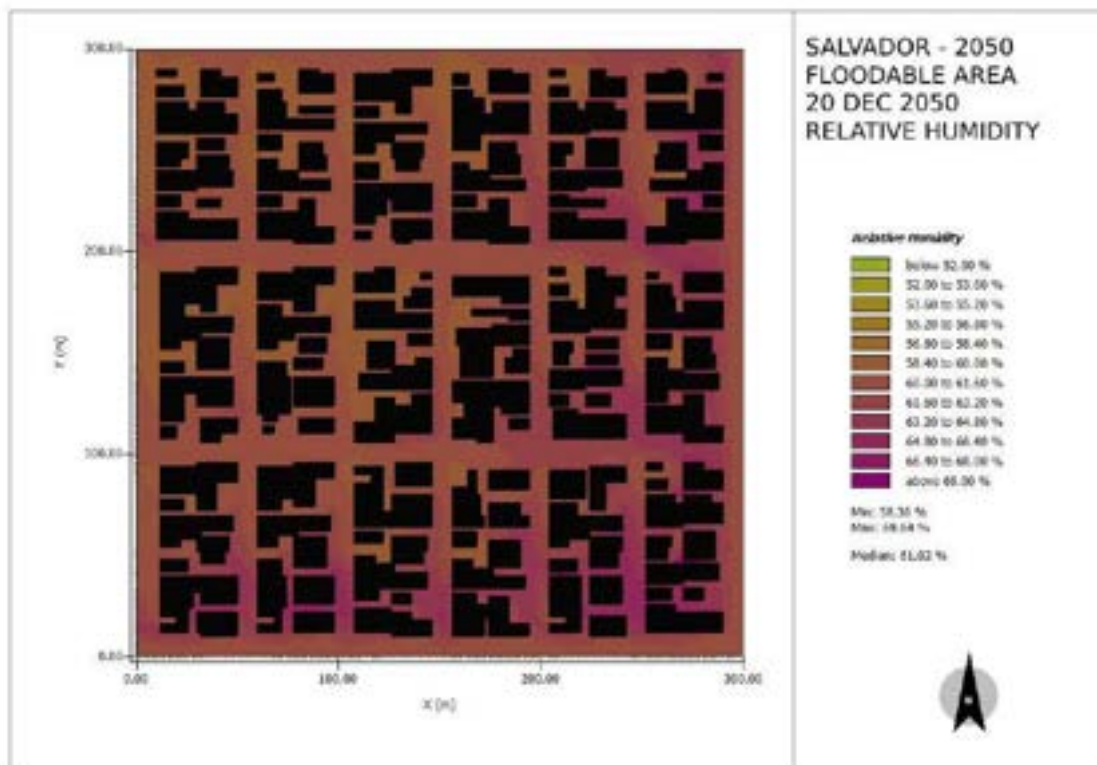
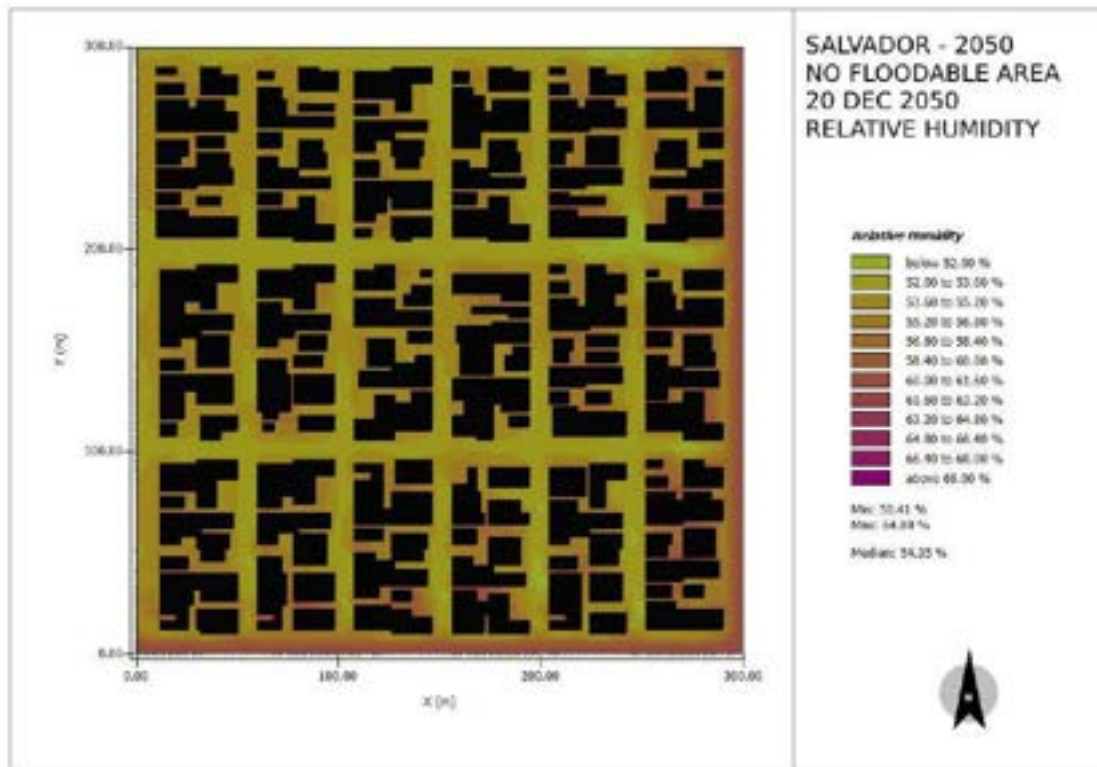


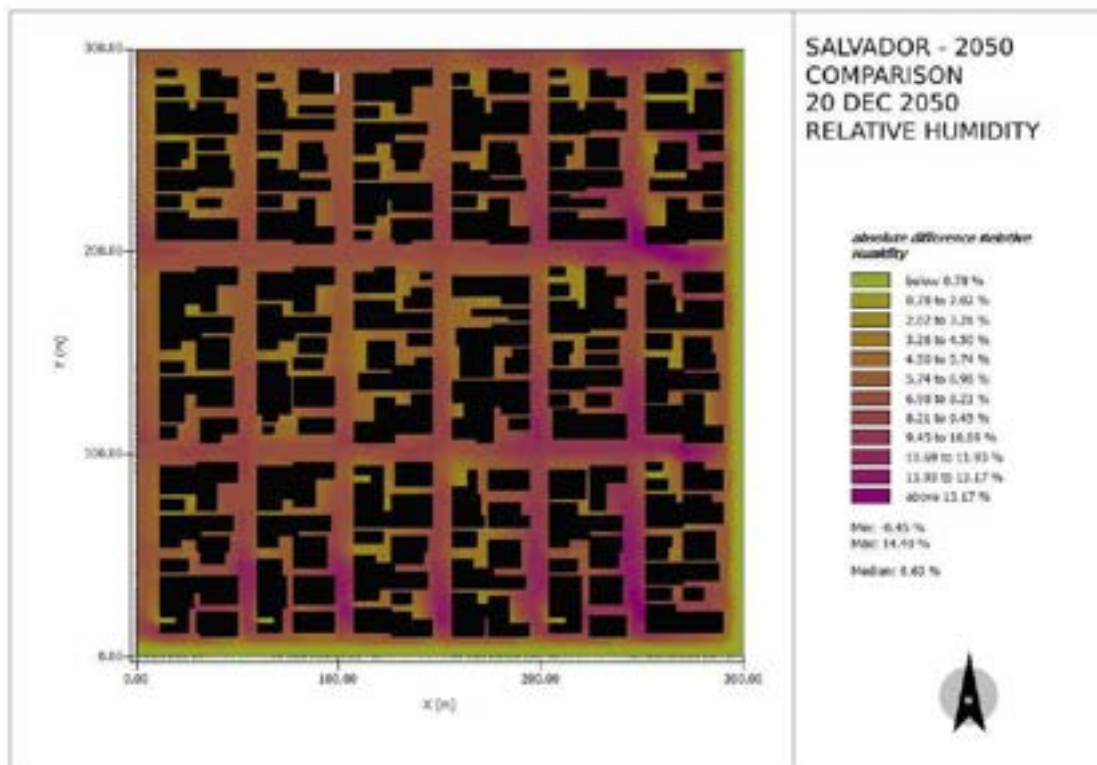
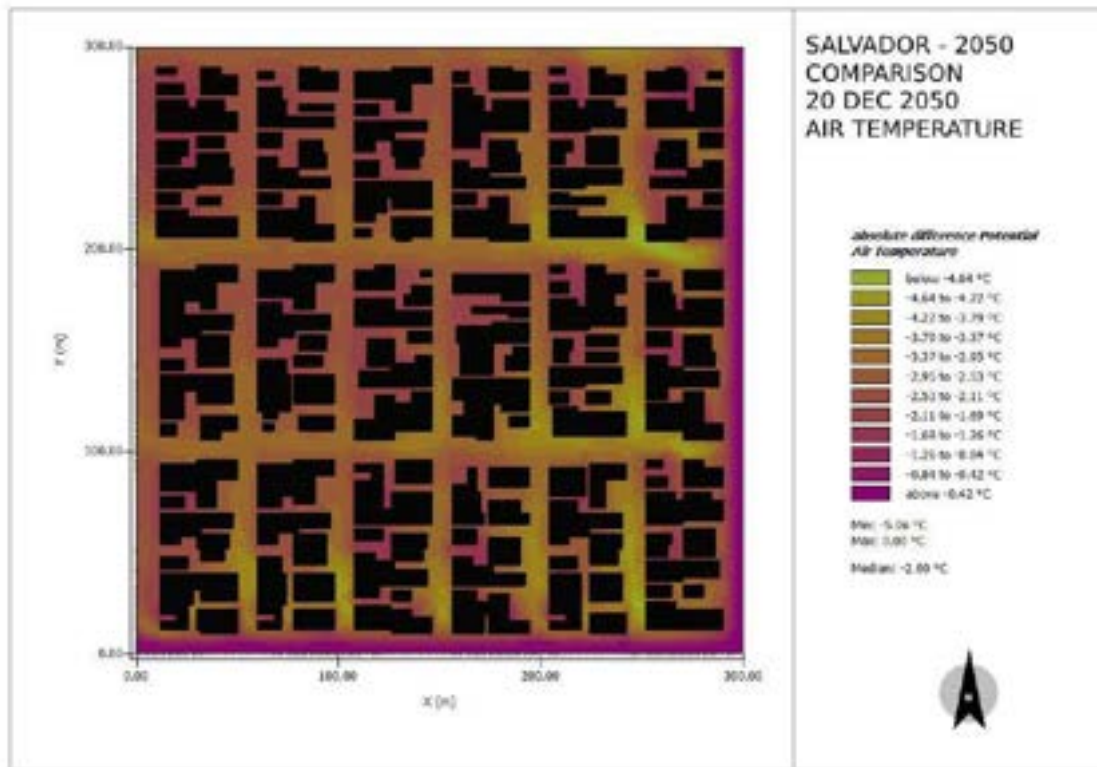




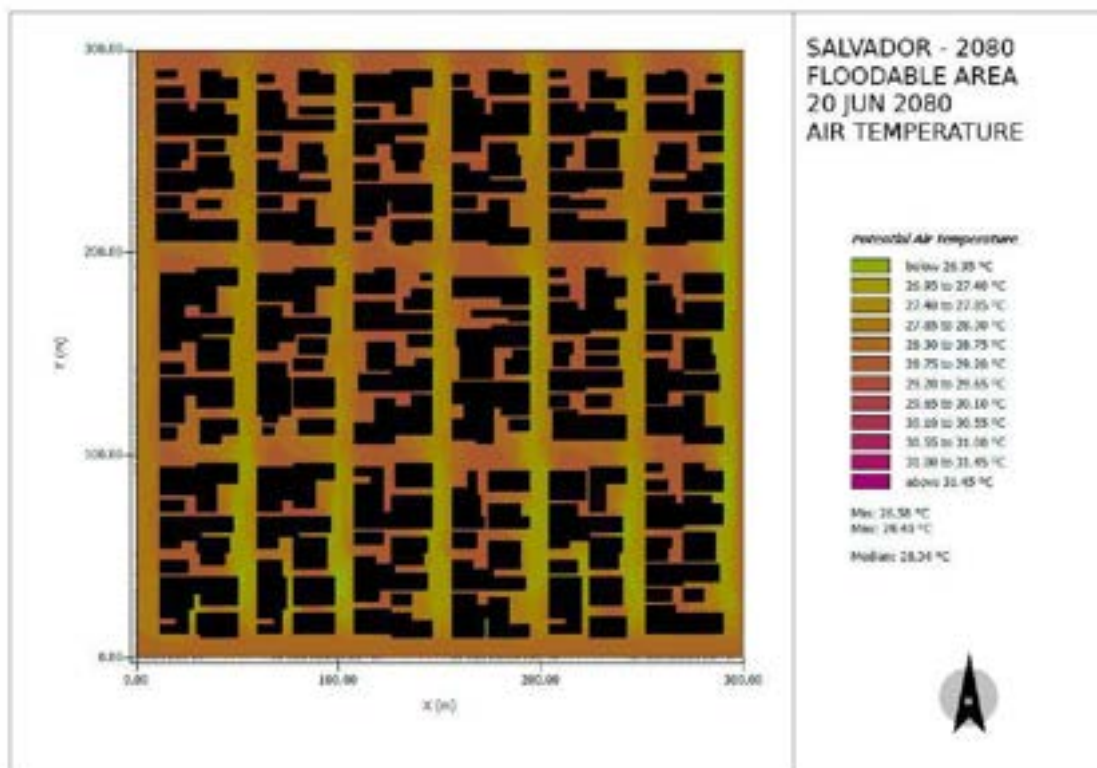
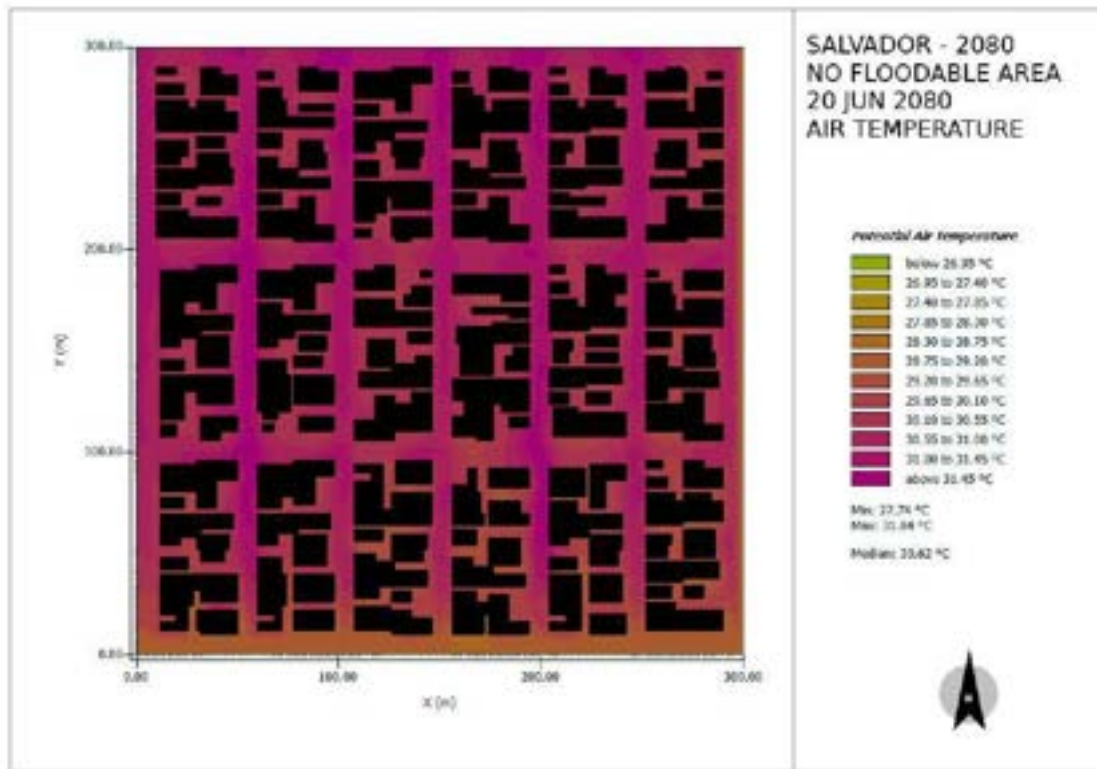
4 – Salvador (2050 – Verão):

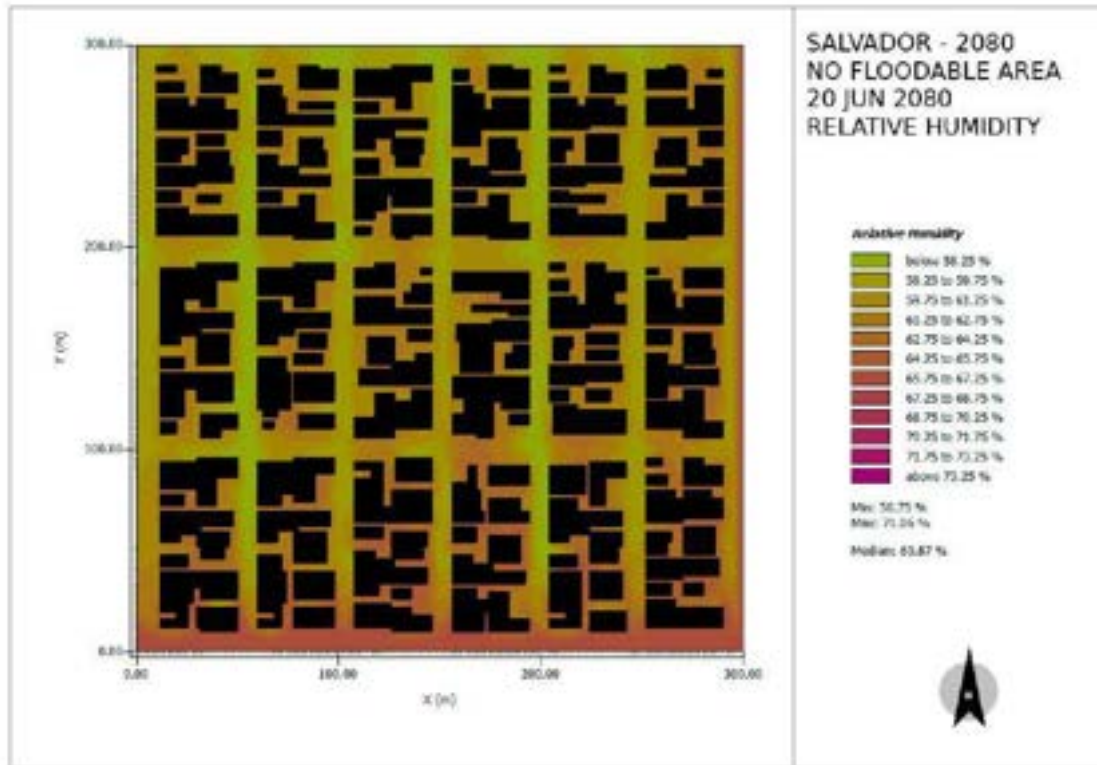


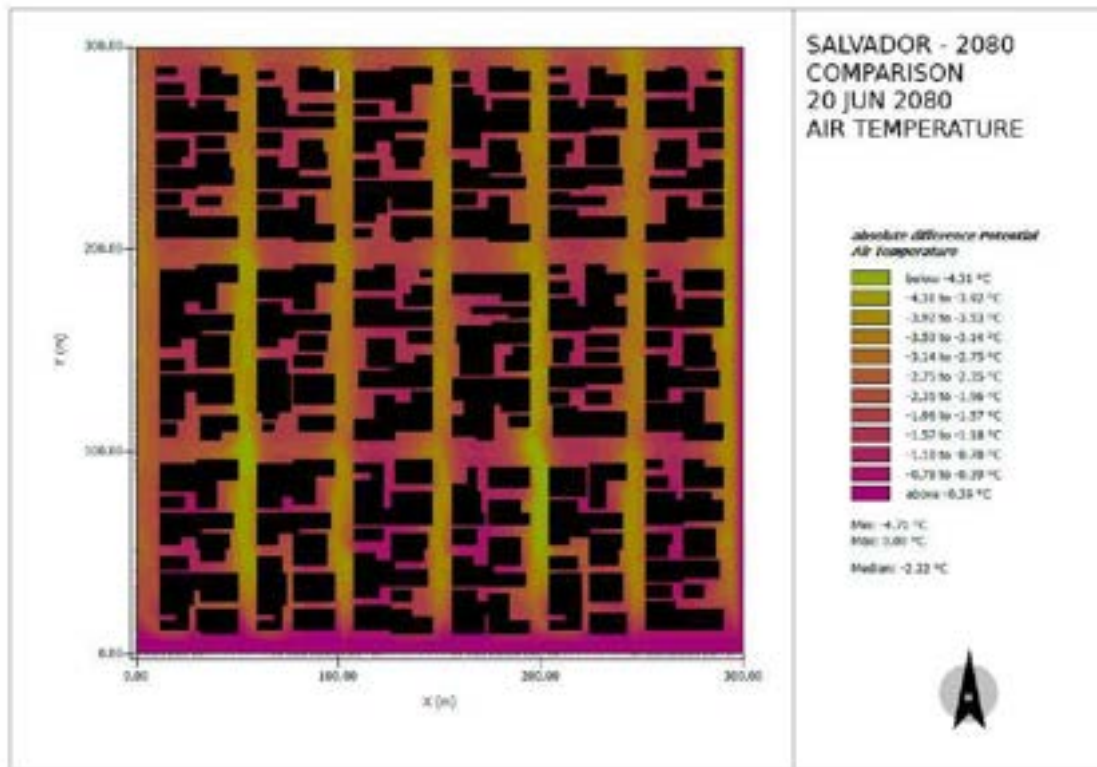




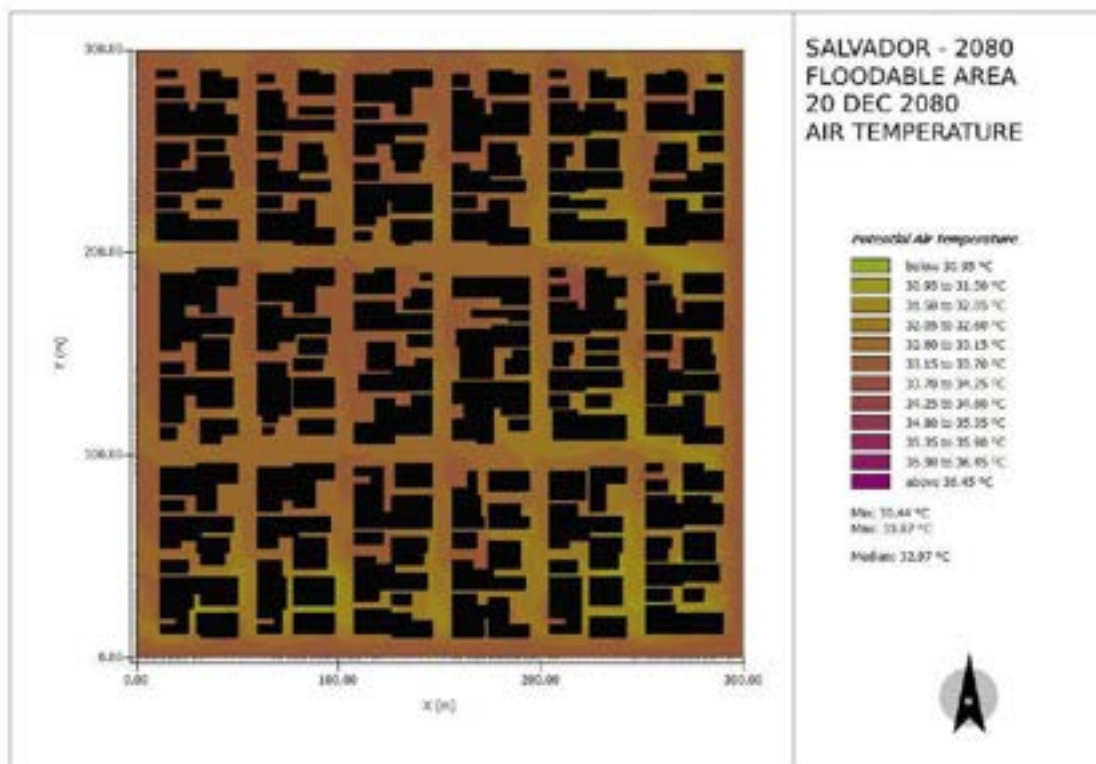
4 – Salvador (2050 – Inverno):

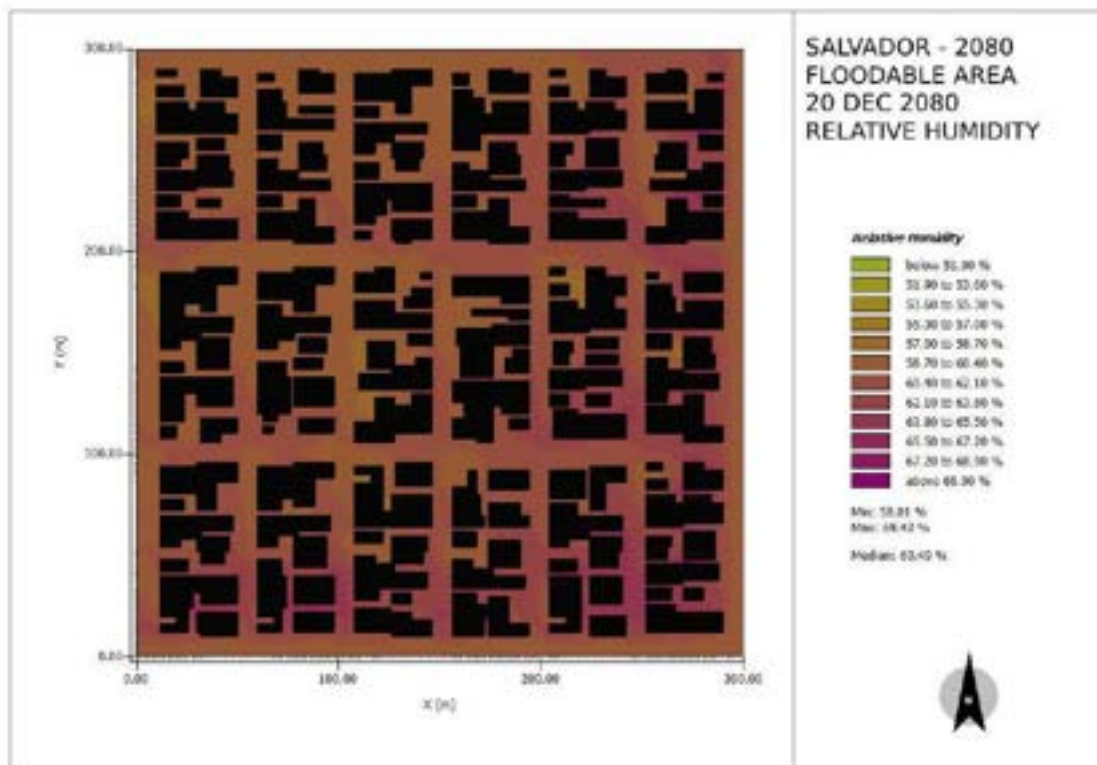
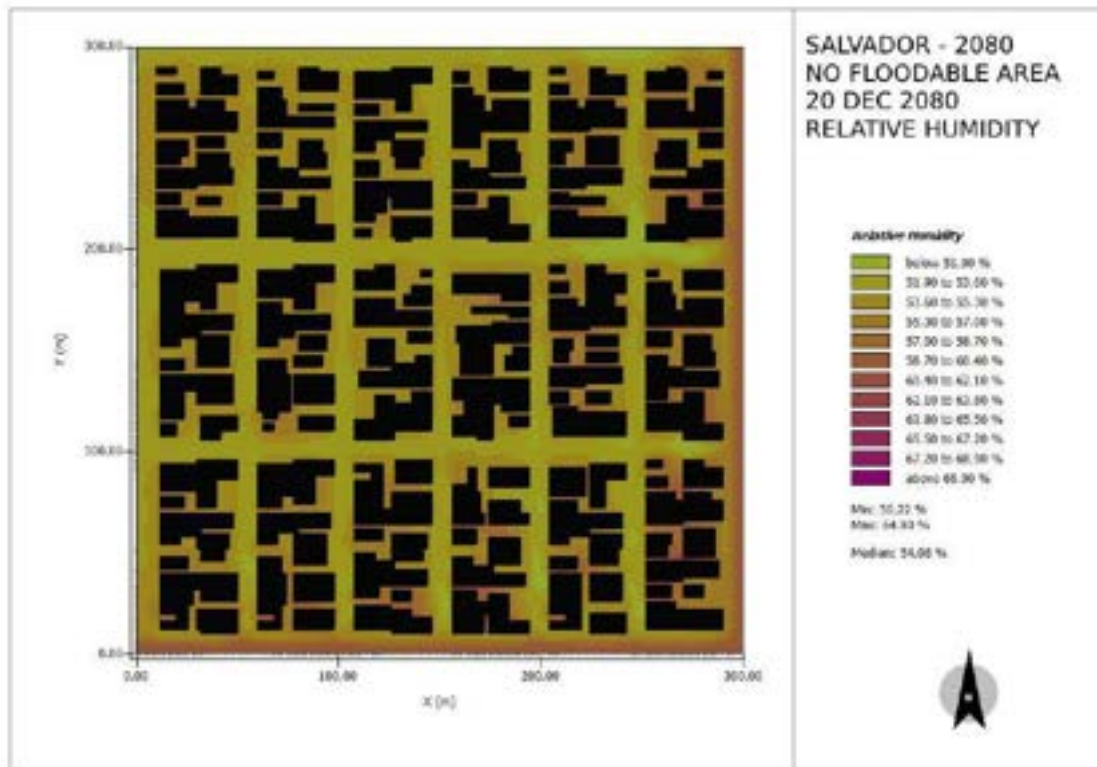


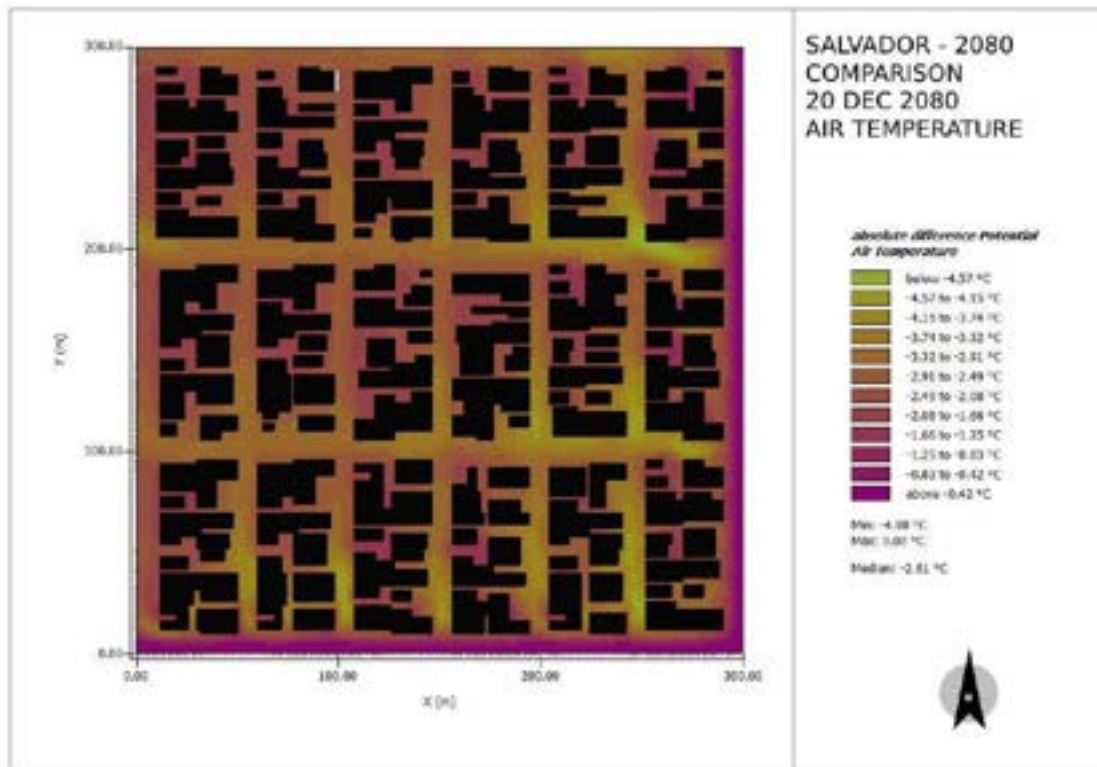




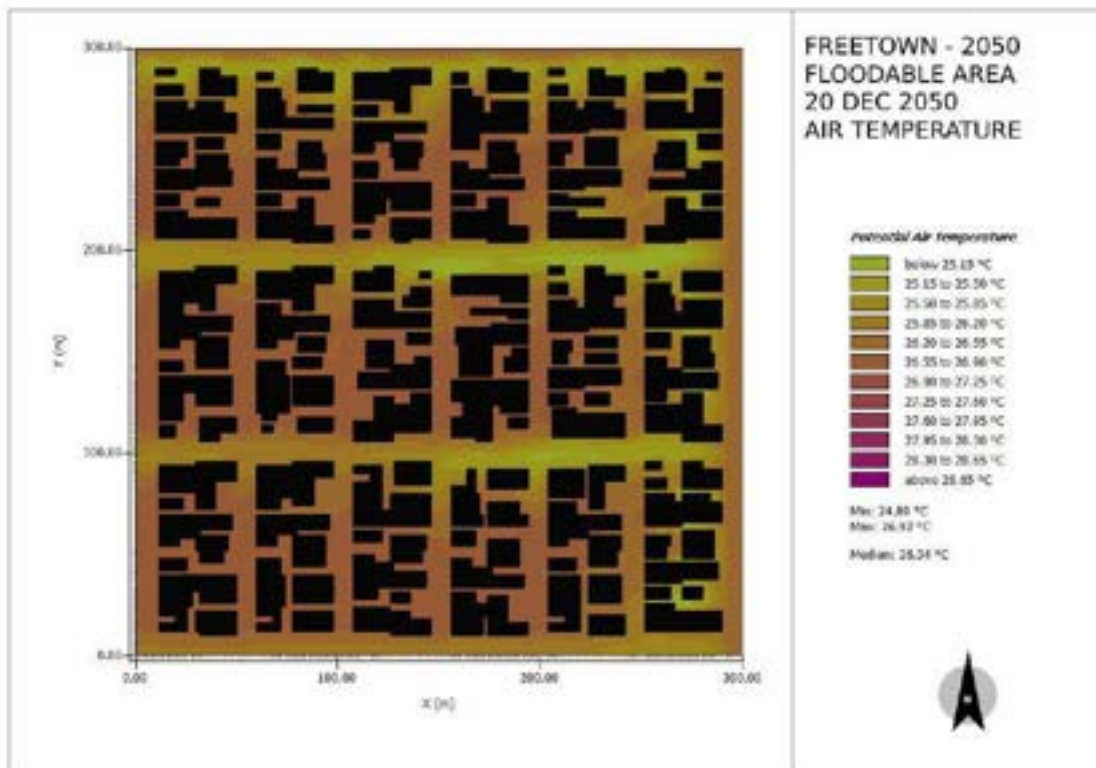
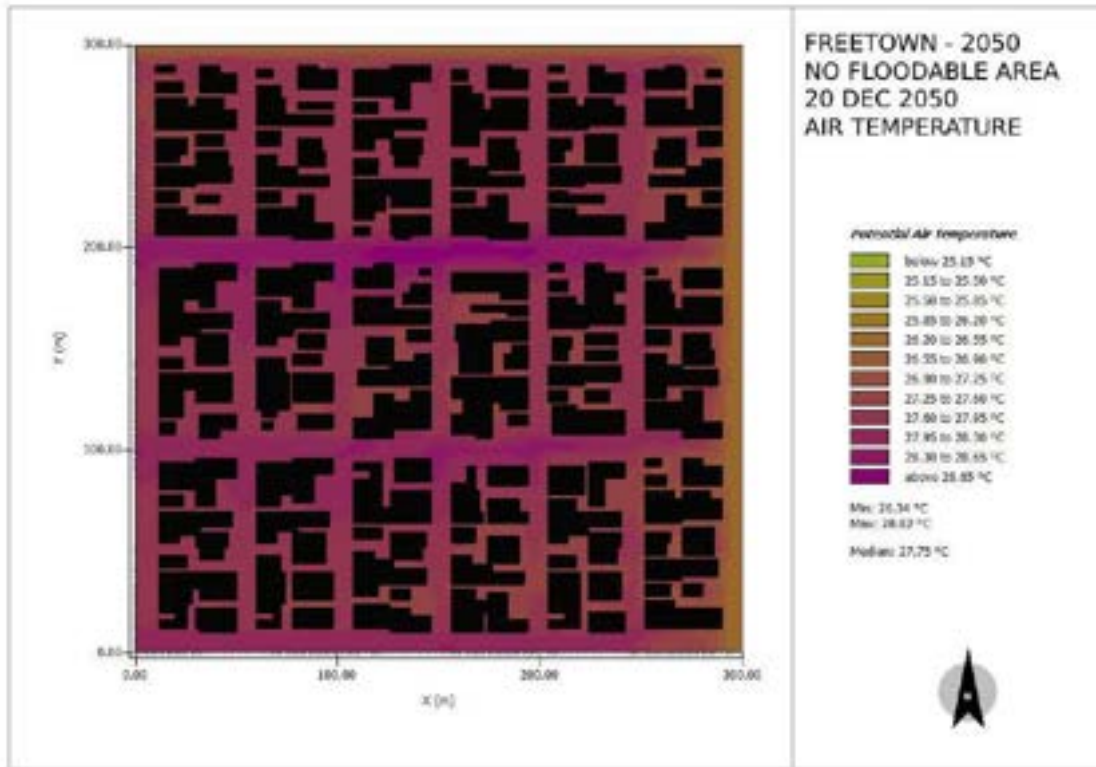
4 – Salvador (2080 – Verão):

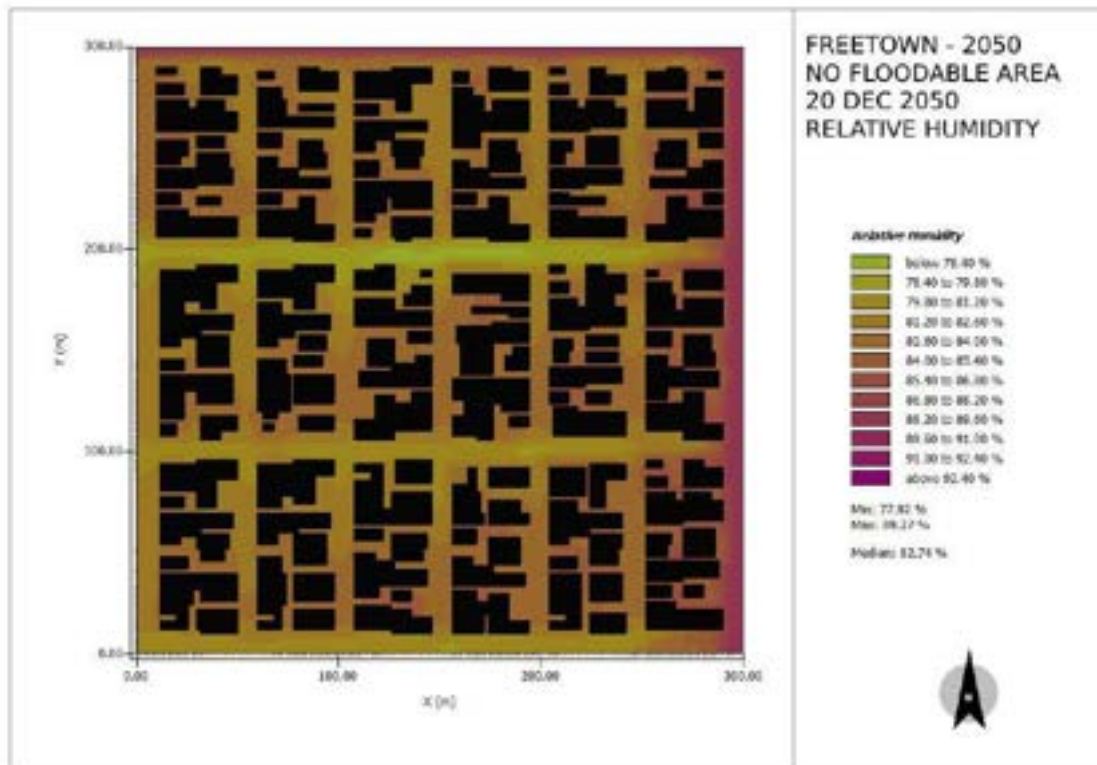


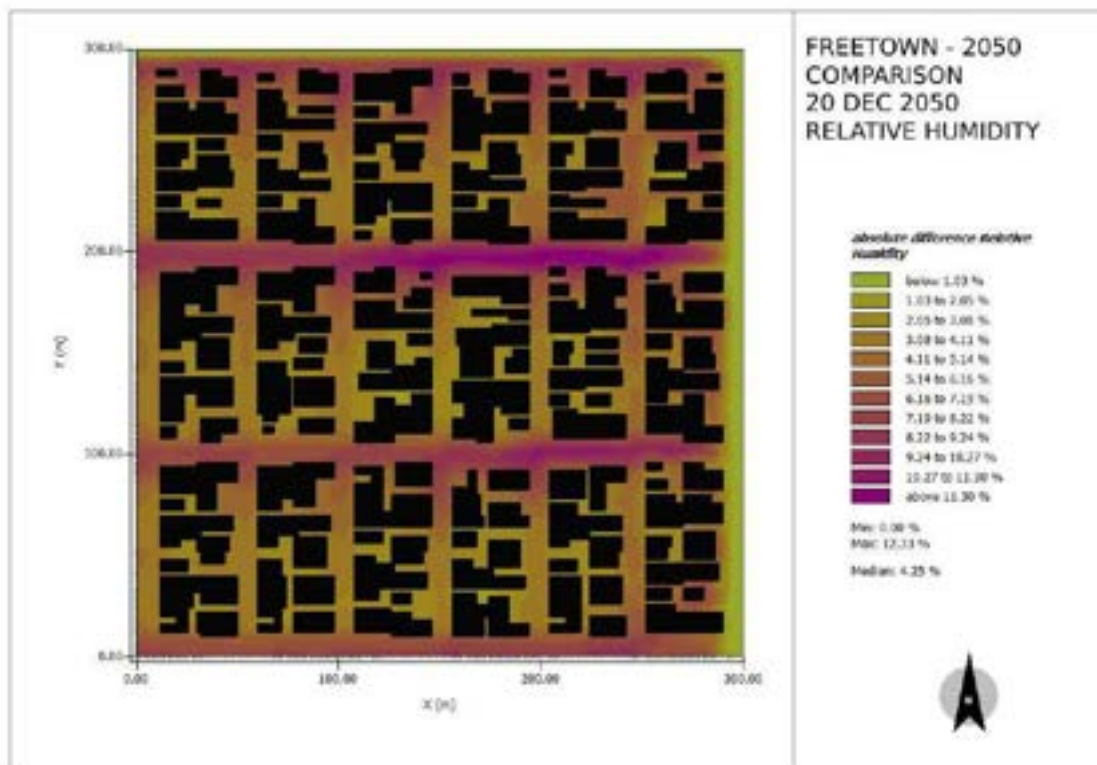
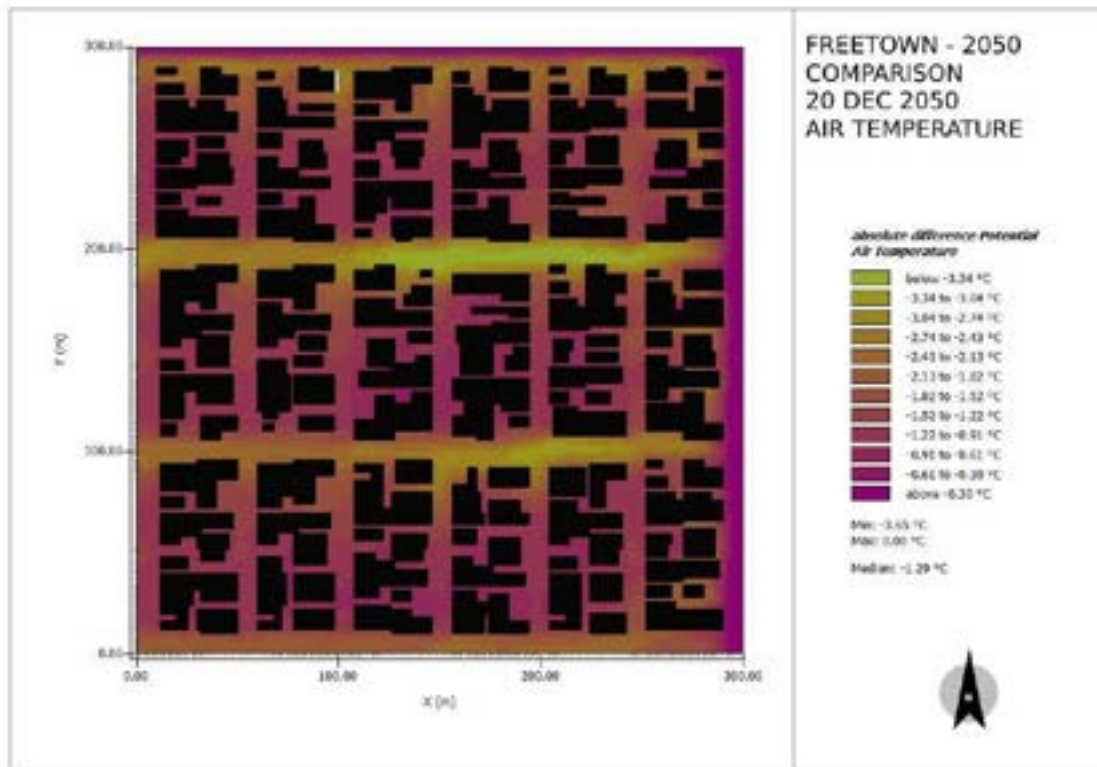




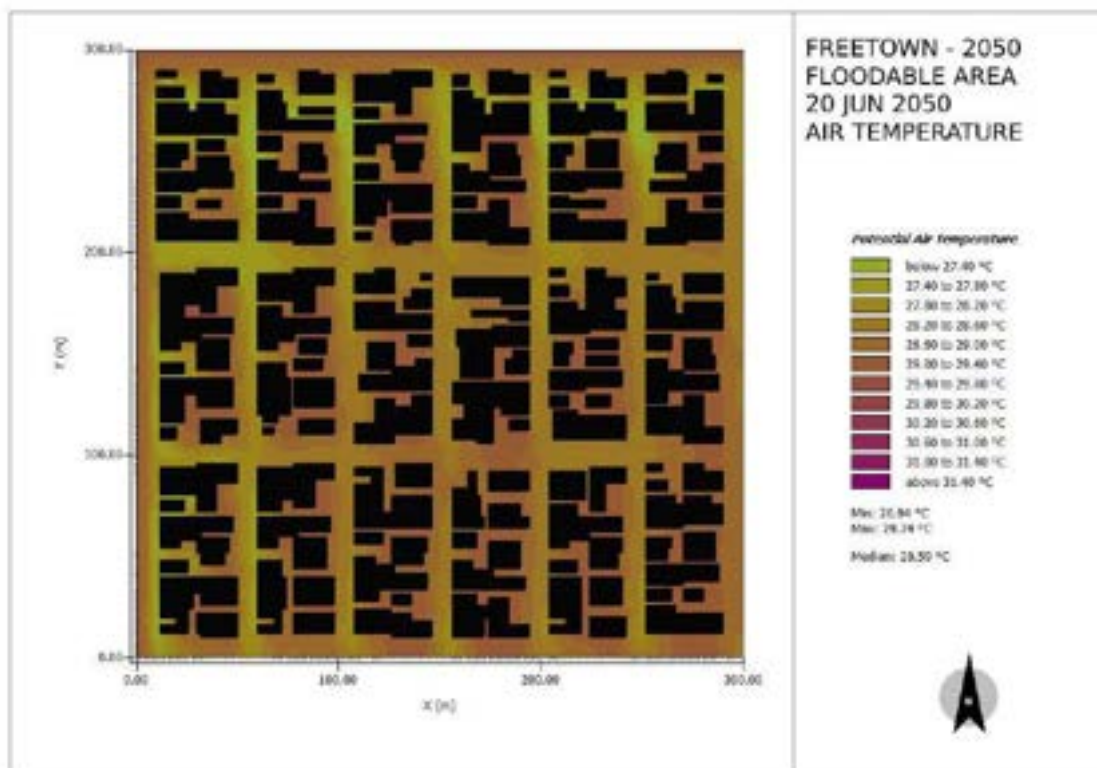
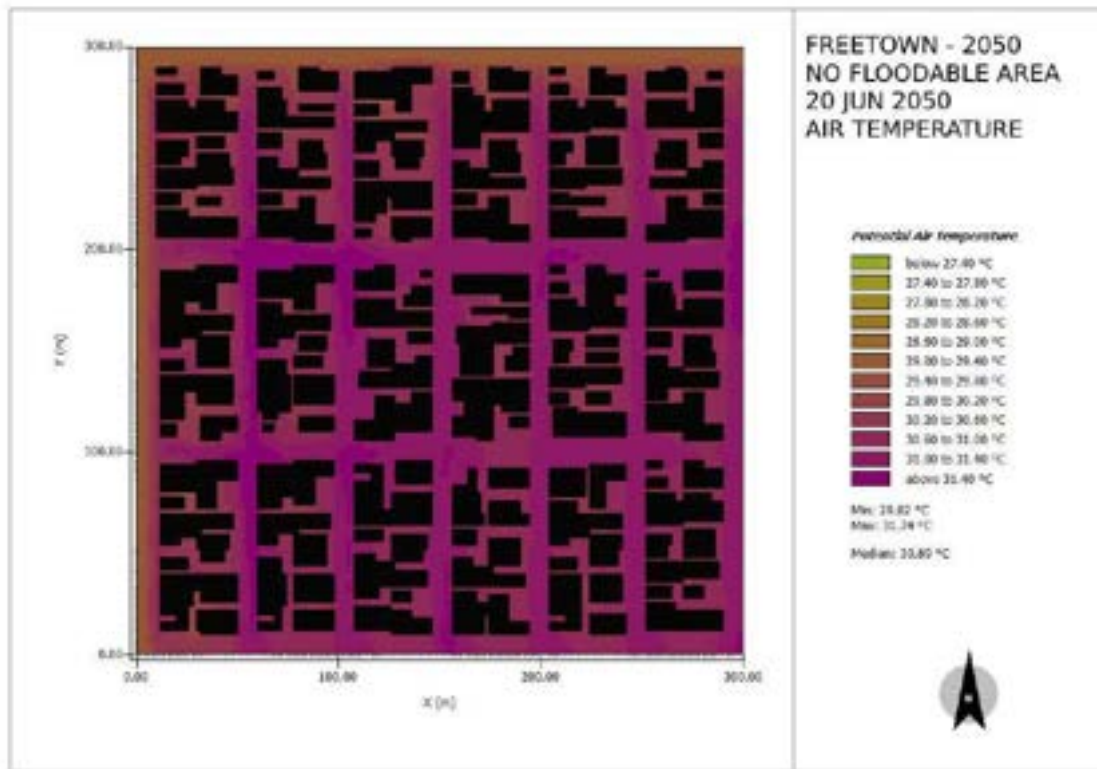
5 – Freetown (2050 – Inverno):

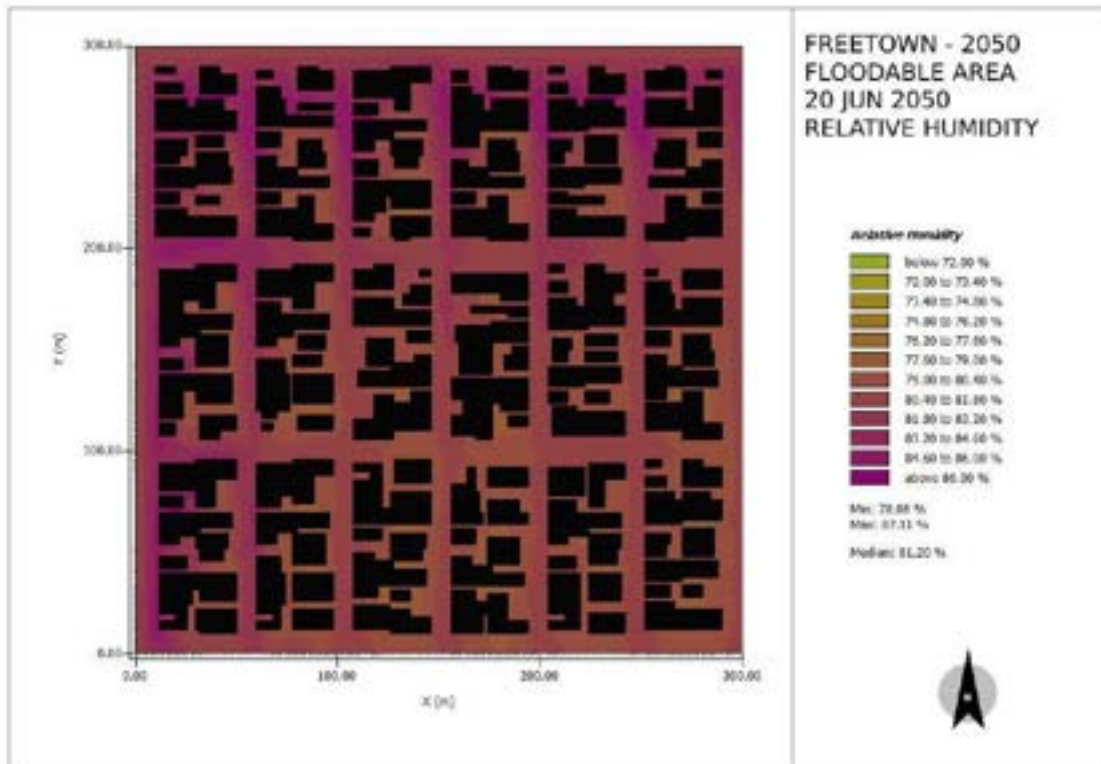
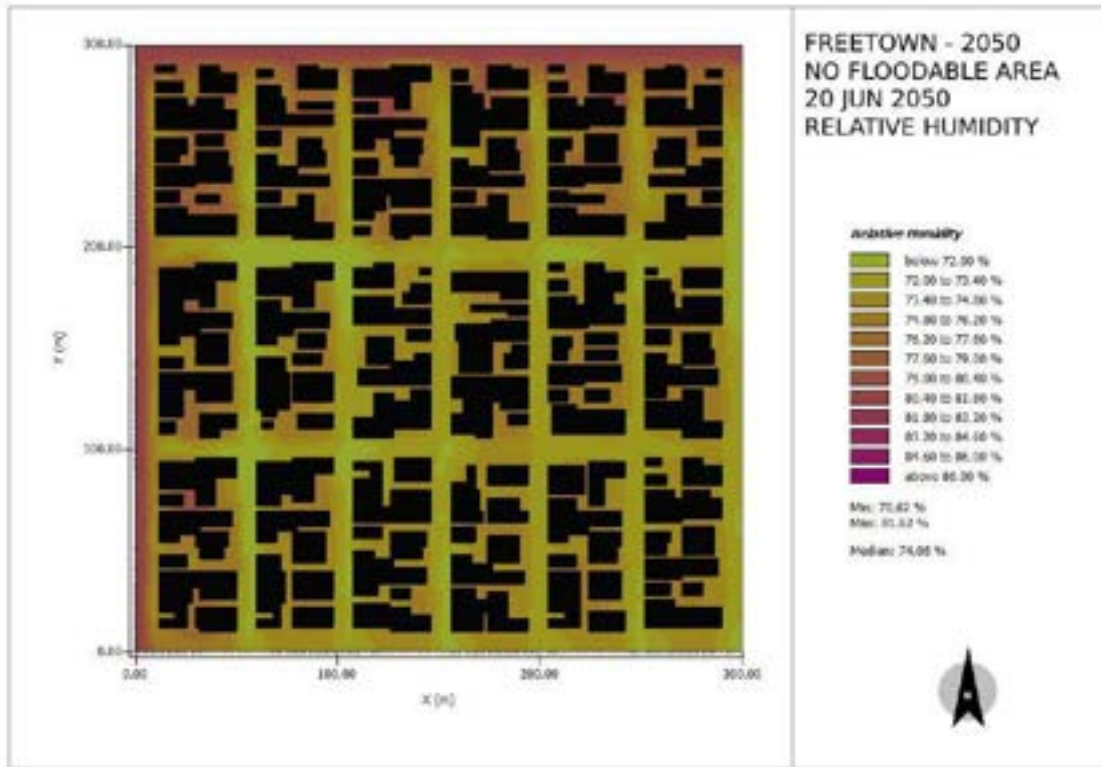


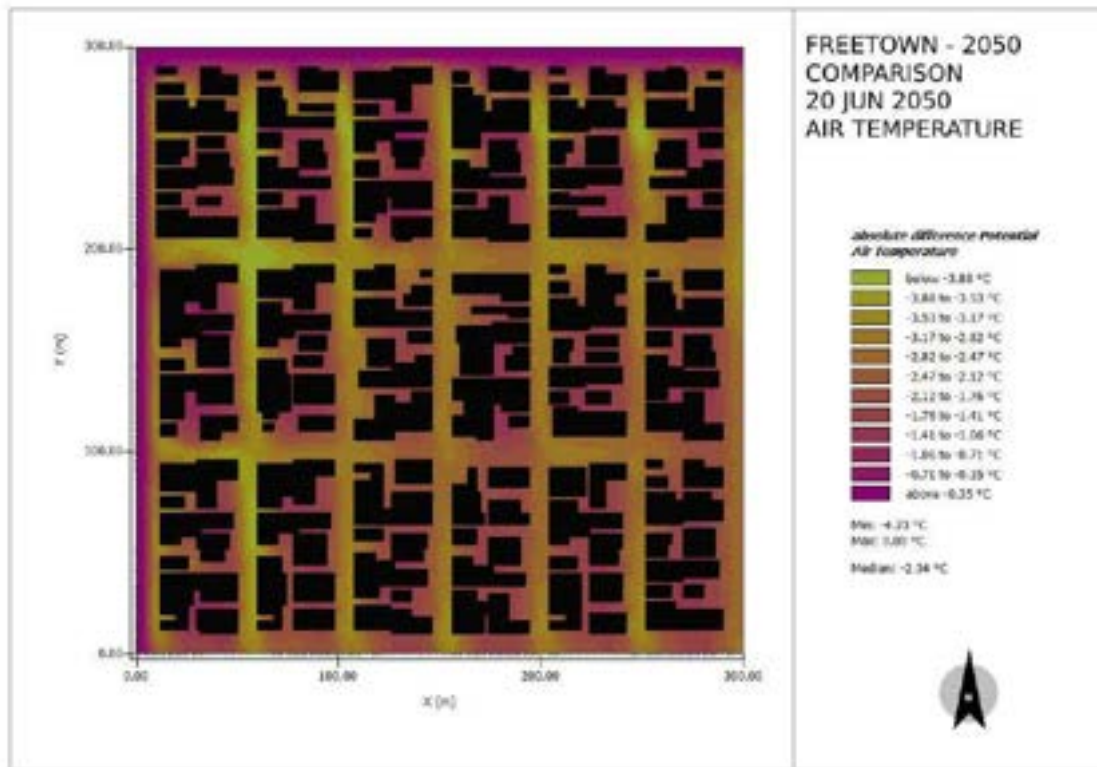




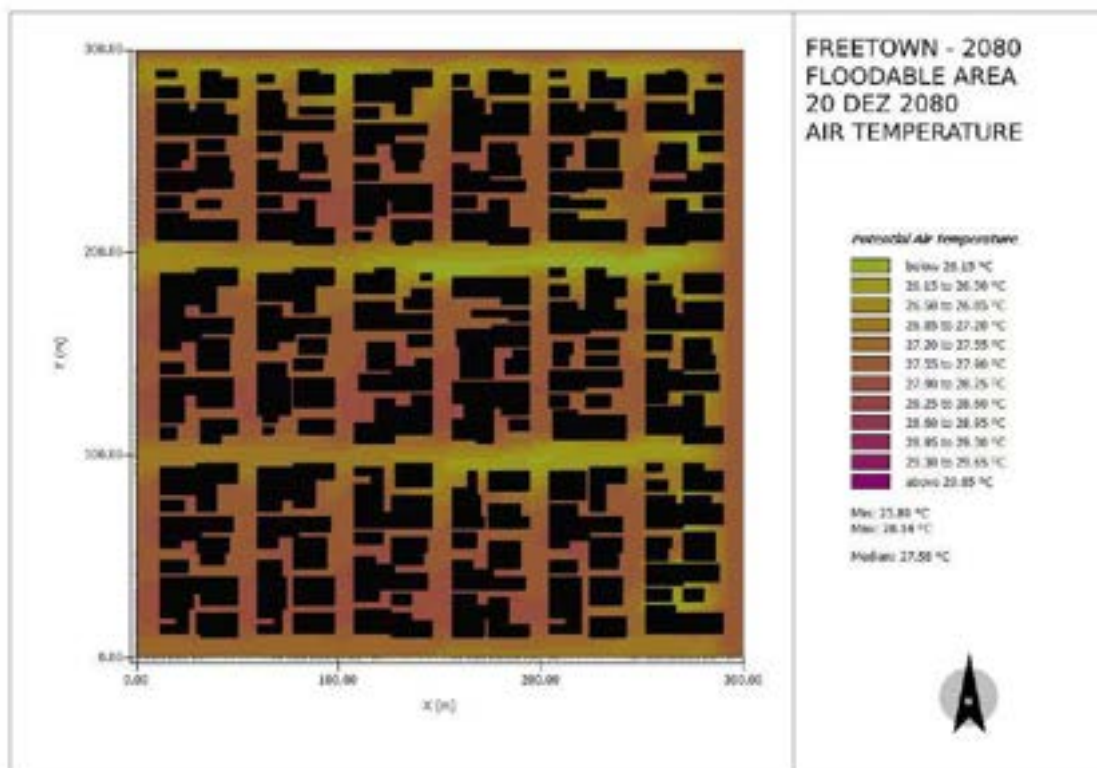
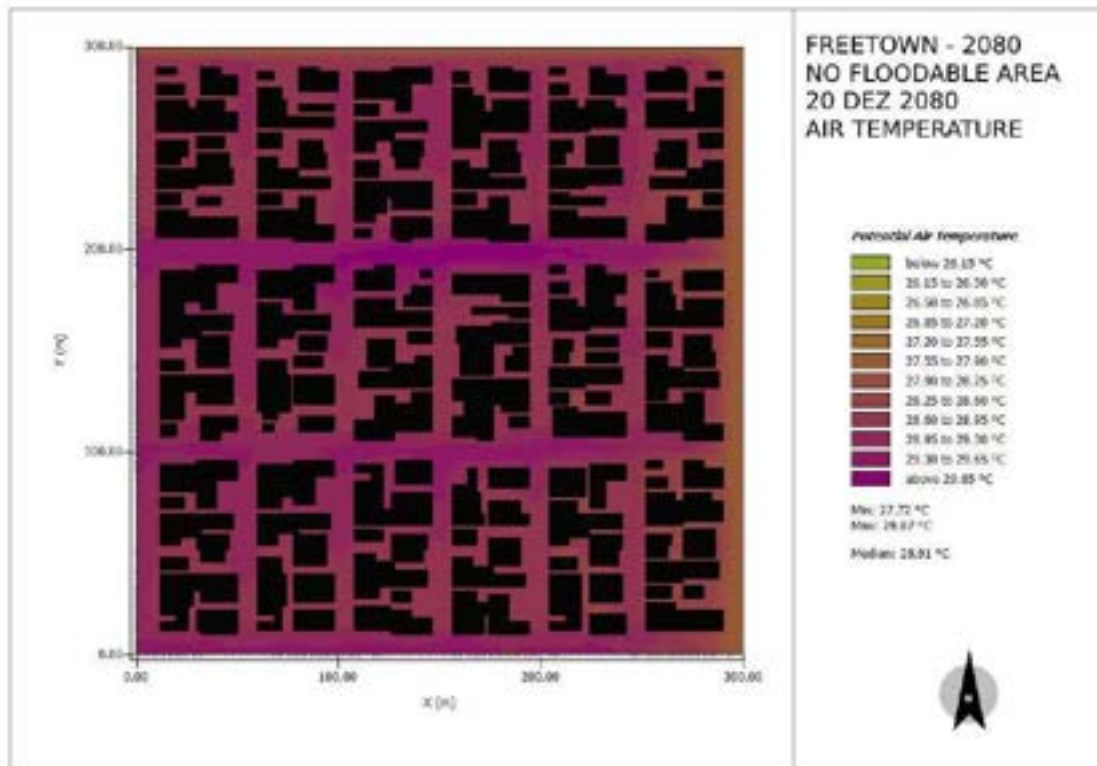
5 – Freetown (2050 – Verão):

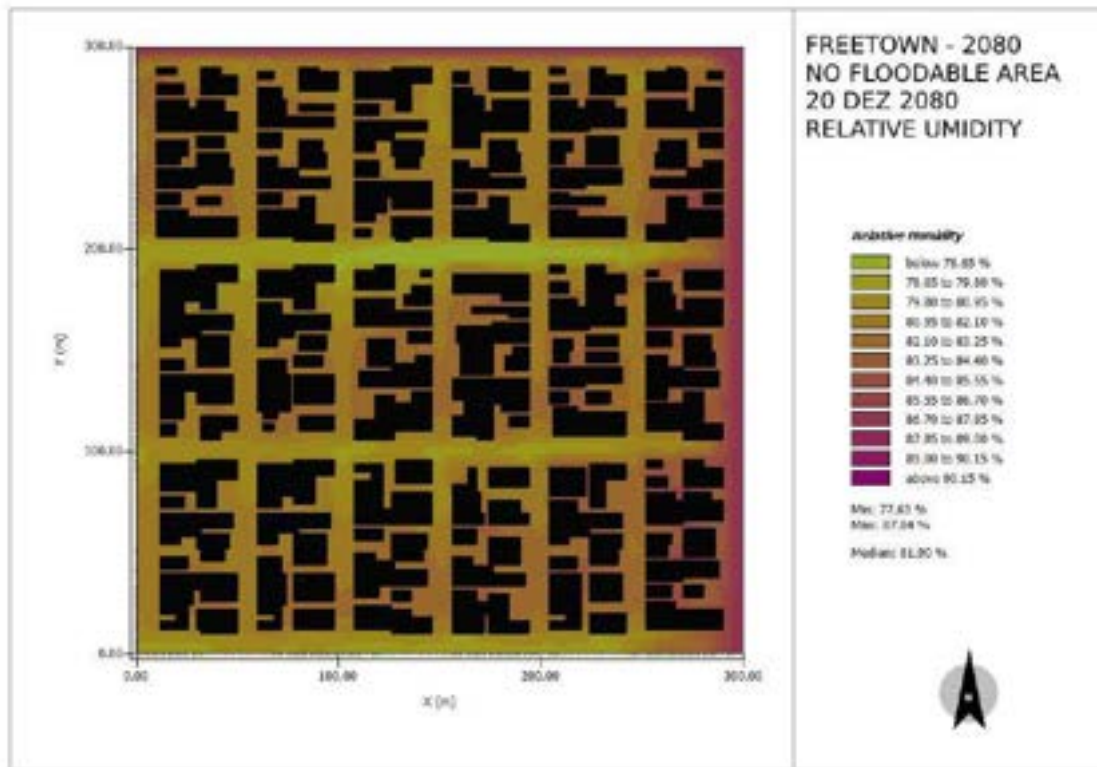


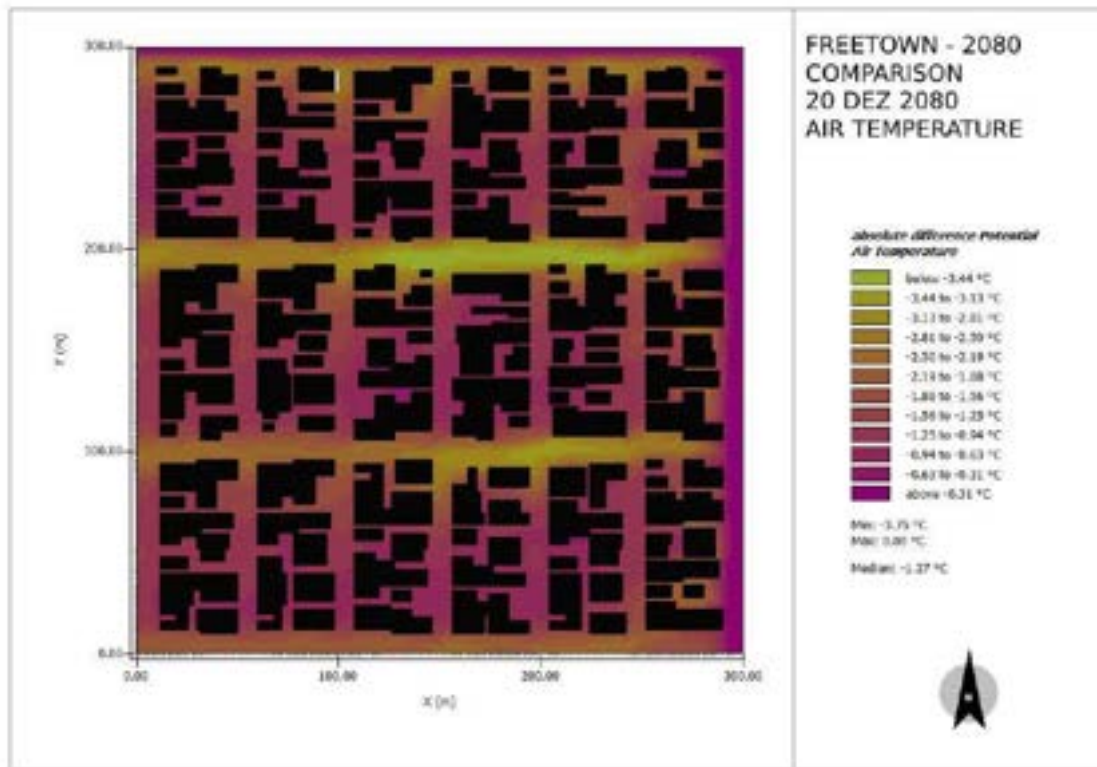




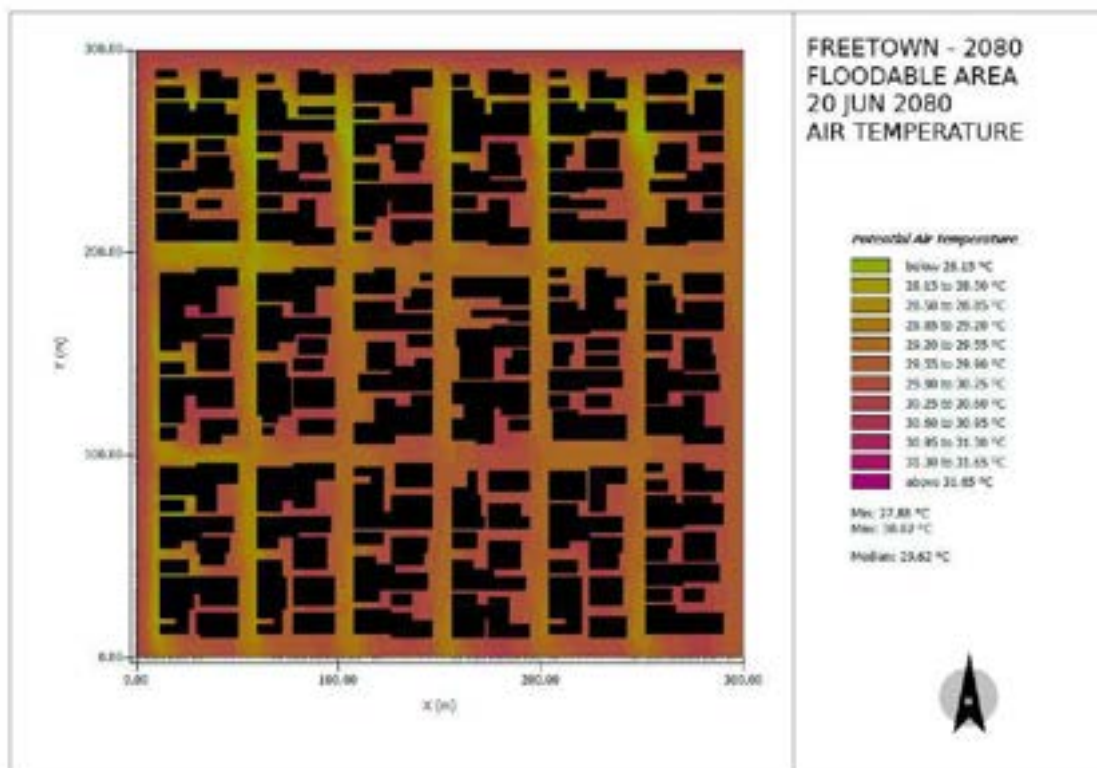
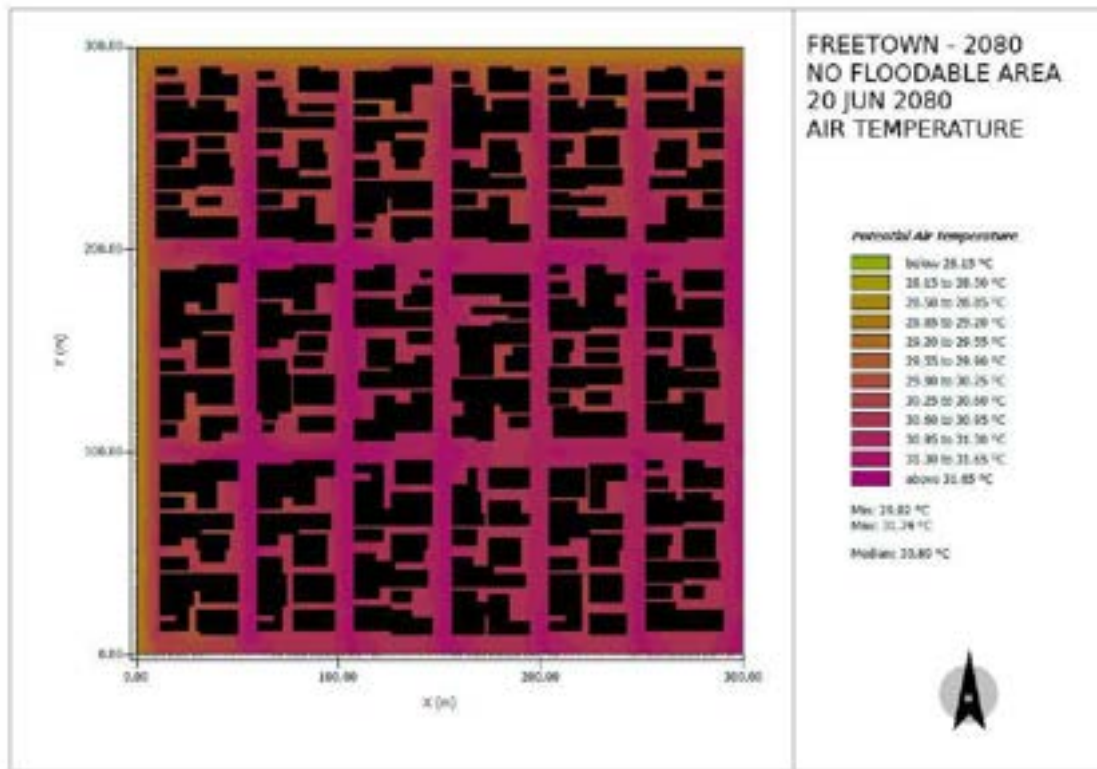
5 – Freetown (2080 – Inverno):

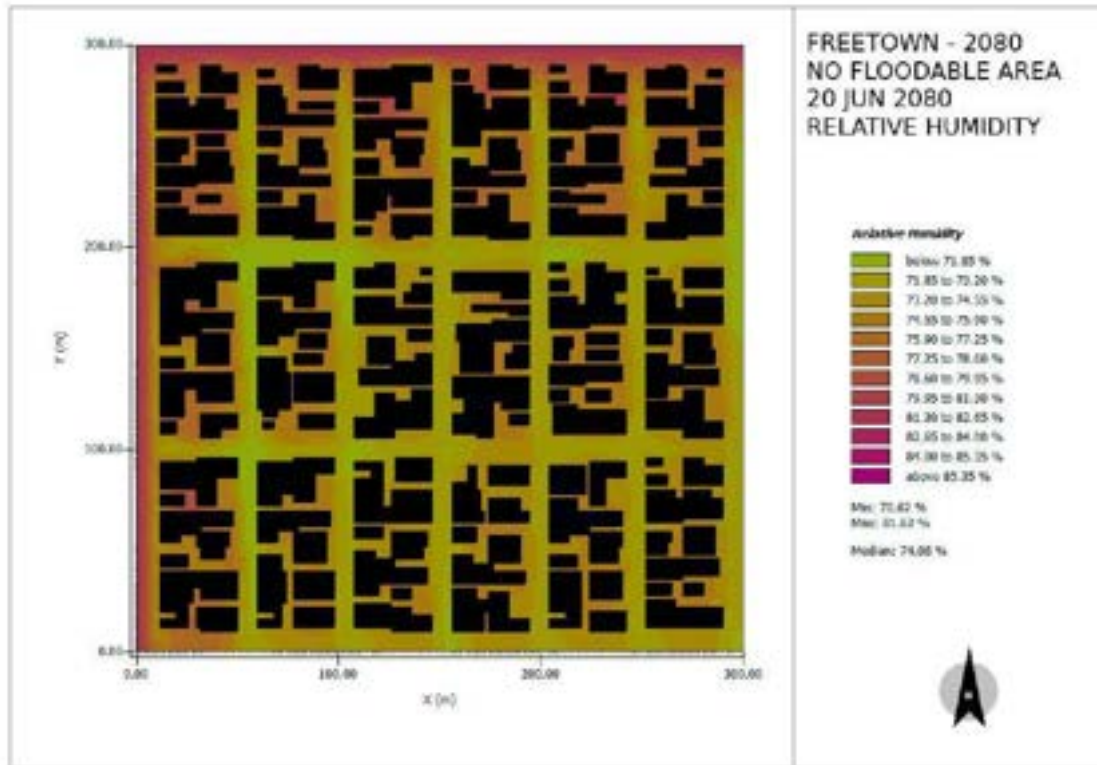






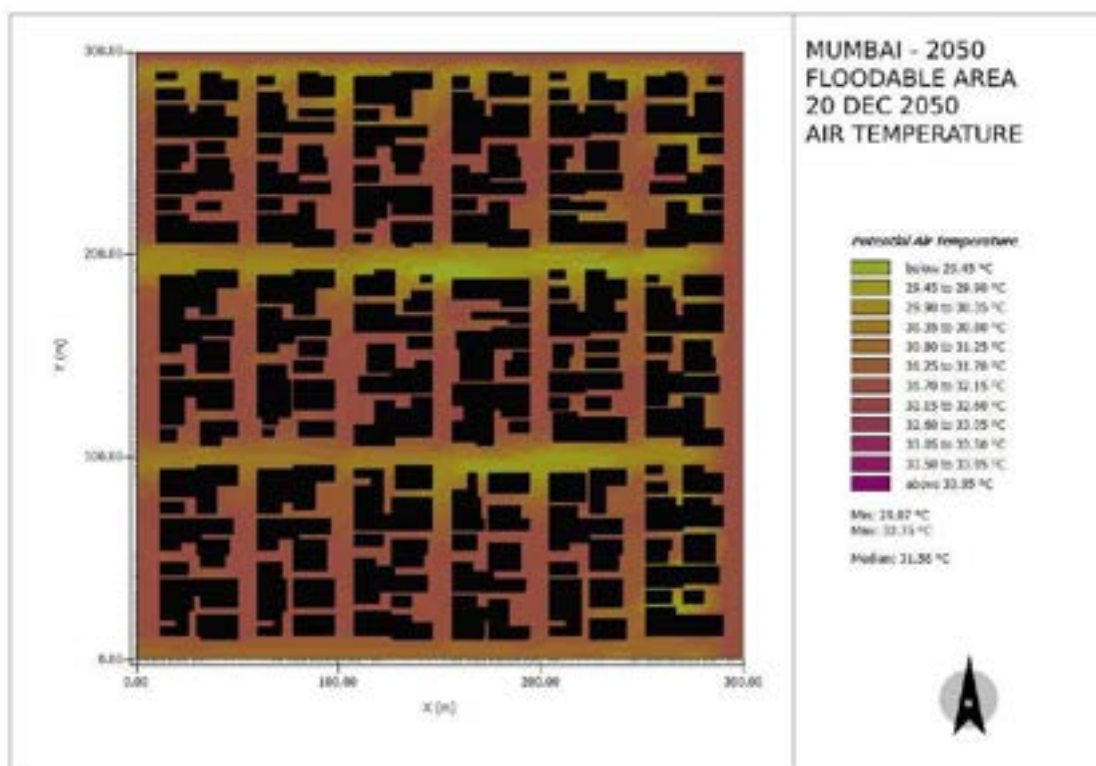
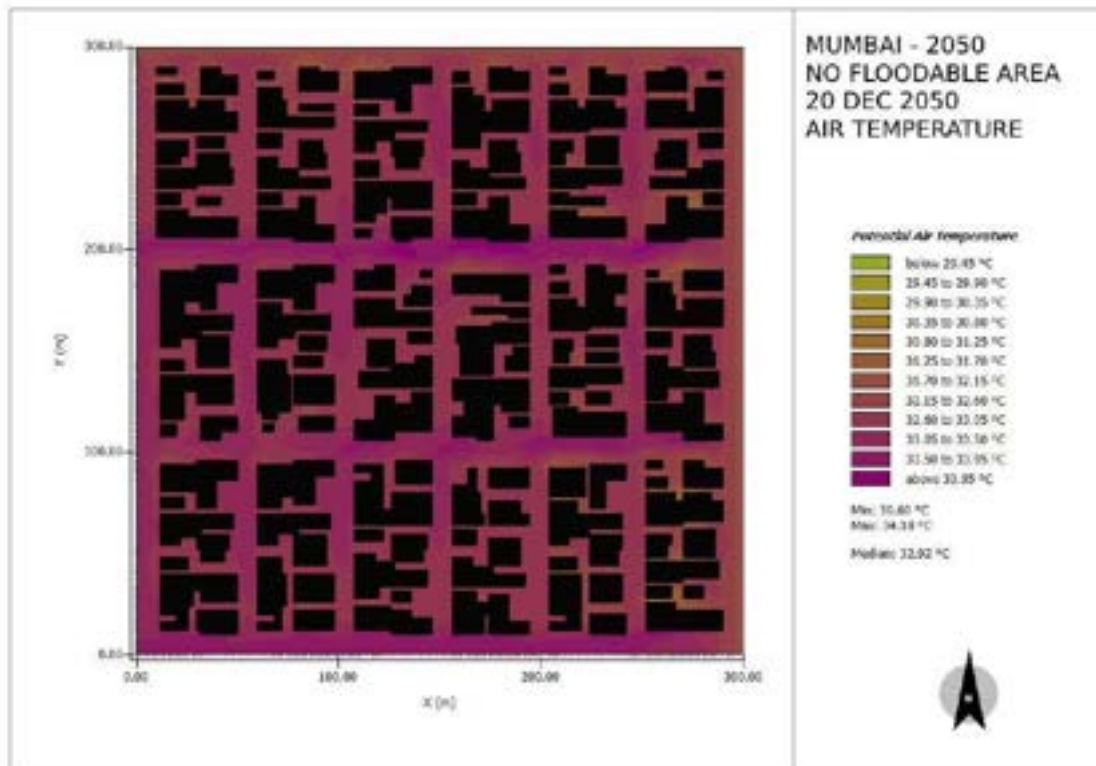
5 – Freetown (2080 – Verão):

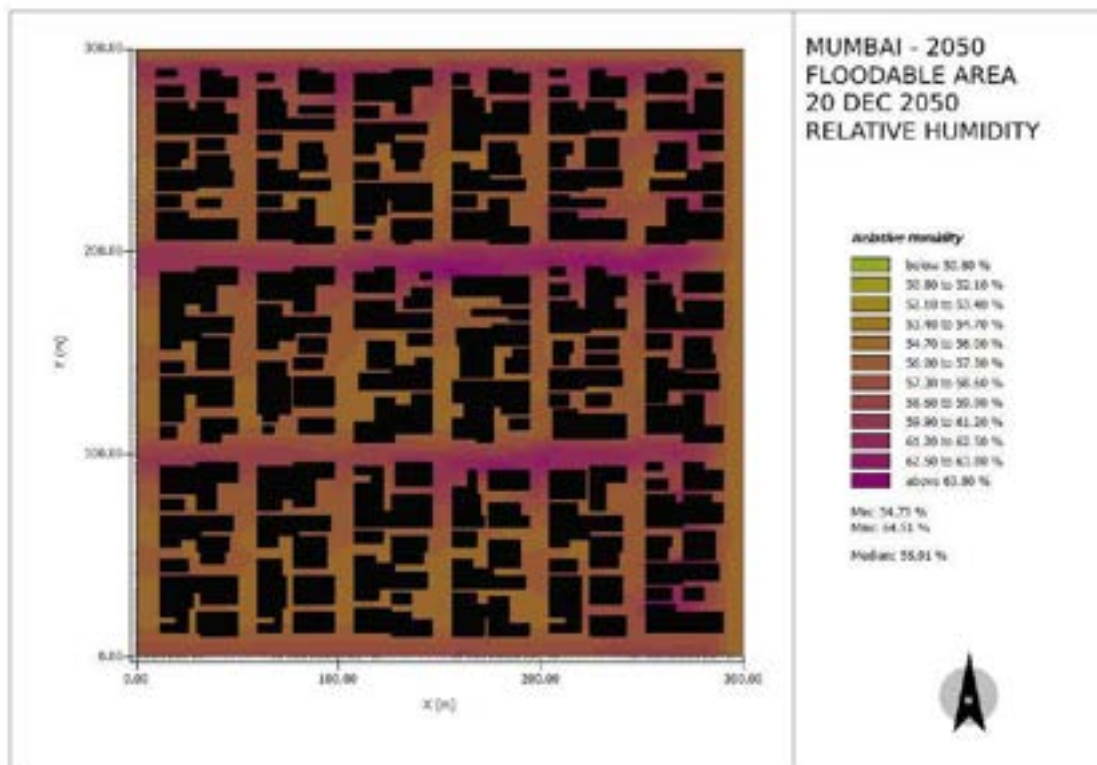
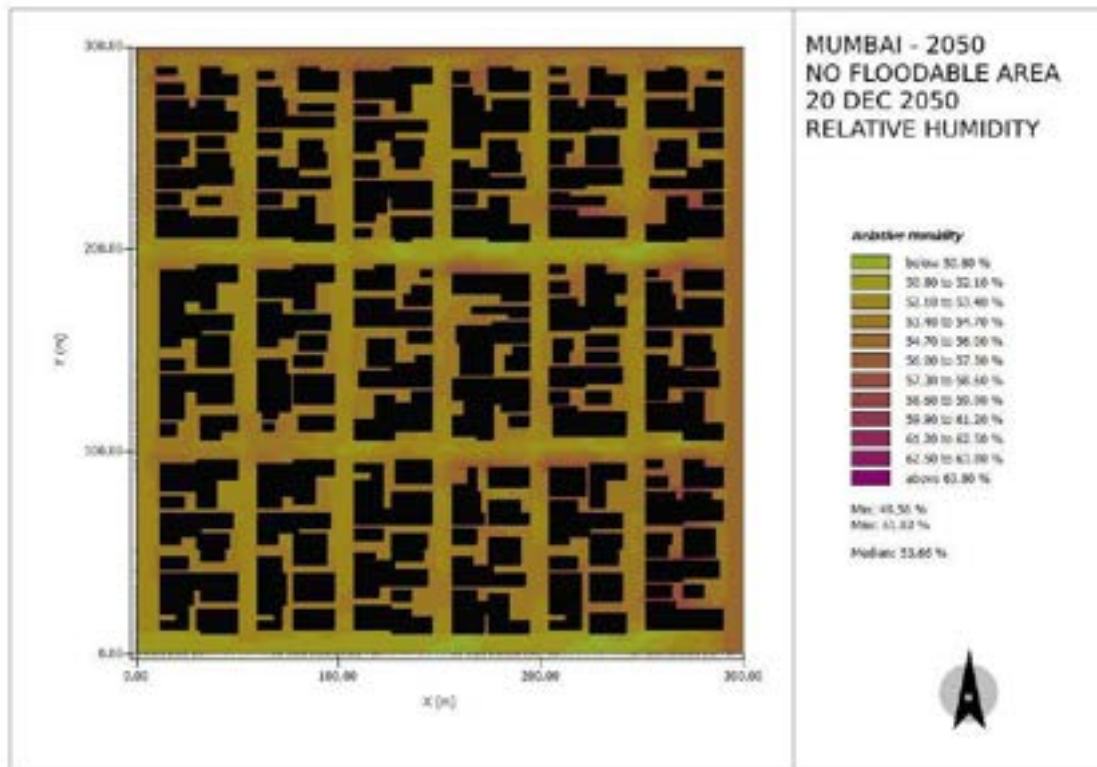


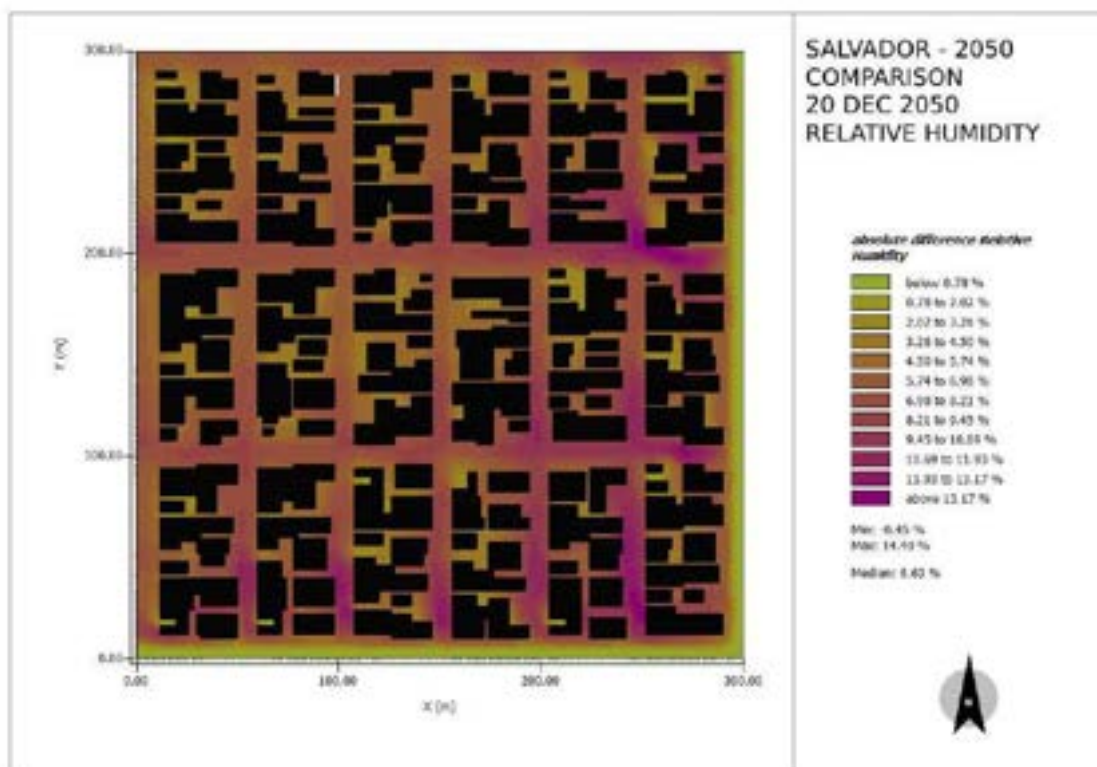
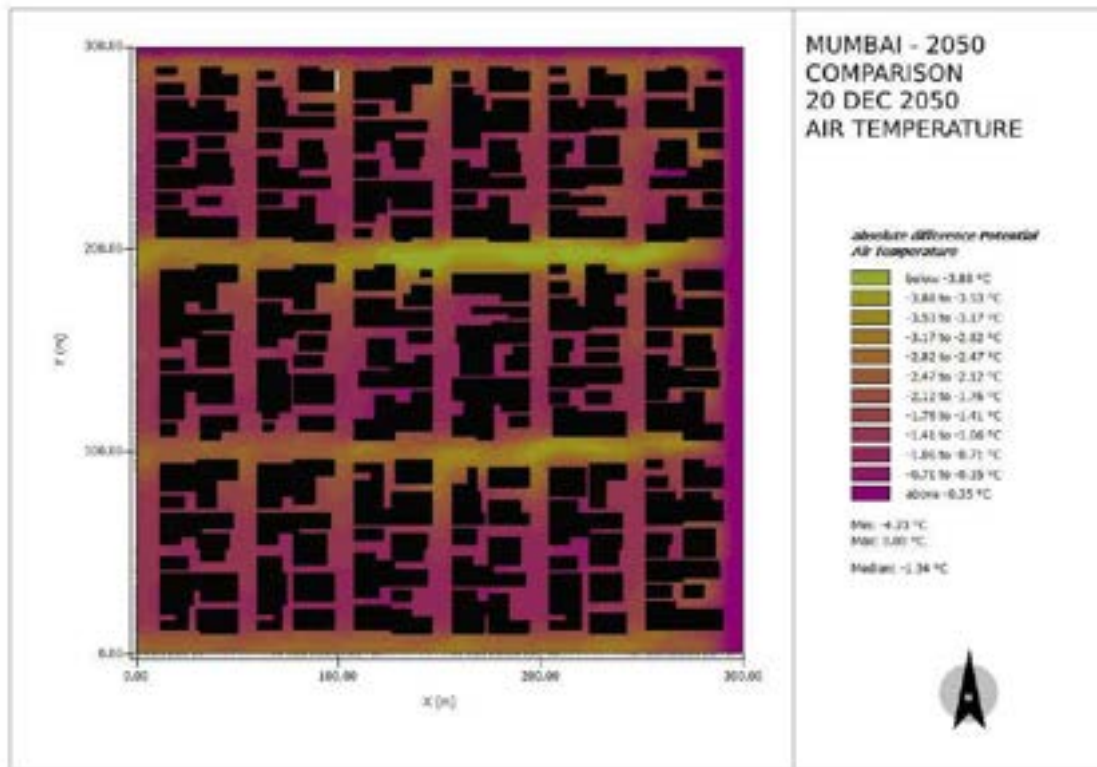




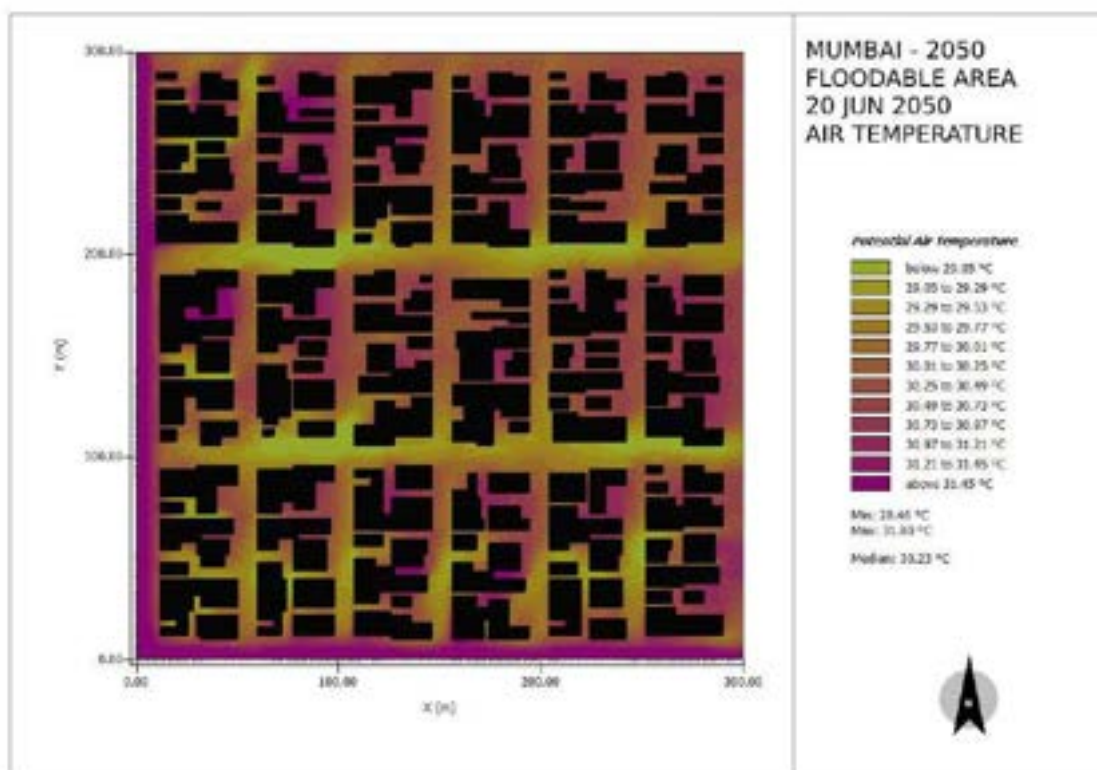
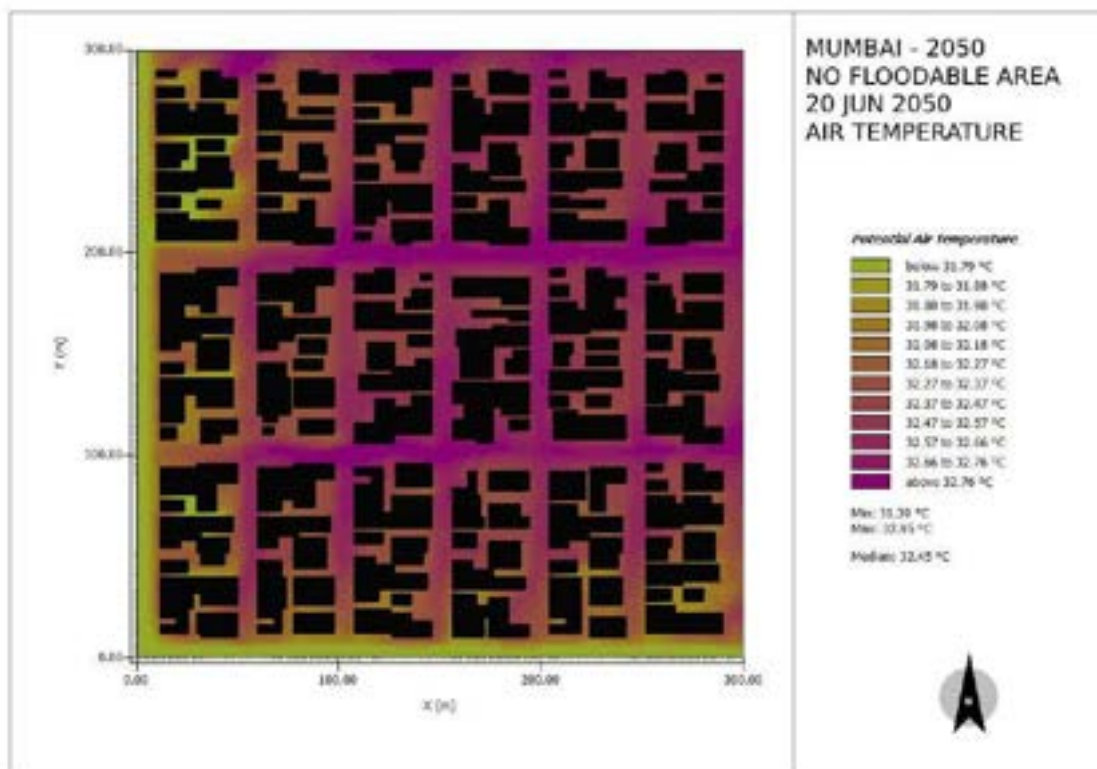
6 – Mumbai (2050 – Inverno):

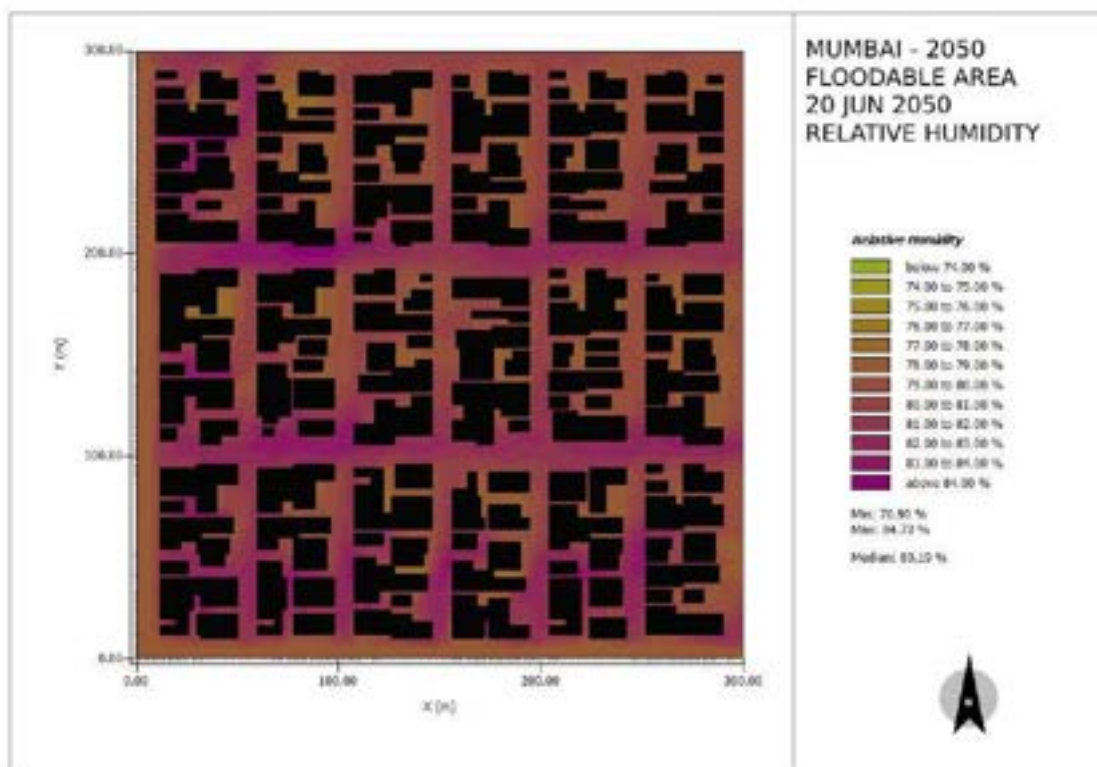
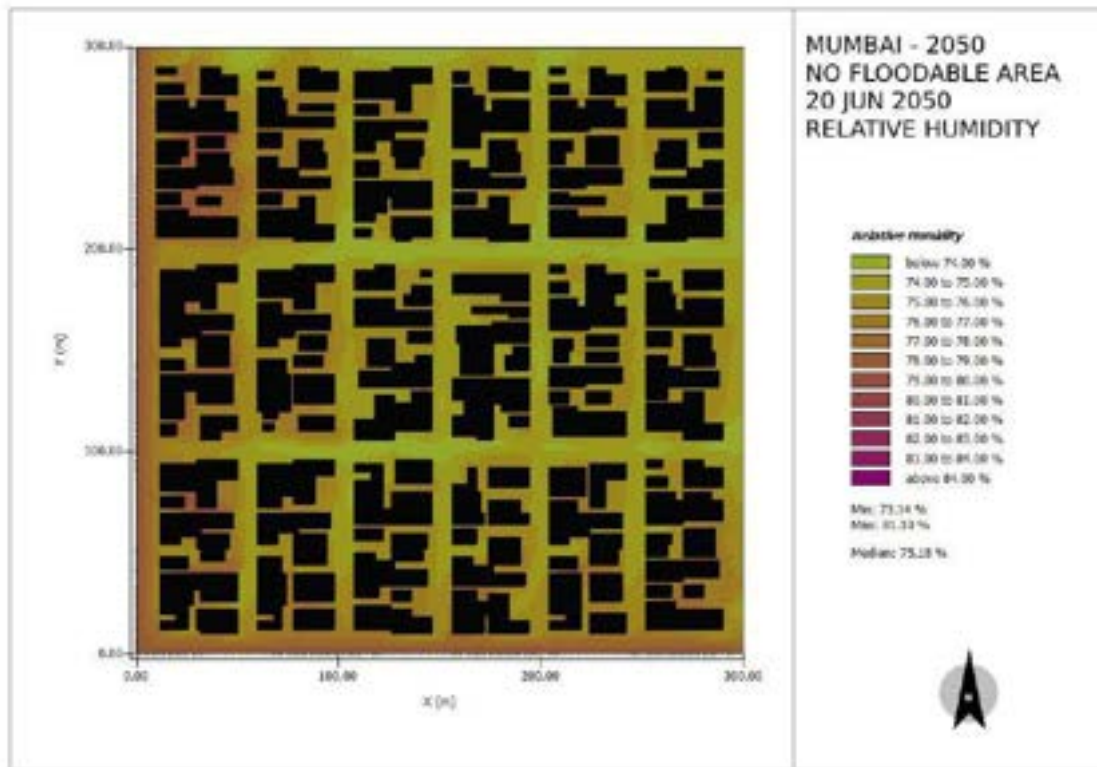


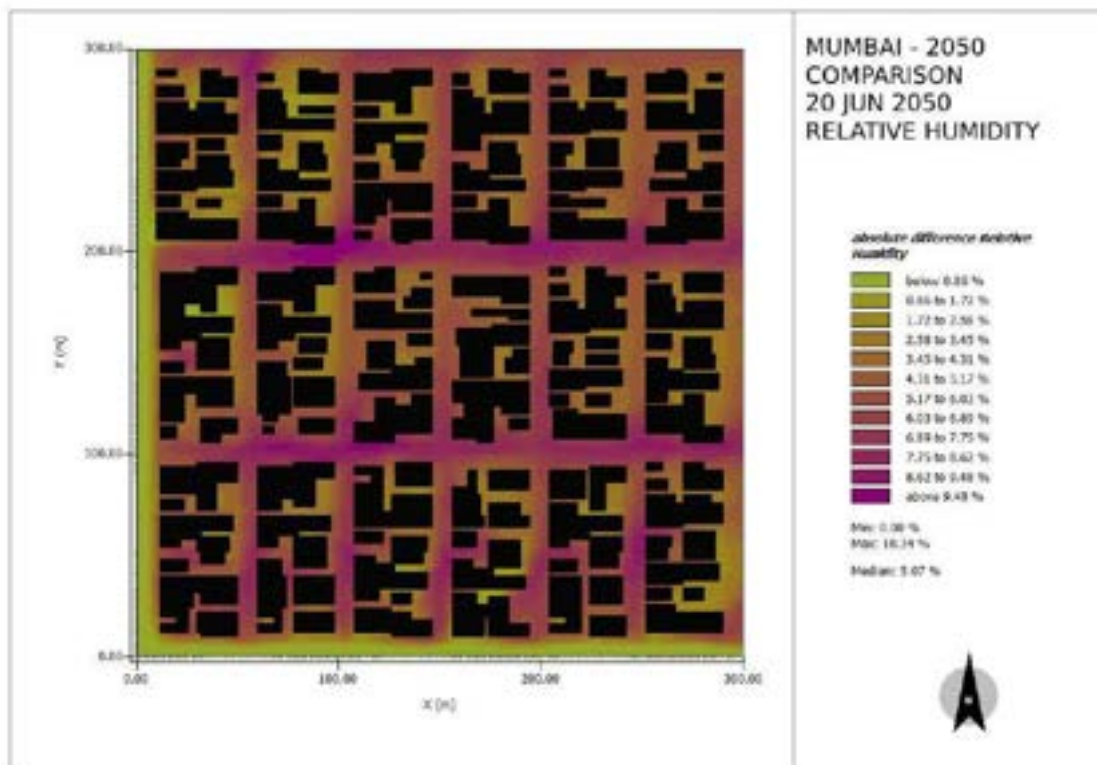
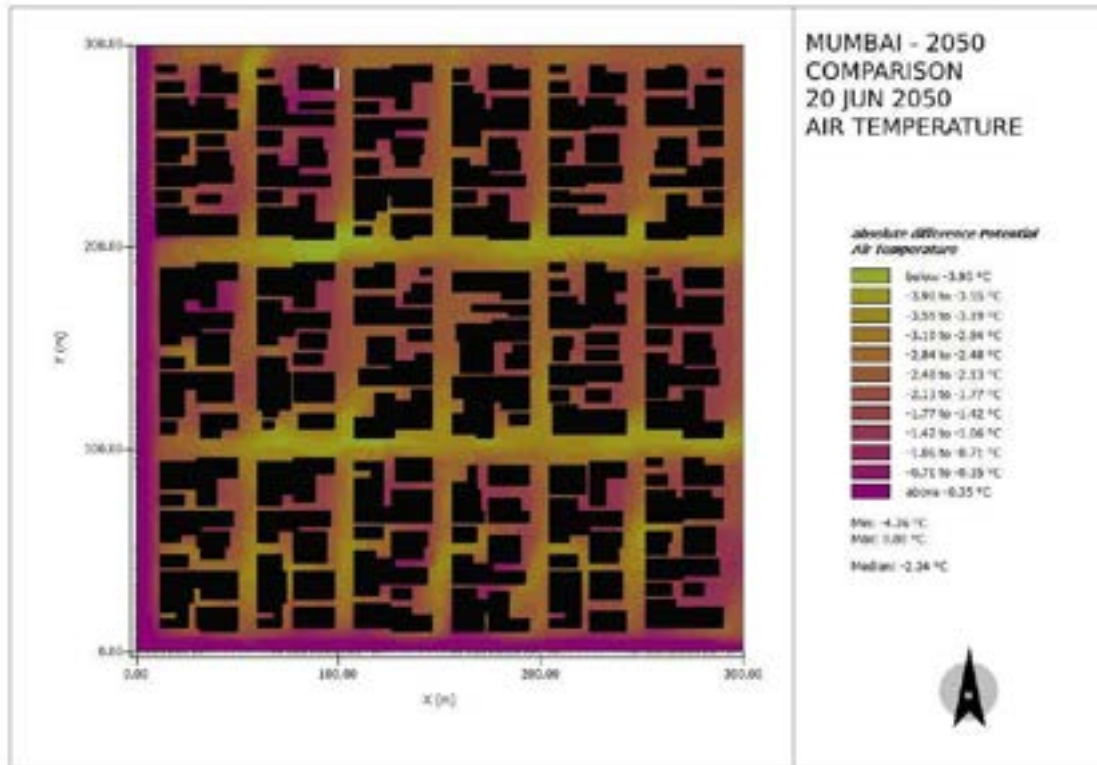




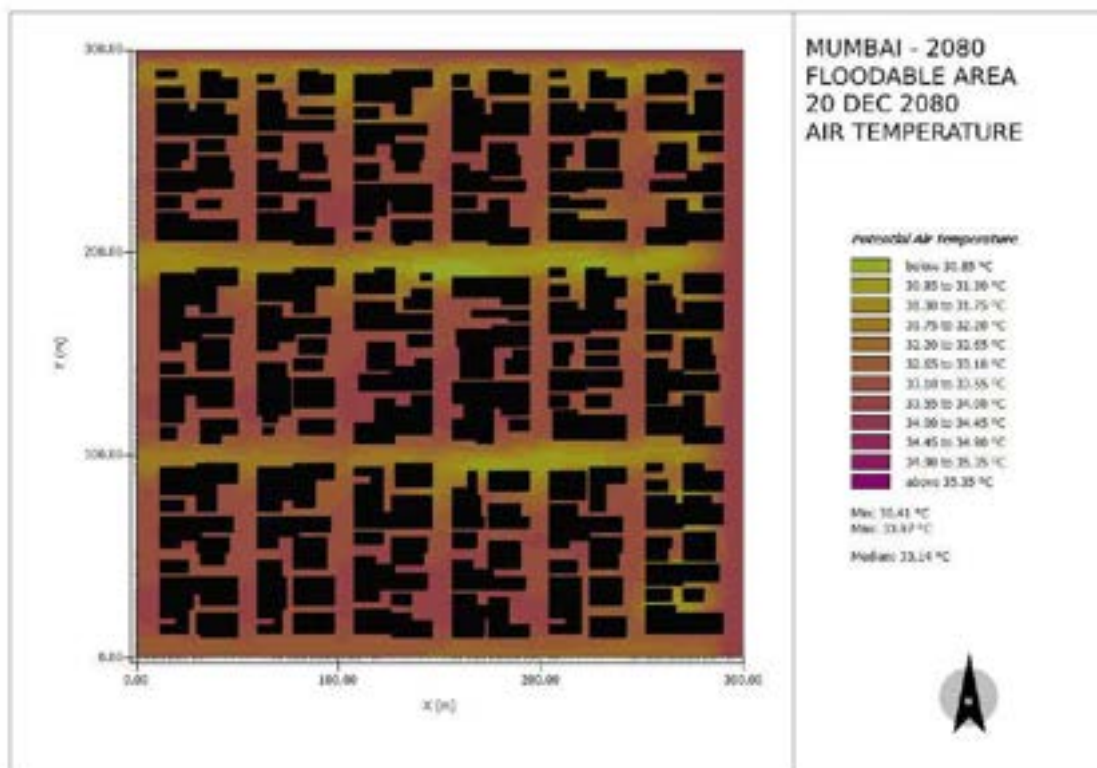
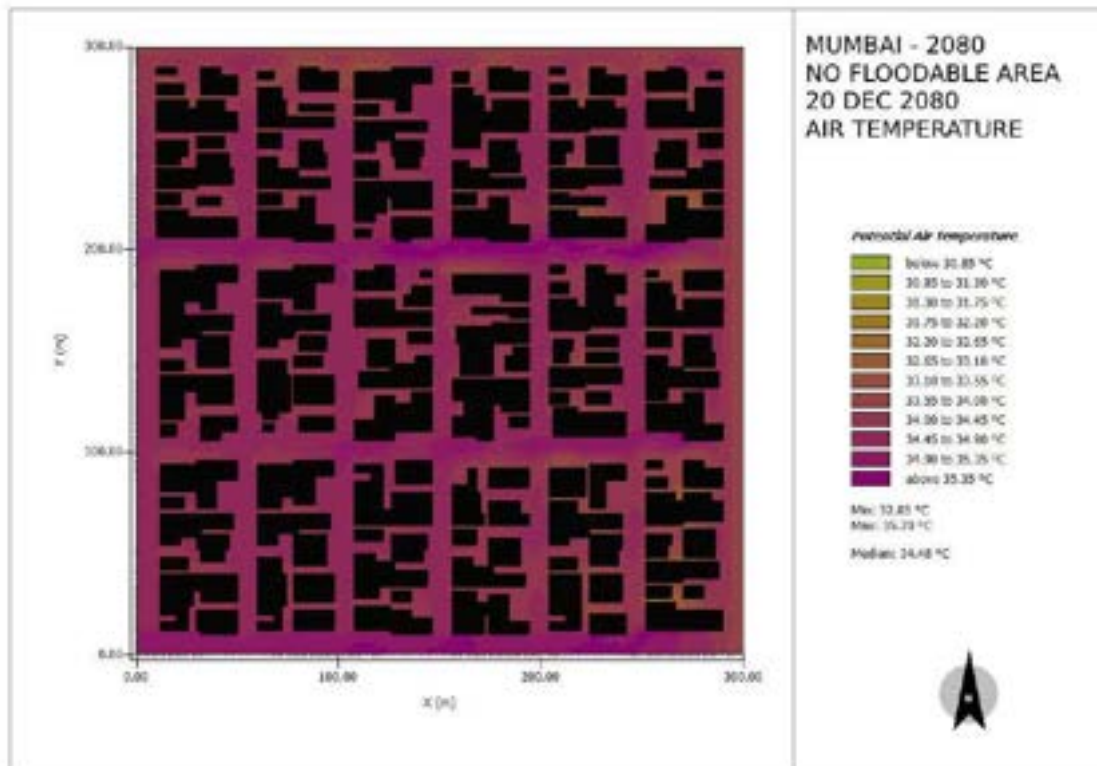
6 – Mumbai (2050 – Verão):

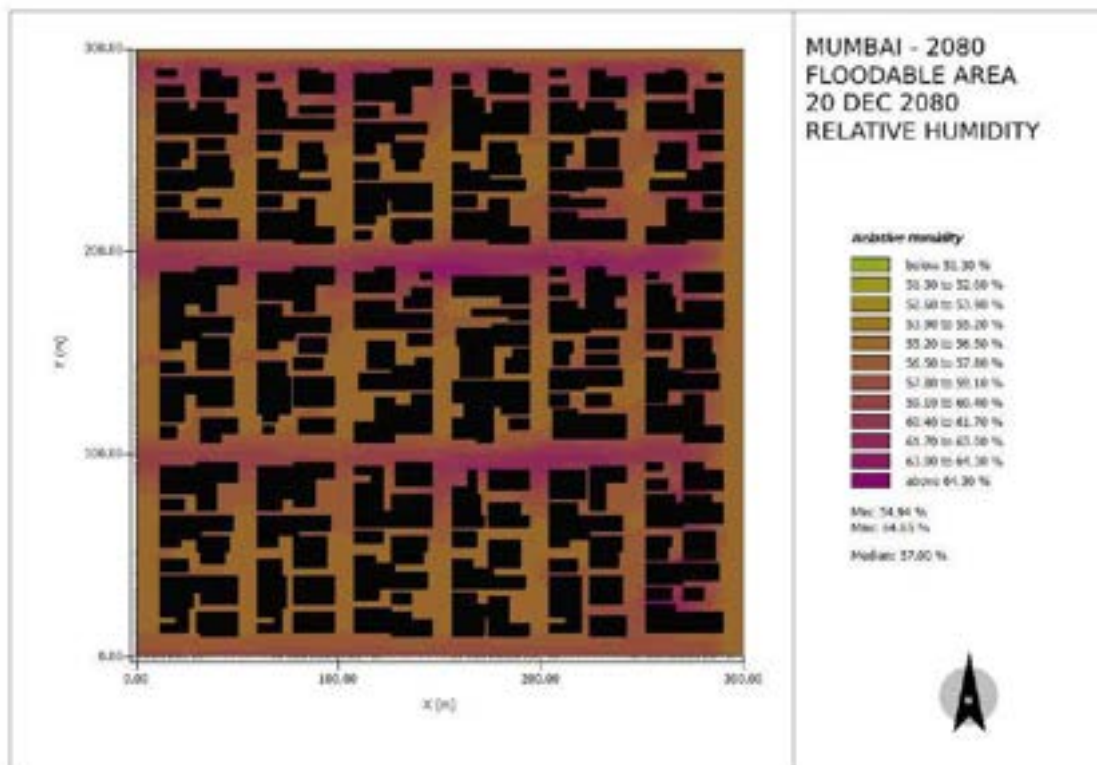
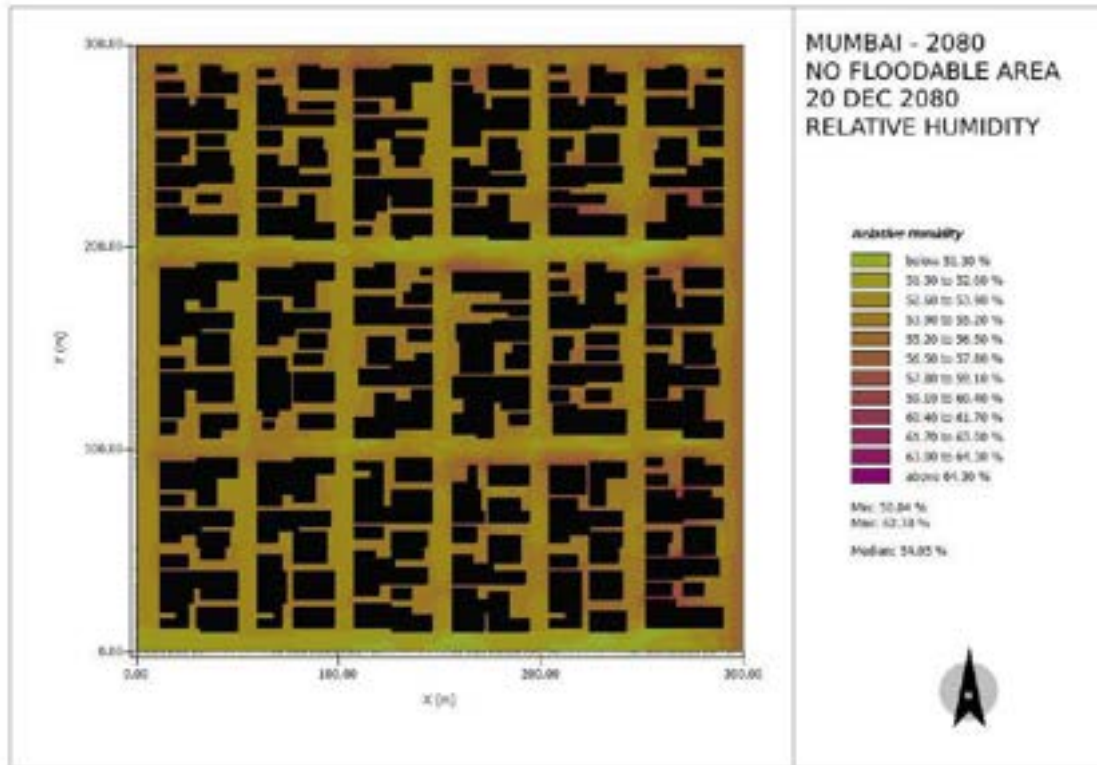


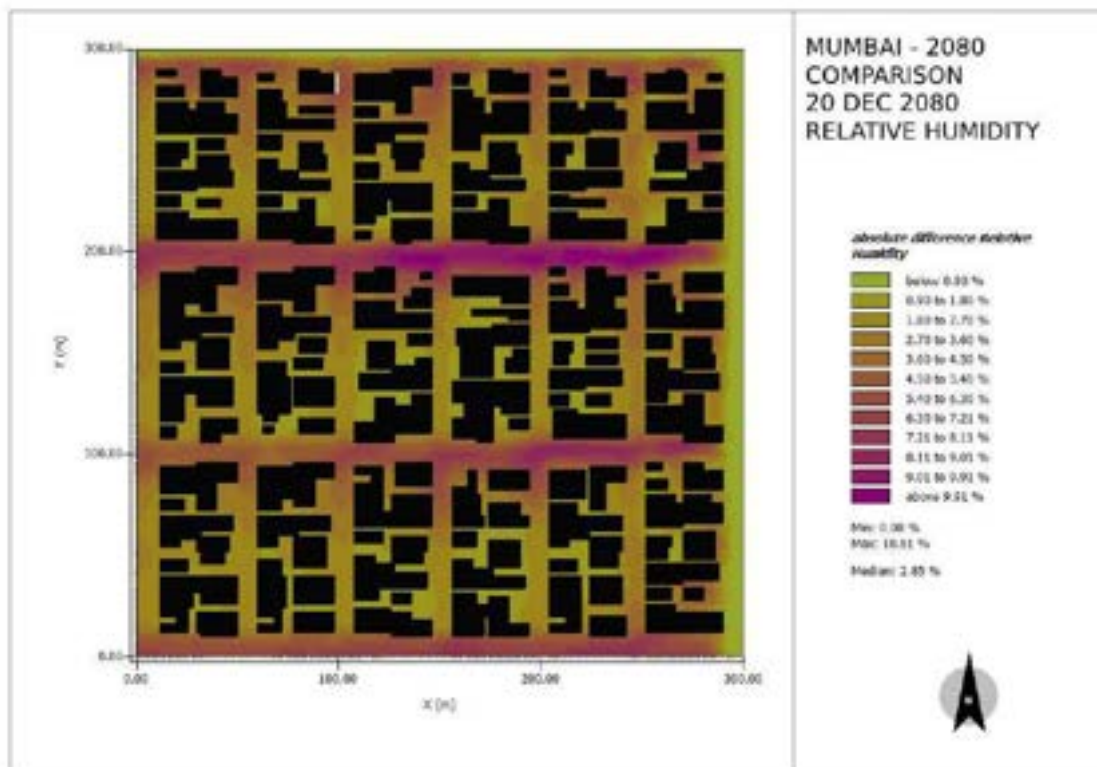
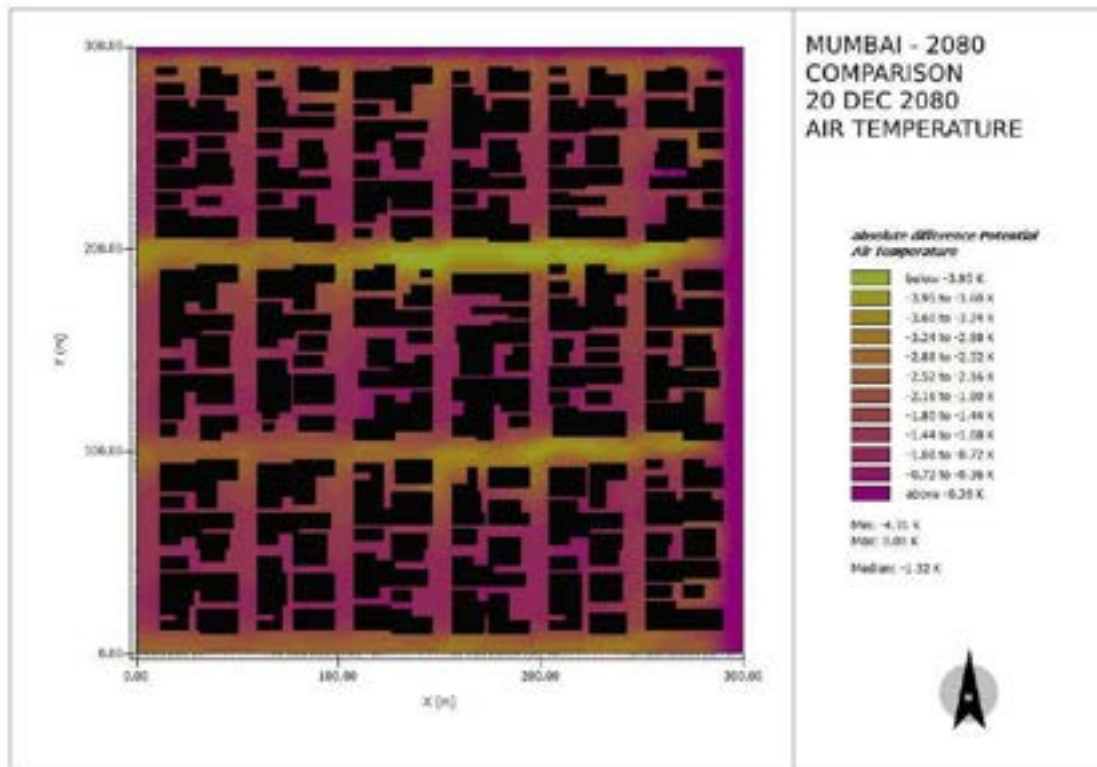




6 – Mumbai (2080 – Inverno):







6 – Mumbai (2080 – Verão):

