



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCOS ABÍLIO MEDEIROS DE SABÓIA

ESTRATÉGIA ROBUSTA PARA A GESTÃO DE DRENAGEM URBANA EM CENÁRIO
DE MUDANÇA DO CLIMA

FORTALEZA
2016

MARCOS ABÍLIO MEDEIROS DE SABÓIA

ESTRATÉGIA ROBUSTA PARA A GESTÃO DE DRENAGEM URBANA EM CENÁRIO
DE MUDANÇA DO CLIMA

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

-
- S122e Sabóia, Marcos Abílio Medeiros de.
Estratégia robusta para a gestão de drenagem urbana em cenário de mudança do clima / Marcos Abílio Medeiros de Sabóia. – 2016.
156 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.
1. Mudanças climáticas. 2. Modelos de circulação global. 3. Curvas IDF. 4. Drenagem urbana. 5. Robustez. I. Título.

MARCOS ABÍLIO MEDEIROS DE SABÓIA

ESTRATÉGIA ROBUSTA PARA A GESTÃO DE DRENAGEM URBANA EM CENÁRIO
DE MUDANÇA DO CLIMA

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Aprovada em 09 / 09 / 2016

BANCA EXAMINADORA

Professor Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador), Doutor
Universidade Federal do Ceará – UFC

Professora Ticiano Marinho de Carvalho Studart, Doutora
Universidade Federal do Ceará – UFC

Professora Renata Mendes Luna, Doutora
Universidade Federal do Ceará – UFC

Professor Luis Henrique Magalhães Costa, Doutor
Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA

Professor Dirceu Silveira Reis Junior, Doutor
Universidade de Brasília – UNB

A Deus

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, sempre agradeço a Deus por tudo de bom que acontece na minha vida. Ele é a fonte de inspiração que nos estimula a fazer tudo o que é correto. Nos momentos difíceis, me mostrou o caminho para superar as inúmeras adversidades da vida que se mostraram presentes durante o desenvolvimento deste trabalho.

Também gostaria de deixar aqui uma grande mensagem de agradecimento ao professor Assis, uma grande pessoa e um professor ímpar. É responsável pela minha orientação acadêmica desde 2009 quando ingressei no mestrado. Sempre se mostrou solícito e disposto a ajudar e ensinar. Quando surgem dificuldades, consegue elaborar uma rápida e fácil solução para qualquer empecilho.

Minha família me apoiou constantemente durante esses anos de trabalho, mesmo quando estava longe, me passavam calma e tranquilidade para que eu pudesse seguir o rumo correto da minha vida. Ensinaram-me a nunca desistir de nada e superar com afinco as dificuldades que a vida nos impõe. Deixarei aqui meus agradecimentos para minha mãe Gilka e meu pai Helder, além da minha irmã Ticiane e do meu irmão Carlos Henrique, ambos Doutores e que sempre me incentivaram a seguir o rumo da vida acadêmica.

Thaiany, minha noiva, é uma das principais incentivadoras do meu crescimento profissional, estando sempre ao meu lado, nos momentos bons e difíceis. Seu amor e carinho incondicionais são parte da minha inspiração para superar as dificuldades diariamente.

Agradeço também aos meus amigos do laboratório de Gerenciamento do Risco Climático e Sustentabilidade Hídrica, especialmente: Cleiton, Wictor, Daniel Cid, Luizinho e Terezinha.

Gostaria de citar os colegas que foram essenciais no desenvolvimento do meu trabalho: Andre Schardong que, mesmo distante, me ajudou em praticamente tudo que precisei, sendo parte essencial no desenvolvimento da pesquisa e o Elder Sandro que participou de várias pesquisas de campo e dedicou grande parte do seu tempo em me ajudar nesse trabalho.

Além dessas pessoas, também gostaria de agradecer:

A todos os professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental que também foram essenciais no meu aprendizado.

A todos os meus amigos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento do meu trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante cinco meses de auxílio.

“Ele não sabia que era impossível, foi lá e fez.”

(Jean Cocteau)

RESUMO

As alterações observadas nos eventos climáticos extremos refletem a influência das mudanças climáticas ocasionadas por fatores antropogênicos, além da variabilidade natural do clima. Segundo projeções climáticas futuras, o aumento da temperatura média da superfície terrestre, ocasionará fortes mudanças nas precipitações médias anuais de quase todo o planeta. O presente trabalho visa avaliar o impacto dos possíveis cenários de mudanças climáticas em sistemas de drenagem urbana, além disso, serão estimados os custos de implantação desses sistemas baseados nos vários cenários de mudanças climáticas estudados e proposto uma solução robusta para o problema de otimização de custos. O local específico do estudo será uma das sub-bacias do Rio Cocó, na cidade de Fortaleza-CE. Foram utilizados dados de precipitações oriundos de seis modelos de circulação global, são eles: bcc-csm1, CanESM2, CCSM4, CESM1-CAM5, Inmcm4 e MIROC5. Esses dados foram extraídos e interpolados para a cidade de Fortaleza-CE. Essas informações foram utilizadas com o intuito de gerar novas equações IDF projetadas para o futuro, através da utilização do “Método da Correspondência de Quantis Equidistantes”, baseadas nas projeções climáticas RCP 4,5 e RCP 8,5. Os novos valores de precipitação gerados por essas novas curvas IDF foram utilizados como um dos dados de entrada do programa HEC-HMS, que é um software capaz de calcular a vazão e volume escoado em uma determinada bacia. Os resultados mostraram que devem ocorrer grandes aumentos nas vazões e volumes escoados no sistema de drenagem analisado, sendo que o cenário RCP 8,5 apresentou valores ainda mais acentuados do que o gerado pelo cenário RCP 4,5.

Palavras-chave: mudanças climáticas, modelos de circulação global, curvas IDF, drenagem urbana, robustez

ABSTRACT

The observed changes in extreme weather events reflect the influence of climate change caused by anthropogenic factors, in addition to natural climate variability. According to future climate projections, the increase in the average surface temperature, will cause major changes in the average annual rainfall of almost the entire planet. This work aims to assess the impact of possible scenarios of climate change on urban drainage systems, in addition, there will be estimated the implementation costs of these systems based on various climate change scenarios studied and proposed a robust solution for cost optimization problem. The specific location of the study will be one of the Rio Coco sub-basins in the city of Fortaleza-CE. There were used rainfall data generated by six different global circulation models, which are: bcc-CSM1, CanESM2, CCSM4, CESM1-CAM5, Inmcm4 and MIROC5. These data were extracted and interpolated to the city of Fortaleza-CE. This information was used in order to generate new IDF equations designed for the future, by using the "Equidistance Quantile Matching Method", based on climate projections RCP 4.5 and RCP 8.5. The new values of rainfall generated by these new IDF curves were used as input data HEC-HMS program, which is capable of calculating flow and volume disposed in a particular basin. The results showed that must occur large increases in flow rates and volumes disposed in the analyzed drainage system, and the RCP 8.5 scenario presented even more pronounced than the values generated by the scenario RCP 4.5.

Keywords: climate changes, global circulation models, IDF curves, urban drainage

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Principais pontos do trabalho	25
Figura 2	– Evolução da concentração de CO ₂ na atmosfera terrestre	29
Figura 3	– Mudança na precipitação média (%) com relação aos cenários RCP	31
Figura 4	– Cenários de planejamento: (a) solução ótima; (b) solução robusta	40
Figura 5	– Fluxograma dos passos metodológicos	46
Figura 6	– Fluxograma da metodologia baseada no método das relações das durações	52
Figura 7	– Fluxograma da metodologia para utilização dos dados do pluviógrafo da UFC para obtenção das chuvas sub-diárias	54
Figura 8	– Fluxograma da metodologia	56
Figura 9	– Determinação da constante c	60
Figura 10	– Comparação entre a equação da AUMEF e a obtida por SILVA et al. (2013)	72
Figura 11	– Bacias Hidrográficas de Fortaleza	73
Figura 12	– Evolução da implantação da rede de drenagem em Fortaleza	75
Figura 13	– Ocupação das margens da Lagoa da Itaperaóba no Bairro Serrinha	75
Figura 14	– Fortes chuvas que ocasionaram alagamentos no Bairro Papicu, em Fortaleza	76
Figura 15	– Avenida Heráclito Graça com Rua Antonio Augusto	77
Figura 16	– Avenida Aguanambi (próximo à avenida 13 de Maio)	77
Figura 17	– Avenida Mister Hull (próximo à avenida Perimetral)	78
Figura 18	– BR-116 (próximo à avenida Oliveira Paiva)	78

Figura 19 – Principais pontos de alagamentos	80
Figura 20 – Localização da sub-bacia modelada	81
Figura 21 – Diagrama unifilar dos trechos a serem modelados	82
Figura 22 – Sequência da análise dos resultados	85
Figura 23 – Relação entre as precipitações máximas de 5 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados	86
Figura 24 – Relação entre as precipitações máximas de 10 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados	86
Figura 25 – Relação entre as precipitações máximas de 15 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados	87
Figura 26 – Relação entre as precipitações máximas de 20 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados	87
Figura 27 – Relação entre as precipitações máximas de 25 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados	88
Figura 28 – Relação entre as precipitações máximas de 30 minutos e 1 hora referentes aos anos analisados	88
Figura 29 – Relação entre as precipitações máximas de 1 hora e 24 horas referentes aos anos analisados	89
Figura 30 – Relação entre as precipitações máximas de 2 horas e 24 horas referentes aos anos analisados	89
Figura 31 – Relação entre as precipitações máximas de 24 horas e 1 dia referentes aos anos analisados	90
Figura 32 – Variação percentual da média das máximas utilizando dados dos modelos GCM	92
Figura 33 – Variação percentual da média acumulada anual utilizando dados dos modelos GCM	94
Figura 34 – Curvas IDF dos 6 modelos GCM utilizados (1970 – 1999) e da AUMEF para o período de retorno de 50 anos	96

Figura 35 – Curvas IDF dos 6 modelos GCM utilizados (1970 – 1999) e da AUMEF para o período de retorno de 100 anos	97
Figura 36 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 50 anos	98
Figura 37 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 100 anos	99
Figura 38 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 50 anos	100
Figura 39 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 100 anos	100
Figura 40 – Curvas IDF dos seis modelos GCM utilizados (1970 – 1999) e da AUMEF para o período de retorno de 50 anos	101
Figura 41 – Curvas IDF dos 6 modelos GCM utilizados (1970 – 1999) e da AUMEF para o período de retorno de 100 anos	102
Figura 42 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 50 anos	103
Figura 43 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 100 anos	104
Figura 44 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 50 anos	105
Figura 45 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 100 anos	105

Figura 46 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 50 anos	108
Figura 47 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 100 anos	108
Figura 48 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 50 anos	110
Figura 49 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 100 anos	111
Figura 50 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo INMCM4 referente ao período de retorno de 50 anos	113
Figura 51 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo INMCM4 referente ao período de retorno de 100 anos	114
Figura 52 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo bcc-csm1 referente ao período de retorno de 50 anos	116
Figura 53 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CSM1 referente ao período de retorno de 100 anos	116
Figura 54 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo MIROC5 referente ao período de retorno de 50 anos	118
Figura 55 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo MIROC5 referente ao período de retorno de 100 anos	119

Figura 56 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CanESM2 referente ao período de retorno de 50 anos	121
Figura 57 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CanESM2 referente ao período de retorno de 100 anos	121
Figura 58 – Variação da vazão na saída do sistema considerando o cenário RCP 4,5	122
Figura 59 – Variação do volume na saída do sistema considerando o cenário RCP 4,5	123
Figura 60 – Variação da vazão na saída do sistema considerando o cenário RCP 8,5	124
Figura 61 – Variação do volume na saída do sistema considerando o cenário RCP 8,5	125
Figura 62 – Tomada de decisão pelo critério de Hurwicz	130
Figura 63 – Aplicação do método SMORO	132
Figura 64 – Curvas IDF das melhores alternativas selecionadas	133
Figura 65 – Comportamentos dos cenários em função da variação do coeficiente de otimismo	144
Figura 66 – Conduto de seção circular	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Variação da forçante radioativa relativa a 1750	30
Tabela 2	– Resumo dos possíveis cenários de RCPs	31
Tabela 3	– Alguns dos principais GCMs (adaptado de SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2015)	33
Tabela 4	– Critérios clássicos e robusto adotados	42
Tabela 5	– GCMs utilizados e suas respectivas resoluções espaciais	47
Tabela 6	– Valores críticos do teste de KS para uma amostra de 30 elementos	51
Tabela 7	– Fatores de desagregação de precipitação	51
Tabela 8	– Fatores de desagregação de precipitação obtidos através dos dados do pluviógrafo da UFC	53
Tabela 9	– Comparação entre o downscaling dinâmico e estatístico	55
Tabela 10	– Custo da locação da rede de drenagem	64
Tabela 11	– Quantitativo de escavação	64
Tabela 12	– Valores de escavação da profundidade, largura e área total	65
Tabela 13	– Valores de reaterro	65
Tabela 14	– Custos de escavação e reaterro	66
Tabela 15	– Custos relativos ao fornecimento e assentamento dos tubos circulares	66
Tabela 16	– Custos relativos ao fornecimento das galerias retangulares	67
Tabela 17	– Custo de implantação de dispositivos auxiliares	67
Tabela 18	– Exemplo de matriz de custos total	68
Tabela 19	– Exemplo de matriz de arrependimento	69
Tabela 20	– Características das Bacias Hidrográficas de Fortaleza (adaptado de Fortaleza, 2013)	73
Tabela 21	– Localização dos pontos de alagamento	79

Tabela 22 – Características dos elementos da bacia a serem modelados	83
Tabela 23 – Comparação entre as relações obtidas através dos dados do pluviógrafo da UFC e pelo método das relações das durações	90
Tabela 24 – Valores do teste de aderência de KS referente às projeções dos GCMs	95
Tabela 25 – Valores do teste de KS referentes às séries de precipitações do pluviógrafo da UFC	96
Tabela 26 – Diferença percentual entre os modelos GCM e a equação da AUMEF	102
Tabela 27 – Diferença percentual entre os modelos GCM e a equação da AUMEF	103
Tabela 28 – Resultados provenientes dos dados do modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 50 anos	106
Tabela 29 – Resultados provenientes dos dados do modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 100 anos	107
Tabela 30 – Resultados provenientes dos dados do modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 50 anos	109
Tabela 31 – Resultados provenientes dos dados do modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 100 anos	109
Tabela 32 – Resultados provenientes dos dados do modelo inmcm4 referente ao período de retorno de 50 anos	112
Tabela 33 – Resultados provenientes dos dados do modelo inmcm4 referente ao período de retorno de 100 anos	112
Tabela 34 – Resultados provenientes dos dados do modelo bcc-csm1 referente ao período de retorno de 50 anos	114
Tabela 35 – Resultados provenientes dos dados do modelo bcc-csm1 referente ao período de retorno de 100 anos	115
Tabela 36 – Resultados provenientes dos dados do modelo MIROC5 referente ao período de retorno de 50 anos	117
Tabela 37 – Resultados provenientes dos dados do modelo MIROC5 referente ao período de retorno de 100 anos	117

Tabela 38 – Resultados provenientes dos dados do modelo CanESM2 referente ao período de retorno de 50 anos	119
Tabela 39 – Resultados provenientes dos dados do modelo CanESM2 referente ao período de retorno de 100 anos	120
Tabela 40 – Custos de implantação da rede de drenagem baseada em cada cenário analisado	126
Tabela 41 – Matriz de custos totais	127
Tabela 42 – Matriz de arrependimento	128
Tabela 43 – Tomada de decisão pelos critérios do Valor Esperado, Minimin, Mínimax e Savage	129
Tabela 44 – Aplicação do método SMORO	131
Tabela 45 – Melhores alternativas relativas a cada critério utilizado	132
Tabela 46 – Resumo das alternativas vencedoras	133
Tabela 47 – Exemplo de aplicação critério maximax ou minimin	142
Tabela 48 – Exemplo de aplicação do critério maximin ou minimax	142
Tabela 49 – Exemplo de aplicação do critério de valor esperado	143
Tabela 50 – Exemplo de aplicação do critério de Hurwicz	143
Tabela 51 – Exemplo de aplicação do critério de Savage (Maximização de lucro)	144
Tabela 52 – Exemplo de aplicação do critério de Savage (Minimização de custo)	145
Tabela 53 – Dados do pluviógrafo da UFC	149
Tabela 54 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo inmcm4 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5	150
Tabela 55 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo bcc_csm1 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5	151
Tabela 56 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo CCSM4 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5	152

Tabela 57 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo CanESM2 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5	153
Tabela 58 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo MIROC5 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5	154
Tabela 59 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo CESM1-CAM5 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Assessment Report
AUMEF	Autarquia Metropolitana de Fortaleza
CH ₄	Metano
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
FAP	Função Acumulada de Probabilidade
FDP	Função de Distribuição de Probabilidade
GCM	General Circulation Models
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
IDF	Intensidade-duração-frequência
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
N ₂ O	Óxido Nitroso
OECD	The organization for Economic Co-operation and Development
PMEL	Pacific Marine Environmental Laboratory
PPM	Partes por milhão
RCP	Representative Concentration Pathway
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
SMORO	Scenario-Based multiobjective robust optimization
TMAP	Thermal Modeling and Analysis Project
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

RF	Radiative Forcing	W/m ²
<i>i</i>	Intensidade média da chuva	mm/h
<i>t</i>	Duração da Chuva	minutos
<i>T</i>	Período de Retorno	anos
<i>B</i>	Parâmetro da equação de chuva	Adimensional
<i>d</i>	Parâmetro da equação de chuva	Adimensional
<i>c</i>	Parâmetro da equação de chuva	Adimensional
<i>b</i>	Parâmetro da equação de chuva	Adimensional
$H(A_i)$	Valor associado ao critério de Hurwicz	Adimensional
α	Probabilidade de acontecer o cenário mais otimista	Adimensional
$Máx(A_i)$	Valor esperado máximo	Adimensional
$Mín(A_i)$	Valor esperado mínimo	Adimensional
F_1	Custo Esperado	R\$
F_2	Desvio-padrão dos custos através dos cenários	R\$
$F(X, \Delta X \omega)$	Função objetivo	Adimensional
X	Vetor de decisão inicial	Adimensional
ΔX	Vetor de expansão do sistema	Adimensional
ω	Parâmetros de cada cenário	Adimensional
k	Refere-se a cada cenário de planejamento	Adimensional
Pr_k	Probabilidade de ocorrência de um determinado cenário de planejamento	Adimensional
$F(X \omega)$	Custo de implantação inicial do sistema	R\$
$F^S(\Delta X \omega)$	Custo suplementar de adaptação do sistema referente a uma mudança ΔX no cenário inicialmente planejado	R\$
N	Número total de cenários considerados	Adimensional
$F_y(y)$	Função acumulada de probabilidades (FAP) teórica	Adimensional
$F_N(y)$	Função acumulada de probabilidades (FAP) empírica	Adimensional
$y(F)$	Função inversa de FAP	Adimensional
$y(T)$	Função inversa de FAP	Adimensional
D_N	Estatística do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov	Adimensional

β	Parâmetro de posição	Adimensional
α	Parâmetro de escala	Adimensional
$E[Y]$	Valor Esperado	Adimensional
$Var[Y]$	Variância	Adimensional
F	Probabilidade anual de não superação	Adimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Objetivo Geral	25
1.2	Objetivos Específicos	26
1.3	Contribuição Técnica e Científica	26
1.4	Estrutura do trabalho	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	Mudanças climáticas	28
2.1.1	<i>Representative Concentration Pathways</i>	30
2.1.2	<i>Modelos de circulação global</i>	32
2.2	Chuvas Intensas (Equação IDF)	34
2.3	Água em ambiente urbano (a drenagem urbana)	36
2.4	Robustez nos projetos de engenharia	39
2.5	Teoria da tomada de decisão	41
2.5.1	<i>Maximax ou Minimin</i>	42
2.5.2	<i>Maximin ou Minimax</i>	42
2.5.3	<i>Valor Esperado</i>	43
2.5.4	<i>Hurwicz</i>	43
2.5.5	<i>Savage</i>	44
2.5.6	<i>SMORO (Scenario-Based multiobjective robust optimization)</i>	44
3	METODOLOGIA	46
3.1	Dados pluviométricos	47
3.1.1	<i>Dados do pluviógrafo da UFC</i>	47
3.1.2	<i>Modelos climáticos globais</i>	47
3.2	Atualização de curvas IDF sob efeito de mudanças climáticas	48
3.2.1	<i>Utilização de parâmetros constantes de desagregação de precipitação de chuvas diárias</i>	49
3.2.1.1	<i>Método das relações das durações</i>	49
3.2.1.2	<i>Relações obtidas por dados do pluviógrafo da UFC</i>	52
3.2.2	<i>“Método da Correspondência de Quantis Equidistantes” (Equidistance quantile matching method)</i>	54
3.3	Cálculo dos parâmetros da equação IDF	59
3.4	Análise do Impacto nas Vazões e Volumes escoados	62

3.5	Análise dos custos de implantação dos cenários.....	63
3.5.1	<i>Custo de locação da rede de drenagem</i>	64
3.5.2	<i>Custo de escavação e reaterro</i>	64
3.5.3	<i>Custo de fornecimento e assentamento dos tubos/galerias de concreto</i>	66
3.5.4	<i>Custos de dispositivos auxiliares</i>	67
3.6	Tomada de decisão	67
4	LOCAL DE APLICAÇÃO	71
4.1	Equação IDF de Fortaleza.....	71
4.2	Relevo e sub-bacias	72
4.3	Situação atual da drenagem urbana em Fortaleza	74
4.4	Sub-bacia modelada.....	81
5	RESULTADOS	84
5.1	Análise das precipitações máximas	85
5.1.1	<i>Análise das precipitações máximas dos dados do pluviógrafo da UFC</i>	85
5.1.2	<i>Análise das precipitações máximas provenientes dos modelos GCM</i>	91
5.2	Projeção das curvas IDF em cenário de mudança climática	95
5.2.1	<i>Análise do teste de aderência de KS</i>	95
5.2.2	<i>Atualização das curvas IDF utilizando o método das relações durações</i>	96
5.2.3	<i>Atualização das curvas IDF utilizando as relações obtidas por dados do pluviógrafo da UFC</i>	101
5.2.4	<i>Atualização de curvas IDF utilizando o “Método da Correspondência de Quantis Equidistantes”</i>	106
5.2.4.1	<i>Modelo CESM1-CAM5</i>	106
5.2.4.2	<i>Modelo CCSM4</i>	109
5.2.4.3	<i>Modelo inmcm4</i>	111
5.2.4.4	<i>Modelo Bcc-csm1</i>	114
5.2.4.5	<i>Modelo MIROC5</i>	117
5.2.4.6	<i>Modelo CanESM2</i>	119
5.3	Impacto das mudanças das curvas IDF nas vazões e volumes escoados na saída do sistema modelado	122
5.4	Custos de implantação de cada cenário analisado	125
5.5	Aplicação da metodologia robusta de dimensionamento de rede de drenagem urbana sob efeitos de mudanças climáticas	126
	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	134

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
APÊNDICE A – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE TOMADA DE DECISÃO	142
APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO.....	146
APÊNDICE C – DADOS DO PLUVIÓGRAFO DA UFC	149
APÊNDICE D – DADOS DOS MODELOS GCM.....	150

1 INTRODUÇÃO

As alterações observadas nos eventos climáticos extremos refletem a influência das mudanças climáticas ocasionados por fatores antropogênicos, além da variabilidade natural do clima (IPCC, 2012).

Evidências observacionais provenientes de todos os continentes e da maioria dos oceanos mostra que muitos sistemas naturais estão sendo afetados por mudanças climáticas regionais, particularmente relacionadas com o aumento de temperatura (IPCC, 2007b).

Segundo projeções climáticas futuras, o aumento da temperatura média da superfície terrestre, ocasionará fortes mudanças nas precipitações médias anuais de quase todo o planeta (IPCC, 2013). Marengo et al. (2013) indicam que os eventos de chuvas máximas também devem se tornar mais frequentes e mais intensos no Brasil.

Para estimar a resposta do sistema atmosférico às mudanças climáticas, pode-se utilizar as projeções provenientes dos modelos de circulação global (GCM) que são capazes de estimar, com diferentes níveis de precisão, as precipitações futuras de determinada localidade baseadas nos possíveis cenários climáticos.

Alterações na intensidade das chuvas máximas associadas com as mudanças climáticas têm o potencial de sobrecarregar sistemas de drenagem, o que pode levar a inundações, comprometimento das vias locais, agravamento de casos de doenças com veiculação hídrica, ou seja, aumento de riscos de perdas humanas e materiais.

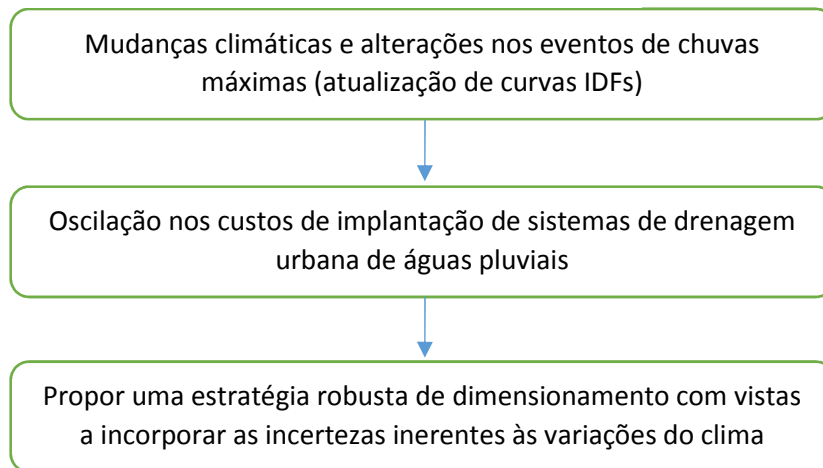
Essas intensidades de chuvas máximas podem ser representadas pelas curvas de intensidade-duração-frequência (IDF) que são largamente utilizadas como parâmetros de projetos de sistemas de drenagem urbana. Tais curvas podem vir a sofrer mudanças significativas caso ocorram alterações nos eventos extremos, impactando diretamente no dimensionamento desses sistemas hidráulicos, e conseqüentemente, nos seus custos de implantação.

No futuro, pode ser que alguns sistemas de drenagem urbana estejam subdimensionados e necessitem de elevados custos para adequar-se à nova realidade imposta pelas mudanças climáticas. Em sentido oposto, pode-se dimensionar um sistema que esteja muito além das reais necessidades do local, caso ocorram diminuições nas chuvas intensas da localidade estudada, levando a gastos bem superiores ao realmente necessário.

O cerne do problema a ser estudado pode ser melhor compreendido por meio da

Erro! Autoreferência de indicador não válida..

Figura 1 – Principais pontos do trabalho



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Alguns questionamentos são realizados pelos planejadores municipais a respeito da drenagem urbana, destacando-se:

- O regime de chuvas máximas é variável no decorrer dos anos?
- A equação IDF utilizada atualmente ainda será válida no futuro?
- As mudanças climáticas podem impactar os eventos extremos?
- Qual a maneira mais apropriada de quantificar essas mudanças?
- Qual o impacto financeiro dessas alterações?
- Qual a melhor alternativa a ser adotada diante desse cenário de incertezas?

Conforme exposto, entende-se que mensurar o impacto das mudanças climáticas no regime de chuvas máximas de determinada localidade e, conseqüentemente, em seu sistema de drenagem urbana é de fundamental importância na gestão das águas pluviais.

Ademais, a repercussão financeira que essas alterações podem causar é um grande desafio a ser solucionado e por isso será o principal objeto de estudo deste trabalho.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal propor uma metodologia robusta de planejamento e implantação de sistemas de drenagem urbana, incorporando os possíveis impactos das mudanças climáticas.

1.2 Objetivos Específicos

- Analisar as projeções futuras de chuvas intensas de alguns modelos de circulação global, baseadas em cenários de mudança climática (*Representative Concentration Pathways* 4,5 e 8,5).
- Obter novas equações IDF (intensidade-duração-frequência) projetadas para o futuro utilizando os referidos modelos e metodologias de desagregação das chuvas diárias em sub-diárias.
- Estimar os possíveis custos de implantação de determinado sistema de drenagem urbana, utilizando novas equações IDF projetadas para o futuro.
- Utilizar critérios de tomada de decisão com o intuito de escolher uma alternativa robusta que contemple os vários cenários de mudanças climáticas e forneça uma solução economicamente viável.

1.3 Contribuição Técnica e Científica

Atualmente, muitas cidades têm sofrido com constantes enchentes/alagamentos e as mudanças climáticas podem ser uma das causas do problema. Existem estudos sobre o impacto das mudanças climáticas em sistemas de drenagem urbana em localidades situadas em médias e altas latitudes. Entretanto, estudos referentes a essa problemática aplicada a lugares situados em baixas latitudes são bastante escassos. Este trabalho visa suprir essa lacuna, além disso, propõe uma metodologia robusta para a tomada de decisão sob incertezas a respeito da gestão de rede de drenagem urbana incorporando as mudanças climáticas.

Essa metodologia baseia-se na utilização de diferentes cenários de mudanças climáticas baseados em informações de modelos de circulação global e na projeção de curvas IDFs para o futuro, impactando diretamente nos projetos de dimensionamento de rede de drenagem urbana. Outro ponto inovador é a utilização de diferentes critérios de tomada de decisão com vistas a escolha da melhor alternativa de dimensionamento baseada nos custos de implantação de cada cenário.

A metodologia proposta pode ser uma forte ferramenta a ser utilizada pelos gestores municipais no intuito de contribuir no processo de tomada de decisão no que se refere à busca de alternativas viáveis para incorporar as projeções climáticas aos projetos de dimensionamento de rede de drenagem urbana.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está subdividido em seis capítulos, que são: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, local de aplicação, resultados e conclusões.

A introdução contém uma visão geral do problema a ser estudado e os objetivos geral e específicos da pesquisa e da contribuição técnica e científica da Tese.

O segundo capítulo trata da revisão da literatura a respeito das mudanças climáticas globais; equação IDF e sua atualização; água em ambiente urbano (incluindo legislação pertinente); conceitos de robustez, resiliência e gestão adaptativa; e os diferentes critérios de tomada de decisão utilizados no problema.

O capítulo relativo à metodologia demonstra, inicialmente, como as equações IDF foram adaptadas para utilização em cenários futuros baseadas em dados de precipitação de modelos de circulação global. A seguir, é explanado como essas novas equações IDF foram utilizadas para gerar as novas vazões em um determinado sistema de drenagem urbana e os custos de implantação da rede de drenagem urbana com base na nova realidade. Também são apresentados os diferentes critérios de tomada de decisão utilizados na pesquisa.

Em relação ao local de aplicação, é apresentado o local onde a metodologia foi aplicada; relevo e sub-bacias; um breve resumo da situação atual da drenagem na cidade e a descrição da sub-bacia modelada; equação IDF e a sua projeção para um cenário futuro.

O quinto capítulo (resultados) traz a análise das precipitações geradas pelos modelos GCM; demonstração das novas equações IDF projetadas para o futuro; impacto das mudanças nas vazões na sub-bacia modelada incorporando as mudanças climáticas; custos de implantação da rede de drenagem baseada em cada cenário modelado e efetiva aplicação da nova metodologia robusta proposta.

O último capítulo se refere às conclusões e algumas sugestões referentes à aplicação da metodologia proposta, tratando de vários aspectos como sua eficácia e aplicabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo, será dividido na revisão e análise dos tópicos a seguir elencados:

- Mudanças climáticas: Será feita uma apresentação dos estudos sobre mudanças climáticas, baseadas no aumento médio da temperatura do planeta e na consequente mudança no regime de chuvas. Além dos modelos climáticos provenientes do CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) e seus possíveis cenários de mudanças climáticas (*Representative Concentration Pathways*);
- Chuvas Intensas (Equação IDF): Será realizada uma breve análise das curvas de intensidade-duração-frequência (IDF), a sua importância e aplicabilidade, e as considerações que devem ser feitas incorporando os impactos das mudanças climáticas, incluindo alguns trabalhos já realizados no que se refere à projeção de atualização de curvas IDFs em algumas cidades do mundo;
- Água em ambiente urbano (a drenagem urbana): Abordagem dos aspectos gerais sobre drenagem urbana atualmente, incluindo a incorporação das mudanças no clima e as legislações pertinentes (federal, estadual e municipal);
- Robustez, resiliência e gestão adaptativa: Revisão sobre esses temas e sua aplicação teórica em projetos de drenagem urbana sob efeito de mudança climática.
- Teoria da tomada de decisão: Estudo sobre algumas alternativas de tomada de decisão, tais como: *Valor Esperado*, *Minimin*, *Minimax*, *Savage*, *Hurwicz* e *SMORO*.

2.1 Mudanças climáticas

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) define o termo mudanças climáticas como sendo uma certa alteração no clima, podendo ser identificado por mudanças na média e/ou variação das suas propriedades, e que persiste por um período prolongado de tempo, normalmente por décadas. A mudança climática pode ser proveniente de processos naturais do próprio planeta ou forças externas, ou das alterações antrópicas que podem modificar a composição da atmosfera ou do uso do solo (UNISDR, 2009).

Devido às mudanças climáticas, aumentos nos volumes totais de precipitação, assim como nas suas intensidades, ocasionarão fortes impactos nos sistemas de drenagem urbana atual. Em muitas localidades, em decorrência do aumento da temperatura média, a

atmosfera tem sua capacidade de reter água diminuída, ocasionando chuvas mais intensas (PHILLIP, 2011).

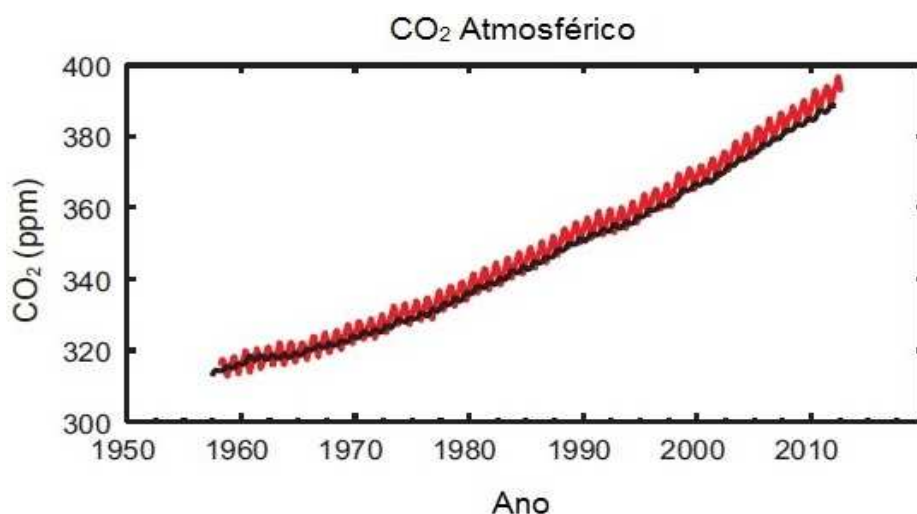
Em consequência disso, muitas cidades ao redor do mundo já estão sofrendo, ao mesmo tempo, com inundações urbanas e longos períodos de estiagem, o que exige políticas públicas voltadas para o gerenciamento desses riscos (OECD, 2016)

Sabe-se que mudanças nas concentrações dos gases promotores do efeito estufa, alterações na radiação solar incidente na Terra e na ocupação do solo podem alterar o equilíbrio do sistema climático terrestre. Essas perturbações são mensuradas pela forçante radioativa (IPCC, 2007a).

A variável denominada de forçante radioativa (*radiative forcing* – RF), medida em W/m^2 , quantifica as mudanças no fluxo de energia terrestre causadas pelos agentes promotores das mudanças climáticas. Valores positivos dessa variável remetem a um possível aquecimento da superfície terrestre, enquanto que valores negativos indicam um resfriamento (IPCC, 2013).

Substâncias e processos (naturais e antrópicos) são os promotores dessas mudanças, tais como: gases causadores do efeito estufa (Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O) e Halocarbonos); poluentes climáticos de vida curta e aerossóis (Monóxido de Carbono (CO)), NO_x , compostos orgânicos voláteis não-metanados; mudanças no albedo devido a mudanças no uso do solo e variação na radiação solar. Contudo, o maior causador do aumento da RF é o crescimento da concentração de CO_2 na atmosfera terrestre, conforme Figura 2. (IPCC, 2013)

Figura 2 – Evolução da concentração de CO_2 na atmosfera terrestre



Fonte: Adaptado de IPCC (2013)

O CO₂ proveniente da queima de combustíveis fósseis e da biomassa para uso energético é o maior responsável pelo aumento do efeito estufa, sendo um fator-chave dos países para lidar com as consequências das mudanças climáticas terrestre. As emissões provenientes do uso de energia oriundas de CO₂ ainda estão crescendo em muitos países e em todo o mundo, principalmente devido ao aumento no uso de meios de transporte e setores da energia. Em 2013, as emissões globais relacionadas ao CO₂ atingiram um recorde de 32,2 milhões de toneladas e, em 2010, representaram cerca de 75% das emissões globais dos gases causadores do efeito estufa. Baseando-se nas políticas atuais, essas emissões são estimadas para exceder 50 bilhões de toneladas em 2050, cerca de três vezes mais do que o que seria necessário para limitar o aumento a longo prazo das temperaturas globais em dois graus Celsius, meta estabelecida na 21ª Conferência do Clima (COP21) (OECD, 2015).

O último relatório de avaliação do IPCC – AR5 mostra a evolução dos valores da forçante radioativa referente aos anos de 1950, 1980 e 2011, tendo como base o ano de 1750.

Tabela 1 – Variação da forçante radioativa relativa a 1750

Ano	Forçante radioativa tendo como base o ano de 1750 (valor médio global)
2011	2,29 W/m ²
1980	1,25 W/m ²
1950	0,57 W/m ²

Fonte: Adaptado de IPCC (2013)

2.1.1 Representative Concentration Pathways

Com o intuito de entender as mudanças climáticas que ocorrerão no futuro, foram criados os possíveis cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*). Esses cenários projetam os valores das RFs para o futuro (2100), baseados nas possíveis mudanças dos agentes promotores das mudanças climáticas (principalmente o CO₂). (VUUREN et al., 2011).

Foram criados quatro cenários de mudanças climáticas (Tabela 2) para o futuro, são eles: RCP 2,6; RCP 4,5; RCP 6 e RCP 8,5. O número associado ao RCP é o valor da RF.

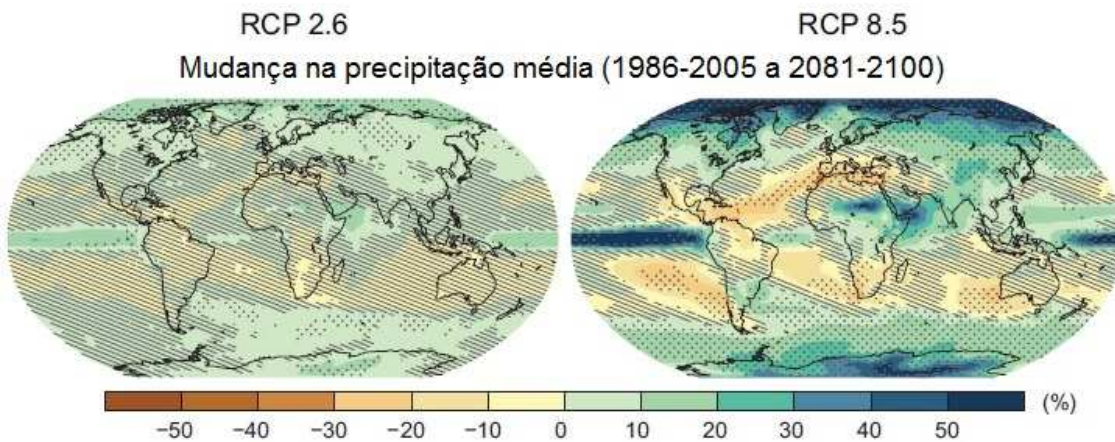
Tabela 2 – Resumo dos possíveis cenários de RCPs

Cenário	Descrição	Concentração equivalente de CO ₂
RCP 8,5	Crescimento da RF até 8,5 W/m ² até 2100	1370 ppm
RCP 6,0	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 6 W/m ²	850 ppm
RCP 4,5	Estabilização após 2100, sem ultrapassar 4,5 W/m ²	650 ppm
RCP 2,6	Antes de 2100, ocorre o pico da RF de 3,0 W/m ² . Então, ocorre o declínio, até a estabilização de 2,6 W/m ² em 2100	490 ppm

Fonte: Adaptado de VUUREN et al. (2011)

O cenário RCP 8,5 é o que possui a maior probabilidade de ocorrência, considerando que não existirão medidas políticas voltadas para o desenvolvimento sustentável, tendência a ser seguida pelo RCP 6. O RCP 4,5 está associado a uma baixa taxa de emissão de gases do efeito estufa e a existência de uma quantidade razoável de medidas político-ambiental. Já o RCP 2,6 representa a situação em que existirão políticas ambientais mais restritivas/rigorosas, no sentido de diminuir a emissão de poluentes (VUUREN et al., 2011).

As mudanças nos cenários RCPs podem afetar fortemente o regime de chuvas de todo o planeta. Essa tendência é confirmada no IPCC – AR5, conforme pode-se observar na Figura 3.

Figura 3 – Mudança na precipitação média (%) com relação aos cenários RCP

Fonte: Adaptado de IPCC (2013)

Sabe-se que as alterações no ciclo hidrológico terrestre, em resposta ao aquecimento global, não ocorrerão de maneira uniforme. De uma maneira geral, a diferença na precipitação entre as regiões secas e úmidas tende a aumentar no futuro com o aumento do número associado ao RCP (IPCC, 2013).

Allan e Soden (2008) também afirmam que os modelos climáticos sugerem que os eventos de precipitações extremas se tornarão cada vez mais comuns devido ao aquecimento global decorrente de ações antrópicas.

De acordo com Emori e Brown (2005) muitas regiões do planeta situadas em médias e altas latitudes devem aumentar as suas médias pluviométricas e chuvas extremas consideravelmente.

2.1.2 Modelos de circulação global

Em setembro de 2008, houve uma reunião envolvendo os 20 grupos de pesquisadores que desenvolvem modelos de previsão climática em todo o mundo. Nesse encontro, os pesquisadores concordaram em promover um novo conjunto de experimentos de modelos climáticos coordenados. Esses experimentos compreendem a quinta fase do projeto CMIP5 que promovem um estudo amplo para (TAYLOR et al., 2012):

- Avaliar os mecanismos responsáveis pelas diferenças dos modelos em relação às respostas pouco compreendidas associadas ao ciclo do carbono e as nuvens.
- Examinar a previsibilidade climática e explorar as capacidades de projeção de sistemas em escala de tempo de décadas.
- Determinar a razão que leva a modelos climáticos semelhantes produzirem resultados tão diferentes.

Os estudos referentes ao CMIP5 resultaram em várias projeções de precipitação geradas pelos modelos de circulação global (General Circulation Models – GCM). Esses modelos são capazes de simular os processos que ocorrem na atmosfera terrestre e entender as condições climáticas atuais e futuras (SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2015), incorporando expectativas de mudança na precipitação a partir de alterações no clima.

Os GCM são capazes de modelar numericamente os processos físicos da atmosfera, oceano, criosfera e superfície terrestre. Pode-se afirmar que são importantes ferramentas

disponíveis para simular a resposta do sistema climático global ao aumento das concentrações dos gases responsáveis pelo efeito estufa.

Atualmente, os GCMs são uma das ferramentas disponíveis mais avançadas para estimar a resposta do sistema climático global ao aumento da concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera (IPCC, 2007a).

Existe um grande número de GCMs, fornecidos por vários centros de pesquisa ao redor do mundo, podendo apresentar variados níveis de precisão, dependendo de sua resolução da grade espacial. Eles são capazes de prever as mudanças na atmosfera terrestre causadas pelos elementos promotores do aquecimento global, especialmente os gases causadores do efeito estufa (SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2015). A Tabela 3 contém alguns dos principais modelos GCM existentes, indicando a sua resolução espacial e o centro de pesquisa responsável pela sua modelagem.

Tabela 3 – Alguns dos principais GCMs (adaptado de SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2015)

País	Modelo	Centro de Pesquisa	Resolução (Lon. vs Lat.)
China	bcc_csm1_1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2,8 x 2,8
China	BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science	2,8 x 2,8
Canada	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis	2,8 x 2,8
USA	CCSM4	National Center of Atmospheric Research	1,25 x 0,94
France	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques and Centre Europeen de Recherches et de Formation Avancee en Calcul Scientifique	1,4 x 1,4
Australia	CSIRO-Mk3-6-	Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	1,8 x 1,8
USA	CESM1-CAM5	National Center of Atmospheric Research	1,25 x 0,94

China	FGOALS_g2	IAP (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China) and THU (Tsinghua University)	2,55 x 2,48
USA	GFDL-CM3	National Oceanic and Atmospheric Administration's Geophysical Fluid Dynamic Laboratory	2,5 x 2,0
USA	GFDL-ESM2G	National Oceanic and Atmospheric Administration's Geophysical Fluid Dynamic Laboratory	2,5 x 2,0
United Kingdom	HadGEM2-AO	Met Office Hadley Centre	1,25 x 1,875
United Kingdom	HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	1,25 x 1,875
France	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace	3,75 x 1,8
France	IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace	3,75 x 1,8
Japan	MIROC5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1,4 x 1,41
Japan	MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2,8 x 2,8
Japan	MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2,8 x 2,8
Germany	MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology	1,88 x 1,87
Germany	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology	1,88 x 1,87
Japan	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	1,1 x 1,1
Norway	NorESM1-M	Norwegian Climate Center	2,5 x 1,9

Fonte: Adaptado de Srivastav, Schardong e Simonovic (2015)

2.2 Chuvas Intensas (Equação IDF)

A equação de intensidade-duração-frequência (IDF), ou curva IDF, é de fundamental importância para o cálculo da chuva de projeto a ser utilizada no dimensionamento de obras hidráulicas, tais como: sarjetas, bocas-de-lobo, bueiros, galerias e canais (SILVA et al., 2013). As curvas (equações) IDF são obtidas através de registros de chuvas intensas em um dado período de tempo relevante dos eventos máximos da localidade em estudo.

Essas equações podem ser expressas por formulações genéricas, conforme equação (1).

$$i = \frac{A}{(t + c)^b} = \frac{B \cdot T^d}{(t + c)^b} \quad (1)$$

Onde i = intensidade média da chuva em uma dada duração t relativo a um período de retorno T (anos); B , d , c e b são parâmetros que devem ser determinados para cada região a ser estudada.

As mudanças climáticas impactarão diretamente os eventos de chuvas máximas, o que causará mudanças nas curvas IDF, fazendo com que as mesmas tenham que ser atualizadas (SCHARDONG; SRIVASTAV; SIMONOVIC, 2014a).

Dessa forma, essas curvas IDF, baseadas em dados históricos observacionais, podem estar subestimando ou superestimando dados pluviométricos utilizados no projeto de obras hidráulicas (HASSANZADECH; NAZEMI; ELSHORBAGY, 2013).

Mirhosseini, Srivastava e Stefanova (2013) utilizaram dados simulados pela combinação de modelos globais e regionais para a atualização das curvas IDF do Alabama, EUA. A análise dos resultados indicou que devem ocorrer chuvas menos intensas em eventos de durações menores.

Hassanzadeh, Nazemi e Elshorbagy (2013) também utilizaram dados de modelos GCM com o intuito de estimar as curvas IDF projetadas para o futuro da cidade de Saskatoon, Canadá. Os estudos apontaram para um aumento nas precipitações extremas de curta duração em baixos períodos de retorno.

Autores como Schardong, Srivastav, e Simonovic (2014b) usaram dados de precipitação do modelo GCM CanESM2 para atualizar curvas IDFs em quatro cidades do Canadá, são elas: London, Hamilton, Calgary e Vancouver. Os resultados indicaram que para qualquer cenário simulado deve ocorrer aumento na intensidade de precipitação de chuvas máximas para todos os períodos de retorno.

Schardong, Srivastav, e Simonovic (2014a) novamente fizeram uso das informações geradas pelo mesmo modelo GCM para projetar a equação IDF da cidade de São Paulo para o futuro. Os resultados apresentam uma tendência de aumento das precipitações extremas.

Conforme mencionado, percebe-se a importância em realizar a atualização de curvas IDF baseadas em projeções futuras dos GCMs, com o intuito de se antecipar às possíveis mudanças climáticas que podem ocorrer no futuro.

2.3 Água em ambiente urbano (a drenagem urbana)

As mudanças climáticas têm afetado seriamente as enchentes urbanas nos últimos anos, além de influenciarem os níveis de precipitação, temperatura e escoamento urbano. Esse fenômeno é intensificado em áreas urbanas devido às suas características peculiares (KARAMOUZ; HOSSEINPOUR; NAZIF, 2011).

Os impactos dessas mudanças climáticas, somados ao da urbanização acelerada e da deterioração de infraestrutura urbana já obsoleta, por exemplo, são prováveis causadores de enchentes urbanas (PHILLIP; ANTON; STEEN, 2011).

Zhou (2012) realizou estudos sobre o efeito das mudanças climáticas no sistema de drenagem urbana na localidade de Skibhus, Dinamarca. Em sua pesquisa, alguns resultados apontaram que uma determinada chuva de projeto com período de retorno de 100 anos será equivalente a uma chuva com período de retorno de 20 anos, considerando um cenário futuro de mudança climática projetada para os próximos 100 anos.

Atualmente, o problema de drenagem de águas pluviais tem se agravado, principalmente nas grandes cidades, devido a inúmeros fatores, tais como: tipo de ocupação do solo, desmatamento, pavimentação, construções irregulares, e entre outros. Todos esses fatores contribuem para a diminuição da infiltração da água no solo e o consequente aumento do volume do escoamento superficial (MOTA, 2012).

Durante muito tempo, pensou-se que o cerne da solução do problema baseava-se no projeto e execução de obras de engenharia para tentar resolver (ou mitigar) o problema, as medidas estruturais. Hoje em dia, entende-se que essas medidas, além de onerosas, não são capazes de resolver o problema por completo. Ou seja, o problema da drenagem urbana excede o campo da engenharia e passa a ser responsabilidade de políticos e sociólogos. A rápida e desordenada urbanização de grandes cidades tem impactado negativamente na ocupação do solo que são dificultadas por conflitos de interesses (TUCCI et al., 1993).

O sistema atual de drenagem de águas pluviais consiste em conduzir as águas das chuvas o mais rápido possível para fora do centro urbano através de canais e tubulações subterrâneas. O dimensionamento desses sistemas é baseado em séries históricas de dados pluviométricos e previsões de padrões para o desenvolvimento urbano. Normalmente, são projetados sem levar em consideração os impactos causados a jusante, possuindo o objetivo primordial apenas de reduzir o risco de inundações localizadas. Essa metodologia convencional de drenagem urbana possui inúmeros problemas recorrentes, tais como: redução do escoamento de base, através da impermeabilização de superfícies; alto custo de tratamento do tipo

centralizado de águas pluvias; aumento da poluição difusa, provenientes do próprio ambiente urbano; assoreamento de corpos hídricos devido à erosão e sedimentação provenientes das altas velocidades dos escoamentos das águas pluviais; excessos de extravasamentos de efluentes de sistemas unitários decorrente do transbordamento de águas residuais não tratadas; aumento das inundações a jusante do escoamento; aumento das ilhas de calor devido à redução da evapotranspiração e do aquecimento das superfícies impermeáveis. Além disso, existe o fato de estarmos expulsando rapidamente um bem tão valioso e escasso nos dias atuais, a água (PHILLIP, 2011).

Pode-se dividir a drenagem urbana em microdrenagem e macrodrenagem. A diferença entre as duas é muito tênue, mas pode-se dizer que a macrodrenagem está relacionada aos escoamentos em fundos de vale, inseridos em bacias de pelo menos 5km², dependendo do grau de urbanização da cidade, geralmente são utilizados indicadores macros da ocupação e do escoamento. A microdrenagem estaria mais relacionada aos locais onde o escoamento natural não está bem definido e, dessa forma, sofre influência da ocupação do solo, são considerados detalhadamente a topografia, quadras, sarjetas, bueiros e os condutos (TUCCI et al., 1993).

Existem várias citações a respeito da relevância e da competência a respeito da correta implementação da gestão das águas pluviais em ambiente urbano.

A Constituição Federal estabelece indiretamente que a responsabilidade sobre a gestão da drenagem urbana é dos municípios, conforme observa-se através do seu inciso VIII, artigo 30, transcrito a seguir:

Art. 30. Compete aos Municípios:

(...)

VIII - promover, no que couber, adequado ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano.

(...)

A Lei Federal nº 11.445/2007 estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, configurando-se como um marco regulatório para o setor e importante instrumento de planejamento. O artigo 2º da referida lei estabelece que os serviços públicos de saneamento básico serão prestados com base nos seguintes princípios fundamentais:

(...)

IV - disponibilidade, em todas as áreas urbanas, de serviços de drenagem e de manejo das águas pluviais adequados à saúde pública e à segurança da vida e do patrimônio público e privado;

(...)

Segundo a Lei federal nº 6.766/1999 que dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências, o seu artigo 3º em seu parágrafo único estabelece que não será permitido o parcelamento do solo:

I – em terrenos alagadiços e sujeitos a inundações, antes de tomadas as providências para assegurar o escoamento das águas;

(...)

Além disso, a referida lei preconiza em seu artigo 4º estabelece que os loteamentos deverão atender, pelo menos, aos seguintes requisitos:

III – **ao longo das águas correntes e dormentes** e das faixas de domínio público das rodovias e ferrovias, será obrigatória a reserva de uma faixa não edificável de 15 (quinze) metros de cada lado, salvo maiores exigências da legislação específica; (grifos nossos)

(...)

A Lei Federal nº 12.651/2012 define as larguras mínimas que definem as Áreas de Preservação Permanente – APP a partir das faixas marginais de qualquer curso d’água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do seu leito regular.

Já a Lei Federal nº 9.433/1997 cita que um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos é a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

Citação similar é encontrada na Lei Federal nº 10.257/2001 ao estabelecer que o plano diretor dos Municípios incluídos no cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos deverá conter o mapeamento contendo as áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, **inundações bruscas** ou processos

geológicos ou **hidrológicos correlatos** e as **medidas de drenagem urbana** necessárias à prevenção e à mitigação de impactos de desastres.

Conforme explicitado através da legislação citada, percebe-se o grau de importância que devemos atribuir aos projetos de drenagem urbana e seu impacto na vida da sociedade. Mostrando a relevância da gestão da drenagem urbana, muitas vezes negligenciada ou subestimada pelas autoridades competentes.

A Constituição do Estado do Ceará, atualizada em 24 de julho de 2012, trata no tópico referente ao ato das disposições constitucionais transitórias que o saneamento básico (que engloba a **drenagem**) é definida como uma das funções públicas de interesse comum na Região Metropolitana de Fortaleza, até determinação posterior em lei ordinária.

As principais referências municipais relativas à relevância dos projetos de drenagem estão dispostas no Código de Obras e Posturas do Município e no Plano Municipal de Saneamento Básico.

A Lei Municipal nº 5.530/1981, que dispõe sobre o Código de Obras e Posturas do Município de Fortaleza e dá outras providências, estabelece em seu artigo 51 que nenhum loteamento ou plano de arruamento será aprovado sem que o proprietário assine escritura pública na qual se obrigue, num prazo máximo de 02 (dois) anos:

(...)

II - **A executar as obras de drenagem** e obras d'arte de acordo com as Normas Técnicas Oficiais;

(...) (grifos nossos)

Com relação ao Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza, pode ser definido como sendo conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais relativo aos processos de abastecimento de água potável; esgotamento sanitário; manejo de resíduos sólidos; **Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas**.

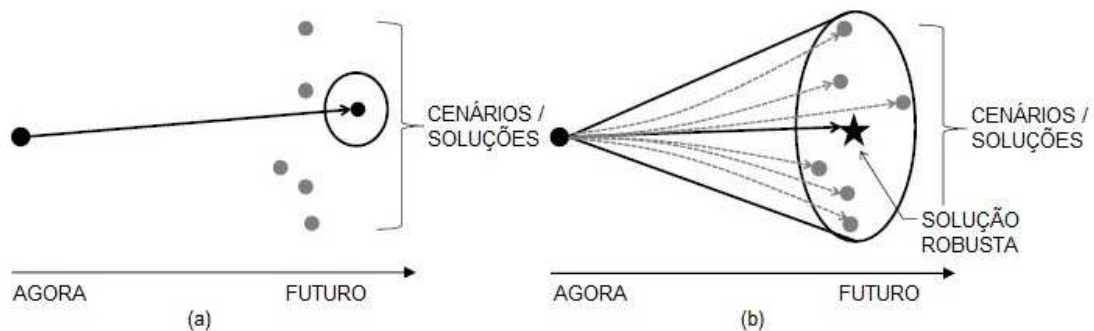
2.4 Robustez nos projetos de engenharia

Alguns autores como Carlson e Doyle (2002) definiram o termo “robustez” como sendo a manutenção de características desejadas de determinado sistema, mesmo diante de mudanças de comportamento de seus componentes ou do ambiente que o circunda. Quanto maior o número de variáveis consideradas na criação de um sistema (quanto maior a sua

complexidade interna), mais robusto ele será, estando menos vulnerável às possíveis mudanças externas.

Seguindo a mesma linha de pensamento, Anderies et al. (2004) afirmam que um projeto robusto não será tão eficiente quanto um que utilizou apenas variáveis ótimas. Entretanto, a performance do sistema robusto não decairá tão rapidamente quanto um sistema ótimo, quando confrontado com mudanças/perturbações externas ou tensões internas. A Figura 4 demonstra a diferença entre uma solução ótima e uma solução robusta, conforme as definições expostas.

Figura 4 – Cenários de planejamento: (a) solução ótima; (b) solução robusta



Fonte: Adaptado de Kang e Lansey (2013)

Quando trabalha-se com uma situação em que existem vários cenários possíveis para fins de dimensionamento, todos devem ser considerados simultaneamente. Cada cenário possui sua própria solução ótima, contudo apenas uma solução pode ser implementada. Uma solução razoável para esse problema seria minimizar o custo total da intervenção, enquanto todas as restrições de cada cenário seriam atendidas. Porém, essa solução resultaria em um grande custo inicial de implantação do sistema, o que poderia torná-lo inviável. Contudo, a maioria dos planejadores prefere enfrentar o risco de um projeto subdimensionado, arcando com custos adicionais para uma futura melhoria do sistema (KANG; LANSEY, 2013).

Autores como Mailhot e Duchesne (2010) propuseram uma nova metodologia de dimensionamento de projetos de drenagem considerando os efeitos das mudanças climáticas. O procedimento possui as seguintes características: consideração da vida útil da estrutura durante o dimensionamento; a probabilidade de excedência da capacidade da estrutura mudará com o passar do tempo; definição de um modelo estatístico que descreva a evolução esperada das chuvas intensas. Foi realizada a suposição de que o período de retorno de determinada chuva intensa decrescerá de maneira linear ao longo dos anos.

Kang e Lansey (2013) descreveram uma metodologia robusta de dimensionamento de projetos de rede de água e esgoto. O método consiste em encontrar uma solução que venha a minimizar o custo total esperado da intervenção e o desvio-padrão dos custos totais dos diversos cenários futuros de dimensionamento possíveis. Cada um desses cenários correspondia a uma situação hipotética de demanda de água potável, de reuso e de esgoto. A solução robusta encontrada visa minimizar um eventual “custo de arrependimento” que seria o custo de adaptação de um sistema subdimensionado ou custo desnecessário proveniente de um sistema superdimensionado.

Olsson et al. (2013) realizaram a quantificação de custos de adaptação do sistema de drenagem da localidade de Arvika, Suécia, sob o efeito de mudanças climáticas. O custo adicional é significativo e as incertezas acerca dos possíveis cenários climáticos são altas, dessa forma, conclui-se que a decisão de incluir, ou não, o efeito dessas mudanças nos projetos de drenagem deve ser analisada com mais profundidade, tanto por engenheiros como por políticos.

2.5 Teoria da tomada de decisão

A tomada de decisão pode ser entendida como o processo de identificar um problema ou uma oportunidade e selecionar uma determinada alternativa para resolvê-lo. Pode-se dizer que um problema ocorre quando o cenário atual de situação é diferente do cenário desejado. Vários fatores afetam a tomada de decisão, tais como: tempo disponível para a tomada de decisão; o nível de impacto da decisão; o ambiente; certeza/incerteza e risco; agentes decisores e conflito de interesses (LACHTERMACHER, 2004).

Em alguns momentos, as pessoas são forçadas a tomar decisões difíceis em que as consequências são muito impactantes e os seus resultados são imprevisíveis. A Análise de Decisão não deve ser considerada descritiva ou explicativa, pois seu propósito não contempla a descrição ou explicação de como e por que as pessoas tomam determinadas decisões. Na realidade, o seu objetivo principal é ajudar as pessoas a tomarem as melhores decisões considerando determinadas preferências básicas, supondo que os indivíduos são capazes de demonstrar suas preferências básicas quando se deparam com situação de decisão simples. Face o exposto, a Análise de Decisão permitirá a resolução de problemas mais complexos nos quais o tomador de decisão mantém suas preferências básicas, entretanto é incapaz de manipular intuitivamente a complexidade da situação (BEKMAN; COSTA NETO, 1980).

A seguir, serão abordados cinco critérios clássicos de tomada de decisão (Ver Apêndice A) e um novo critério robusto, conforme especificado na Tabela 4.

Tabela 4 – Critérios clássicos e robusto adotados

CRITÉRIOS CLÁSSICOS	Maximax ou Minimin
	Maximin ou Minimax
	Valor Esperado
	Hurwicz
	Savage
CRITÉRIO ROBUSTO	SMORO (Scenario-Based multiobjective robust optimization)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.5.1 *Maximax ou Minimin*

Nesse critério, deve-se adotar uma consideração mais otimista das projeções futuras e supõe-se que ocorrerá o melhor cenário possível. Admite-se que, após selecionar determinado cenário, ocorrerá o melhor resultado possível. Isto posto, o planejador deve verificar qual o lucro máximo para cada alternativa e escolher aquela que fornece o maior lucro máximo (ANDRADE, 1989).

Entretanto, caso a decisão a ser tomada baseie-se na minimização de custos, o critério a ser adotado é análogo ao anterior, tentando minimizar o custo mínimo para cada alternativa (critério Minimin).

2.5.2 *Maximin ou Minimax*

Conforme Bekman e Costa Neto (1980) deve-se utilizar o critério maximin quando há o desejo de se resguardar do pior cenário possível que possa ocorrer para alternativa adotada. Quando os valores considerados referem-se a perdas, o critério a ser utilizado é o minimax.

O critério maximin baseia-se na visão mais pessimista da situação. Supõe que, escolhido uma determinada alternativa, ocorrerá o pior cenário possível. Então, o planejador deve avaliar o lucro mínimo para cada alternativa e escolher a que fornece o maior lucro mínimo. Contudo, caso a escolha deva considerar a minimização de custos, deve-se tentar minimizar os custos máximos que poderão ocorrer (critério Minimax) (ANDRADE, 1989).

2.5.3 Valor Esperado

O critério do valor esperado pode ser utilizado quando é associada uma probabilidade de ocorrência de determinado evento.

Segundo Naghettini e Pinto (2007), o valor esperado de X pode ser obtido por meio da ponderação por $p_x(x)$, função massa de probabilidades (no caso discreto), ou $f_x(x)$, função densidade de probabilidades (no caso contínuo), dos valores possíveis da variável aleatória.

O valor esperado, expresso por $E[X]$ pode calculado por (2) para o caso discreto e (3) para o caso contínuo:

$$E[X] = \sum_{\text{todos } x_i} x_i p_x(x_i) \quad (2)$$

$$E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x(x) dx \quad (3)$$

2.5.4 Hurwicz

De acordo com Andrade (1989), este princípio admite que os tomadores de decisão, de modo geral, não são extremamente pessimistas ou otimistas, fornecendo uma regra de decisão entre esses dois limites.

O critério de Hurwicz procura ponderar as visões otimistas e pessimistas através de um fator, chamado de coeficiente de otimismo. Dado um coeficiente de otimismo, α , o valor associado a cada alternativa é calculado a partir da equação (4).

$$H(A_i) = \alpha \cdot [Máx(A_i)] + (1 - \alpha) \cdot [Mín(A_i)] \quad (4)$$

Onde

$H(A_i)$ = valor associado ao critério de Hurwicz

α = probabilidade de acontecer o cenário mais otimista

$1 - \alpha$ = probabilidade de acontecer o cenário mais pessimista

$Máx(A_i)$ = valor esperado máximo

$Mín(A_i)$ = valor esperado mínimo

Com base na equação (4), percebe-se que o referido critério estabelece uma relação linear entre os valores máximos e mínimos esperados.

2.5.5 *Savage*

Esse critério corresponde a uma variante do minimax, pois sugere que seja calculada a minimização do máximo “arrependimento” correspondente a cada cenário possível. Esse arrependimento é calculado pela diferença entre o resultado obtido através da alternativa escolhida e aquele que seria obtido se fosse escolhida a melhor alternativa (Bekman; Costa Neto, 1980, p.42).

O critério de Savage ou de menor arrependimento, baseia-se no princípio de que devemos escolher o cenário que possa gerar o menor arrependimento máximo. Ou seja, a menor diferença entre um determinado cenário e a pior situação estudada.

2.5.6 *SMORO (Scenario-Based multiobjective robust optimization)*

Quando considerados independentemente, cada cenário possui uma única solução ótima. O método SMORO leva em consideração os múltiplos cenários possíveis com o objetivo de encontrar a solução mais robusta. Duas funções objetivo a serem minimizadas são utilizadas, F_1 representa o custo esperado e F_2 o desvio-padrão dos custos através dos cenários (KANG; LANSEY, 2013).

Minimizar

$$F_1 = E[F(X, \Delta X|\omega)] = \sum_{k=1}^N Pr_k \times F(X, \Delta X^k|\omega^k) \quad (5)$$

Minimizar

$$F_2 = \left\{ \sum_{k=1}^N Pr_k [F_1 - F(X, \Delta X^k|\omega^k)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Sujeito a $G(X, \Delta X^k|\omega^k) > 0, \forall k, k = 1, \dots, N$

Onde X e ΔX são os vetores de decisão inicial e de expansão do sistema, respectivamente.

$$F(X, \Delta X|\omega) = F(X|\omega) + F^S(\Delta X|\omega) \quad (7)$$

$F(X|\omega)$ refere-se ao custo de implantação inicial do sistema, dada certas condições pré-estabelecidas. Já a equação $F^S(\Delta X|\omega)$ representa o custo suplementar de adaptação do sistema referente a uma mudança ΔX no cenário inicialmente planejado.

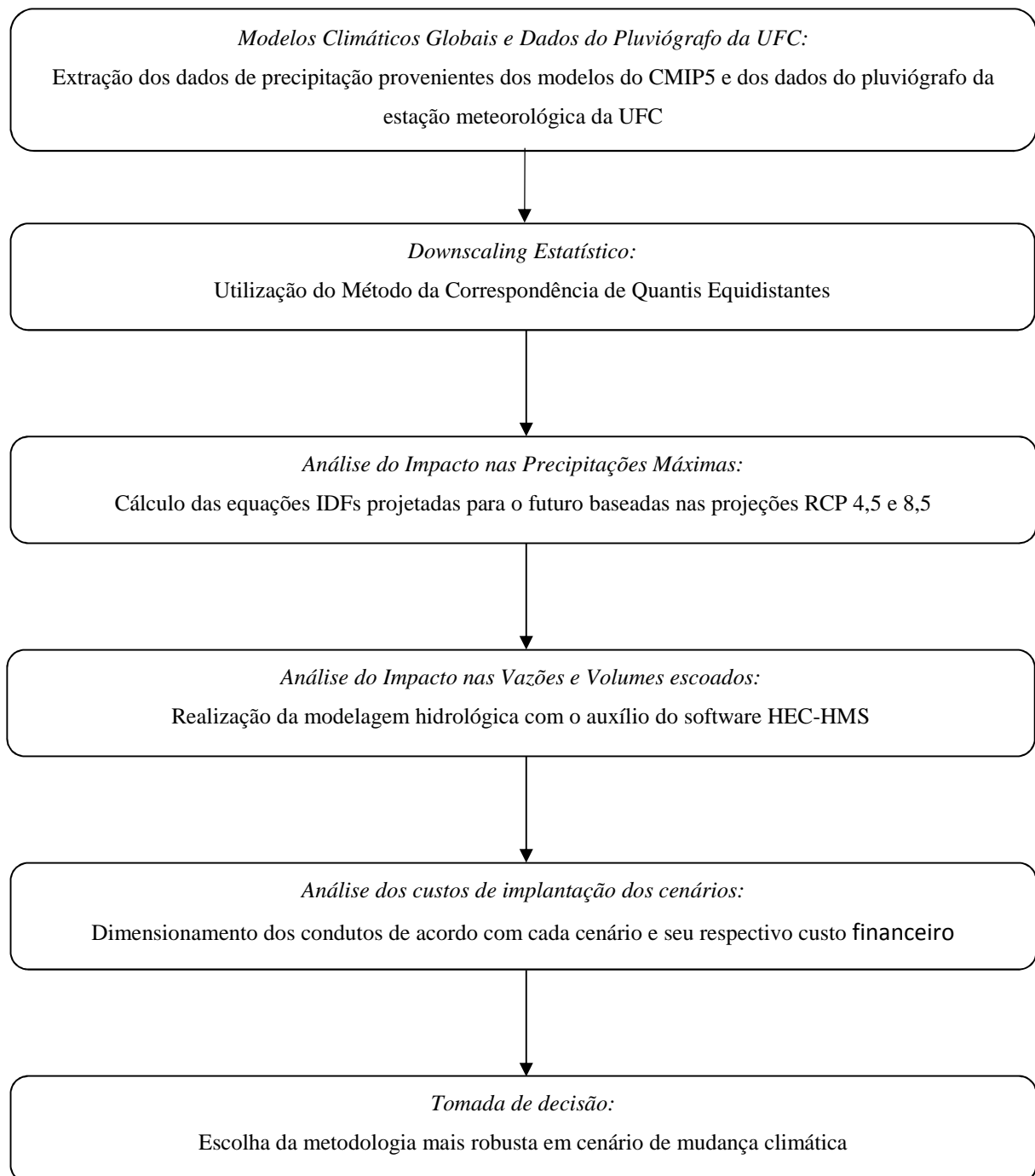
A variável Pr_k representa a probabilidade de ocorrência de um determinado cenário de planejamento k , e N informa o número total de cenários considerados. Os parâmetros de cada cenário são representados por ω .

O projetista que utiliza essa metodologia tem como objetivo principal minimizar os seus custos, enquanto minimiza os riscos (variabilidade dos custos dos cenários possíveis).

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho pode ser representada através do fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma dos passos metodológicos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.1 Dados pluviométricos

Nesta seção, foi realizada a análise estatística dos dados provenientes do pluviógrafo da UFC. Ademais, foram extraídos dados de precipitação de seis modelos GCM para a série histórica, projeção RCP 4,5 e RCP 8,5.

3.1.1 Dados do pluviógrafo da UFC

Realizou-se a análise estatística dos dados do pluviógrafo da estação meteorológica do Centro de Ciências Agrárias da UFC, através de registros contínuos com intervalo de 5 em 5 minutos desde 1970 até 1999 (30 anos).

Foram avaliados os eventos de precipitação máximos anuais para durações de 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos, 25 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 6 horas, 12 horas, 18 horas, 24 horas e 1 dia.

Também foram calculadas as relações entre as durações dessas chuvas máximas.

3.1.2 Modelos climáticos globais

Neste trabalho, foram utilizados dados de precipitação oriundas de seis GCMs (Tabela 5), esses modelos foram escolhidos por possuírem dados diários de precipitação para a região estudada. Além disso, foram avaliados por Silveira et al. (2013) quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre o nordeste setentrional do Brasil e Silveira et al. (2016) também analisaram projeções das precipitações na bacia do Rio São Francisco, que está inserida em grande parte do nordeste brasileiro.

Tabela 5 – GCMs utilizados e suas respectivas resoluções espaciais

GCMs utilizados	Resolução espacial (Longitude x Latitude)
Bcc-csm1	2,8 x 2,8
CanESM2	2,8 x 2,8
CCSM4	1,25 x 0,94
CESM1-CAM5	1,25 x 0,94
inmcm4	2,00 x 1,50
MIROC5	1,4 x 1,41

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os dados foram extraídos no sítio eletrônico do CMIP5 (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>), estando em formato NetCDF. A visualização dessas informações, e respectiva interpolação linear para o ponto da grade desejado, foi realizada com o auxílio do *FERRET*.

O *FERRET* é um programa computacional gratuito de visualização e análise interativa concebido para satisfazer as necessidades dos oceanógrafos e meteorologistas que analisam grandes e complexos conjuntos de dados em grade. Sendo capaz de funcionar nos sistemas *Unix* e *Mac* que utilizam a interface de visualização X Windows.

Foi desenvolvido pelo *Thermal Modeling and Analysis Project* (TMAP) no PMEL em Seattle para analisar as saídas de seus modelos numéricos oceânicos e compará-los com os dados observacionais em grade (FERRET, 2015).

É largamente utilizado para a visualização e interpolação de dados de precipitação gerados pelos modelos GCM. Tendo importância fundamental no desenvolvimento desta pesquisa.

O downscaling estatístico dos dados de precipitação foi realizado por meio da utilização do Método da Correspondência dos Quantis Equidistantes com vistas a correção do viés estatístico presente nas amostras geradas pelos GCMs.

3.2 Atualização de curvas IDF sob efeito de mudanças climáticas

Verificou-se que as mudanças climáticas impactarão diretamente os eventos de chuvas máximas, sendo necessário que as curvas IDF sejam projetadas para um cenário futuro incorporando essas alterações climáticas.

Foram utilizados modelos de circulação global (GCM) para estimar as precipitações futuras na cidade de Fortaleza. Contudo, os modelos utilizados foram capazes de fornecer apenas as precipitações acumuladas diariamente, não apresentando a discretização de chuvas sub-diárias (15 minutos, 30 minutos, 1 hora...) que são imprescindíveis para o cálculo das curvas IDF. Para a obtenção das alturas pluviométricas sub-diárias foram utilizados dois métodos distintos de desagregação.

No primeiro método, foi considerado que as constantes de desagregação, ou seja, as relações entre as chuvas sub-diárias, são constantes ao longo do tempo, sendo utilizadas as constantes descritas pelo método das relações das durações, posteriormente, utilizou-se as constantes obtidas por meio dos registros do pluviógrafo da UFC.

Com relação ao segundo método, foi utilizada a metodologia utilizada por Srivastav, Schardong e Simonovic (2015) em que a desagregação é realizada levando em consideração as funções acumuladas de probabilidade (FAP).

3.2.1 Utilização de parâmetros constantes de desagregação de precipitação de chuvas diárias

Foram realizadas duas simulações por meio de parâmetros constantes de desagregação de chuvas diárias, utilizando as constantes descritas por Bertoni & Tucci (1993), referentes ao método das relações das durações, e as obtidas através de dados do pluviógrafo da UFC com registros de 1970 a 1999.

3.2.1.1 Método das relações das durações

Inicialmente, calculou-se as máximas diárias anuais dos modelos GCM relativo de 1970 a 1999. Em seguida, uma distribuição de probabilidade foi ajustada a esses dados.

Utilizou-se a distribuição de valores extremos do tipo I (distribuição de Gumbel), por ser muito utilizada na análise de eventos hidrológicos. A função acumulada de probabilidades (FAP) teórica da distribuição de Gumbel, de acordo com Naghettini e Pinto (2007), é dada pela equação (8).

$$F_y(y) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{y - \beta}{\alpha} \right) \right] \text{ para } -\infty < y < \infty, -\infty < \beta < \infty, \alpha > 0 \quad (8)$$

Sabe-se que a FAP empírica, dada pela equação (9), pode ser calculada pela razão entre a ordem (m) de classificação de um elemento em uma certa amostra e o seu número total de elementos (N).

$$F_N(y) = \frac{m}{N} \quad (9)$$

Já a função densidade de probabilidade é expressa pela equação (10).

$$f_y(y) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{y - \beta}{\alpha} - \exp \left(-\frac{y - \beta}{\alpha} \right) \right] \quad (10)$$

Onde α representa o parâmetro de escala e β o parâmetro de posição, sendo calculados por meio do método dos momentos que consiste em igualar os momentos amostrais aos populacionais. Já o valor esperado e a variância são calculados, respectivamente, por (11) e (12):

$$E[Y] = \beta + 0,5772\alpha \quad (11)$$

$$Var[Y] = \sigma_y^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \quad (12)$$

A função inversa da FAP de Gumbel, ou função de quantis, é expressa pela expressão (13) ou (14) :

$$y(F) = \beta - \alpha \ln[-\ln(F)] \quad (13)$$

$$y(T) = \beta - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (14)$$

Sabendo que, a variável T representa o período de retorno de evento em anos e F representa a probabilidade anual de não superação.

Para verificar o ajuste da distribuição de Gumbel aos dados, utilizou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS), podendo ser calculado baseado na maior diferença entre as FAPs empírica e teórica. A estatística do teste de KS é dada por:

$$D_N = \sup_{-\infty < y < \infty} |F_N(y) - F_y(y)| \quad (15)$$

Considerando-se uma amostra de 30 elementos, a Tabela 6 apresenta os valores críticos da estatística D_N para cada nível de significância do teste.

Tabela 6 – Valores críticos do teste de KS para uma amostra de 30 elementos

Nível de significância do teste	0,10	0,05	0,02	0,01
Valores críticos	0,218	0,242	0,270	0,290

Fonte: Adaptado de NAGHETTINI E PINTO (2007)

Após a verificação da aderência da distribuição de Gumbel às séries de dados de precipitação do pluviógrafo e dos GCMs, procedeu-se à determinação das alturas máximas de chuva referente aos seguintes períodos de retorno: 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos. Essas chuvas diárias foram desagregadas utilizando-se as relações constantes de desagregação descritas no método das relações das durações (Tabela 7), gerando precipitações de durações de 2 horas, 1 hora, 30 minutos, 25 minutos, 20 minutos, 15 minutos, 10 minutos e 5 minutos.

O método das relações das durações assume a hipótese de que as relações entre precipitações máximas de diferentes durações são constantes ao longo do tempo.

Dessa forma, é possível determinar as intensidades de precipitações para as durações e período de retorno citados.

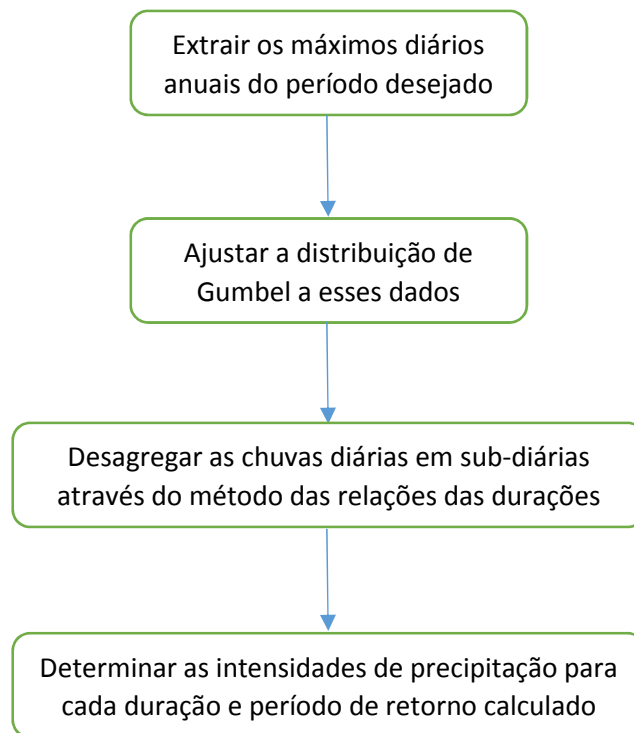
Tabela 7 – Fatores de desagregação de precipitação

Relação constante	Fator
5min/30min	0,34
10min/30min	0,54
15min/30min	0,70
20min/30min	0,81
25min/30min	0,91
30min/1h	0,74
1h/24h	0,42
2h/24h	0,52
24h/1dia	1,10

Fonte: Adaptado de TUCCI et al. (1993)

Posteriormente, o procedimento foi repetido utilizando-se dados dos modelos GCM referentes ao período de 2070 a 2099, com o intuito de comparar as mudanças ocorridas nas precipitações em uma escala de tempo de um século. O fluxograma da metodologia utilizada pode ser analisado através da Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia baseada no método das relações das durações



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.2.1.2 Relações obtidas por dados do pluviógrafo da UFC

Foram utilizados dados do pluviógrafo da estação meteorológica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará. O equipamento foi capaz de apresentar registros contínuos de chuva de 5 em 5 minutos, no período de 1970 a 1999.

Em seguida, foram extraídas as chuvas máximas diárias e sub-diárias (5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos, 25 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 6 horas, 12 horas, 18 horas, 24 horas) do referido período. De posse desses valores, é possível obter as constantes de desagregação a serem utilizadas, que são: 5 minutos / 30 minutos; 10 minutos / 30 minutos; 20 minutos / 30 minutos; 25 minutos / 30 minutos; 30 minutos / 1 hora; 1 hora / 24 horas; 2 horas / 24 horas e 24 horas / 1 dia.

Posteriormente, foram extraídos os valores máximos diários de precipitação dos modelos GCM referente ao período de 1970 a 1999. Realizou-se um ajuste da distribuição de Gumbel a esses dados para determinar as alturas pluviométricas dos seguintes períodos de retorno: 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos.

Esses valores foram desagregados utilizando-se as relações constantes de desagregação (Tabela 8) obtidas através dos dados do pluviógrafo da UFC.

Tabela 8 – Fatores de desagregação de precipitação obtidos através dos dados do pluviógrafo da UFC

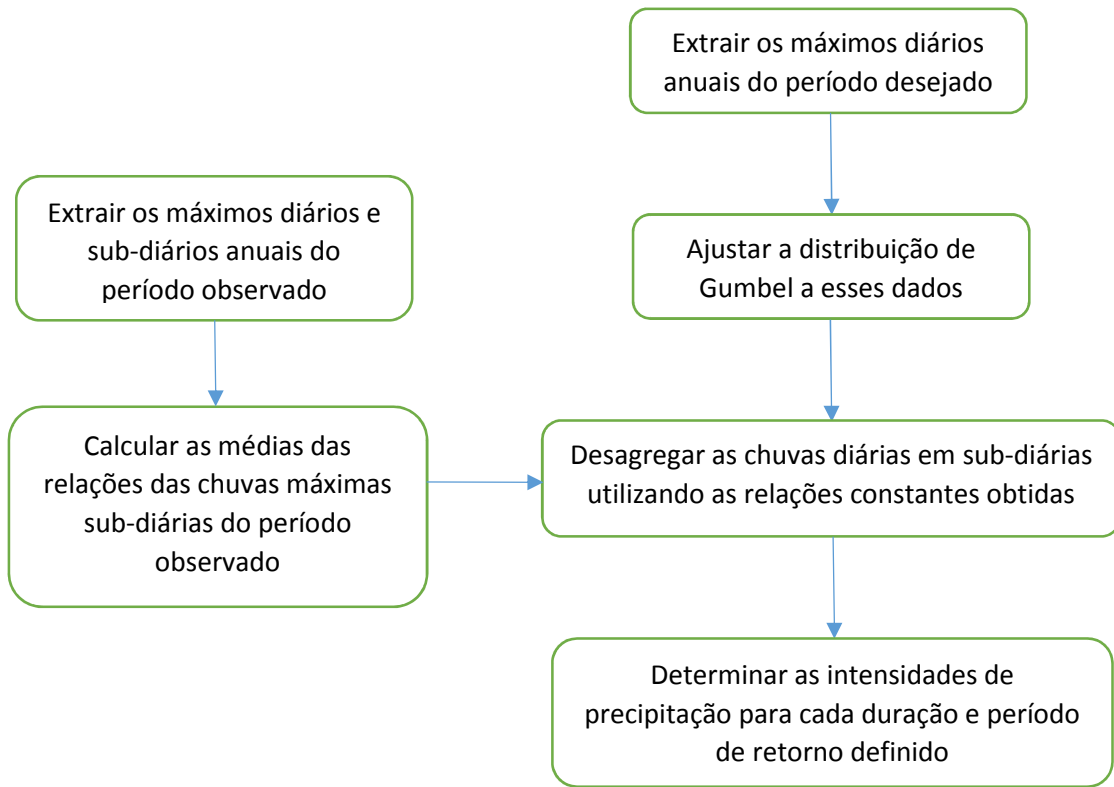
Relação constante	Fator
5min/30min	0,29
10min/30min	0,43
15min/30min	0,58
20min/30min	0,73
25min/30min	0,87
30min/1h	0,72
1h/24h	0,46
2h/24h	0,59
24h/1dia	1,08

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Essa desagregação resultou em precipitações de durações de 2 horas, 1 hora, 30 minutos, 25 minutos, 20 minutos, 15 minutos, 10 minutos e 5 minutos. Dessa forma, é possível calcular as intensidades de precipitações para as durações e período de retorno citados.

O procedimento também foi repetido utilizando-se dados dos modelos GCM referentes ao período de 2070 a 2099. A Figura 7 demonstra o fluxograma da metodologia utilizada.

Figura 7 – Fluxograma da metodologia para utilização dos dados do pluviógrafo da UFC para obtenção das chuvas sub-diárias



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.2.2 “Método da Correspondência de Quantis Equidistantes” (*Equidistance quantile matching method*)

O método denominado de “Equidistance Quantile Matching Method” ou “Método da Correspondência de Quantis Equidistantes”, descrito Srivastav, Schardong e Simonovic (2015), possui uma abordagem diferente dos outros métodos presentes nesse trabalho, não considerando constante os fatores de relação de desagregação das chuvas sub-diárias.

Os modelos de circulação global e regional possuem resoluções espaciais incompatíveis com o tamanho de uma bacia hidrográfica. Dessa forma, faz-se necessário que seja obtida uma ligação entre os dados obtidos por esses modelos e os equivalentes em uma resolução maior (mais próxima da realidade). Uma das técnicas utilizadas para realizar essa ligação chama-se downscaling, podendo ser subdividido em dois tipos: dinâmico e estatístico. O downscaling dinâmico é baseado em modelos de área limitada ou através da utilização de modelos de circulação com resoluções extremamente elevadas para simular condições locais. Já o downscaling estatístico baseia-se em funções de transferência utilizadas para relacionar os

modelos de circulação de global e os locais de estudo, ou seja, estabelece-se uma relação matemática entre os dados gerados pelos referidos modelos com os dados de precipitação observado da área de estudo (SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2015). A Tabela 9 realiza uma sucinta comparação entre alguns critérios relacionados ao downscaling dinâmico e estatístico.

Tabela 9 – Comparação entre o downscaling dinâmico e estatístico

Critério	Downscaling dinâmico	Downscaling estatístico
Tempo computacional	Mais lento	Rápido
Experimentos	Realizações limitadas	Realizações múltiplas
Complexidade	Interações físicas complexas	Interações físicas sucintas
Exemplos	Modelos de circulação regional, GCM aninhado	Regressão linear, rede neural, regressão de kernel

Fonte: Adaptado de Srivastav, Schardong e Simonovic (2015)

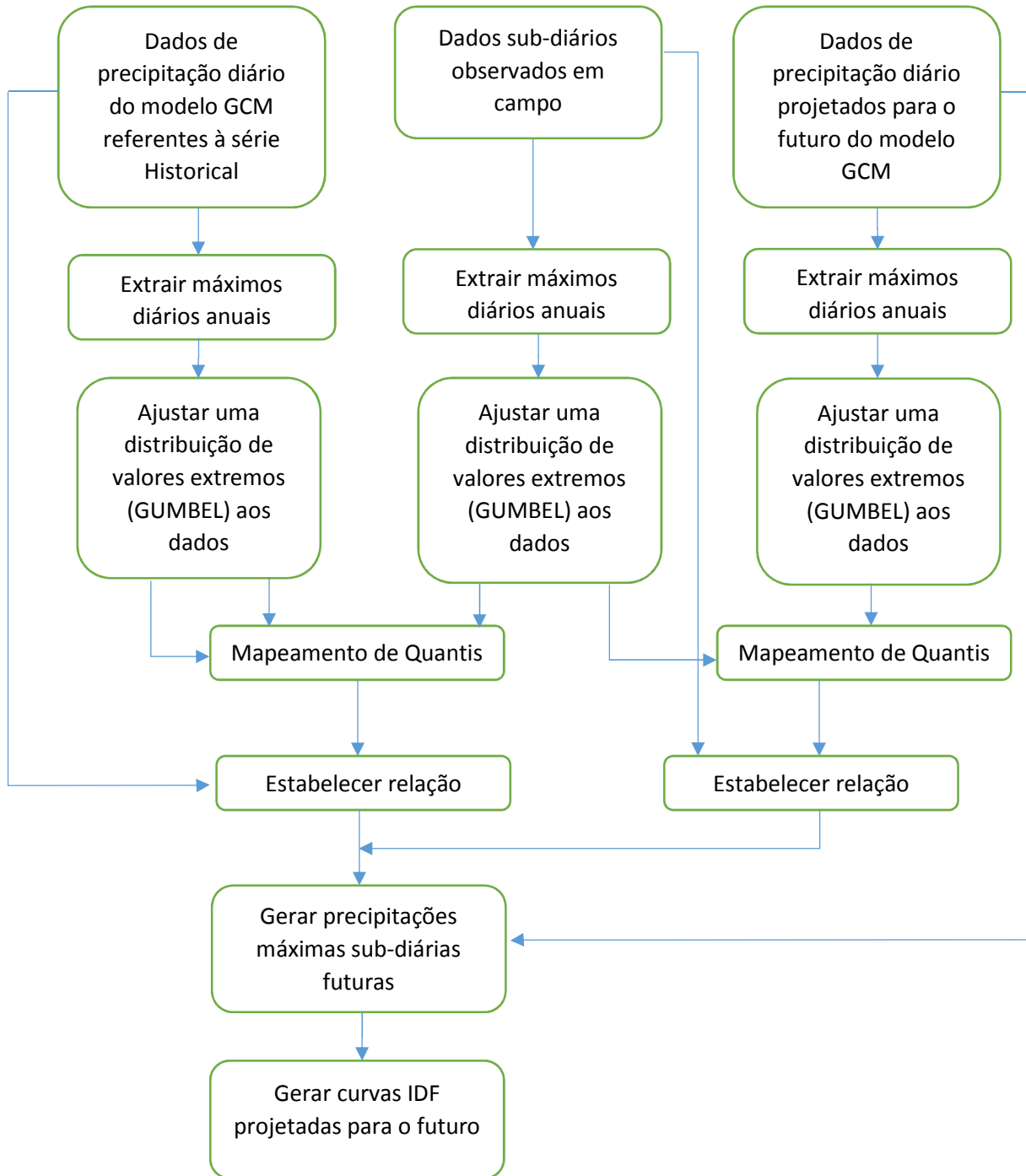
Baseado no exposto, entende-se que o “Método da Correspondência de Quantis” refere-se à utilização da técnica denominada de downscaling estatístico. O referido método possui duas premissas principais a serem seguidas, a primeira indica que deve-se relacionar os dados referentes às chuvas máximas diárias geradas pelo GCM e as chuvas máximas sub-diárias extraídas dos dados observados, esse procedimento descreve o “downscaling” espacial realizado. A segunda vertente remete à realização do “downscaling temporal” relacionando as chuvas máximas diárias geradas pelo GCM (*série historical*) e as chuvas máximas diárias relativas às projeções futuras do GCM (cenários RCPs) (SRIVASTAV; SCHARDONG; SIMONOVIC, 2015).

Ou seja, primeiramente devemos estabelecer a relação entre os dados históricos observados e os dados obtidos pelo GCM (correção de viés). Em seguida, estimar as alterações para possíveis situações futuras baseadas nos cenários RCPs.

A referida metodologia pode ser descrita na Figura 8 e resumida através dos três passos descritos a seguir:

- 1) Estabelecer uma relação estatística entre as precipitações máximas anuais oriundas do modelo GCM e dos dados obtidos em campo referentes ao mesmo período de tempo.
- 2) Estabelecer uma relação estatística entre as precipitações máximas anuais oriundas do modelo GCM referente ao período base e o período futuro a ser analisado.
- 3) Estabelecer uma relação estatística entre os passos 1 e 2 com o intuito de atualizar as curvas IDF para o futuro.

Figura 8 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Adaptado de Srivastav, Schardong e Simonovic (2015)

A metodologia descrita pode ser aplicada por meio dos procedimentos sequenciais a seguir:

(i) Extrair os máximos sub-diários (5min, 10min, ..., 24horas) da série histórica observada.

$$X_{max}^{STN} = \begin{bmatrix} X_{1,max}^{STN,5min} & X_{1,max}^{STN,10min} & \dots & X_{1,max}^{STN,24h} \\ X_{2,max}^{STN,5min} & X_{2,max}^{STN,10min} & \dots & X_{2,max}^{STN,24h} \\ X_{3,max}^{STN,5min} & X_{3,max}^{STN,10min} & \dots & X_{3,max}^{STN,24h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{N,max}^{STN,5min} & X_{N,max}^{STN,10min} & \dots & X_{N,max}^{STN,24h} \end{bmatrix}$$

Onde N representa o número total de anos observados e $X_{i,max}^{STN,j}$ representa a máxima precipitação sub-diária de uma determinada duração j^{th} em um dado ano i^{th} em uma determinada estação (STN) de medição.

(ii) Extrair os máximos diários obtidos pela série *historical* gerada pelo modelo GCM.

$$X_{max}^{STN} = \begin{bmatrix} X_{1,max}^{GCM} \\ X_{2,max}^{GCM} \\ X_{3,max}^{GCM} \\ \vdots \\ X_{N,max}^{GCM} \end{bmatrix}$$

Onde $X_{i,max}^{GCM}$ representa a precipitação máxima diária do modelo GCM em um dado ano i^{th} e N representa o número total de anos da amostra.

(iii) Extrair os máximos diários obtidos pelos vários cenários RCPs (RCP 4,5; RCP 8,5) gerados pelo modelo GCM selecionado.

$$X_{max}^{GCM,fut} = \begin{bmatrix} X_{1,max}^{GCM,RCP 2,6} & X_{1,max}^{GCM,RCP 4,5} & \dots & X_{1,max}^{GCM,RCP 8,5} \\ X_{2,max}^{GCM,RCP 2,6} & X_{2,max}^{GCM,RCP 4,5} & \dots & X_{2,max}^{GCM,RCP 8,5} \\ X_{3,max}^{GCM,RCP 2,6} & X_{3,max}^{GCM,RCP 4,5} & \dots & X_{3,max}^{GCM,RCP 8,5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{N_F,max}^{GCM,RCP 2,6} & X_{N_F,max}^{GCM,RCP 4,5} & \dots & X_{N_F,max}^{GCM,RCP 8,5} \end{bmatrix}$$

Onde $X_{fut,max}^{GCM}$ representa a precipitação máxima diária do modelo GCM referente aos cenários futuros e N_F representa o número total de anos considerado.

(iv) Ajustar uma função de distribuição de probabilidade aos máximos diários (cada um dos máximos sub-diários observados e os máximos gerados pelo modelo GCM, incluindo a série *historical* e os cenários futuros).

$$FDP^{GCM} = f(\theta^{GCM} / X_{max}^{GCM}) \quad (16)$$

$$FDP_j^{STN} = f(\theta^{STN,j} / X_{max}^{STN,j}) \quad (17)$$

$$FDP^{GCM,fut} = f(\theta^{GCM} / X_{max}^{GCM,fut}) \quad (18)$$

Onde FDP exprime a função de distribuição de probabilidade, f representa a função usada no ajuste e θ representa os parâmetros da distribuição ajustada.

(v) As funções acumuladas de probabilidade dos máximos diários da série *historical* gerada pelo modelo GCM e dos máximos sub-diários observados são igualados com o objetivo de estabelecer uma relação estatística usando o princípio “*quantile based mapping*”. Dessa forma, é possível obtermos os máximos sub-diários $Y_{max,j}^{GCM}$ do modelo GCM. Esse processo é chamado de “*downscaling espacial*” dos máximos diários do modelo para os máximos sub-diários observados.

$$Y_{max,j}^{STN} = invFAP((FAP(X_{max}^{GCM} / \theta^{GCM})) / \theta^{STN,j}) \quad (19)$$

(vi) Estabelecer uma relação estatística similar que expresse a mudança entre os máximos diários da série *historical* e os máximos dos cenários futuros. Esse processo é chamado de “*dowscaling temporal*” dos máximos diários referentes aos cenários futuros RCPs para os máximos diários do modelo GCM referente ao período atual.

$$Y_{max}^{GCM,fut} = invFAP((FAP(X_{max}^{GCM} / \theta^{GCM})) / \theta^{GCM,fut}) \quad (20)$$

Onde $Y_{max}^{GCM,fut}$ se refere à “equivalência de quantis” entre o período base e o período futuro.

(vii) Encontrar a função mais apropriada para relacionar $Y_{max,j}^{STN}$ e X_{max}^{GCM} . Caso tenha sido usado uma distribuição de probabilidade de Gumbel, pode-se admitir que a relação entre essas duas variáveis é linear.

$$Y_{max,j}^{STN} = f(X_{max}^{GCM}) \quad (21)$$

$$Y_{max,j}^{STN} = a_1 \times X_{max}^{GCM} + b_1 \quad (22)$$

(viii) De maneira análoga, deve-se encontrar a função mais apropriada para relacionar $Y_{fut,max}^{GCM}$ e X_{max}^{GCM} .

$$Y_{max,j}^{GCM,fut} = f(X_{max}^{GCM}) \quad (23)$$

$$Y_{max,j}^{GCM,fut} = a_2 \times X_{max}^{GCM} + b_2 \quad (24)$$

(ix) Para calcular os máximos sub-diários dos cenários futuros (RCPs), deve-se combinar as equações (22) e (23) substituindo X_{max}^{GCM} por $Y_{max}^{GCM,fut}$ na equação (24).

$$X_{max,j}^{STN,future} = a_1 \times \left[\frac{Y_{max}^{GCM,fut} - b_2}{a_2} \right] + b_1 \quad (25)$$

3.3 Cálculo dos parâmetros da equação IDF

A equação geral de chuvas intensas, dado um determinado período de retorno, pode ser expressa por:

$$\log i = \log A + b \cdot (\log(t + c)) \quad (26)$$

Onde

i = intensidade da precipitação (mm/min)

t = duração da chuva (min)

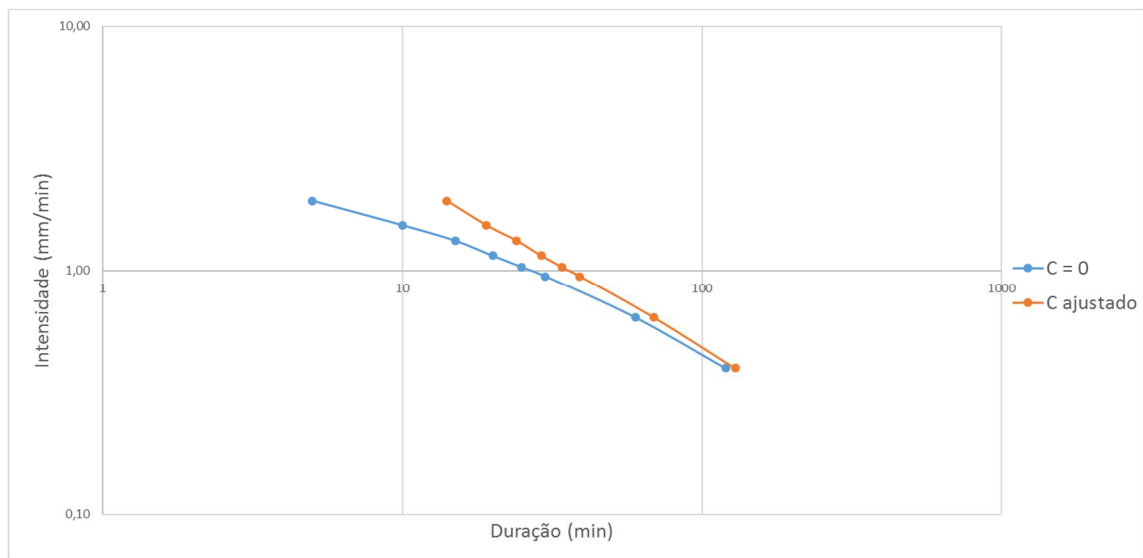
b = tangente do ângulo de inclinação da reta

A = intercepto ou ordenada correspondente à duração de 1 minuto

c = termo utilizado devido à necessidade de uma correção referente à duração

Para a obtenção dos parâmetros da equação IDF, primeiramente calculou-se o valor da variável c , que foi estimado numericamente, de modo a linearizar o gráfico bilogárítico relativo a $\log(i) \times \log(t+c)$, onde i representa o valor da intensidade máxima de chuva referente a um período de retorno de 5 anos e t representa a duração da chuva, conforme metodologia proposta por Wilken (1978). A Figura 9 demonstra com clareza o resultado da correção da variável c .

Figura 9 – Determinação da constante c



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em seguida, aplicando-se o método dos mínimos quadrados, obteve-se o valor da variável b , através da seguinte expressão:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \log(t+c) \cdot (\log i - \overline{\log i})}{\sum_{i=1}^n \log(t+c) \cdot (\log(t+c) - \overline{\log(t+c)})} \quad (27)$$

Onde

$\log i$ = valores de i (mm/min) em escala logarítmica, referentes ao período de retorno de 5 anos.

$\overline{\log i}$ = média dos valores de i (mm/min) em escala logarítmica, referentes ao período de retorno de 5 anos.

$(t + c)$ = valores de $(t+c)$ em escala logarítmica, referentes ao período de retorno de 5 anos.
 $\overline{\log(t + c)}$ = média dos valores de $(t+c)$ em escala logarítmica, referentes ao período de retorno de 5 anos.

De posse do valor de b , é possível calcular o valor médio de A para cada período de retorno utilizado, baseando na equação (28):

$$i = \frac{A}{(t + c)^b} \therefore i = \frac{B \cdot T^d}{(t + c)^b} \quad (28)$$

$$A = B \cdot T^d \quad (29)$$

Onde

i = intensidade da precipitação (mm/h)

T = período de retorno (anos)

Ou seja, para cada período de retorno utilizado foi calculado um valor médio da variável A .

Posteriormente, aplicando-se novamente o método dos mínimos quadrados na equação (29), sendo possível obter a equação (30) que representa o valor da variável d .

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n \log(T_i) \cdot (\log A_i - \overline{\log A})}{\sum_{i=1}^n \log(T_i) \cdot (\log T_i - \overline{\log(T)})} \quad (30)$$

Onde

$\log(T_i)$ = logaritmo do valor de cada período de retorno (anos)

$\overline{\log(T)}$ = média dos valores de $\log(T_i)$

$\log A_i$ = logaritmo do valor de A referente a cada período de retorno utilizado

$\overline{\log A}$ = média dos valores de $\log A_i$

Após o cálculo dessas 3 variáveis, pode-se facilmente calcular o valor de B através da seguinte expressão:

$$\log(B) = \overline{\log(A)} - d.\overline{\log(T)} \therefore B = 10^{\overline{\log(A)} - d.\overline{\log(T)}} \quad (31)$$

3.4 Análise do Impacto nas Vazões e Volumes escoados

Normalmente, definem-se os escoamentos em superficial, representando o fluxo sobre a superfície do solo e seus múltiplos canais; subsuperficial, o fluxo que se dá junto às raízes da cobertura vegetal e; subterrâneo, o fluxo devido à contribuição do aquífero.

Entende-se como escoamento superficial a parte da precipitação total que esco inicialmente pela superfície do solo, começando por pequenos cursos d'água até chegar em cursos de água maiores e mais bem definidos.

Nesse trabalho, foi utilizado o software de simulação HEC-HMS com vistas a estimar o impacto das mudanças climáticas nas vazões e volumes escoados em uma dada bacia.

O modelo computacional HEC-HMS foi desenvolvido para estimar o escoamento superficial em uma bacia hidrográfica dada uma certa precipitação através da representação da bacia como um sistema interligado de componentes hidrológicos e hidráulicos. O referido programa é capaz de gerar hidrogramas a partir de informações da bacia hidrográfica a ser modelada, tais como: precipitação; curve number (CN); time lag e propriedades geométricas dos trechos a serem modelados (SHARFFENBERG, 2013).

Para a simulação da rotina precipitação-escoamento, o programa fornece os seguintes componentes:

- Várias de opções de especificação da precipitação, como descrever um evento histórico observado de precipitação, um evento hipotético de precipitação baseado na frequência, ou um evento que representa o limite máximo de precipitação em um dado local.
- Modelos de perda que podem estimar o volume do escoamento, dada a precipitação e propriedades da bacia hidrográfica.
- Modelos de escoamento que podem representar o escoamento superficial, armazenamento e as perdas de energia devido ao deslocamento das águas para fora da bacia hidrográfica.
- Modelos hidrológicos que podem quantificar o armazenamento e o fluxo de energia decorrente do fluxo hidráulico dentro de um canal.

O escoamento superficial da bacia foi calculado assumindo-se uma precipitação uniformemente distribuída. Os hietogramas adotados foram baseados na equação IDF de Fortaleza e nas 12 novas equações baseadas nas projeções dos modelos GCM. A partir dessas equações, calculou-se as precipitações associadas ao tempo de retorno de 50 anos para as durações 5 minutos, 15 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas e 6 horas.

Para o cálculo da precipitação efetiva foi utilizado o método do Soil Conservation Service (SCS), no qual a chuva efetiva é função da altura total de chuva e do parâmetro de abstração denominado CN.

A variável CN pode variar de 0 a 100, tendo o objetivo de refletir as condições de cobertura e solo do local, podendo assumir valores que refletem uma cobertura muito impermeável (limite inferior) até uma cobertura completamente impermeável (limite superior). Para o estudo, considerou-se o uso atual do solo, com o intuito de individualizar os impactos provenientes apenas das mudanças climáticas.

O time lag, ou tempo de retardo, pode ser definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa do hietograma de chuva excedente e o pico do hidrograma (CHOW et al., 1988). Podendo ser expresso por:

$$T_{Lag} = 0,6 \cdot T_c \quad (32)$$

Onde T_{Lag} representa o Time lag (em horas) e T_c denota o tempo de concentração da sub-bacia.

3.5 Análise dos custos de implantação dos cenários

Foram quantificados os custos de implantação da rede de drenagem de cada cenário estudado, totalizando 13 cenários possíveis. Um cenário foi baseado nas chuvas intensas calculadas através da equação IDF de Fortaleza, 12 cenários foram baseados nas equações IDF provenientes dos dados de precipitação máxima gerada pelos seis modelos GCM utilizados, considerando-se os cenários RCP 4,5 e RCP 8,5. Os cenários foram dimensionados de acordo com as vazões geradas pelo software HEC-HMS referente a cada trecho do sistema modelado.

Considerou-se apenas os custos relativos aos condutos subterrâneos (circulares e retangulares), excluindo-se o custo do conduto principal (canal aberto trapezoidal). Considerou-se no dimensionamento a utilização de seções circulares de concreto com os seguintes

diâmetros: 0,3 metro; 0,4 metro; 0,5 metro; 0,6 metro; 0,8 metro; 1,0 metro; 1,2 metro; 1,5 metro. Além disso, foram utilizadas seções retangulares de 1,5 x 1,5 metros; 2,0 x 2,0 metros; 2,5 metros x 2,5 metros; 3,0 x 3,0 metros.

Na quantificação do custo total de cada cenário foram considerados os custos de locação de rede de drenagem, serviços de escavação e reaterro, fornecimento e assentamento dos tubos/galerias de concreto e a implantação de bocas de lobo.

Os custos considerados basearam-se nos preços de referência da tabela SINAPI-CE (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) de setembro de 2015.

3.5.1 *Custo de locação da rede de drenagem*

Foi calculada toda a extensão da rede de drenagem e utilizado o preço de referência discriminado na Tabela 10.

Tabela 10 – Custo da locação da rede de drenagem

Sinapi	Serviços Preliminares	Unidade	Preço Unitário (R\$)
73610	Locação de Redes de Água ou de Esgoto	m	0,86

Fonte: Tabela de Custos SINAPI_DESONERADO_09_2015

3.5.2 *Custo de escavação e reaterro*

Primeiramente, foram calculados os volumes de escavação referente a cada tipo de seção dos tubos/galerias utilizados. Considerou-se o cálculo do cobrimento, largura e espessura da base conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Quantitativo de escavação

Cobrimento (mínimo de 1 metro)	Largura	Espessura da base (mínimo de 0,2 metro)
$\frac{Diâmetro}{2} + 0,4 \text{ (metro)}$	$Diâmetro + 0,6 \text{ (metro)}$	$\frac{Diâmetro}{4}$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Utilizando os dados da Tabela 11, foi calculado o quantitativo relativo a cada tipo de seção utilizado, conforme Tabela 12. A profundidade corresponde ao somatório do cobrimento, diâmetro/altura do tubo/galeria e espessura da base.

Tabela 12 – Valores de escavação da profundidade, largura e área total

Tipo	Profundidade (m) (1)	Largura (m) (2)	Área total (m ²) (1) x (2) = (3)
Seção circular de 0,3m	1,50	0,90	1,35
Seção circular de 0,4m	1,60	1,00	1,60
Seção circular de 0,5m	1,70	1,10	1,87
Seção circular de 0,6m	1,80	1,20	2,16
Seção circular de 0,8m	2,00	1,40	2,80
Seção circular de 1,0m	2,25	1,60	3,60
Seção circular de 1,2m	2,50	1,80	4,50
Seção circular de 1,5m	3,03	2,10	6,35
Seção retangular de 1,5 x 1,5m	3,03	2,10	6,35
Seção retangular de 2,0 x 2,0m	3,90	2,60	10,14
Seção retangular de 2,5 x 2,5m	4,78	3,10	14,80
Seção retangular de 3,0 x 3,0m	5,65	3,60	20,34

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os quantitativos de reaterro podem ser facilmente calculados subtraindo-se a área da seção transversal da galeria/tubo da área total da seção transversal escavada (Tabela 13).

Tabela 13 – Valores de reaterro

Tipo	Área total (m ²) (1)	Área da seção (m ²) (2)	Área de reaterro (m ²) (1) - (2) = (3)
Seção circular de 0,3m	1,35	0,07	1,28
Seção circular de 0,4m	1,60	0,13	1,47
Seção circular de 0,5m	1,87	0,20	1,67
Seção circular de 0,6m	2,16	0,28	1,88
Seção circular de 0,8m	2,80	0,50	2,30
Seção circular de 1,0m	3,60	0,79	2,81
Seção circular de 1,2m	4,50	1,13	3,37
Seção circular de 1,5m	6,35	1,77	4,59
Seção retangular de 1,5 x 1,5m	6,35	2,25	4,10
Seção retangular de 2,0 x 2,0m	10,14	4,00	6,14
Seção retangular de 2,5 x 2,5m	14,80	6,25	8,55

Seção retangular de 3,0 x 3,0m	20,34	9,00	11,34
--------------------------------	-------	------	-------

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os custos unitários de escavação e reaterro utilizados estão discriminados na Tabela 14.

Tabela 14 – Custos de escavação e reaterro

Sinapi	Movimentação de Terra	Unidade	Preço Unitário (R\$)
73962/013	Escavação de vala não escorada em material de 1ª categoria com profundidade até 1,5 com retroescavadeira 105hp, sem esgotamento	m ³	3,6
73962/004	Escavacao de vala não escorada em material de 1a categoria com profundidade de 1,5 até 3m com retroescavadeira 75hp, sem esgotamento	m ³	6,31
73964/005	Reaterro de vala/cava sem controle de compactação, utilizando retro-escavadeira e compactador vibratorio com material reaproveitado	m ³	8,11

Fonte: Tabela de Custos SINAPI_DESONERADO_09_2015

3.5.3 Custo de fornecimento e assentamento dos tubos/galerias de concreto

Através das vazões fornecidas pelo HEC-HMS e pelas características da bacia (declividade e comprimento do trecho), pôde-se dimensionar os condutos mínimos necessários para transportar as águas pluviais em cada sub-bacia. Após a quantificação do tipo e total de condutos necessários, obteve-se os custos totais de fornecimento e assentamento dos mesmos, utilizando-se os custos unitários da Tabela 15 e Tabela 16.

Tabela 15 – Custos relativos ao fornecimento e assentamento dos tubos circulares

Sinapi	Fornecimento e Assentamento de Tubos Circulares	Unidade	Preço Unitário (R\$)
83676	Tubo de concreto simples dn 300 mm para drenagem - fornecimento e instalação	m	84,03
7745	Tubo de concreto armado, classe pa-1, pb, dn = 400 mm, para aguas pluviais	m	79,4
7714	Tubo de concreto armado, classe pa-1, pb, dn = 500 mm, para aguas pluviais	m	98,55
7725	Tubo de concreto armado, classe pa-1, pb, dn = 600 mm, para aguas pluviais	m	130,86
7750	Tubo de concreto armado, classe pa-1, pb, dn = 800 mm, para aguas pluviais	m	219,58
7753	Tubo de concreto armado, classe pa-1, pb, dn = 1000 mm, para aguas pluviais	m	298,74
7757	Tubo de concreto armado, classe pa-1, pb, dn = 1200 mm, para aguas pluviais	m	417,47
7758	Tubo de concreto armado, classe pa-1, pb, dn = 1500 mm, para aguas pluviais	m	637,06

73724	Assentamento de tubo de concreto d = 0,4m	m	18,67
73723	Assentamento de tubo de concreto d = 0,5m	m	28,36
73722	Assentamento de tubo de concreto d = 0,6m	m	36,31
73720	Assentamento de tubo de concreto d = 0,8m	m	75,05
73721	Assentamento de tubo de concreto d = 1,0m	m	112,05
73719	Assentamento de tubo de concreto d = 1,2m	m	139,02
73718	Assentamento de tubo de concreto d = 1,5m	m	217,54

Fonte: Tabela de Custos SINAPI_DESONERADO_09_2015

Tabela 16 – Custos relativos ao fornecimento das galerias retangulares

Sinapi	Fornecimento das Galerias Retangulares	Unidade	Preço Unitário (R\$)
37476	Aduela/galeria de concreto armado, secao retangular 1.50 x 1.50 m	m	2.190,78
37477	Aduela/galeria de concreto armado, secao retangular 2.00 x 2.00 m	m	2.989,99
37478	Aduela/galeria de concreto armado, secao retangular 2.50 x 2.50 m	m	3.717,70
37479	Aduela/galeria de concreto armado, secao retangular 3.00 x 3.00 m	m	4.518,18

Fonte: Tabela de Custos SINAPI_DESONERADO_09_2015

3.5.4 Custos de dispositivos auxiliares

Os custos de dispositivos auxiliares (Tabela 17) referem-se às bocas de lobo utilizadas no orçamento. Considerou-se a utilização de uma unidade do item a cada 60 metros, em cada lado da via.

Tabela 17 – Custo de implantação de dispositivos auxiliares

Sinapi	Fornecimento das Galerias Retangulares	Unidade	Preço Unitário (R\$)
83659	Boca de lobo em alvenaria tijolo macico, revestida c/ argamassa de cimento e areia 1:3, sobre lastro de concreto 10cm e tampa de concreto armado	m	559,27

Fonte: Tabela de Custos SINAPI_DESONERADO_09_2015

3.6 Tomada de decisão

Diante da variedade de possíveis cenários de custos de implantação da rede de drenagem e das imensas indefinições a respeito de como se comportará o clima no futuro, procedeu-se à aplicação da metodologia robusta de dimensionamento de rede de drenagem urbana considerando os efeitos das mudanças climáticas.

Como não se sabe ao certo qual cenário tem a maior chance de ocorrência, considerou-se que todos os 13 cenários possuem a mesma probabilidade de acontecer. Na análise, foram utilizados seis critérios de tomada de decisão.

Procedeu-se a construção de uma matriz de custos total de implantação de cada cenário diante de determinada alternativa escolhida anteriormente. Como penalidade por ter escolhida uma alternativa divergente do que pode vir a acontecer considerou-se um acréscimo de 20% (fator multiplicador de 1,2) que seria relativo ao custo de escavação para retirada da tubulação subdimensionada, transporte de material e entre outros. Ou seja, caso tenhamos gasto um valor C_A para implantação de uma determinada alternativa A, se a alternativa B (que possui custo de implantação C_B) venha a acontecer e possua custo de implantação superior à alternativa A, o custo total de implantação da alternativa B, dado que a alternativa A já foi implantada anteriormente, é dado pela expressão:

$$\text{Custo total de B} = C_A + 1,2 \times C_B \quad (33)$$

Aplicando ao caso concreto, basta substituir as alternativas pelos custos de implantação da rede de drenagem baseados nos dados de precipitação provenientes dos modelos GCM, conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Exemplo de matriz de custos total

		CENÁRIOS		
		A	B	C
ALTERNATIVAS	A	$Custo\ total = C_A$	$Se\ (C_B \leq C_A)$ $Custo\ total = C_A$ $Se\ (C_B > C_A)$ $Custo\ total = C_A + 1,2 \times C_B$	$Se\ (C_c \leq C_A)$ $Custo\ total = C_A$ $Se\ (C_c > C_A)$ $Custo\ total = C_A + 1,2 \times C_c$
	B	$Se\ (C_A \leq C_B)$ $Custo\ total = C_B$ $Se\ (C_A > C_B)$ $Custo\ total = C_B + 1,2 \times C_A$	$Custo\ total = C_B$	$Se\ (C_c \leq C_B)$ $Custo\ total = C_B$ $Se\ (C_c > C_B)$ $Custo\ total = C_B + 1,2 \times C_c$
	C	$Se\ (C_A \leq C_c)$ $Custo\ total = C_c$ $Se\ (C_A > C_c)$ $Custo\ total = C_c + 1,2 \times C_A$	$Se\ (C_B \leq C_c)$ $Custo\ total = C_B$ $Se\ (C_B > C_c)$ $Custo\ total = C_c + 1,2 \times C_B$	$Custo\ total = C_c$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Para a aplicação da metodologia, também é necessário a obtenção da matriz de arrependimento (Tabela 19). Onde cada célula de arrependimento, corresponde ao valor da diferença do seu custo total e o menor custo de implantação de cada cenário.

Tabela 19 – Exemplo de matriz de arrependimento

		CENÁRIOS		
		A	B	C
ALTERNATIVAS	A	Arrependimento = $C_A - C_{A,MIN}$	Arrependimento = $C_A - C_{B,MIN}$	Arrependimento = $C_A - C_{C,MIN}$
	B	Arrependimento = $C_B - C_{A,MIN}$	Arrependimento = $C_B - C_{B,MIN}$	Arrependimento = $C_B - C_{C,MIN}$
	C	Arrependimento = $C_C - C_{A,MIN}$	Arrependimento = $C_C - C_{B,MIN}$	Arrependimento = $C_C - C_{C,MIN}$
CUSTO MÍNIMO		$C_{A,MIN}$	$C_{B,MIN}$	$C_{C,MIN}$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Após o cálculo dessas duas matrizes, pode-se aplicar os critérios de tomada de decisão exemplificados anteriormente.

O critério do valor esperado é dado pela escolha do menor valor médio dos custos totais de implantação de cada alternativa.

O critério minimin é calculado através da obtenção do menor valor entre os mínimos custos totais de implantação de cada alternativa. No sentido oposto, o critério minimax é obtido pelo menor valor entre os máximos.

Caso o planejador deseje atribuir um certo grau de otimismo (ou pessimismo) na escolha dos cenários, deve-se utilizar o critério de Hurwicz. Nesse caso, teremos um conjunto de soluções ótimas atribuídas a cada grau (%) de otimismo referente aos custos totais de implantação. Quanto maior for o otimismo, a solução estará próxima da alternativa de menor custo. Caso contrário, a solução estará próxima da alternativa que apresentar o custo mais elevado.

Para o cálculo da melhor alternativa, utilizando-se o critério de Savage, que é baseado na matriz de arrependimento, deve-se calcular os máximos arrependimentos de cada alternativa. Em seguida, escolhe-se a menor entre elas.

O critério mais robusto a ser incluído na análise (SMORO), é capaz de fornecer um conjunto de soluções ótimas, baseada na minimização de duas funções de custos. A primeira baseada no custo médio de cada alternativa. Enquanto que a segunda, refere-se à minimização dos desvios-padrão através dos cenários.

4 LOCAL DE APLICAÇÃO

A cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, está localizada aproximadamente nas seguintes coordenadas geográficas: Latitude 3°43'02" (SUL) e Longitude 38°32'35" (OESTE). Possui área total de 313,14 km² e uma altitude média de 16 metros. Em relação aos aspectos climáticos, possui clima tropical quente sub-úmido, apresentando pluviosidade média de 1338 mm (com as chuvas concentradas no período de janeiro a maio) e uma temperatura média diária que varia de 26° a 28° Celsius (IPECE, 2012).

4.1 Equação IDF de Fortaleza

Atualmente, a equação da Autarquia Metropolitana de Fortaleza (AUMEF) é tida como oficial pela Secretaria de Infraestrutura do Município de Fortaleza, sendo bastante utilizada em projetos de drenagem urbana na Região Metropolitana de Fortaleza e cidades próximas, sendo expressa pela equação (34). (SILVA et al., 2013).

$$i = \frac{528,076 \cdot T^{0,148}}{(t + 6)^{0,62}} \quad (34)$$

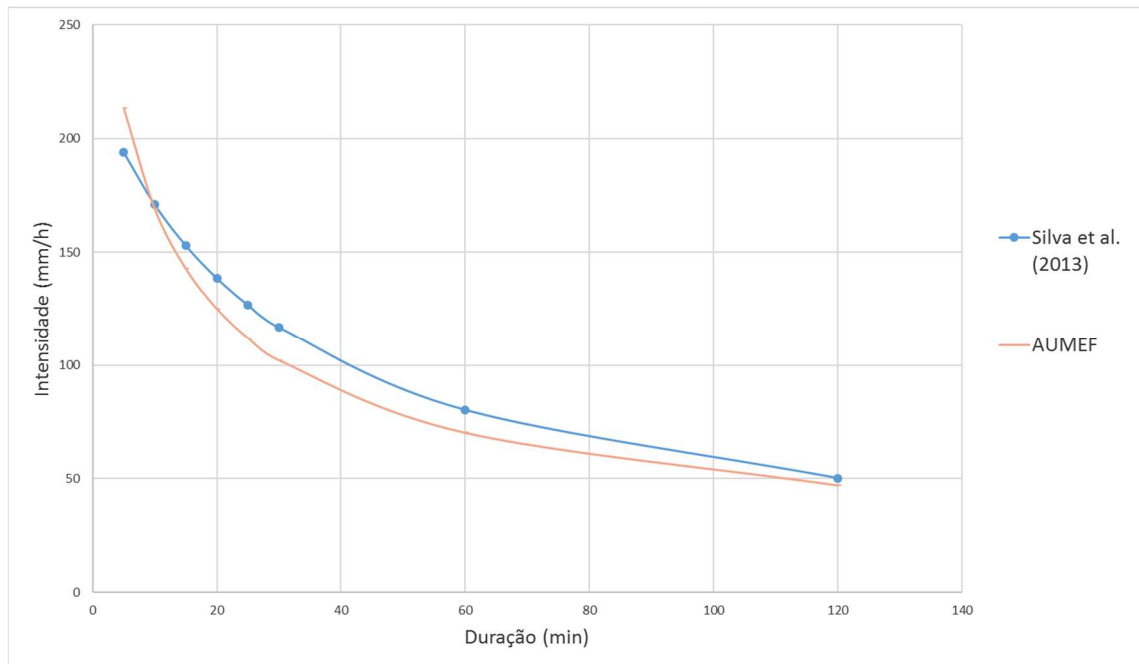
Onde i = intensidade média da chuva (mm/h) em uma dada duração t (minutos) relativo a um período de retorno T (anos). Essa equação foi desenvolvida baseada em dados da estação climatológica do INMET no período de 1928 a 1975. Porém, no final da análise de consistência dos dados foi utilizada uma série de apenas 37 anos. (CEARÁ, 1978 *apud* SILVA et al., 2013).

Silva et al. (2013) propôs a atualização da equação IDF da cidade de Fortaleza utilizando 30 anos de registros pluviográficos (1970-1999) da estação climatológica da Universidade Federal do Ceará (UFC), obtendo a equação (35).

$$i = \frac{2345,29 \cdot T^{0,173}}{(t + 28,31)^{0,904}} \quad (35)$$

Nas Figura 10 temos a comparação da equação IDF utilizada pela AUMEF e a proposta por Silva et al. (2013).

Figura 10 – Comparação entre a equação da AUMEF e a obtida por SILVA et al. (2013)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Percebe-se que a atualização da curva IDF utilizando dados pluviográficos mais recentes resultou em algumas mudanças nas intensidades das chuvas máximas. Para o período de retorno de 50 anos, a nova IDF apresentou um valor de intensidade 9% menor do que a IDF antiga em relação à chuva de 5 minutos de duração. Enquanto que a maior diferença entre as duas curvas ocorre na chuva de 60 minutos, onde calculou-se que a nova IDF apresenta uma intensidade 15% maior do que a antiga.

4.2 Relevo e sub-bacias

O município de Fortaleza possui quatro bacias hidrográficas, que estão total ou parcialmente inseridos na cidade, são elas: Bacia da Vertente Marítima; do rio Cocó; do rio Maranguapinho e do rio Pacoti. A divisão das bacias pode ser melhor compreendida através da Figura 11 e da Tabela 20.

Seu relevo é composto por planícies litorâneas e tabuleiros pré-litorâneos, já seu solo compreende Areias Quartzosas Marinhas, Planossolo Solódico, Podzólico Vermelho-Amarelo e Solonchak. Estando localizada, em relação às bacias do Ceará, na Bacia Hidrográfica Metropolitana e possui vegetação formada por Complexo Vegetacional da Zona Litorânea e Floresta Perenifólia Paludosa Marítima (IPECE, 2012).

Figura 11 – Bacias Hidrográficas de Fortaleza



Fonte: FORTALEZA (2013)

Tabela 20 – Características das Bacias Hidrográficas de Fortaleza (adaptado de Fortaleza, 2013)

Bacia	Área (Km ²)	Talvegue Principal (Km)	Localização
Vertente Marítima	34,54	23	Compreende a faixa localizada ao longo do litoral, entre os Rios Cocó e Ceará
Rio Cocó	209,63	97	Inclui a maior parte da área do município de Fortaleza, possui os seguintes mananciais principais: Rio Cocó, lagoas da Messejana, da Parangaba, do Opaia e do Parangabussu e Riacho do Tauape
Rio Maranguapinho	86,84	100	Está localizada a oeste da cidade, tem como principais mananciais: Rio Maranguapinho, Açude da Agronomia, Riacho do Açude de João Lopes, Riacho Sangradouro do Açude da Agronomia, Riacho da Lagoa do Mondubim e o Riacho Correntes
Rio Pacoti	5,02	3	Ocupa uma pequena área no extremo leste da cidade

Fonte: Adaptado de Fortaleza (2013)

4.3 Situação atual da drenagem urbana em Fortaleza

No município de Fortaleza, a grande expansão urbana não foi acompanhada de um adequado planejamento de infraestrutura. Esse crescimento desordenado ocasionou graves consequências para a cidade nas áreas de saneamento, habitação, malha viária, drenagem urbana e entre outros (FORTALEZA, 2013).

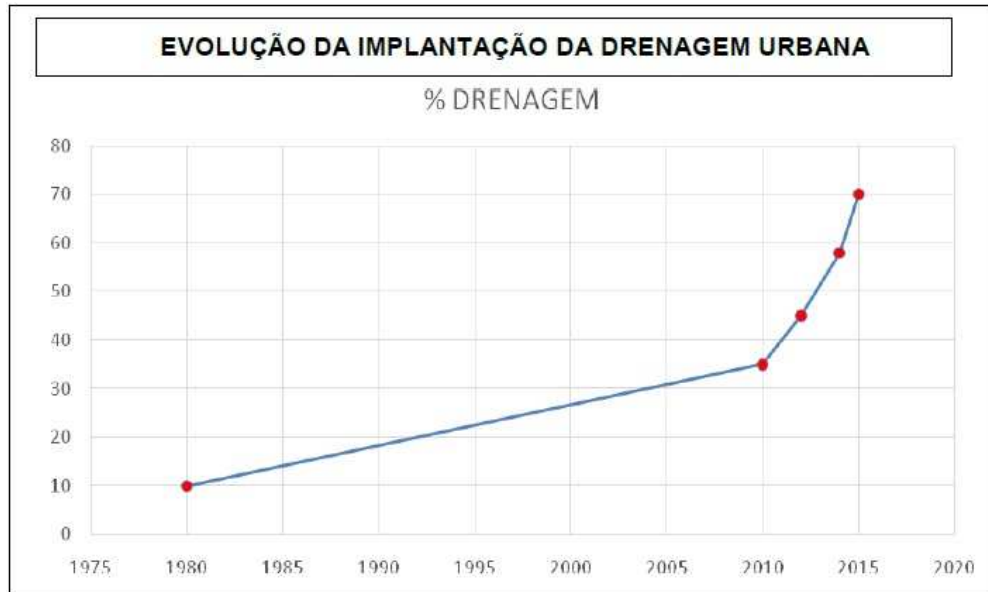
De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza (2013), as principais causas de alagamento na cidade são:

- Obstrução da rede por detritos, lixos e sedimentos, que se caracteriza por ser a maior causa dos pontos de alagamento na cidade.
- Ocupação desordenada, inclusive nas áreas das margens de corpos hídricos, que ocasionam inundações constantes.
- A topografia plana da cidade, que contribui para a existência de áreas sujeitas a inundações nos períodos chuvosos;
- O processo de crescimento acelerado experimentado por Fortaleza entre 1970 e 2000, sem que a infraestrutura urbana fosse ampliada de tal forma a suportar o adensamento da cidade, prejudicando especialmente as áreas onde vivem os mais carentes;
- A modificação pela ação antrópica associada ao processo de urbanização do curso natural do caminho das águas drenadas pela hidrografia citada, impondo a necessidade de soluções de drenagem.

Percebe-se que no Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza, não existe referência alguma ao impacto das mudanças climáticas nas chuvas intensas da cidade de Fortaleza-CE. Reforçando a ideia de que o tema é pouco explorado e que deve ser incluído em futuros estudos sobre a problemática.

Mesmo com o crescimento desordenado, assim como a maioria das capitais brasileiras, Fortaleza conseguiu expandir a sua rede de drenagem urbana. A evolução da rede de 1980 a 2015 pode ser vista na Figura 12.

Figura 12 – Evolução da implantação da rede de drenagem em Fortaleza



Fonte: FORTALEZA (2015)

Ao longo dos anos, Fortaleza perdeu inúmeros mananciais, principalmente lagoas, que auxiliavam no amortecimento das cheias urbanas. A ocupação desordenada ao longo das margens dos corpos hídricos tem aumentado crescentemente (Ver Figura 13) e contribuído para intensificar a incidência de enchentes.

Figura 13 – Ocupação das margens da Lagoa da Itaperaóba no Bairro Serrinha



Fonte: SOUZA FILHO; ARAÚJO (2016)

Em matéria publicada no Jornal O Povo do dia 06/01/2015, foi veiculado informações a respeito de uma enchente urbana ocorrida no Bairro Papicu, em Fortaleza. O título da matéria é “Por que tantos alagamentos no Papicu?”.

Conforme Figura 14, pode-se observar o alto nível do escoamento superficial presente nas ruas. Na reportagem, é citado que moradores afirmaram que, em mais de 30 anos, nenhuma chuva provocou os alagamentos do referido dia.

Figura 14 – Fortes chuvas que ocasionaram alagamentos no Bairro Papicu, em Fortaleza



Fonte: O POVO (2015)

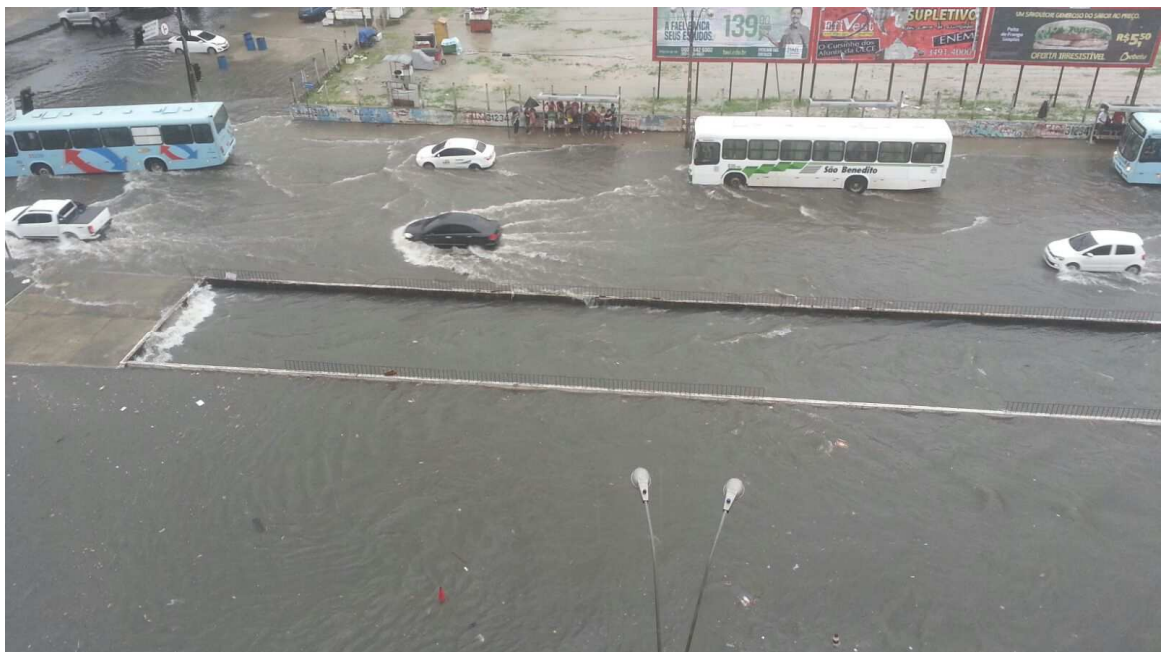
Atualmente, a capital cearense possui inúmeros pontos recorrentes de alagamento, tais como: cruzamento da Avenida Heráclito Graça com Rua Antonio Augusto (Figura 15); Avenida Aguanambi (Figura 16); Avenida Mister Hull (Figura 17); BR-116 (Figura 18); Avenida Raul Barbosa, próximo à Via Expressa; Rua Boris (próximo ao Centro Cultural Dragão do Mar); Avenida Alberto Craveiro (próximo à BR-116); cruzamento da Avenida Beira-Mar com Rua João Cordeiro e entre outros.

Figura 15 – Avenida Heráclito Graça com Rua Antonio Augusto



Fonte: GLOBO (2012)

Figura 16 – Avenida Aguanambi (próximo à avenida 13 de Maio)



Fonte: TRIBUNA DO CEARÁ (2016)

Figura 17 – Avenida Mister Hull (próximo à avenida Perimetral)



Fonte: TRIBUNA DO CEARÁ (2016)

Figura 18 – BR-116 (próximo à avenida Oliveira Paiva)



Fonte: GLOBO (2016)

Os locais citados e outros pontos de alagamento da cidade estão devidamente identificados na Figura 19, onde observa-se com clareza a disposição dos trechos que possuem deficiências em seu sistema de drenagem urbana.

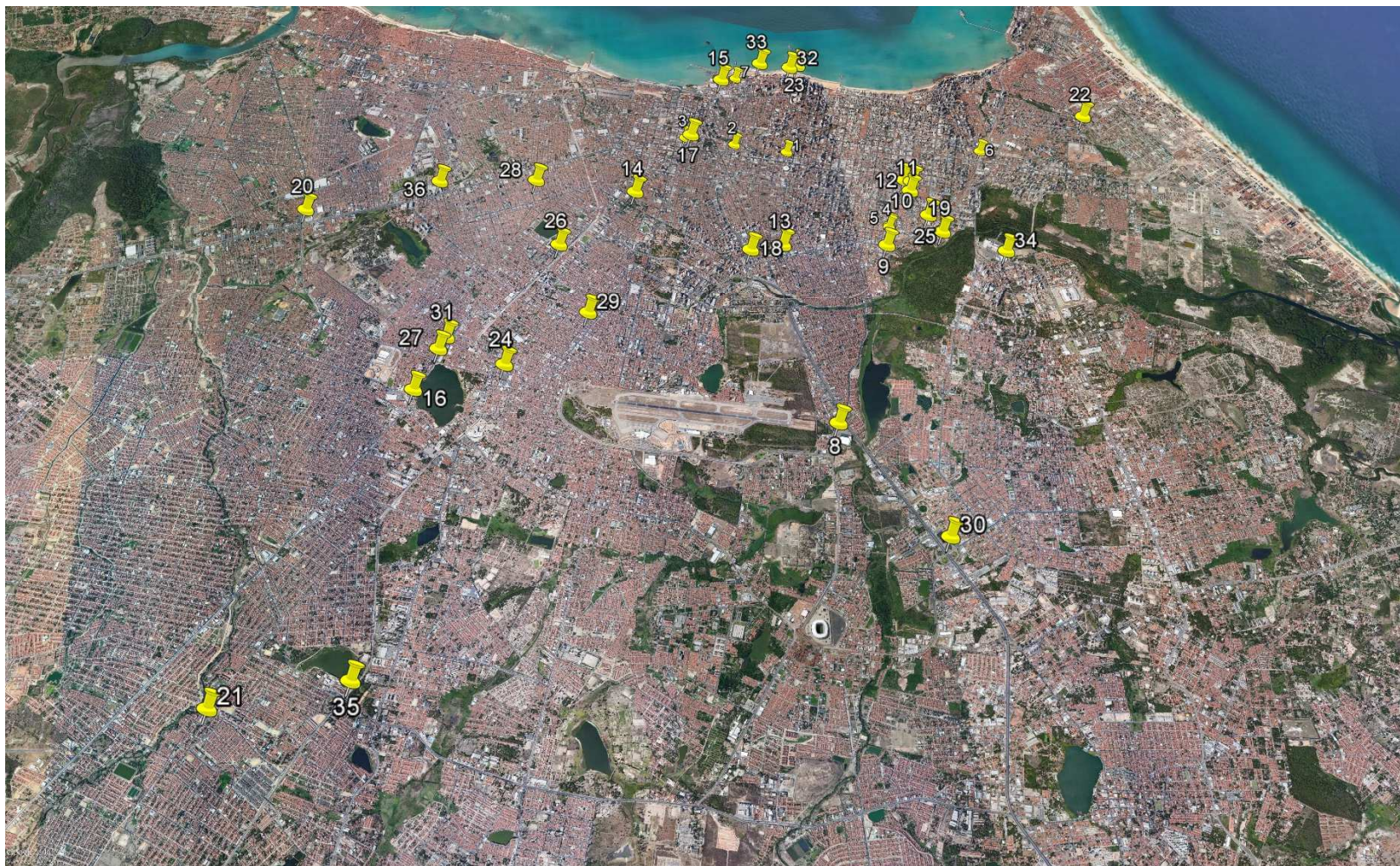
Também foi realizada uma pesquisa nos principais jornais eletrônicos da cidade de Fortaleza a respeito dos principais e recorrentes pontos de alagamentos no período de 2010 a 2016, a localização desses pontos está contida na Tabela 21.

Tabela 21 – Localização dos pontos de alagamento

PONTOS	LOCALIZAÇÃO
1	Heráclito Graça com Antônio Augusto
2	Avenida Heráclito Graça com Dom Manoel
3	Avenida Duque de Caxias com Barão do Rio Branco
4	Avenida Pontes Vieira com Desembargador Moreira
5	Avenida Desembargador Moreira com Julio Siqueira
6	Túnel da Santos Dumont com Via Expressa
7	Rua Boris
8	Avenida Alberto Craveiro
9	Avenida Raul Barbosa
10	Rua Barbosa de Freitas com Padre Valdevino
11	Rua Leonardo Mota com Antônio Sales
12	Rua Leonardo Mota com Beni de Carvalho
13	Avenida Pontes Vieira (em frente à ETICE)
14	Avenida 13 de maio (em frente à UFC)
15	Avenida Alberto Nepomuceno (SEFAZ)
16	Rua Augusto dos Anjos com Gomes Brasil
17	Avenida Duque de Caxias com Major Facundo
18	Avenida Aguanambi (próximo à rotatória)
19	Rua Santa Terezinha do Menino Jesus
20	Avenida Mister Hull (próximo à Perimetral)
21	Rua Brumado - Conj. Esperança
22	Avenida Engenheiro Alberto Sá
23	Rua João Cordeiro
24	Rua Zacarias Gondim com XV de Novembro
25	Avenida Pontes Vieira com Senador Virgílio Távora
26	Avenida José Bastos (HEMOCE)
27	Avenida José Bastos
28	Rua Professor Anacleto (próximo ao Frangolândia)
29	Rua Desembargador Praxedes com Alberto Magno
30	Br-116 com Avenida Oliveira Paiva
31	Avenida José Bastos com Rua Pernambuco
32	Avenida Historiador Raimundo Girão com Gonçalves Lêdo
33	Rua dos Tabajaras com Rua dos Cariris
34	Avenida Coronel Miguel Dias
35	Túnel do Mondubim
36	North Shopping

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 19 – Principais pontos de alagamentos

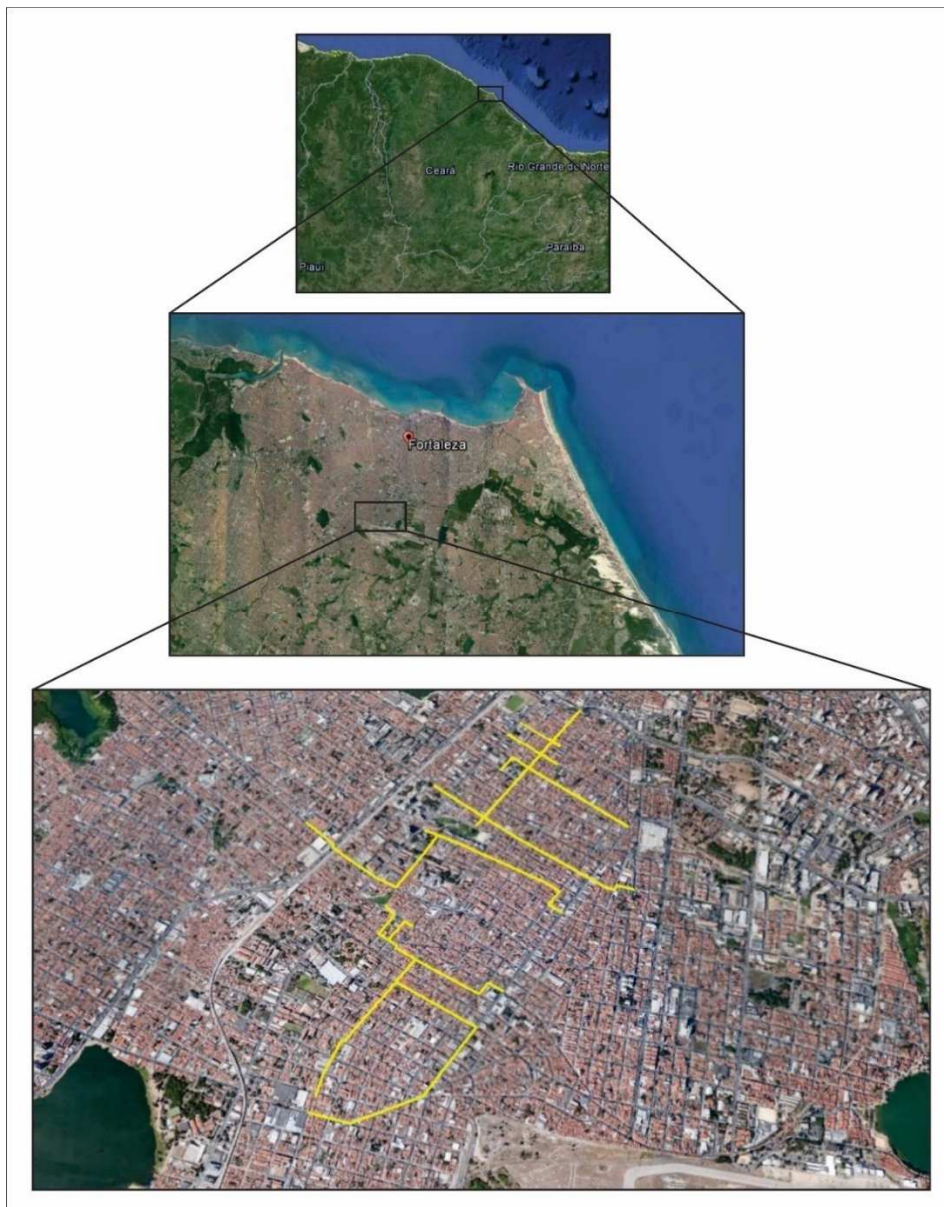


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.4 Sub-bacia modelada

Foi escolhida a sub-bacia do riacho Tauape, localizada na bacia do Rio Cocó, para a aplicação da metodologia proposta por já existir um estudo prévio sobre o local realizado pela SHS NORDESTE Consultoria e Projetos de Engenharia e o Consórcio CONCREMAT/CSL/CAB no ano de 1995. A sub-bacia em estudo está localizada na região centro-sul de Fortaleza, tendo seu exutório no próprio Rio Cocó. A localização da área a ser modelada está descrita na Figura 20.

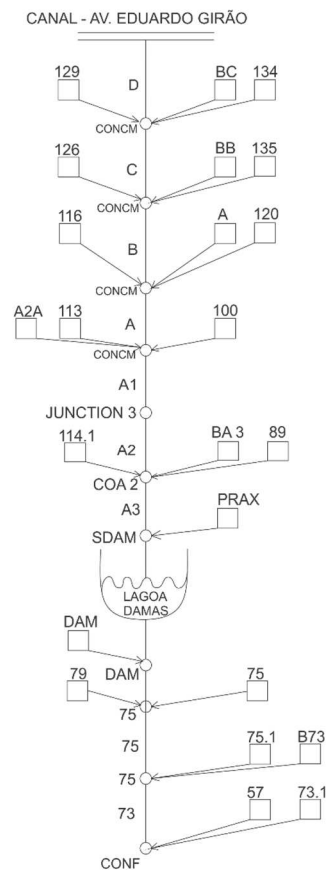
Figura 20 – Localização da sub-bacia modelada



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na Figura 21, tem-se o diagrama unifilar correspondente ao trecho a ser modelado. As linhas verticais com nomenclatura correspondem aos trechos canalizados do sistema, enquanto que as sub-bacias são representas por retângulos. Já os elementos que agregam as contribuições das sub-bacias e trechos canalizados são chamados de junções e são representados por círculos no referido diagrama. Importante lembrar que na modelagem foi considerado o efeito do amortecimento da Lagoa Damas.

Figura 21 – Diagrama unifilar dos trechos a serem modelados



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O diagrama unifilar e características dos elementos da bacia (bem como suas nomenclaturas) foram baseados em informações do documento que constitui o Diagnóstico do Sistema de Macradrenagem da Sub-Bacia do Riacho Tauapé na Cidade de Fortaleza (Ceará) realizado pela SHS NORDESTE Consultoria e Projetos de Engenharia e o Consórcio CONCREMAT/CSL/CAB no ano de 1995. O referido estudo apresentou as metodologias e os resultados do estudo de cheias da bacia hidrográfica do riacho Tauapé, servindo de suporte fundamental na obtenção de dados para o desenvolvimento desse trabalho. A Tabela 22 contém

as nomenclaturas atribuídas às sub-bacias modeladas com seus respectivos parâmetros de entrada do programa HEC-HMS (áreas, valores de CN, Time lag e propriedades geométricas dos trechos canalizados do sistema de drenagem).

Tabela 22 – Características dos elementos da bacia a serem modelados

Sub-Bacia	Área da bacia (km ²)	CN	Time Lag (horas)	Trecho	Extensão do trecho (m)	Declividade média (m/m)	N (Manning)	Formato da Seção	Largura de fundo (m)	Declividade lateral
57	0,3583	80	1,06							
73.1	0,1816	80	0,6							
				73	488	0,0035	0,02	Trapezoidal	2,4	1
B73	0,1184	80	0,69							
75.1	0,1541	80	1,1							
				75	285	0,001	0,02	Trapezoidal	3,5	1
79	0,38	80	1,08							
75	0,0881	80	0,5							
DAM	0,1061	80	0,4							
PRAX	0,2498	80	0,5							
				A3	402,8	0,0038	0,025	Trapezoidal	2,65	0,85
BA3	0,1071	80	0,4							
89	0,28	80	0,5							
114.1	0,1108	80	0,8							
				A2	261,4	0,0025	0,025	Trapezoidal	2,6	0,84
				A1	75,3	0,0032	0,025	Trapezoidal	2,6	0,84
A2A	0,0753	80	0,4							
113	0,0864	80	0,35							
100	0,2983	80	0,5							
				A	436,3	0,003	0,0025	Trapezoidal	2,6	0,84
A	0,11	80	0,4							
120	0,314	80	0,5							
116	0,0968	80	0,44							
				B	125,8	0,0045	0,025	Trapezoidal	2,6	0,84
BB	0,0203	80	0,3							
126	0,0532		0,36							
135	0,0236	80	0,4							
				C	136,3	0,0029	0,025	Trapezoidal	2,6	0,84
BC	0,0161	80	0,222							
134	0,0204	80	0,47							
129	0,0476	80	0,5							
				D	226,3	0,0027	0,025	Trapezoidal	2,6	0,84

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

5 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com base na metodologia apresentada. Além de dados adicionais relevantes para o bom entendimento do assunto em questão.

Primeiramente, será realizada uma análise das precipitações máximas oriundas dos dados dos modelos GCM analisados, explanando as variações percentuais que devem ocorrer em relação as precipitações máximas anuais e as máximas diárias relativas aos cenários RCP 4,5 e RCP 8,5.

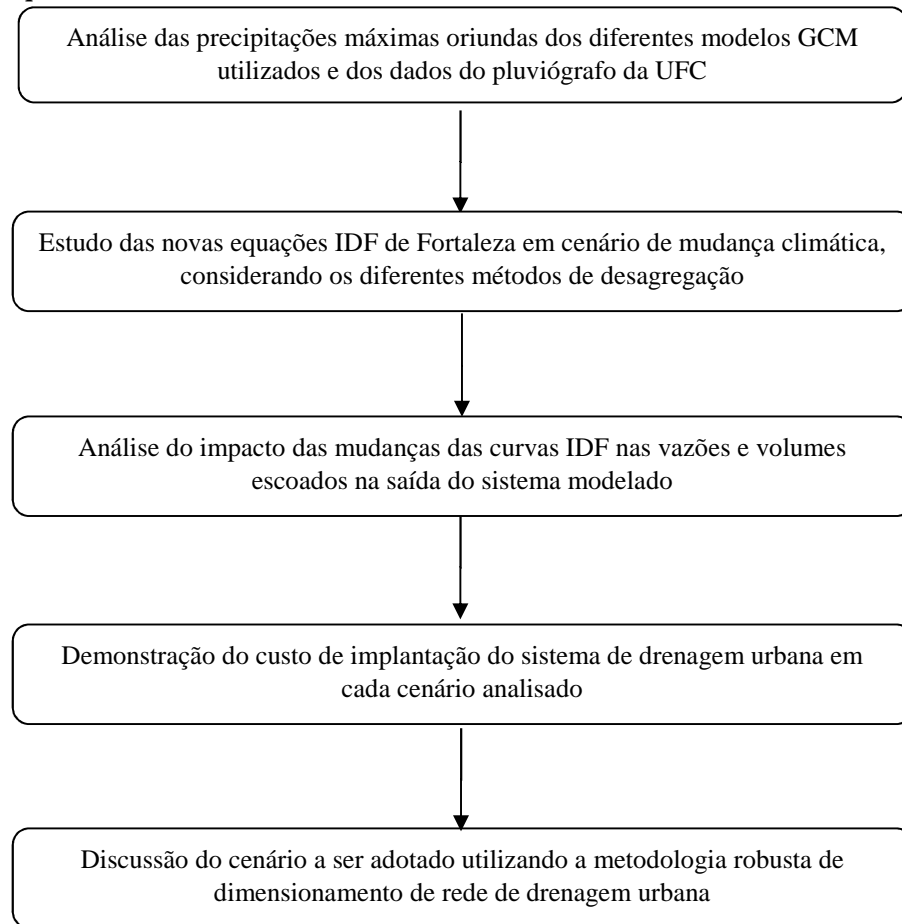
Em seguida, as novas equações IDF de Fortaleza atualizadas considerando os efeitos das mudanças climáticas serão apresentadas. Posteriormente, serão apresentados os impactos das mudanças nas equações IDF na vazão e volumes escoados na saída do sistema modelado. Os resultados foram montados baseados em saídas de conjuntos de modelos GCM, demonstrando a variação percentual do aumento ou diminuição das variáveis consideradas.

Os custos relativos à implantação de cada cenário foram quantificados e foi aplicada para o caso estudado a metodologia robusta de escolha do melhor cenário de dimensionamento da rede drenagem urbana.

Os resultados obtidos e a escolha do melhor cenário de dimensionamento foram devidamente analisados e discutidos, com o intuito de avaliarmos a escolha do cenário mais robusto de dimensionamento em cenário de mudança climática, que é o objetivo primordial de análise desse estudo.

A sequência da análise dos resultados obtidos pode ser melhor compreendido por meio da visualização do fluxograma descritivo presente na Figura 22.

Figura 22 – Sequência da análise dos resultados



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

5.1 Análise das precipitações máximas

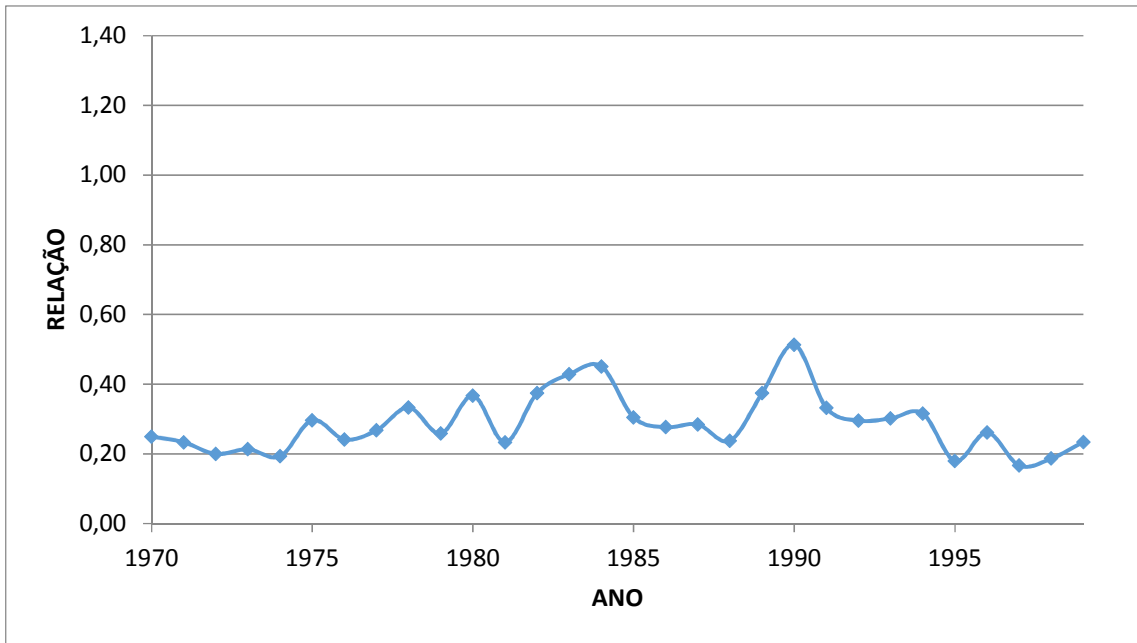
Neste subitem, serão analisadas as precipitações máximas obtidas por meio do estudo dos dados do pluviógrafo da UFC e dos modelos GCM.

5.1.1 Análise das precipitações máximas dos dados do pluviógrafo da UFC

Da análise dos dados de precipitação máxima do pluviógrafo da UFC foram calculadas as chuvas máximas anuais para cada duração de chuva analisada para o período de 1970 a 1999 (Apêndice C).

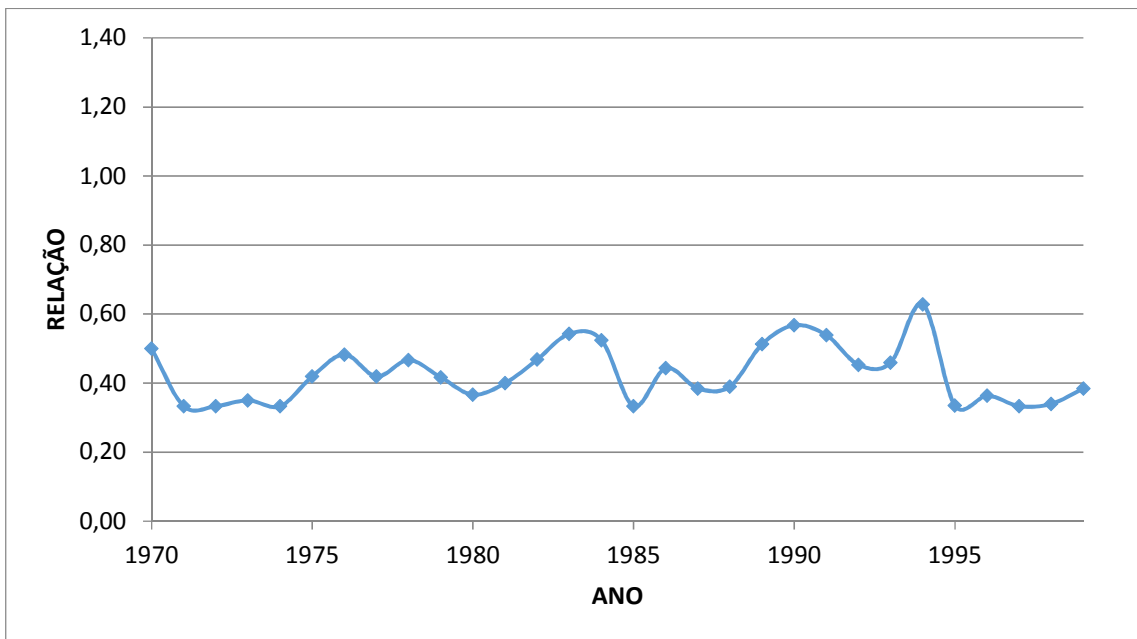
Em seguida, obteve-se a relação entre essas precipitações máximas, com o intuito de comparar com as constantes preconizadas pelo “método das relações das durações” e verificar o grau de correspondência entre ambos.

Figura 23 – Relação entre as precipitações máximas de 5 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados



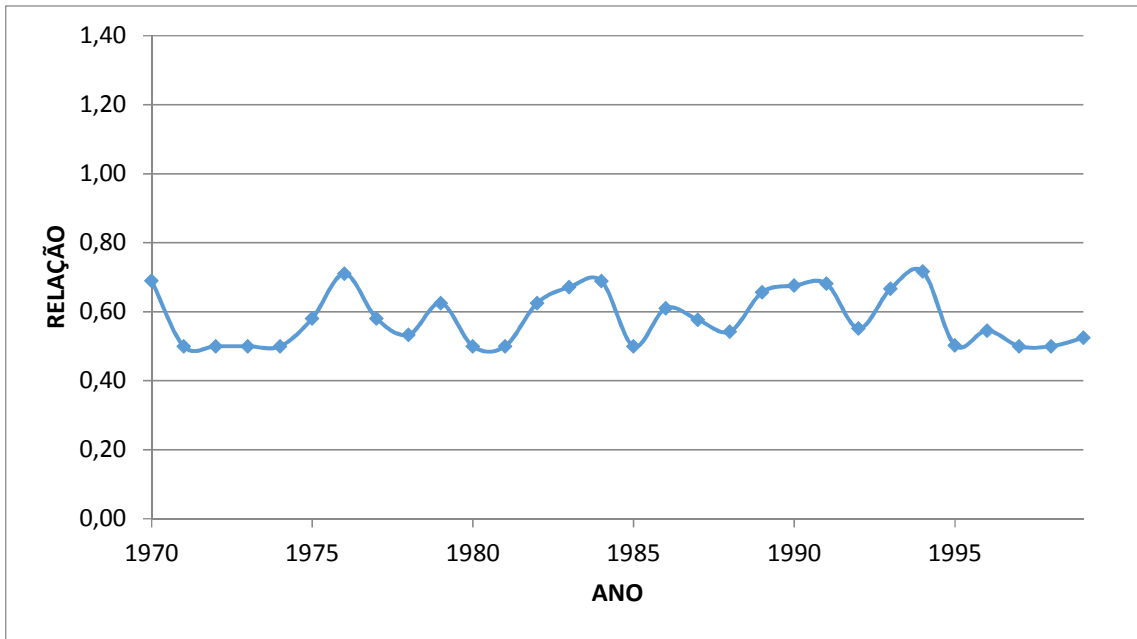
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 24 – Relação entre as precipitações máximas de 10 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados



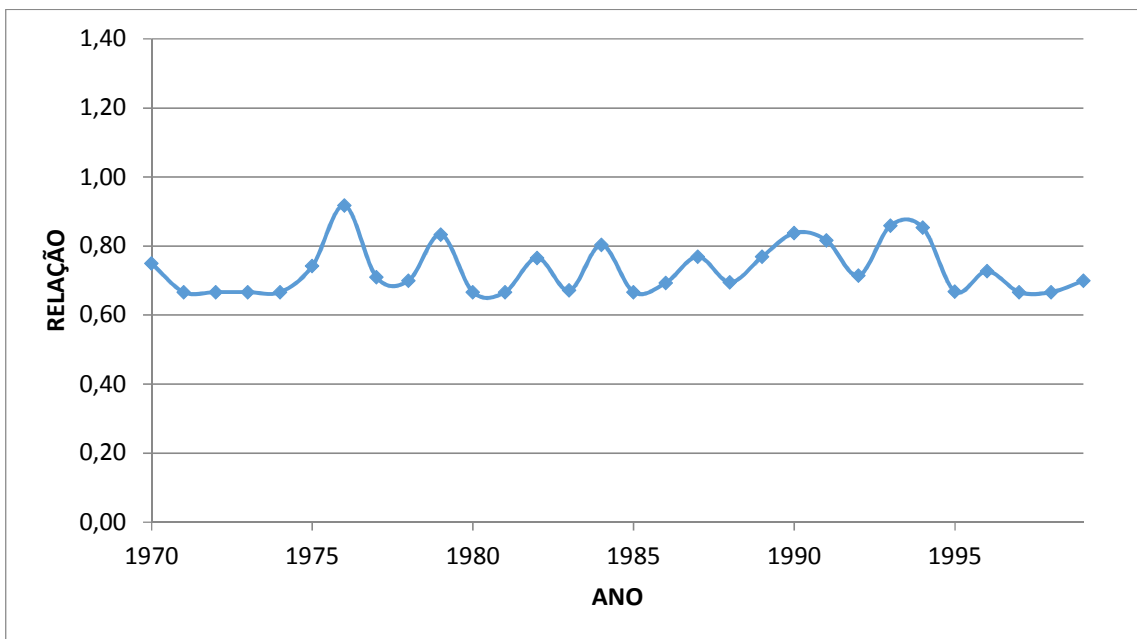
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 25 – Relação entre as precipitações máximas de 15 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados



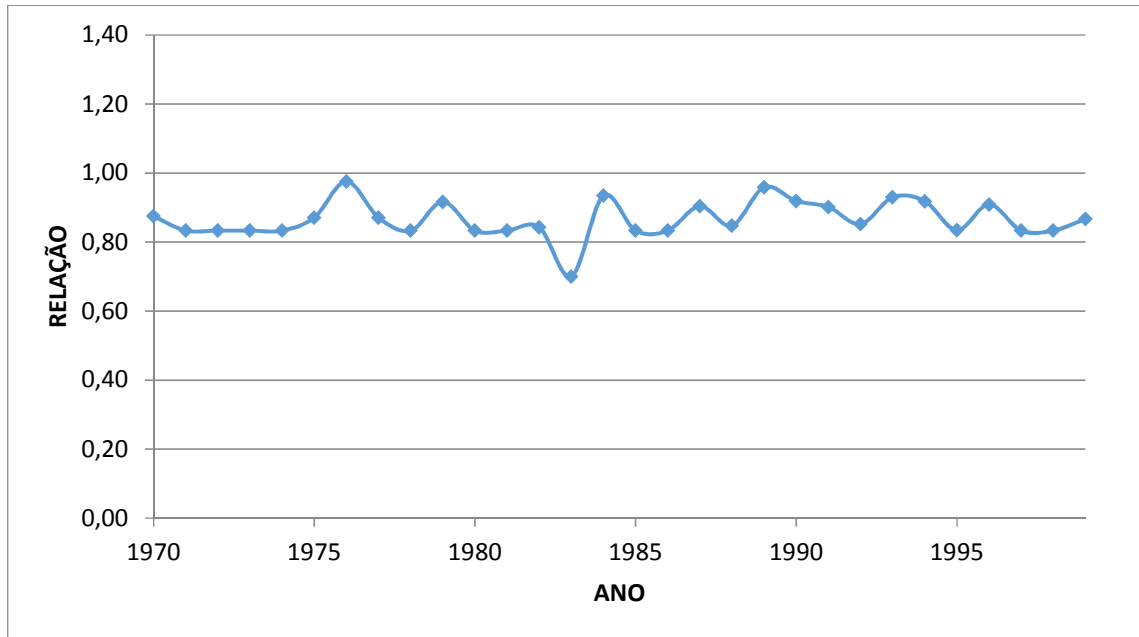
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 26 – Relação entre as precipitações máximas de 20 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados



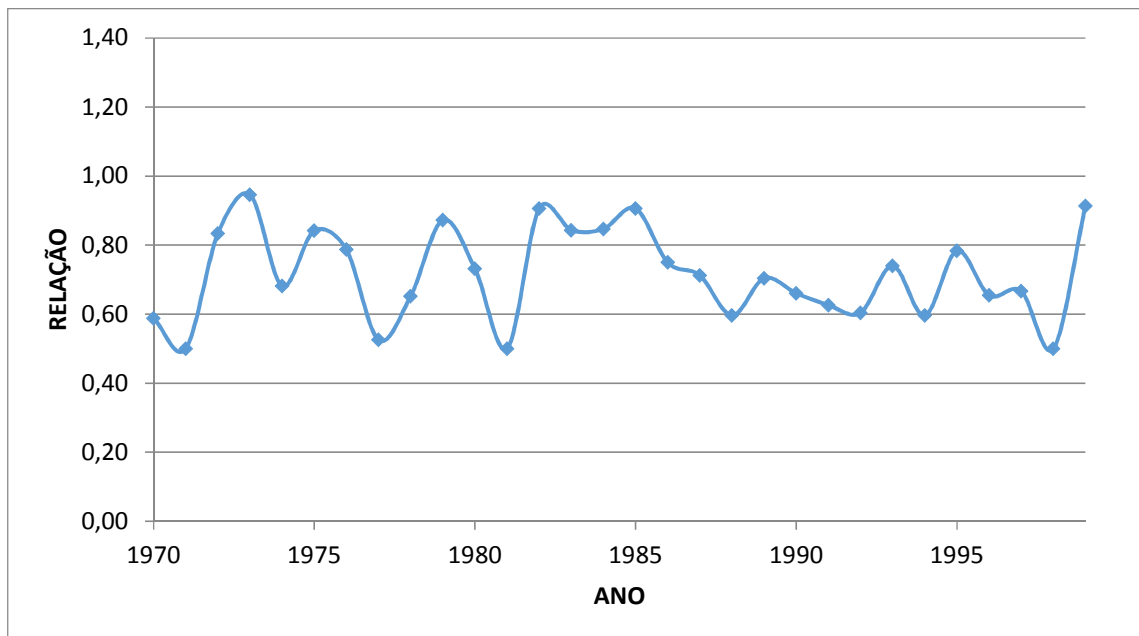
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 27 – Relação entre as precipitações máximas de 25 minutos e 30 minutos referentes aos anos analisados



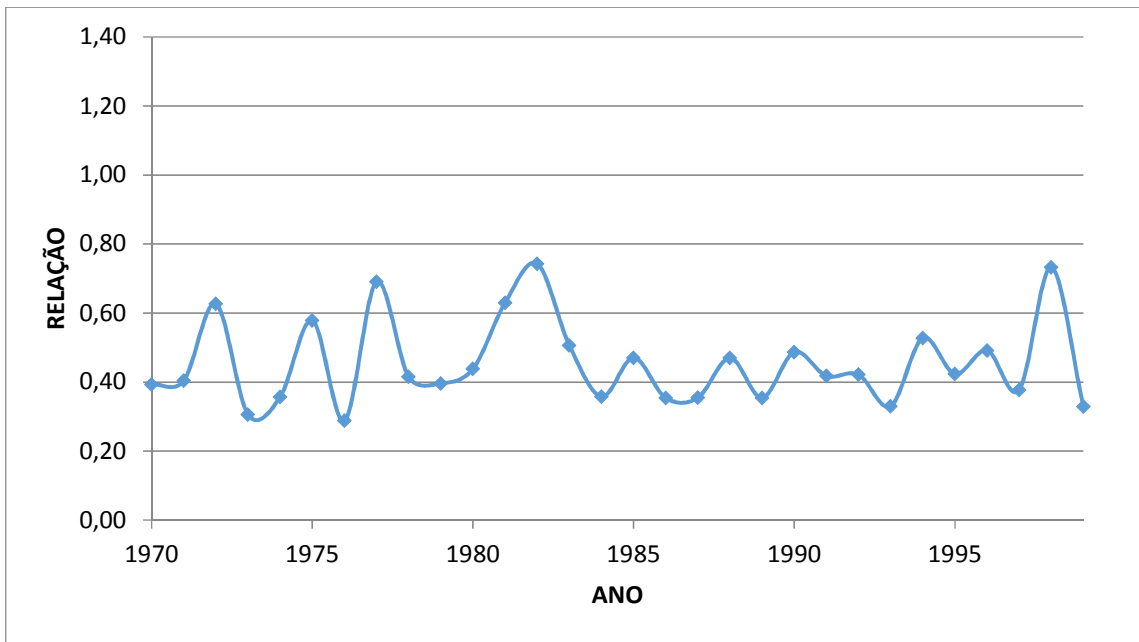
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 28 – Relação entre as precipitações máximas de 30 minutos e 1 hora referentes aos anos analisados



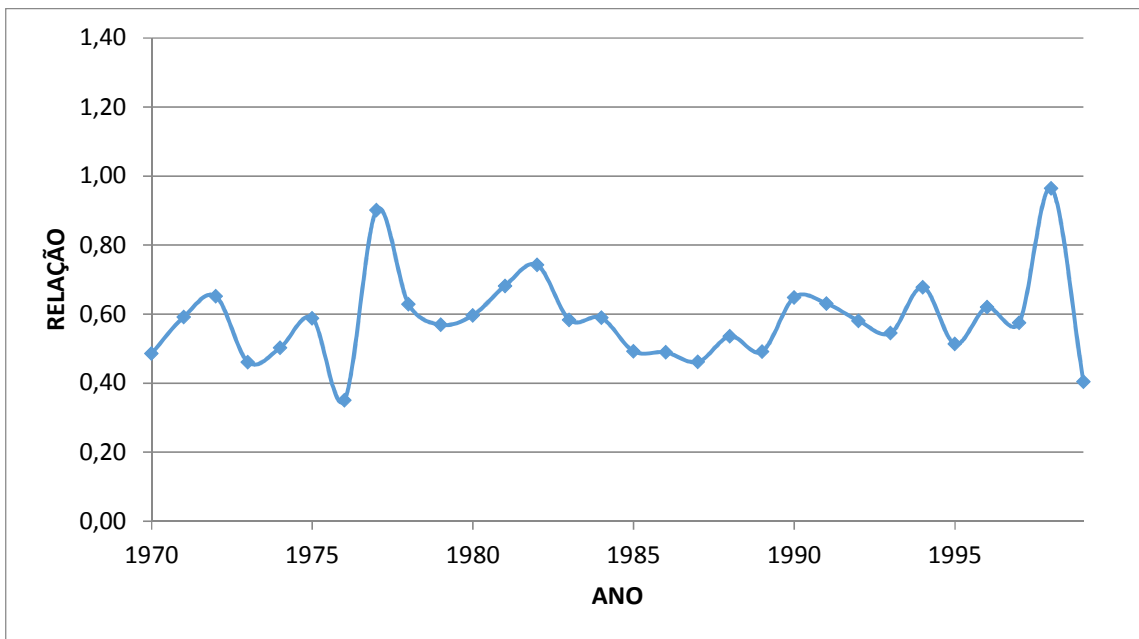
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 29 – Relação entre as precipitações máximas de 1 hora e 24 horas referentes aos anos analisados



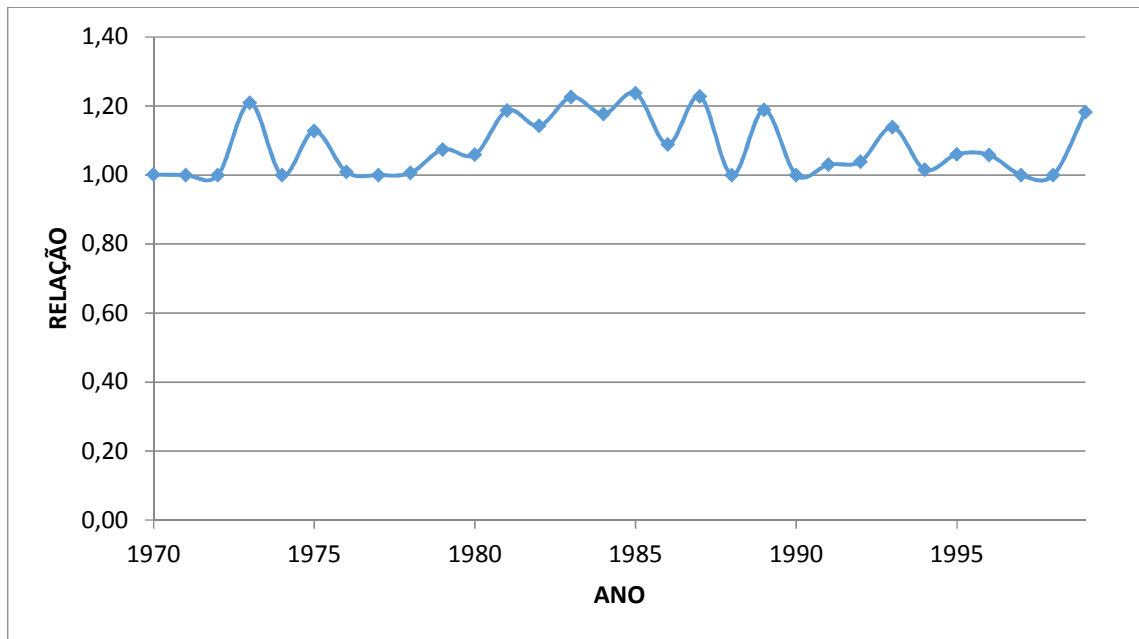
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 30 – Relação entre as precipitações máximas de 2 horas e 24 horas referentes aos anos analisados



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 31 – Relação entre as precipitações máximas de 24 horas e 1 dia referentes aos anos analisados



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As médias das relações das chuvas máximas constatadas através da manipulação dos dados do pluviógrafo da UFC (1970 a 1999) e as constantes dessas relações oriundas do “método das relações das durações” estão presentes na Tabela 23.

Tabela 23 – Comparação entre as relações obtidas através dos dados do pluviógrafo da UFC e pelo método das relações das durações

	Relações entre as precipitações máximas								
	5min / 30min	10min / 30min	15min / 30min	20min / 30min	25min / 30min	30min / 1h	1h / 24h	2h / 24h	24h / 1dia
Dados do pluviógrafo da UFC	0,29	0,43	0,58	0,73	0,87	0,72	0,46	0,59	1,08
Método das relações das durações	0,34	0,54	0,7	0,81	0,91	0,74	0,42	0,52	1,1
Diferença	-18,49%	-26,30%	-20,31%	-10,47%	-5,02%	-3,38%	7,86%	11,16%	-1,58%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Percebe-se o nível de correspondência entre as relações, onde o resultado mais divergente refere-se à relação entre a chuva de 10 minutos e 30 minutos que apresentou uma diferença de -26,30%.

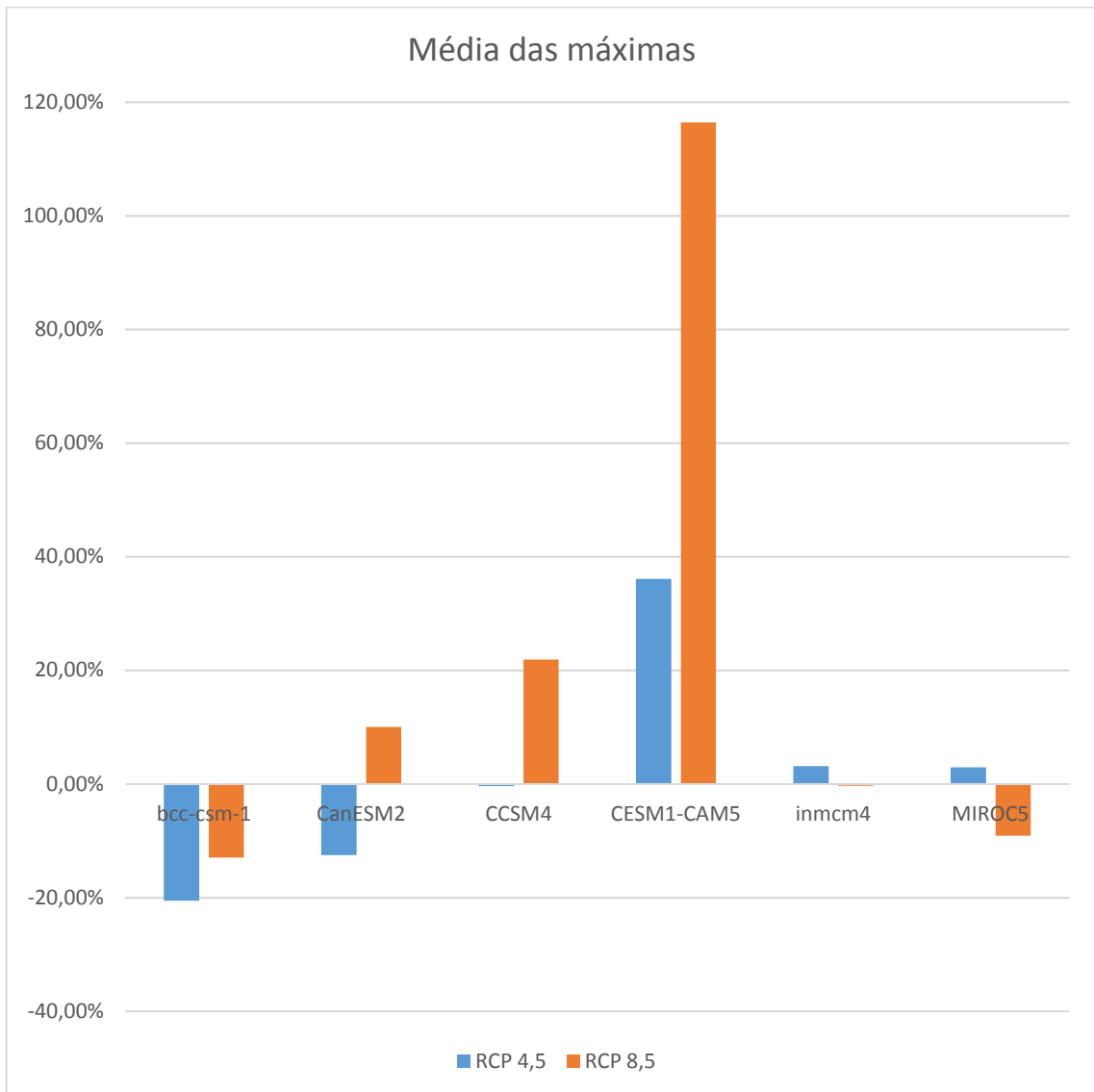
A partir da relação entre a chuva de 20 minutos e 30 minutos, os resultados apresentaram valores muito próximos com um erro que varia entre -5,02% e 11,16%, demonstrando a proximidade entre os resultados.

5.1.2 Análise das precipitações máximas provenientes dos modelos GCM

Foram analisadas as precipitações máximas anuais e as máximas diárias oriundas dos dados gerados pelos 6 (seis) modelos GCM estudados. Comparando-se os valores da série *historical* (1970 – 1999) e os gerados pelos cenários RCP 4,5 e RCP 8,5, referente ao período de 2070 a 2099.

Os resultados das variações médias das máximas e da média anual de cada modelo são demonstrados nas Figura 32 e Figura 33.

Figura 32 – Variação percentual da média das máximas utilizando dados dos modelos GCM



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os resultados provenientes do modelo bcc-csm-1 apontam que deve ocorrer diminuição na média das chuvas máximas diárias nos cenários RCP 4,5 e RCP 8,5, de 20,59% e de 12,98%, respectivamente.

Em relação à média das máximas diárias geradas pelo modelo CanESM2, os dados de precipitação apontam para uma diminuição média de 12,54% no RCP 4,5 e um aumento de 9,99% no cenário RCP 8,5.

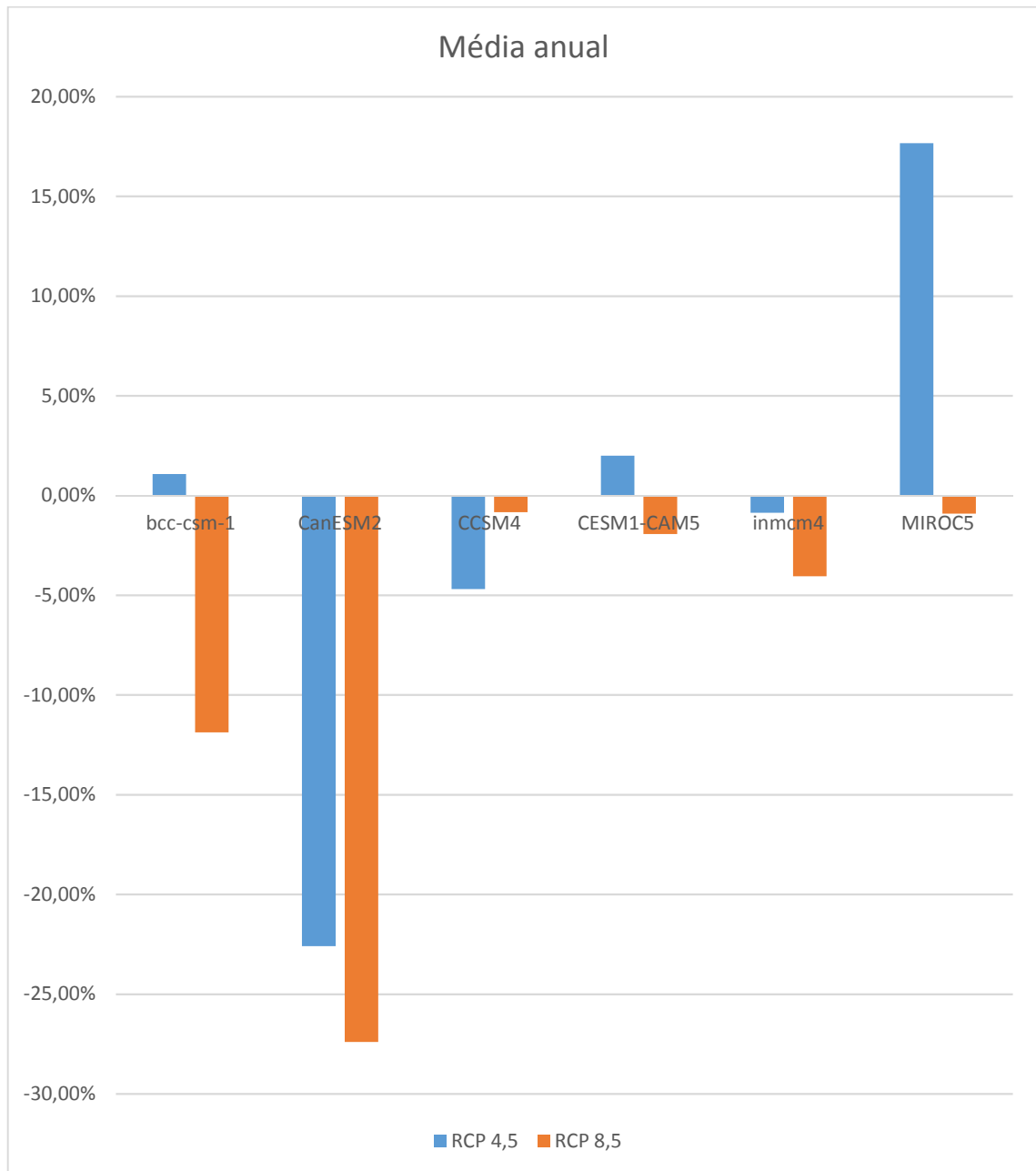
A média das chuvas máximas diárias, baseada nos dados referentes ao modelo CCSM4, devem permanecer praticamente constante no cenário RCP 4,5, apresentando uma diminuição quase nula (0,38%). Entretanto, no cenário de maior impacto climático (RCP 8,5) deve ocorrer um considerável aumento de aproximadamente 21,88%.

Os números mais preocupantes referem-se às chuvas máximas diárias do modelo CESM1-CAM5, no cenário RCP 4,5 haverá um considerável aumento de 36,06% na média dessas precipitações. O cenário RCP 8,5 aponta para valores mais ainda mais alarmantes, demonstrando um aumento superior a 116,40%, ou seja, esses valores serão mais do que duplicados no cenário mais pessimista.

Dos modelos analisados, o inmcm4 apresentou as menores variações dos dados analisados. A média das chuvas máximas permaneceu praticamente estável, apresentando apenas pequenas variações percentuais nos 2 (dois) cenários. No cenário RCP 4,5, a média das chuvas máximas teve pequeno aumento de 3,13%. Em relação ao cenário RCP 8,5, o modelo sugere que devemos ter diminuição ínfima de 0,36% na média das máximas diárias. Como pode-se perceber, esse modelo parece ser bem conservador, pois sugere que não devemos ter mudanças significativas no regime de chuvas de Fortaleza, considerando os dois cenários de mudanças climáticas analisados.

Os resultados do modelo MIROC5 sugerem que devem ocorrer situações bem distintas com relação aos possíveis cenários de mudanças climáticas. No cenário RCP 4,5, tem-se aumento na média das máximas diárias de aproximadamente 2,88%. Já o cenário RCP 8,5, deve apresentar uma diminuição, na média das máximas, de 9,14%.

Figura 33 – Variação percentual da média acumulada anual utilizando dados dos modelos GCM



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com relação à média da precipitação acumulada anual, com base no modelo bcc-csm-1, existe pequena tendência de aumento de aumento no cenário RCP 4,5 (1,07%) e diminuição no cenário RCP 8,5 (11,88%).

O modelo CanESM2 aponta para uma diminuição das precipitações acumuladas anualmente nos dois cenários analisados, ocorrendo maior redução de acordo com o aumento do número associado ao RCP.

O modelo CCSM4 também sugere que haverá discreta diminuição nas precipitações acumuladas anualmente nos dois cenários de projeção climática. No cenário RCP 4,5, a diminuição será de 4,69%, enquanto que no cenário RCP 8,5 esse decréscimo será de 0,83%.

Os resultados do modelo CESM1-CAM5 indicam que a média das precipitações acumuladas anualmente deve permanecer praticamente constante, com um ligeiro aumento de 2,00% no cenário RCP 4,5 e leve diminuição de 1,94% no cenário RCP 8,5.

A média acumulada anual do modelo inmcm4 permaneceu praticamente estável nos dois cenários. No cenário RCP 4,5, as precipitações anuais devem ter irrisória redução de 0,87%. Em relação ao cenário RCP 8,5, o modelo sugere que a média das chuvas acumuladas no ano deve apresentar também leve redução de 4,05%.

Os resultados do modelo MIROC5 sugerem que no cenário RCP 4,5, teremos aumento na média da precipitação acumulada anual de 17,66%. O cenário RCP 8,5, deve apresentar leve diminuição na média de precipitação anual de apenas 0,91%.

5.2 Projeção das curvas IDF em cenário de mudança climática

5.2.1 Análise do teste de aderência de KS

O valor do teste de aderência de KS demonstrou que, utilizando-se um nível de significância do teste de 0,10, todas as séries de projeções de precipitações máximas geradas pelos modelos globais utilizados se ajustaram a distribuição de Gumbel, conforme observa-se na Tabela 24.

Tabela 24 – Valores do teste de aderência de KS referente às projeções dos GCMs

	Historical	RCP 4,5	RCP 8,5
Bcc-csm1	0,086	0,092	0,084
CanESM2	0,146	0,125	0,122
CCSM4	0,087	0,184	0,175
CESM1-CAM5	0,164	0,125	0,164
inmcm4	0,103	0,128	0,079
MIROC5	0,078	0,077	0,108

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com relação aos dados do pluviógrafo da UFC, foram analisadas as séries de dados de precipitações máximas referentes às durações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 120, 360, 720,

1080 e 1440 minutos. Baseado no teste de KS, os dados de precipitação se ajustaram à distribuição de Gumbel, a depender do nível de significância utilizado no teste. A Tabela 25 exprime o resultado do teste baseado no nível de significância.

Tabela 25 – Valores do teste de KS referentes às séries de precipitações do pluviógrafo da UFC

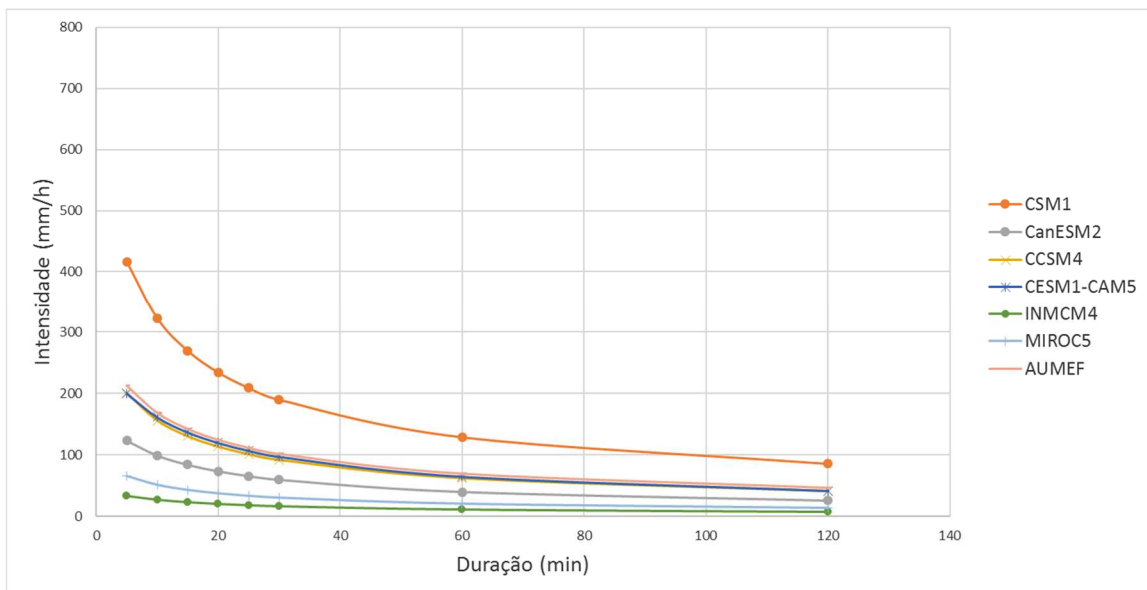
Duração (minutos)	5	10	15	20	25	30	60	120	360	720	1080	1440
Valor do teste de KS	0,097	0,185	0,224	0,187	0,229	0,249	0,080	0,093	0,177	0,118	0,126	0,118
Nível de significância	0,10	0,10	0,05	0,10	0,05	0,02	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

5.2.2 Atualização das curvas IDF utilizando o método das relações durações

Com o objetivo de verificar a acurácia do método das relações das durações, foram calculadas as equações IDF utilizando dados da série *historical* (1970 – 1999) de seis modelos GCM (MIROC5, CESM1-CAM5, CCSM4, INMCM4, CSM1, CanESM2) e comparadas com a equação da IDF da AUMEF, conforme pode-se observar na Figura 34 e Figura 35.

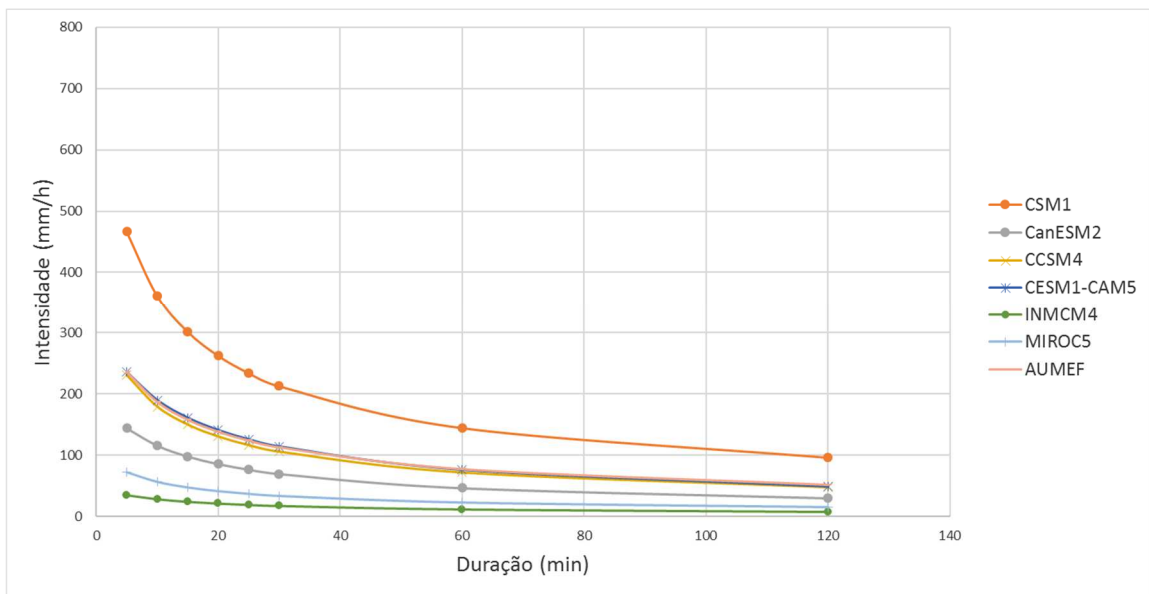
Figura 34 – Curvas IDF dos 6 modelos GCM utilizados (1970 – 1999) e da AUMEF para o período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Por meio da análise da Figura 34, pode-se observar que os modelos CESM1-CAM5 e CCSM4 apresentaram resultados satisfatórios, pois suas curvas IDF possuem erros médios de apenas 6% e 9%, respectivamente, em relação à da AUMEF. Enquanto isso, os modelos CSM1, CanESM2, INMCM4 e MIROC5 não se mostraram eficientes, devido à alta discrepância dos seus resultados com o esperado.

Figura 35 – Curvas IDF dos 6 modelos GCM utilizados (1970 – 1999) e da AUMEF para o período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na Figura 35, pode-se observar com clareza a acurácia dos modelos CESM1-CAM5 e CCSM4. O primeiro obteve resultados excelentes, quase ocorrendo uma sobreposição à equação da AUMEF. Enquanto que o segundo apresentou um erro médio de apenas 6%.

Diante dos resultados, considerou-se que os modelos CESM1-CAM5 e CCSM4 não necessitariam de correção de viés para as chuvas futuras, visto que para o período de 1970 a 1999 as curvas IDF foram muito próximas à da AUMEF.

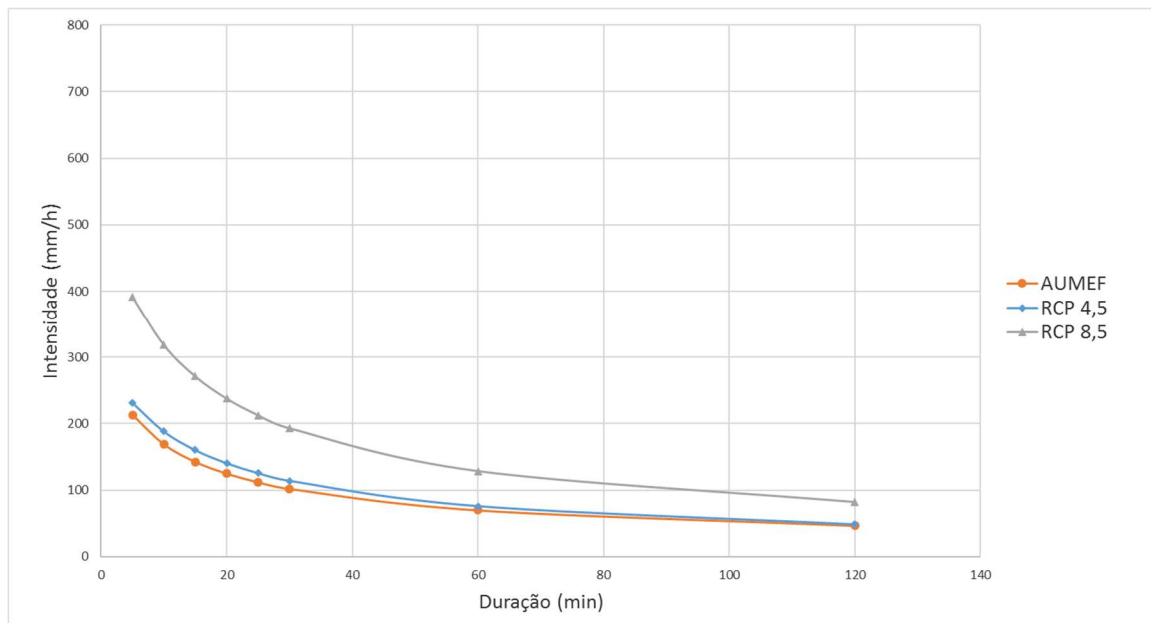
Dessa forma, as equações IDF dos dois modelos que apresentaram os melhores resultados foram projetadas para o futuro (2070 – 2099) apenas desagregando as suas chuvas máximas anuais.

Em seguida, o processo foi repetido para esses dois modelos, considerando os cenários de mudanças climáticas (RCP 4,5 e RCP 8,5) com o intuito de avaliarmos as mudanças ocorridas em relação à equação da AUMEF.

Dessa forma, será possível entender e mensurar as mudanças que podem vir a ocorrer nas equações IDF de chuvas futuras.

A primeira análise foi feita com base nos dados do modelo CESM1-CAM5, conforme pode-se observar nas Figura 36 e Figura 37.

Figura 36 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 50 anos

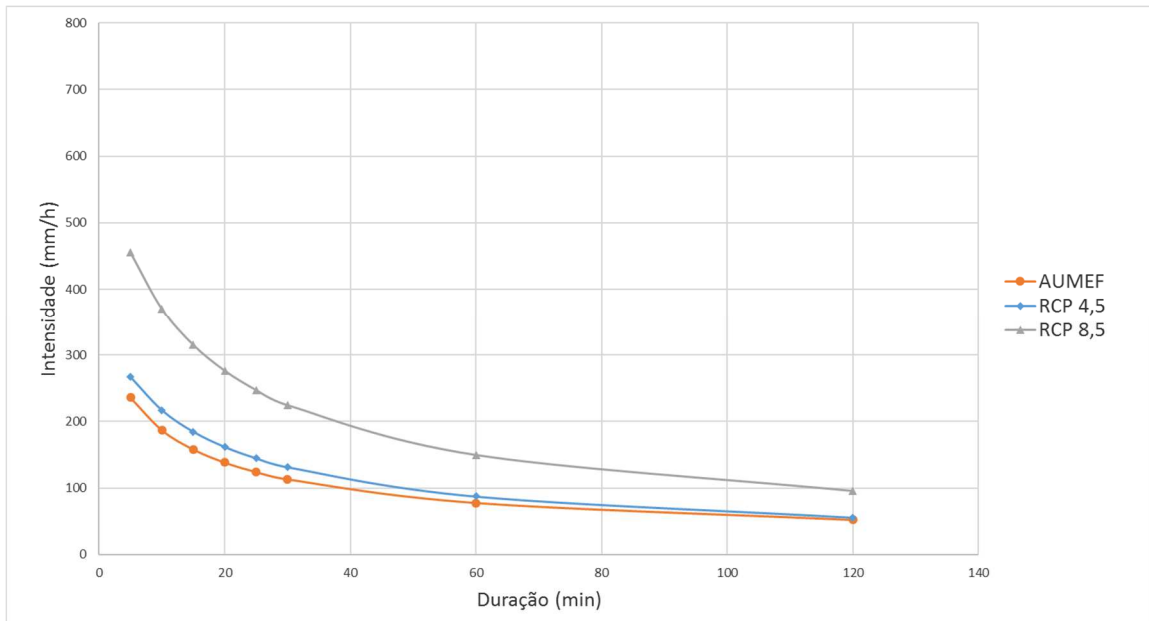


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Percebe-se que para o período de retorno de 50 anos, a projeção RCP 4,5 apresentou um pequeno aumento de intensidade nas chuvas máximas em relação à equação da AUMEF, aproximadamente 10% de incremento médio. Onde o maior aumento percentual foi relativo à chuva de 20 minutos, apresentando um acréscimo de 12,5%.

A projeção RCP 8,5, como já era esperado, apresentou intensidades ainda mais altas, representando um aumento médio de mais de 85% nas intensidades das chuvas máximas.

Figura 37 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 100 anos

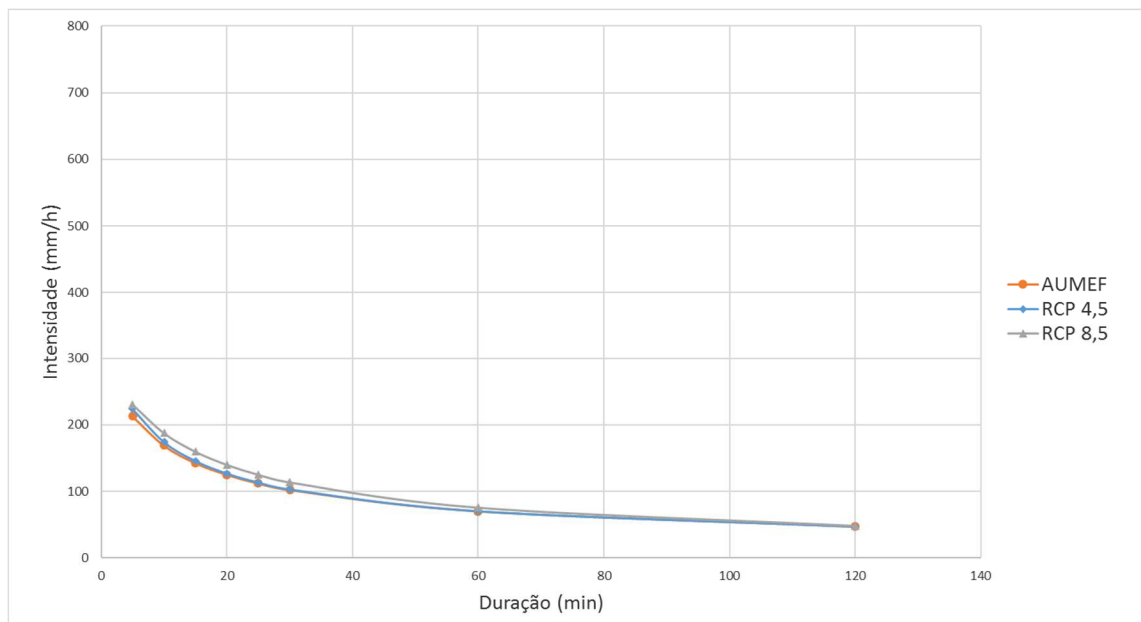


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 relativas ao período de retorno de 100 anos também apresentaram as mesmas tendências de intensificação das chuvas máximas. Sendo que a primeira projeção apresentou uma elevação média de quase 15%, enquanto que a da projeção mais pessimista foi de mais de 95%.

Os resultados das projeções geradas pelo CCSM4 apresentaram resultados mais próximos dos obtidos pelas séries históricas, de acordo com a Figura 38 e Figura 39.

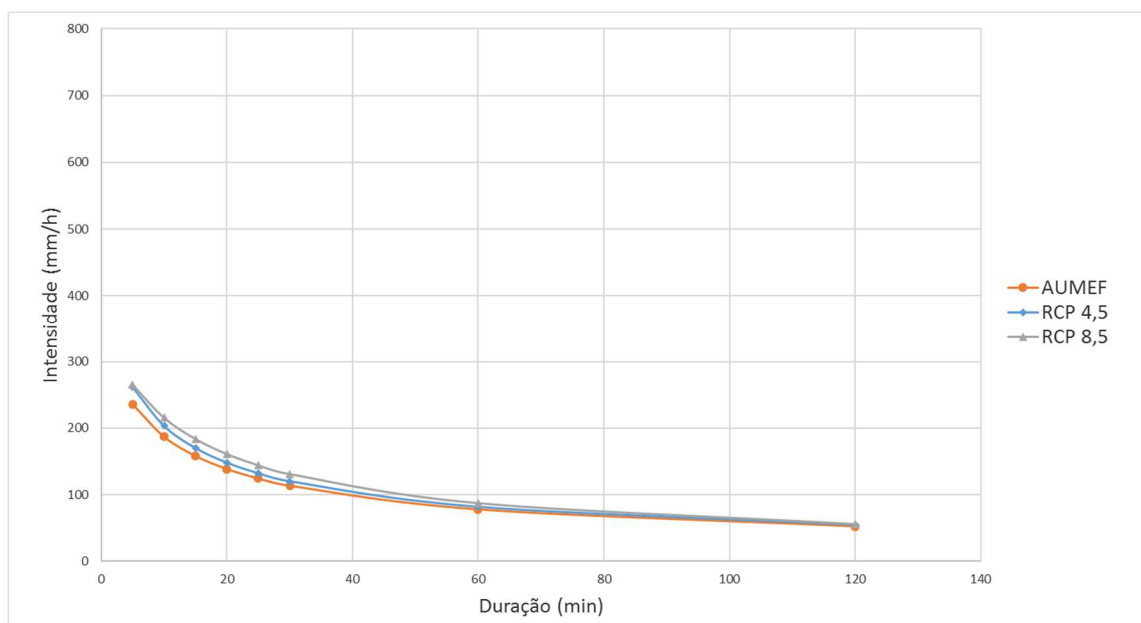
Figura 38 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com relação ao período de retorno de 50 anos, as projeções apresentaram intensidades bem próximas às da AUMEF. A RCP 4,5 teve valores quase idênticos e a RCP 8,5 projetou um aumento médio de menos de 10%.

Figura 39 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 100 anos



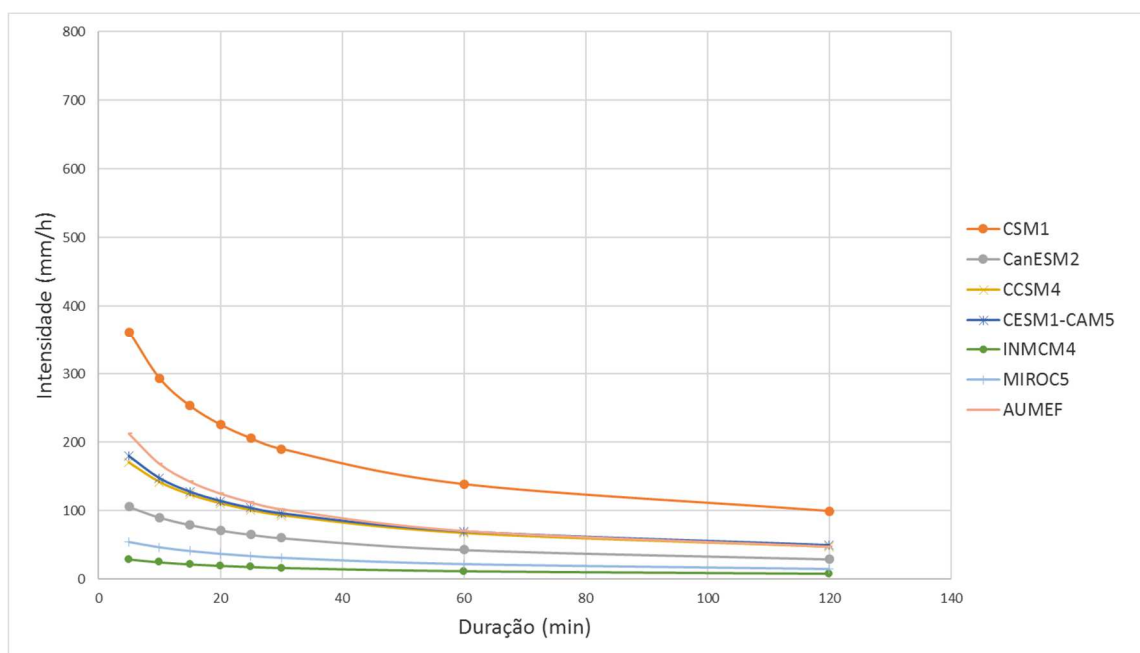
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Comportamento análogo ao da situação anterior tiveram as curvas projetadas para o futuro, utilizando-se um período de retorno de 100 anos. Para chuvas de mais de 1 hora de duração, as três curvas mostraram-se quase iguais. Apenas em chuvas de curta duração, houveram pequenos aumentos percentuais.

5.2.3 Atualização das curvas IDF utilizando as relações obtidas por dados do pluviógrafo da UFC

Foram calculadas novas equações IDF utilizando dados da série *historical* (1970 – 1999) de seis GCMs (MIROC5, CESM1-CAM5, CCSM4, INMCM4, CSM1, CanESM2) e comparadas com a equação da IDF da AUMEF, com o intuito de avaliar a precisão do método, conforme pode-se observar na Figura 40.

Figura 40 – Curvas IDF dos seis modelos GCM utilizados (1970 – 1999) e da AUMEF para o período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Percebe-se que os modelos que mais se aproximaram da equação original da AUMEF são o CESM1-CAM5 e o CCSM4. A Tabela 26 demonstra o erro percentual desses dois modelos em relação à curva original da AUMEF relativo ao período de retorno de 50 anos.

Em relação à chuva de 5 minutos, o modelo CCSM4 apresentou uma diferença de -20,04% em relação à equação da AUMEF, enquanto que o modelo CESM1-CAM5 apresentou

um erro de -15,75%. Contudo, esse erro percentual diminui significativamente com o aumento da duração da chuva, visto que considerando a chuva de 30 minutos de duração, o modelo CCSM4 apresentou um erro de -8,71% e o modelo CESM1-CAM5 de apenas -6,04%.

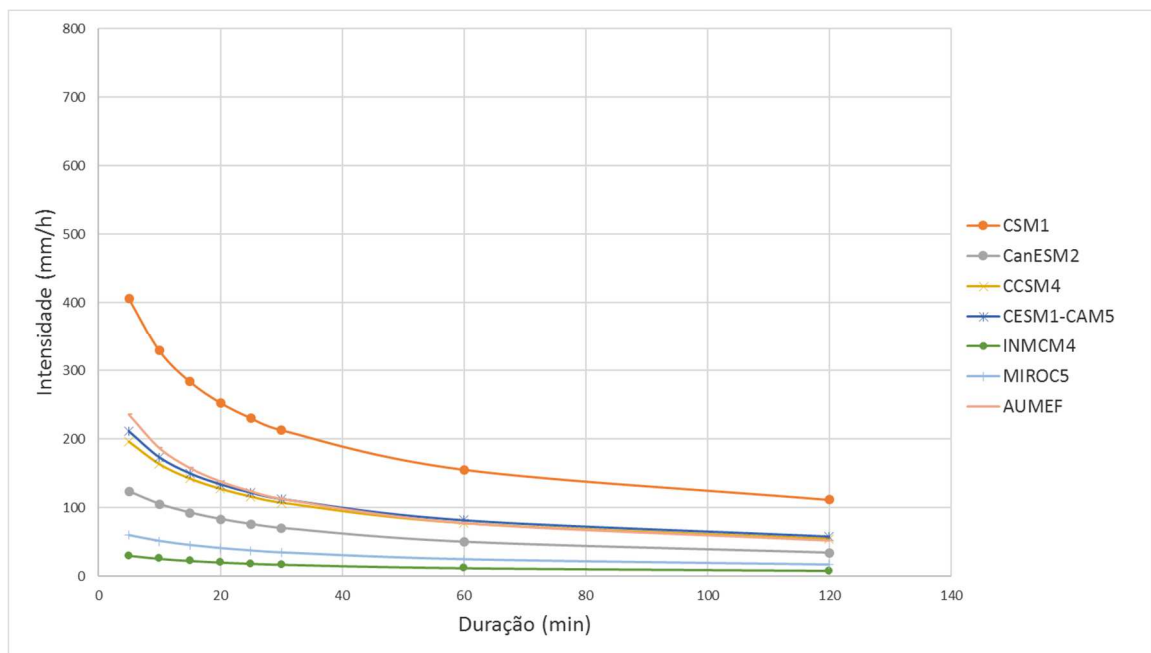
Tabela 26 – Diferença percentual entre os modelos GCM e a equação da AUMEF

DURAÇÃO (minutos)	DIFERENÇA EM RELAÇÃO À EQUAÇÃO DA AUMEF	
	CESM1-CAM5	CCSM4
5	-15,75%	-20,04%
10	-12,75%	-15,95%
15	-10,54%	-13,31%
20	-8,77%	-11,40%
25	-7,30%	-9,92%
30	-6,04%	-8,71%
60	-0,77%	-4,23%
120	5,13%	0,09%
ERRO MÉDIO	-7,10%	-10,43%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na Figura 41 é realizada a mesma comparação da figura anterior, para o período de retorno de 100 anos.

Figura 41 – Curvas IDF dos 6 modelos GCM utilizados (1970 – 1999) e da AUMEF para o período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Novamente, constata-se que os modelos mais precisos foram o CESM1-CAM5 e o CCSM4. A Tabela 27 demonstra o erro percentual desses dois modelos em relação à curva original da AUMEF relativo ao período de retorno de 100 anos.

Percebe-se que as chuvas de curta duração apresentaram os maiores erros percentuais, tornando-se muito pequenos quando a duração da chuva é aumentada.

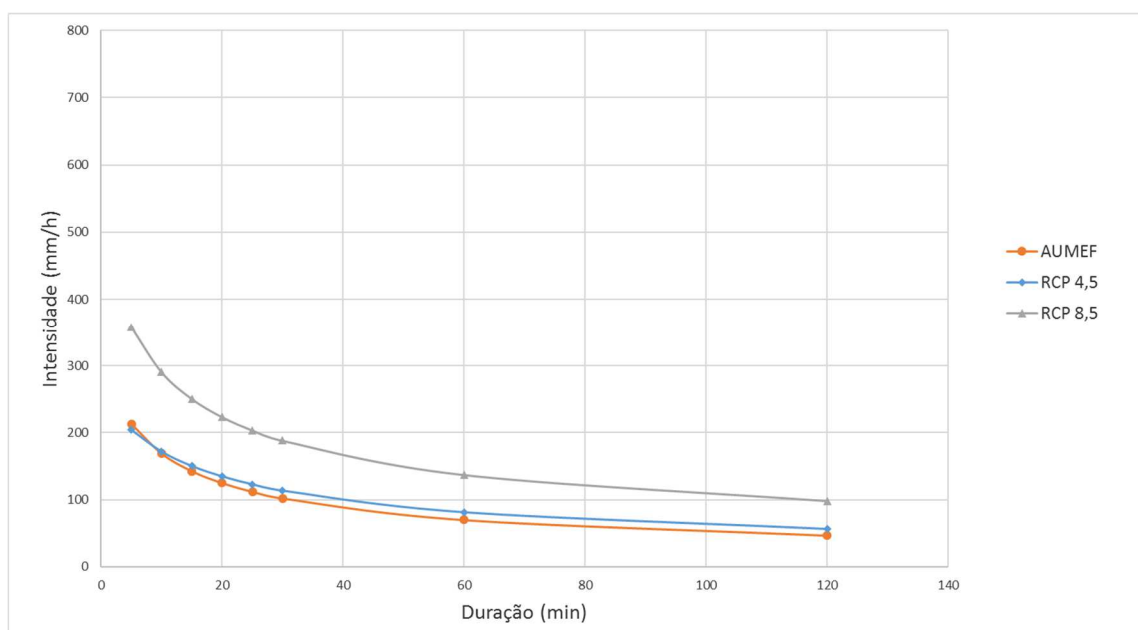
Tabela 27 – Diferença percentual entre os modelos GCM e a equação da AUMEF

DURAÇÃO (minutos)	DIFERENÇA EM RELAÇÃO À EQUAÇÃO DA AUMEF	
	CESM1-CAM5	CCSM4
5	-10,58%	-16,97%
10	-7,40%	-12,73%
15	-5,05%	-9,99%
20	-3,18%	-8,00%
25	-1,62%	-6,46%
30	-0,28%	-5,21%
60	5,31%	-0,56%
120	11,58%	3,93%
ERRO MÉDIO	-1,40%	-7,00%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Considerando que os modelos CESM1-CAM5 e o CCSM4 apresentaram os resultados mais precisos e com pequenos erros médios percentuais, foram utilizados para as análises das projeções futuras para os cenários RCP 4,5 e RCP 8,5.

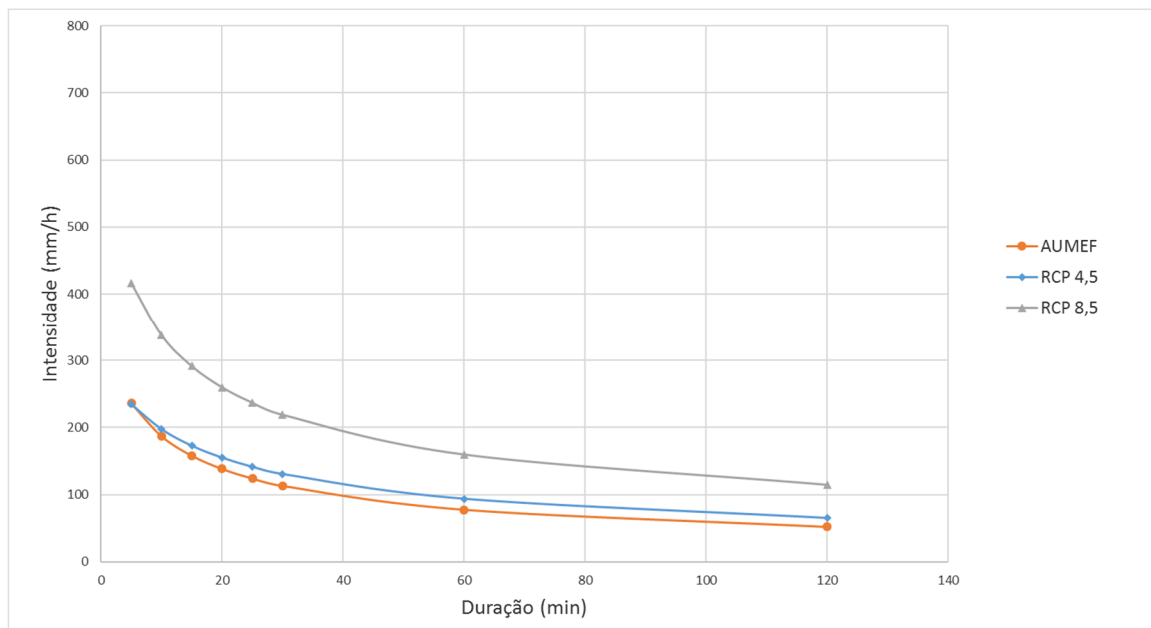
Figura 42 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na Figura 42, tem-se as projeções oriundas do modelo CESM1-CAM5 referentes ao período de retorno de 50 anos. A RCP 4,5 apontou para valores menores que à equação da AUMEF para chuvas de 5 minutos de duração, entretanto, indicou um aumento médio de menos de 10% na intensificação das chuvas máximas. A RCP 8,5 apresentou valores mais bem mais altos que os da AUMEF para qualquer duração de chuva, com um incremento médio de mais de 80%.

Figura 43 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 100 anos

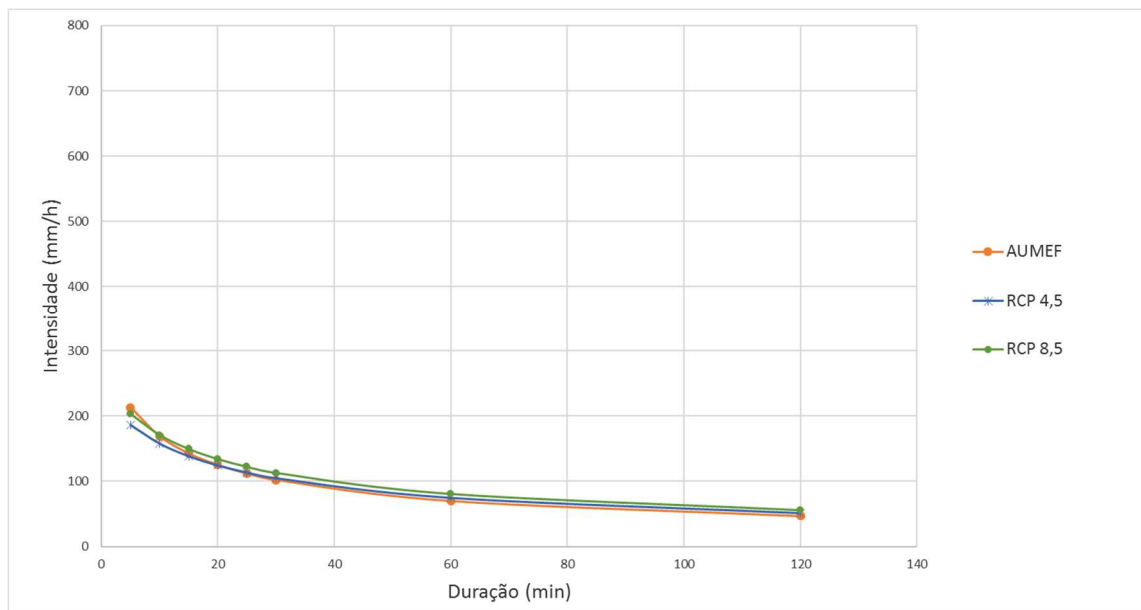


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Relativamente ao período de retorno de 100 anos, a projeção RCP 4,5 apresentou valores praticamente iguais aos da AUMEF para chuvas de 5 minutos de duração, contudo apresentou aumento nas chuvas com duração mais elevada.

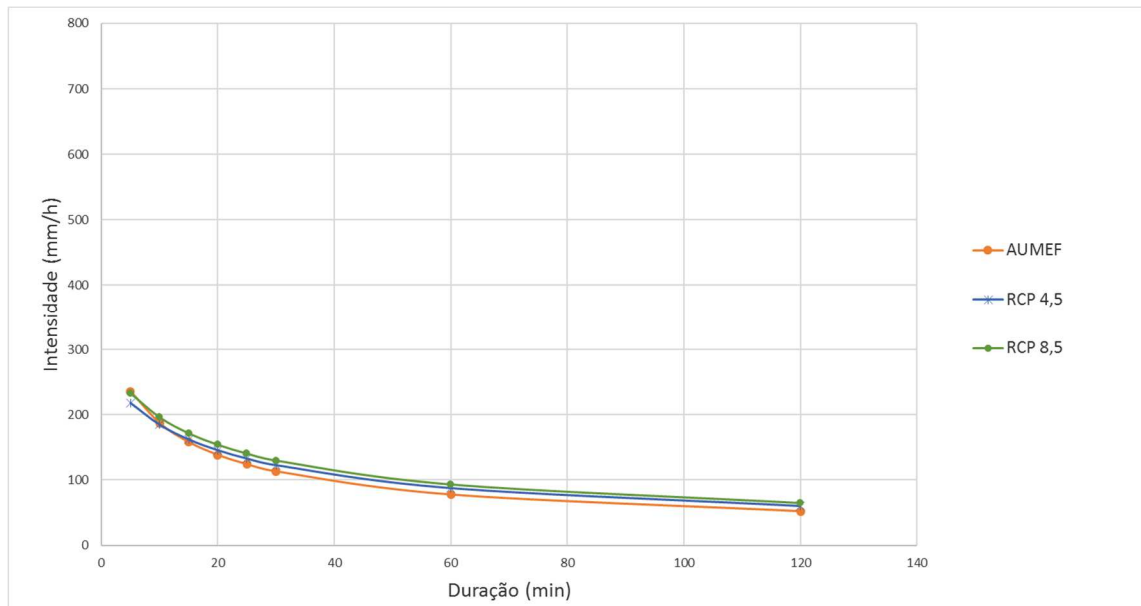
A projeção RCP 8,5 indicou que deve haver um aumento médio de mais de 90% na intensidade das chuvas máximas anuais em comparação à equação IDF da AUMEF.

Figura 44 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 45 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As Figura 44 e a Figura 45 mostram as novas curvas IDF projetadas para o futuro com base nos dados do modelo CCSM4 para os períodos de retorno de 50 e 100 anos, respectivamente, em comparação à curva da equação utilizada pela AUMEF.

No primeiro período de retorno estudado, percebe-se que houve quase uma sobreposição da projeção RCP 4,5 à curva da AUMEF. Já a projeção RCP 8,5 apresentou um ínfimo aumento médio de aproximadamente 8%.

Para o período de retorno de 100 anos, nota-se que as duas projeções tiveram ligeiros acréscimos em relação à curva da AUMEF, onde a RCP 4,5 teve um aumento médio de quase 5% e a RCP 8,5 por volta de 12%.

5.2.4 Atualização de curvas IDF utilizando o “Método da Correspondência de Quantis Equidistantes”

Através da utilização do “Método da Correspondência de Quantis Equidistantes” ou “Equidistance Quantile Matching Method” foram calculadas novas equações IDF para a cidade de Fortaleza-CE, projetadas para os cenários de mudança climática RCP 4,5 e RCP 8,5.

Os dados de precipitação atualizados (viés corrigido) para o futuro foram comparados com os dados de precipitação do pluviógrafo da UFC. Em seguida, foram calculados os parâmetros das equações de chuva com o intuito de se obterem as novas equações IDF atualizadas.

Essas equações IDF projetadas para o futuro foram novamente comparadas com a atual equação da AUMEF, com o intuito de identificar possíveis mudanças nos padrões de chuvas intensas. Foram adotados, para efeito de comparação os períodos de retorno de 50 e 100 anos.

5.2.4.1 Modelo CESM1-CAM5

Os resultados da aplicação do “Método da Correspondência de Quantis Equidistantes” aos dados de precipitação gerados pelo modelo CESM1-CAM5 foram os que apresentaram os valores mais extremos entre os modelos analisados.

Tabela 28 – Resultados provenientes dos dados do modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 50 anos

Duração	Período de retorno de 50 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	17,33	207,94	22,02	264,29	55,54	666,48
10 minutos	22,81	136,88	28,16	168,98	66,35	398,08

15 minutos	31,45	125,80	38,87	155,49	91,85	367,40
20 minutos	40,21	120,64	49,83	149,49	118,48	355,44
25 minutos	49,03	117,67	61,14	146,74	147,61	354,26
30 minutos	59,12	118,24	74,35	148,69	183,03	366,06
60 minutos	84,05	84,05	105,60	105,60	259,42	259,42
120 minutos	114,65	57,32	145,45	72,73	365,34	182,67
360 minutos	176,11	29,35	226,66	37,78	587,50	97,92
720 minutos	192,95	16,08	246,77	20,56	630,94	52,58
1080 minutos	194,40	10,80	247,51	13,75	626,57	34,81
1440 minutos	192,25	8,01	245,72	10,24	627,38	26,14

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 29 – Resultados provenientes dos dados do modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 100 anos

Duração	Período de retorno de 100 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Total (mm)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	19,12	229,42	23,99	287,86	61,70	740,43
10 minutos	24,85	149,11	30,40	182,41	73,37	440,21
15 minutos	34,28	137,12	41,98	167,91	101,59	406,36
20 minutos	43,88	131,63	53,85	161,56	131,10	393,31
25 minutos	53,64	128,75	66,21	158,90	163,51	392,41
30 minutos	64,92	129,84	80,72	161,43	203,01	406,03
60 minutos	92,26	92,26	114,61	114,61	287,70	287,70
120 minutos	126,39	63,19	158,34	79,17	405,77	202,88
360 minutos	195,37	32,56	247,81	41,30	653,85	108,97
720 minutos	213,46	17,79	269,29	22,44	701,58	58,46
1080 minutos	214,63	11,92	269,72	14,98	696,27	38,68
1440 minutos	212,63	8,86	268,09	11,17	697,56	29,06

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

CENÁRIO - RCP 4,5

$$i = \frac{736,9068 \cdot T^{0,1624}}{(t + 14,4142)^{0,6079}} \quad (36)$$

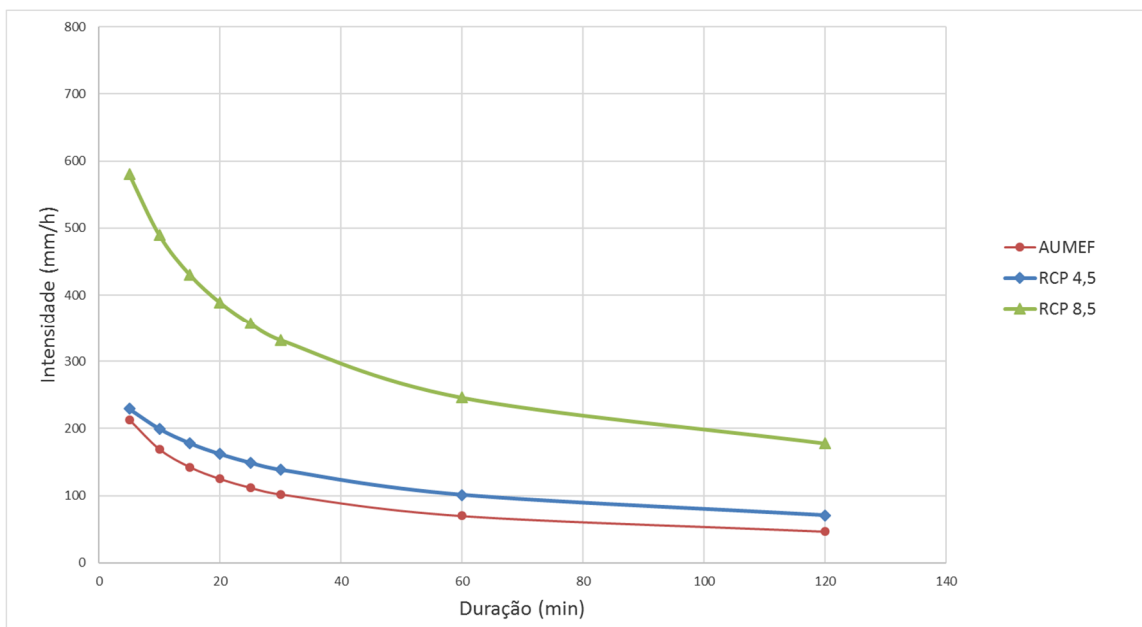
CENÁRIO - RCP 8,5

$$i = \frac{876,0093 \cdot T^{0,2255}}{(t + 7,6045)^{0,5107}} \quad (37)$$

A primeira análise remete ao período de retorno de 50 anos (Figura 46), o cenário RCP 4,5 apresentou um aumento médio de 30,49% na intensidade média das chuvas máximas. Enquanto isso, a chuva de 5 minutos demonstrou um acréscimo de apenas 7,63%.

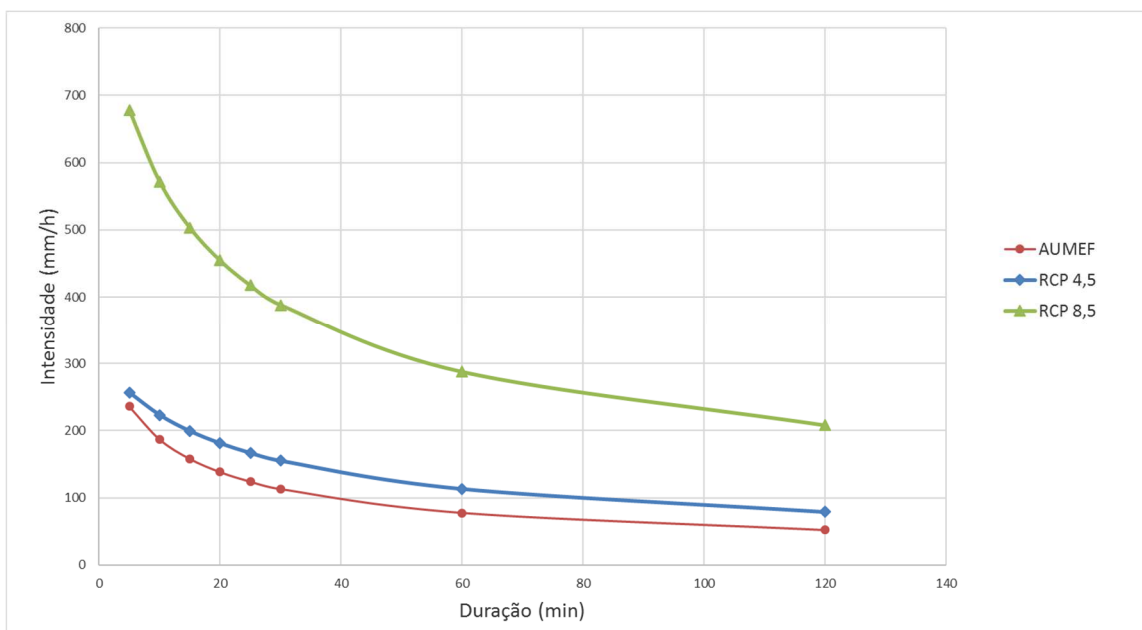
O RCP 8,5 apresentou valores bem mais elevados que os disponibilizados pela IDF da AUMEF, com um aumento médio de 218,50%.

Figura 46 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 47 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CESM1-CAM5 referente ao período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Para o período de retorno de 100 anos (

Figura 47), o RCP 4,5 também ocorreram aumentos nas intensidades máximas, apresentando um aumento médio de 31,80%. Enquanto isso, o cenário RCP 8,5 teve um acréscimo médio de 236,09%. A chuva de 5 minutos (curta duração) foi calculada com intensidade de 678,41 mm/h, o que representa um impacto muito elevado nas chuvas de curta duração.

5.2.4.2 Modelo CCSM4

Dos modelos utilizados, o CCSM4 apresenta uma das melhores resoluções espaciais (Latitude x Longitude = 1,25 x 0,94) juntamente com o CESM1-CAM5. Dessa forma, espera-se que apresentem os resultados mais fidedignos.

Tabela 30 – Resultados provenientes dos dados do modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 50 anos

Duração	Período de retorno de 50 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	17,33	207,94	21,30	255,62	24,27	291,30
10 minutos	22,81	136,88	27,34	164,04	30,73	184,36
15 minutos	31,45	125,80	37,73	150,92	42,43	169,72
20 minutos	40,21	120,64	48,35	145,05	54,44	163,32
25 minutos	49,03	117,67	59,28	142,26	66,95	160,68
30 minutos	59,12	118,24	72,00	144,00	81,64	163,29
60 minutos	84,05	84,05	102,28	102,28	115,93	115,93
120 minutos	114,65	57,32	140,71	70,35	160,22	80,11
360 minutos	176,11	29,35	218,88	36,48	250,89	41,82
720 minutos	192,95	16,08	238,48	19,87	272,57	22,71
1080 minutos	194,40	10,80	239,33	13,30	272,96	15,16
1440 minutos	192,25	8,01	237,49	9,90	271,35	11,31

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 31 – Resultados provenientes dos dados do modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 100 anos

Duração	Período de retorno de 100 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	19,12	229,42	23,94	287,25	26,82	321,89
10 minutos	24,85	149,11	30,34	182,06	33,63	201,79
15 minutos	34,28	137,12	41,90	167,59	46,46	185,84
20 minutos	43,88	131,63	53,75	161,25	59,66	178,99

25 minutos	53,64	128,75	66,08	158,58	73,53	176,46
30 minutos	64,92	129,84	80,55	161,10	89,91	179,83
60 minutos	92,26	92,26	114,38	114,38	127,63	127,63
120 minutos	126,39	63,19	158,00	79,00	176,95	88,47
360 minutos	195,37	32,56	247,26	41,21	278,34	46,39
720 minutos	213,46	17,79	268,70	22,39	301,79	25,15
1080 minutos	214,63	11,92	269,14	14,95	301,80	16,77
1440 minutos	212,63	8,86	267,50	11,15	300,38	12,52

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

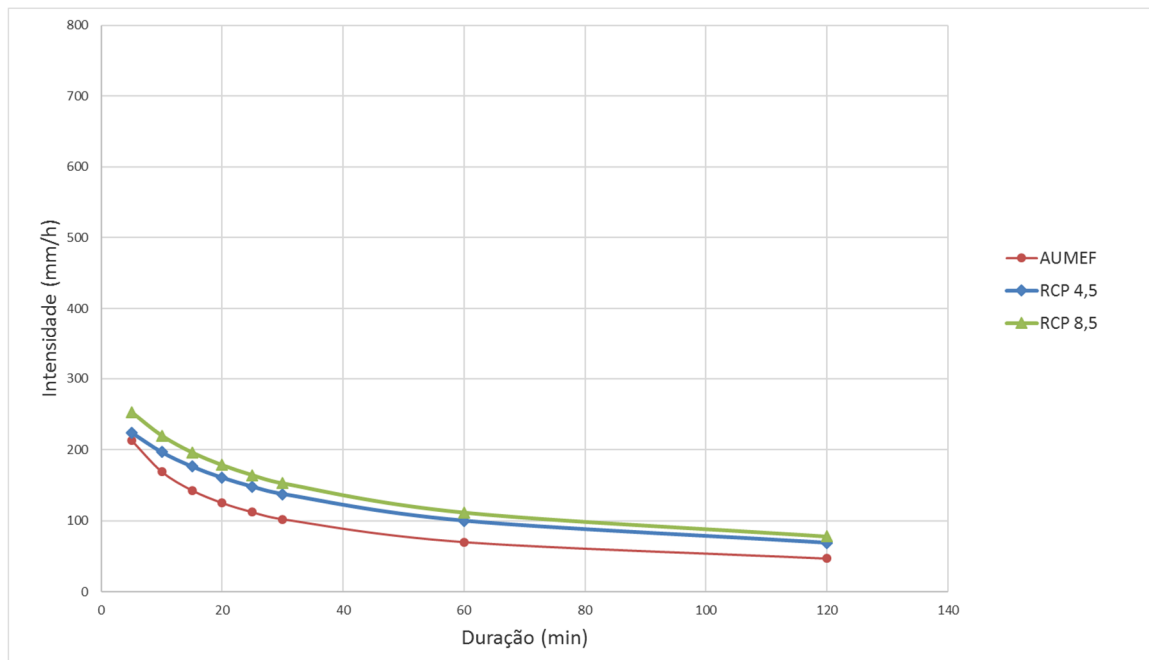
CENÁRIO - RCP 4,5

$$i = \frac{620,9295 \cdot T^{0,2544}}{(t + 17,3028)^{0,6489}} \quad (38)$$

CENÁRIO - RCP 8,5

$$i = \frac{686,3308 \cdot T^{0,2026}}{(t + 14,2544)^{0,6055}} \quad (39)$$

Figura 48 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 50 anos



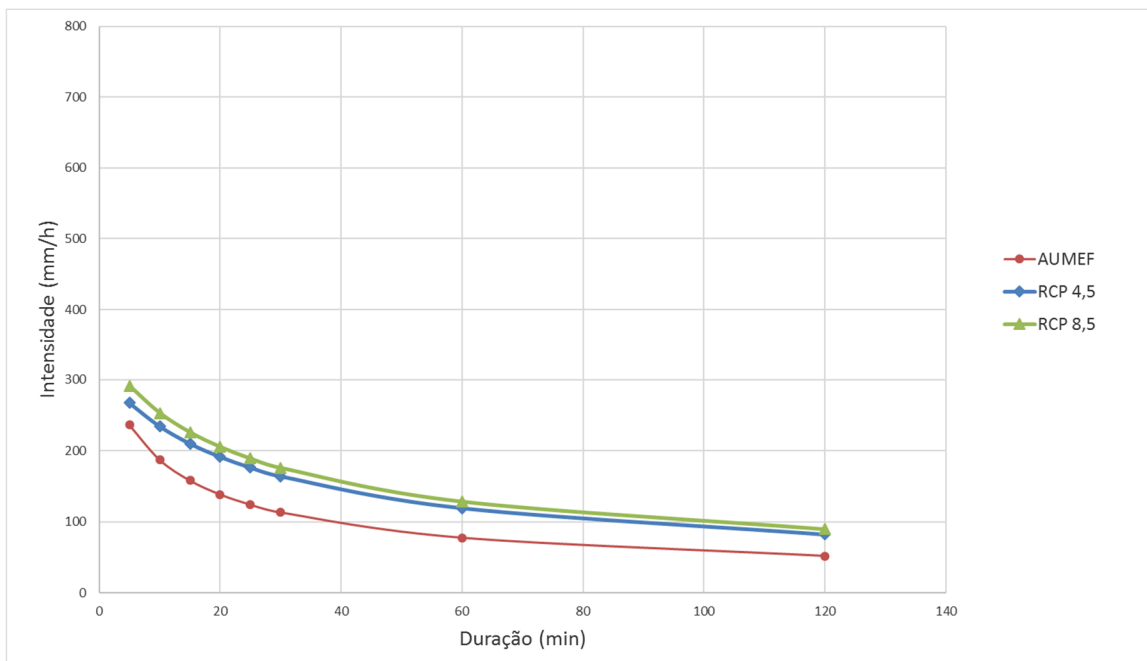
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A Figura 48 mostra a comparação entre as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 com a curva IDF utilizada pela AUMEF com relação ao período de retorno de 50 anos. Para chuvas

de 5 minutos de duração, a projeção RCP 4,5 apresenta valores muito próximos às da AUMEF. Em seguida, a diferença entre as duas curvas cresce até atingir um acréscimo máximo de quase 45% para chuvas de 120 minutos.

O cenário RCP 4,5 demonstrou apresentar um incremento de quase 20% na intensidade de chuvas máximas de curta duração (5 minutos) e de mais de 65% em relação a chuvas de 120 minutos.

Figura 49 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CCSM4 referente ao período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Ao analisar os resultados obtidos utilizando-se um período de retorno mais elevado (100 anos), percebe-se que as curvas das duas projeções diminuiriam aproximadamente a mesma diferença percentual entre si. Enquanto que aumentaram a discrepância para a equação oficial.

5.2.4.3 Modelo *inmcm4*

A seguir, tem-se os dados os resultados provenientes do modelo GCM *inmcm4* que possui resolução espacial 2,00 x 1,50 (Longitude x Latitude), um pouco inferior aos modelos CESM1-CAM5 e CCSM4.

Tabela 32 – Resultados provenientes dos dados do modelo inmcm4 referente ao período de retorno de 50 anos

Duração	Período de retorno de 50 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	17,33	207,94	35,64	427,66	15,12	181,46
10 minutos	22,81	136,88	43,67	262,04	20,30	121,80
15 minutos	31,45	125,80	60,39	241,57	27,96	111,85
20 minutos	40,21	120,64	77,72	233,15	35,69	107,08
25 minutos	49,03	117,67	96,26	231,03	43,33	104,00
30 minutos	59,12	118,24	118,49	236,99	51,96	103,93
60 minutos	84,05	84,05	168,08	168,08	73,92	73,92
120 minutos	114,65	57,32	234,77	117,38	100,17	50,08
360 minutos	176,11	29,35	373,23	62,21	152,35	25,39
720 minutos	192,95	16,08	402,82	33,57	167,65	13,97
1080 minutos	194,40	10,80	401,48	22,30	169,44	9,41
1440 minutos	192,25	8,01	400,75	16,70	167,12	6,96

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 33 – Resultados provenientes dos dados do modelo inmcm4 referente ao período de retorno de 100 anos

Duração	Período de retorno de 100 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	19,12	229,42	40,72	488,64	16,49	197,90
10 minutos	24,85	149,11	49,46	296,78	21,86	131,16
15 minutos	34,28	137,12	68,42	273,70	30,13	120,51
20 minutos	43,88	131,63	88,13	264,38	38,50	115,49
25 minutos	53,64	128,75	109,37	262,50	46,87	112,48
30 minutos	64,92	129,84	134,97	269,95	56,41	112,81
60 minutos	92,26	92,26	191,40	191,40	80,20	80,20
120 minutos	126,39	63,19	268,11	134,06	109,16	54,58
360 minutos	195,37	32,56	427,95	71,32	167,10	27,85
720 minutos	213,46	17,79	461,07	38,42	183,35	15,28
1080 minutos	214,63	11,92	458,96	25,50	184,93	10,27
1440 minutos	212,63	8,86	458,62	19,11	182,72	7,61

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

CENÁRIO - RCP 4,5

$$i = \frac{541,0216 \cdot T^{0,3291}}{(t + 12,2910)^{0,5787}} \quad (40)$$

CENÁRIO - RCP 8,5

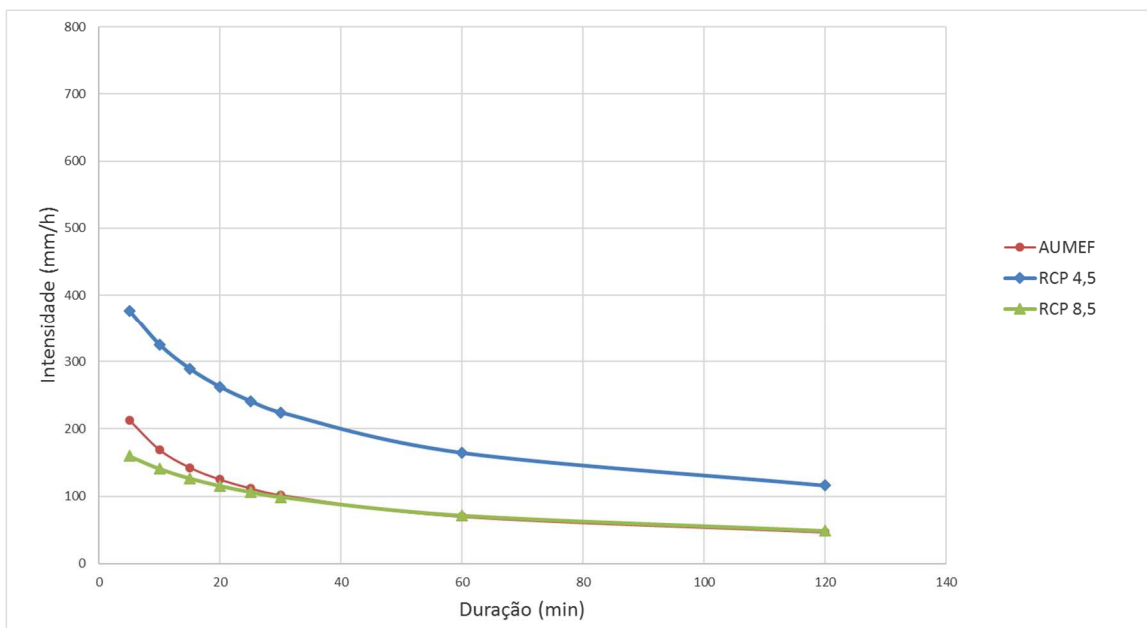
$$i = \frac{762,2614 \cdot T^{0,1619}}{(t + 19,7644)^{0,6843}} \quad (41)$$

Por meio da análise da Figura 50 e Figura 51, nota-se que as curvas da equação da AUMEF e da projeção RCP 8,5, praticamente se sobrepõem a partir da duração de 25 minutos, tanto para o período de retorno de 50 anos como para o de 100 anos.

Nesse caso, o cenário que implicaria no maior aumento percentual das intensidades de chuvas máximas seria o RCP 4,5 (cenário de emissão intermediária), apresentando um acréscimo percentual de mais de 75% nas chuvas de 5 minutos, podendo chegar a quase 150% em chuvas de 120 minutos, considerando-se um período de retorno de 50 anos.

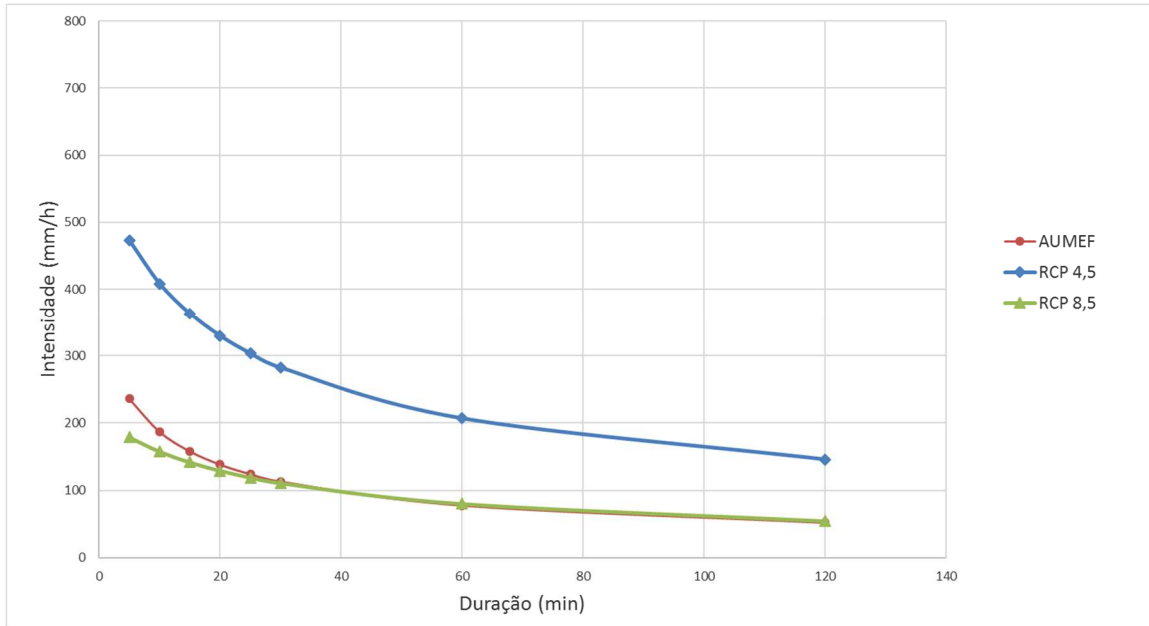
Duplicando-se o valor do período de retorno, esse aumento referente ao cenário RCP 4,5 fica ainda mais evidente, representando um valor médio superior a 140%.

Figura 50 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo INMCM4 referente ao período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 51 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo INMCM4 referente ao período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

5.2.4.4 Modelo Bcc-csm1

O modelo Bcc-csm1 apresenta umas das piores resoluções espaciais dos modelos analisados, aproximada 2,8 x 2,8 (Longitude x Latitude). Dessa forma, pode-se esperar que os resultados não sejam tão precisos quanto os dos modelos de melhor resolução.

Tabela 34 – Resultados provenientes dos dados do modelo bcc-csm1 referente ao período de retorno de 50 anos

Duração	Período de retorno de 50 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	17,33	207,94	7,90	94,78	9,33	111,91
10 minutos	22,81	136,88	12,07	72,42	13,70	82,18
15 minutos	31,45	125,80	16,55	66,18	18,80	75,21
20 minutos	40,21	120,64	20,90	62,69	23,82	71,46
25 minutos	49,03	117,67	24,70	59,28	28,38	68,12
30 minutos	59,12	118,24	28,54	57,08	33,17	66,34
60 minutos	84,05	84,05	40,77	40,77	47,32	47,32
120 minutos	114,65	57,32	52,78	26,39	62,14	31,07
360 minutos	176,11	29,35	74,58	12,43	89,95	14,99
720 minutos	192,95	16,08	84,86	7,07	101,22	8,43
1080 minutos	194,40	10,80	87,74	4,87	103,89	5,77
1440 minutos	192,25	8,01	84,86	3,54	101,12	4,21

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 35 – Resultados provenientes dos dados do modelo bcc-csm1 referente ao período de retorno de 100 anos

Duração	Período de retorno de 100 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	19,12	229,42	8,35	100,16	9,85	118,18
10 minutos	24,85	149,11	12,58	75,48	14,29	85,75
15 minutos	34,28	137,12	17,25	69,01	19,63	78,51
20 minutos	43,88	131,63	21,81	65,44	24,89	74,67
25 minutos	53,64	128,75	25,85	62,05	29,73	71,35
30 minutos	64,92	129,84	29,99	59,98	34,86	69,73
60 minutos	92,26	92,26	42,82	42,82	49,71	49,71
120 minutos	126,39	63,19	55,72	27,86	65,57	32,78
360 minutos	195,37	32,56	79,40	13,23	95,57	15,93
720 minutos	213,46	17,79	89,99	7,50	107,20	8,93
1080 minutos	214,63	11,92	92,80	5,16	109,79	6,10
1440 minutos	212,63	8,86	89,96	3,75	107,07	4,46

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

CENÁRIO - RCP 4,5

$$i = \frac{734,8541 \cdot T^{0,0873}}{(t + 20,6649)^{0,7476}} \quad (42)$$

CENÁRIO - RCP 8,5

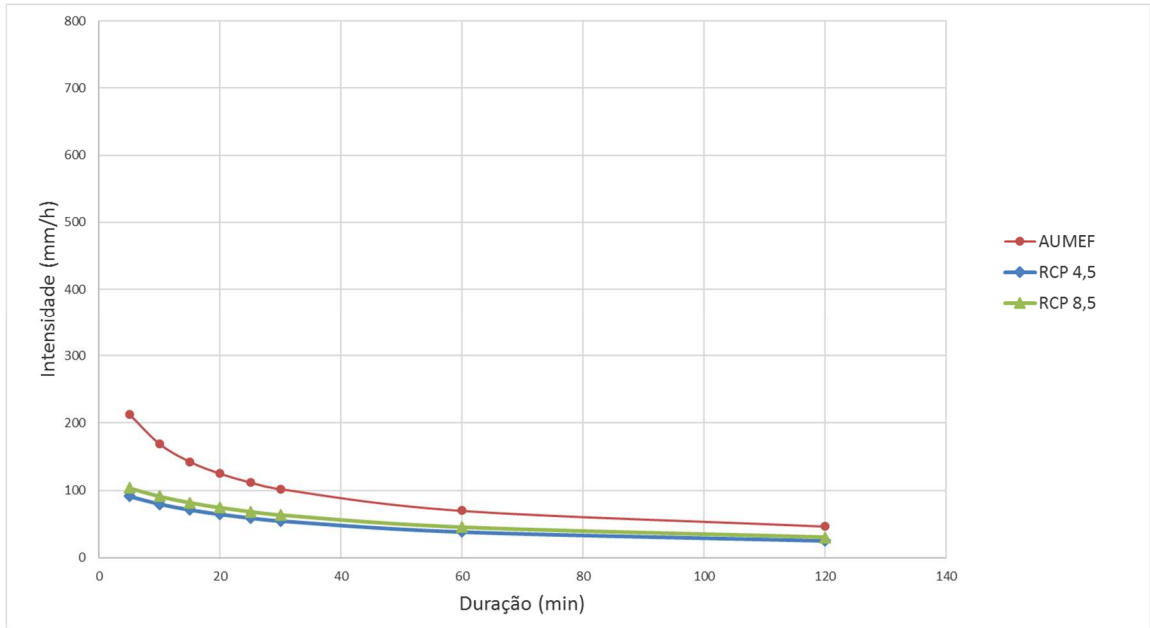
$$i = \frac{788,4440 \cdot T^{0,0876}}{(t + 20,8779)^{0,7278}} \quad (43)$$

Mediante a análise dos resultados do modelo Bcc-csm1, constata-se que para os períodos de retorno analisados (50 anos e 100 anos) as curvas projetadas para o futuro (RCP 4,5 e RCP 8,5) apresentaram intensidades de chuva muito inferiores à equação da AUMEF.

Segundo os resultados do modelo, o aumento na concentração dos gases causadores do efeito estufa causará fortes diminuições nas intensidades de chuvas máximas da cidade de Fortaleza.

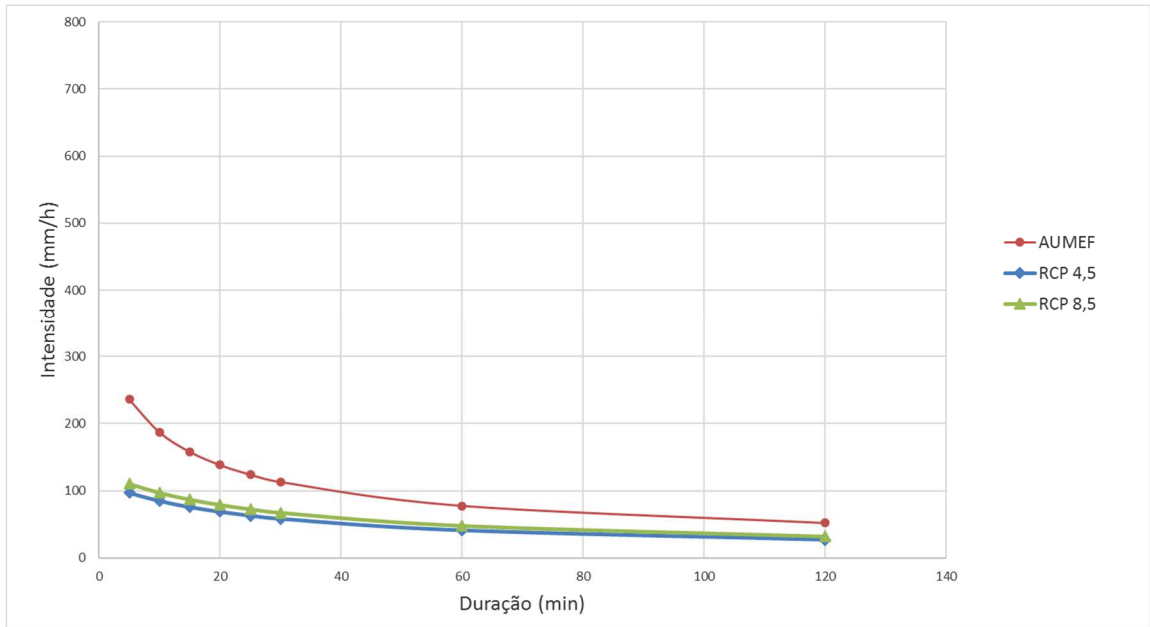
Vale ressaltar que a maior intensidade de chuva máxima seria de aproximadamente 100 mm/h apenas, tanto para o cenário RCP 4,5 como para o RCP 8,5 nos períodos de retorno analisados.

Figura 52 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo bcc-csm1 referente ao período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 53 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CSM1 referente ao período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

5.2.4.5 Modelo MIROC5

O modelo MIROC5 apresenta resolução espacial razoável de 1,4 x 1,41 (Longitude x Latitude), ou seja, espera-se que os seus resultados apresentem valores coerentes com a realidade.

Tabela 36 – Resultados provenientes dos dados do modelo MIROC5 referente ao período de retorno de 50 anos

Duração	Período de retorno de 50 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	17,33	207,94	19,16	229,94	13,06	156,69
10 minutos	22,81	136,88	24,90	149,41	17,95	107,69
15 minutos	31,45	125,80	34,35	137,39	24,70	98,80
20 minutos	40,21	120,64	43,97	131,90	31,46	94,39
25 minutos	49,03	117,67	53,76	129,02	38,01	91,22
30 minutos	59,12	118,24	65,06	130,13	45,27	90,54
60 minutos	84,05	84,05	92,46	92,46	64,44	64,44
120 minutos	114,65	57,32	126,67	63,34	86,62	43,31
360 minutos	176,11	29,35	195,84	32,64	130,12	21,69
720 minutos	192,95	16,08	213,96	17,83	143,99	12,00
1080 minutos	194,40	10,80	215,13	11,95	146,09	8,12
1440 minutos	192,25	8,01	213,12	8,88	143,61	5,98

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 37 – Resultados provenientes dos dados do modelo MIROC5 referente ao período de retorno de 100 anos

Duração	Período de retorno de 100 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	19,12	229,42	21,18	254,13	14,40	172,85
10 minutos	24,85	149,11	27,20	163,19	19,48	116,89
15 minutos	34,28	137,12	37,53	150,14	26,83	107,31
20 minutos	43,88	131,63	48,10	144,29	34,22	102,67
25 minutos	53,64	128,75	58,96	141,50	41,48	99,56
30 minutos	64,92	129,84	71,60	143,20	49,64	99,27
60 minutos	92,26	92,26	101,71	101,71	70,62	70,62
120 minutos	126,39	63,19	139,90	69,95	95,46	47,73
360 minutos	195,37	32,56	217,55	36,26	144,62	24,10
720 minutos	213,46	17,79	237,07	19,76	159,42	13,29
1080 minutos	214,63	11,92	237,93	13,22	161,32	8,96
1440 minutos	212,63	8,86	236,08	9,84	158,95	6,62

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

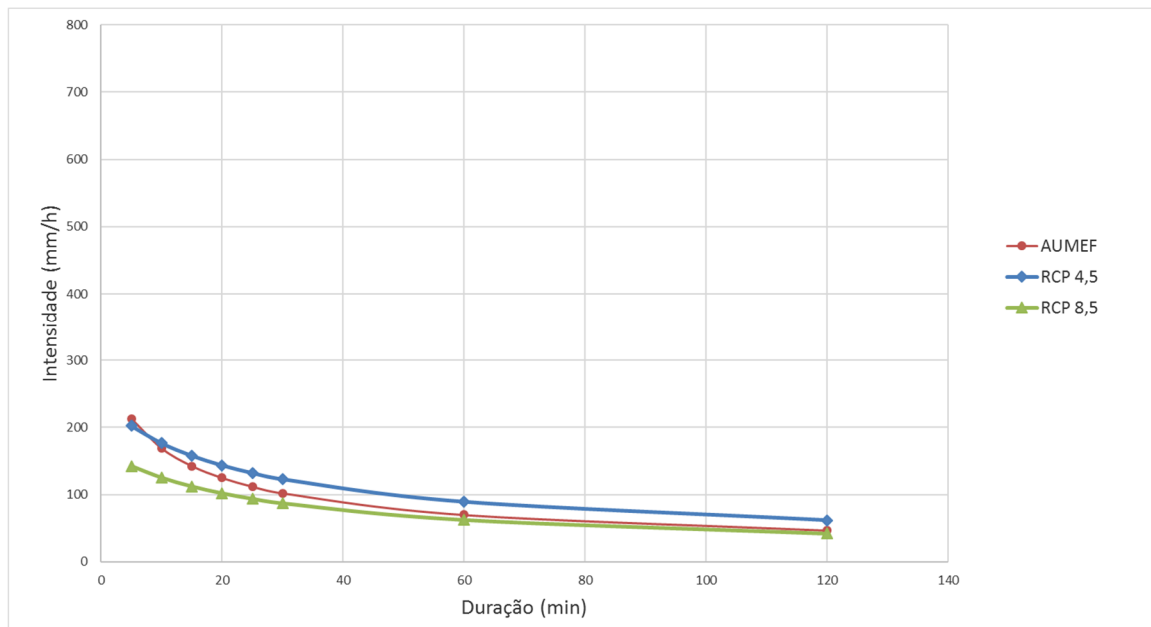
CENÁRIO - RCP 4,5

$$i = \frac{639,8823 \cdot T^{0,2003}}{(t + 15,9149)^{0,6361}} \quad (44)$$

CENÁRIO - RCP 8,5

$$i = \frac{647,7016 \cdot T^{0,1897}}{(t + 19,6886)^{0,7040}} \quad (45)$$

Figura 54 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo MIROC5 referente ao período de retorno de 50 anos

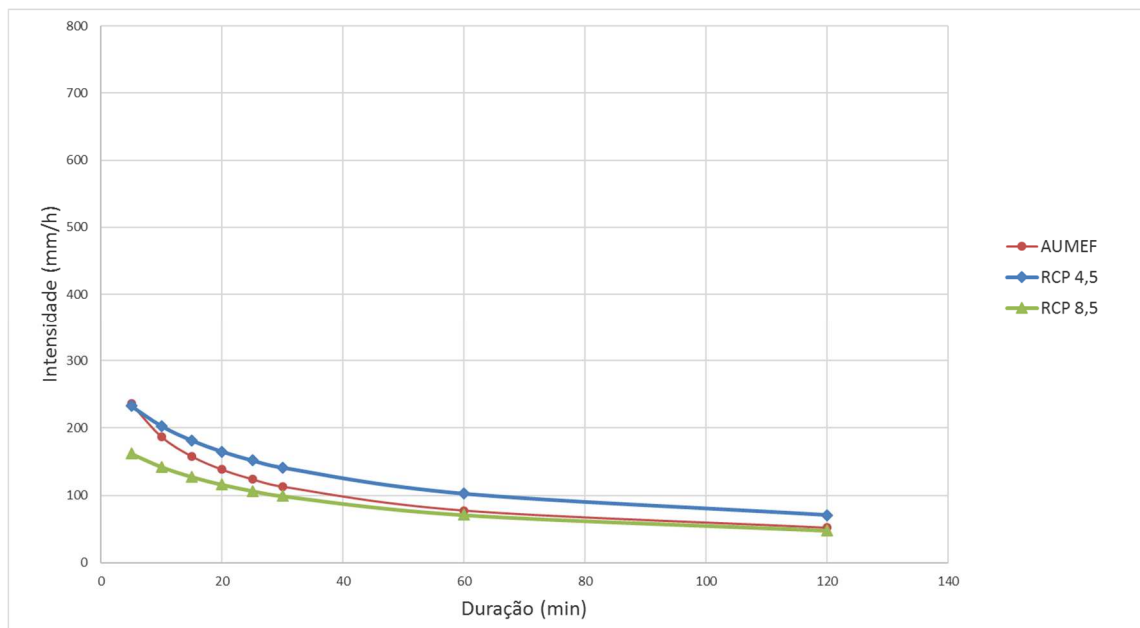


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em relação ao período de retorno de 50 anos, nota-se que o cenário RCP 4,5 apresenta as maiores intensidades de chuvas máximas, com exceção da duração de chuva de 5 minutos que é ultrapassada pela AUMEF.

O RCP 8,5, apesar de ser o cenário de maior emissão, apresenta os menores valores de intensidades para qualquer duração de chuvas analisada. Contudo, quanto maior a duração da chuva, mais ele se iguala com a curva da AUMEF, principalmente para chuvas com duração superior a uma hora.

Figura 55 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo MIROC5 referente ao período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Analisando-se um período de retorno de 100 anos, percebe-se praticamente a mesma tendência analisada na situação anterior.

5.2.4.6 Modelo CanESM2

O modelo CanESM2, juntamente com o modelo Bcc-csm1, possui uma das piores resoluções espaciais dentre os modelos utilizados que é de 2,8 x 2,8 (Longitude x Latitude). Em seguida, tem-se os resultados de projeção das curvas IDF para o futuro com base nos dados do referido modelo.

Tabela 38 – Resultados provenientes dos dados do modelo CanESM2 referente ao período de retorno de 50 anos

Duração	Período de retorno de 50 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	17,33	207,94	12,45	149,44	19,71	236,50
10 minutos	22,81	136,88	17,26	103,56	25,52	153,15
15 minutos	31,45	125,80	23,74	94,98	35,21	140,85
20 minutos	40,21	120,64	30,23	90,68	45,09	135,26
25 minutos	49,03	117,67	36,45	87,48	55,17	132,40
30 minutos	59,12	118,24	43,31	86,62	66,84	133,67

60 minutos	84,05	84,05	61,67	61,67	94,97	94,97
120 minutos	114,65	57,32	82,66	41,33	130,26	65,13
360 minutos	176,11	29,35	123,62	20,60	201,73	33,62
720 minutos	192,95	16,08	137,06	11,42	220,22	18,35
1080 minutos	194,40	10,80	139,25	7,74	221,31	12,30
1440 minutos	192,25	8,01	136,73	5,70	219,35	9,14

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 39 – Resultados provenientes dos dados do modelo CanESM2 referente ao período de retorno de 100 anos

Duração	Período de retorno de 100 anos					
	Observado		RCP 4,5		RCP 8,5	
	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)	Total (mm)	Intensidade (mm/h)
5 minutos	19,12	229,42	13,49	161,83	21,75	260,97
10 minutos	24,85	149,11	18,44	110,61	27,85	167,09
15 minutos	34,28	137,12	25,38	101,51	38,44	153,74
20 minutos	43,88	131,63	32,34	97,02	49,26	147,79
25 minutos	53,64	128,75	39,11	93,87	60,43	145,03
30 minutos	64,92	129,84	46,66	93,32	73,45	146,90
60 minutos	92,26	92,26	66,41	66,41	104,32	104,32
120 minutos	126,39	63,19	89,43	44,72	143,63	71,82
360 minutos	195,37	32,56	134,74	22,46	223,68	37,28
720 minutos	213,46	17,79	148,90	12,41	243,60	20,30
1080 minutos	214,63	11,92	150,93	8,39	244,37	13,58
1440 minutos	212,63	8,86	148,49	6,19	242,57	10,11

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

CENÁRIO - RCP 4,5

$$i = \frac{702,8991 \cdot T^{0,1427}}{(t + 19,1330)^{0,6931}} \quad (46)$$

CENÁRIO - RCP 8,5

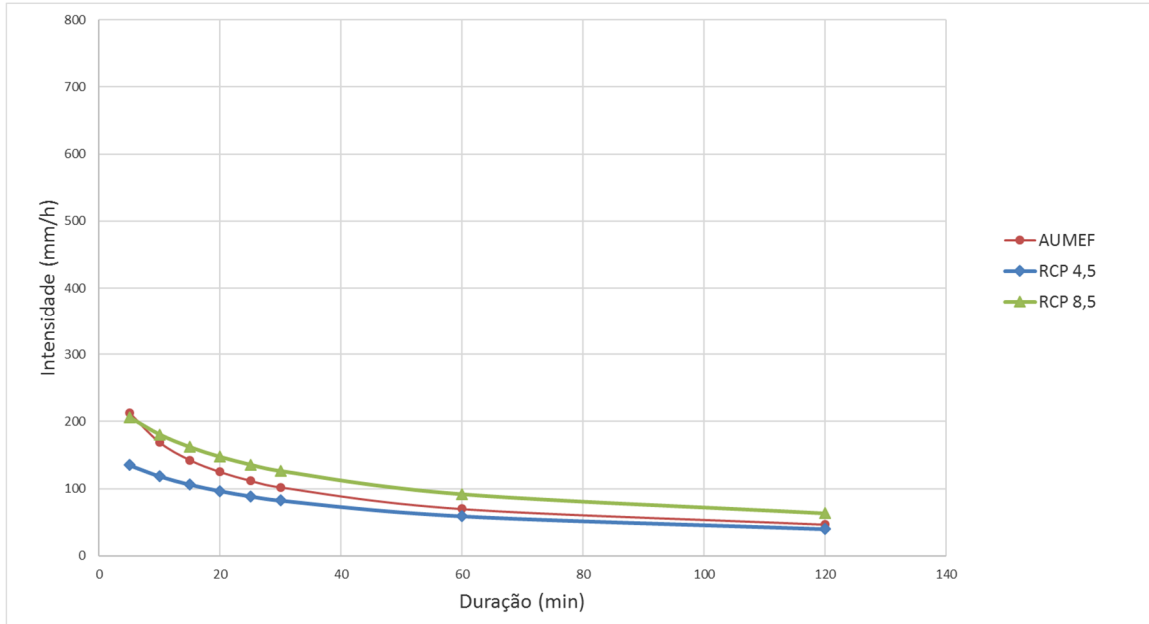
$$i = \frac{691,5597 \cdot T^{0,1962}}{(t + 16,7853)^{0,6415}} \quad (47)$$

Analisando-se a Figura 56 (período de retorno de 50 anos) e Figura 57 (período de retorno de 100 anos) percebe-se que ambas as projeções nos diferentes períodos de retorno apresentam as mesmas tendências de mudanças.

A projeção RCP 4,5 indica que deve haver uma diminuição na intensidade das chuvas máximas, principalmente nas chuvas de duração inferiores a uma hora. Todavia, a projeção RCP 8,5 aponta para um aumento na intensidade das chuvas máximas, com exceção

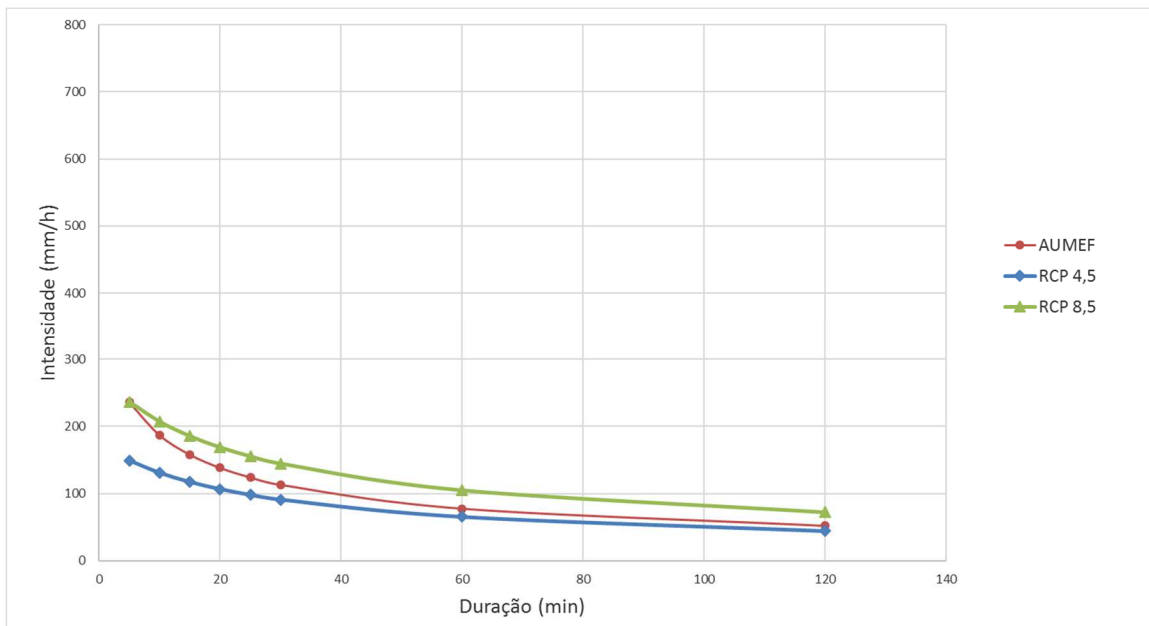
das chuvas de curta duração (próximas a 5 minutos) que permanecem com os valores próximos aos estipulados pela equação utilizada pela AUMEF.

Figura 56 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CanESM2 referente ao período de retorno de 50 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 57 – Curva IDF da equação oficial de Fortaleza e as projeções RCP 4,5 e RCP 8,5 baseadas no modelo CanESM2 referente ao período de retorno de 100 anos



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

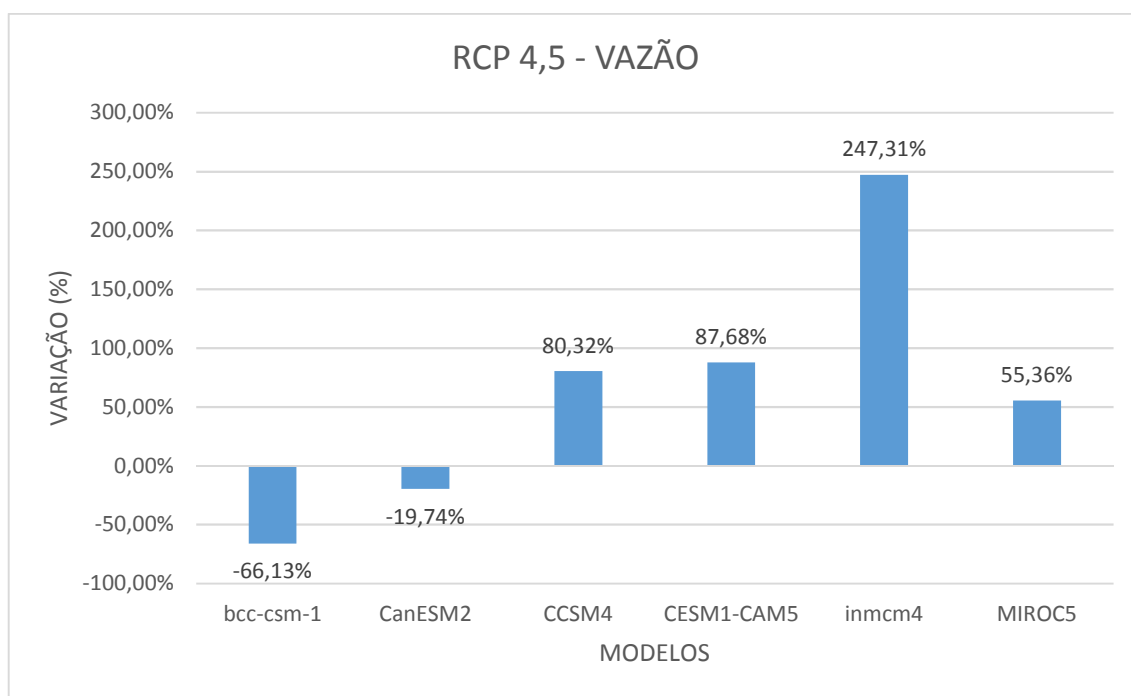
5.3 Impacto das mudanças das curvas IDF nas vazões e volumes escoados na saída do sistema modelado

Após a obtenção das novas curvas IDF projetadas para o futuro baseadas nos seis modelos GCM utilizados, as mesmas foram utilizadas para estimar as vazões resultantes de uma chuva de período de retorno de 50 (cinquenta) anos na sub-bacia do Tauape.

Foram calculadas as variações dos picos de vazões e dos volumes escoados na saída do sistema, com relação aos valores inicialmente projetados com base na equação da AUMEF.

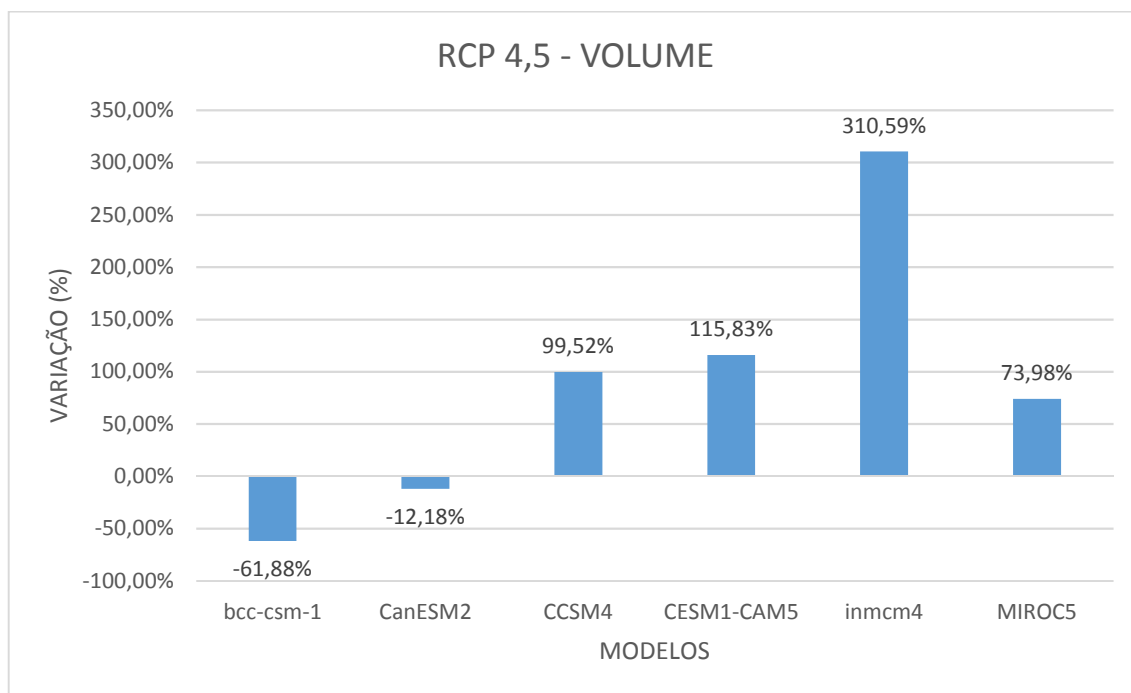
Considerando o cenário de mudança climática RCP 4,5, constatou-se que quatro dos seis modelos utilizados resultaram em aumento da vazão e do volume escoado no final do sistema de drenagem conforme observamos na Figura 58 e Figura 59, respectivamente.

Figura 58 – Variação da vazão na saída do sistema considerando o cenário RCP 4,5



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

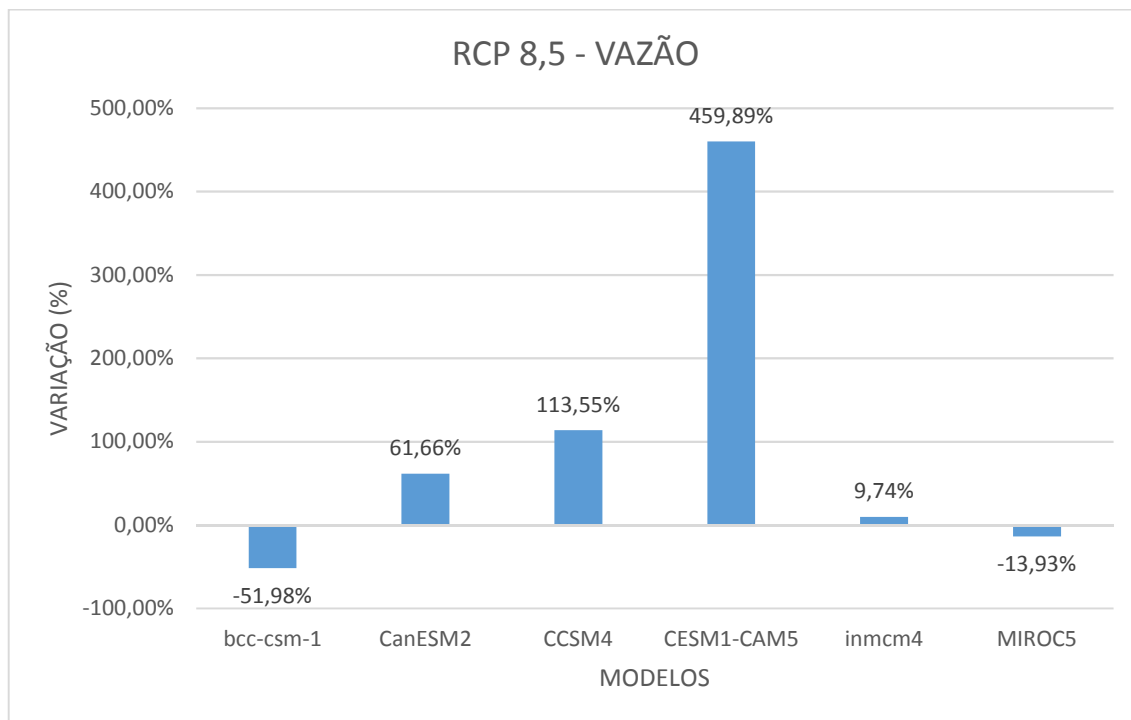
Em relação às mudanças nos picos de vazões no cenário RCP 4,5 (Figura 58), percebe-se que a maior variação percentual foi oriunda do modelo inmcm4 (247,31%), contudo o aumento médio nas vazões foi de 64,13%.

Figura 59 – Variação do volume na saída do sistema considerando o cenário RCP 4,5

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Considerando-se o aumento no volume escoado na saída do sistema, tendo como base o cenário RCP 4,5, verificou-se que o maior aumento percentual foi de 310,59% referente ao modelo inmcm4 e o aumento médio foi de 87,64%.

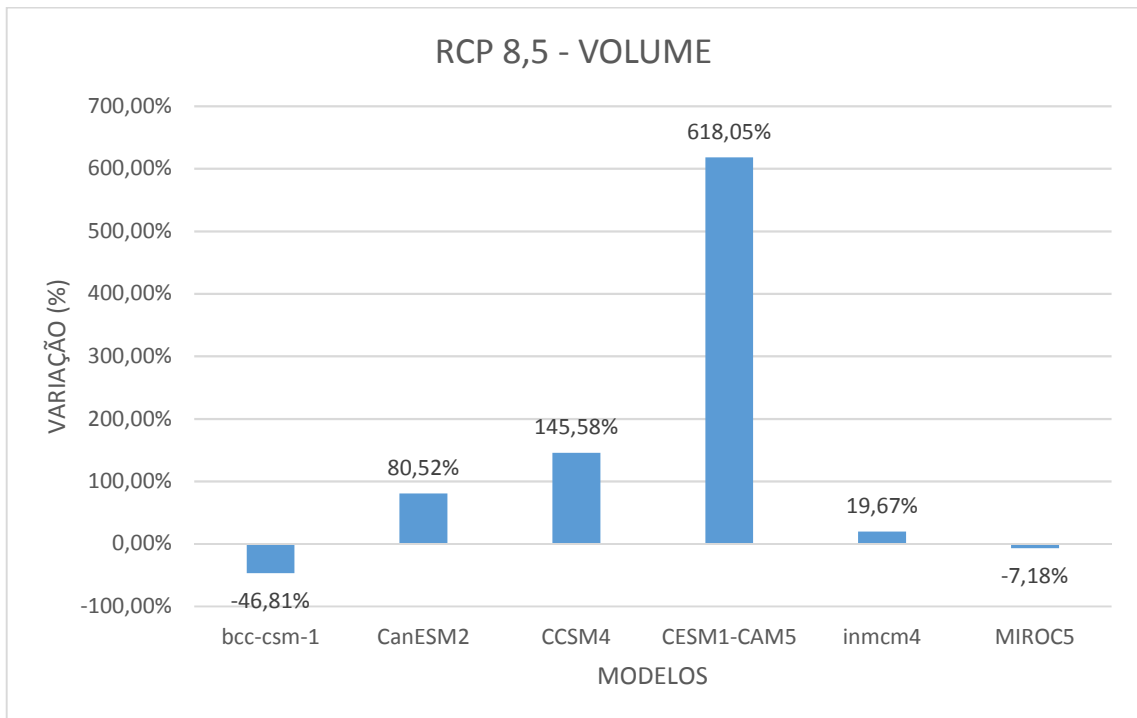
No cenário RCP 8,5, ocorreram aumentos ainda mais significativos nas vazões e volumes transportados na saída do sistema.

Figura 60 – Variação da vazão na saída do sistema considerando o cenário RCP 8,5

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em relação aos picos de vazão, tendência similar de aumento foi encontrada, sendo que a maior elevação foi registrada pelo modelo CESM1-CAM5 (459,89%) e o aumento médio foi de 96,49%.

Figura 61 – Variação do volume na saída do sistema considerando o cenário RCP 8,5



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Já os volumes escoados apresentaram aumentos ainda mais significativos, onde o maior acréscimo percentual foi 618,05% proveniente do modelo CESM1-CAM5 e o aumento médio foi 134,97%.

5.4 Custos de implantação de cada cenário analisado

Foram quantificados os custos de implantação do sistema de drenagem urbana considerando os resultados provenientes da utilização da equação IDF oficial de Fortaleza e os custos de implantações utilizando as equações IDF projetadas para o futuro dos seis modelos GCM nos cenários RCP 4,5 e RCP 8,5.

Tabela 40 – Custos de implantação da rede de drenagem baseada em cada cenário analisado

CLIMA ATUAL	UTILIZADO	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO
		EQUAÇÃO IDF ATUAL
CENÁRIO RCP 4,5	MODELOS GCM	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO
	BCC-CSM1	R\$ 3.316.926,11
	CanESM2	R\$ 5.794.396,26
	CCSM4	R\$ 13.381.467,46
	CESM1-CAM5	R\$ 13.381.467,46
	inmcm4	R\$ 18.211.677,73
	MIROC5	R\$ 11.546.268,10
CENÁRIO RCP 8,5	MODELOS GCM	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO
	BCC-CSM1	R\$ 4.052.711,99
	CanESM2	R\$ 11.546.268,10
	CCSM4	R\$ 15.751.064,18
	CESM1-CAM5	R\$ 22.992.836,37
	inmcm4	R\$ 8.623.026,77
	MIROC5	R\$ 5.821.621,32

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Por meio da análise da Tabela 40, percebe-se a grande variação de custos e as incertezas inerentes à mudança climática.

O cenário RCP 4,5 apresentou como cenário mais otimista da implantação de rede o custo de R\$ 3.316.926,11 e o cenário mais pessimista de R\$ 18.211.677,73. O valor médio calculado dos modelos, nesse cenário, foi de R\$ 10.938.700,52.

Enquanto isso, o cenário RCP 8,5 apresentou os valores de R\$ 4.052.711,99 e de R\$ 22.992.836,37 referentes aos custos de implantação relativos ao cenário mais otimista e mais pessimista, respectivamente. Já o valor médio de implantação calculado foi de R\$ 11.464.588,12, um pouco superior ao cenário RCP 4,5.

5.5 Aplicação da metodologia robusta de dimensionamento de rede de drenagem urbana sob efeitos de mudanças climáticas

Para a realização do dimensionamento da rede de drenagem, inicialmente procedeu-se ao cálculo da matriz de custos totais, conforme observado na Tabela 41.

Em seguida, calculou-se a matriz de arrependimento (Tabela 42).

Tabela 41 – Matriz de custos totais (R\$)

		CENÁRIOS												
		EQUAÇÃO OFICIAL	BCC-CSM1 (RCP 4,5)	BCC-CSM1 (RCP 8,5)	CanESM2 (RCP 4,5)	CanESM2 (RCP 8,5)	CCSM4 (RCP 4,5)	CCSM4 (RCP 8,5)	CESM1-CAM5 (RCP 4,5)	CESM1-CAM5 (RCP 8,5)	inmcm4 (RCP 4,5)	inmcm4 (RCP 8,5)	MIROC5 (RCP 4,5)	MIROC5 (RCP 8,5)
ALTERNATIVAS	EQUAÇÃO OFICIAL	R\$ 6.611.308,05	R\$ 6.611.308,05	R\$ 6.611.308,05	R\$ 6.611.308,05	R\$ 12.533.260,11	R\$ 14.735.499,35	R\$ 17.579.015,41	R\$ 14.735.499,35	R\$ 26.269.142,04	R\$ 20.531.751,67	R\$ 9.025.370,51	R\$ 12.533.260,11	R\$ 6.611.308,05
	BCC-CSM1 (RCP 4,5)	R\$ 7.270.184,43	R\$ 3.316.926,11	R\$ 4.199.869,16	R\$ 6.289.890,30	R\$ 13.192.136,50	R\$ 15.394.375,73	R\$ 18.237.891,80	R\$ 15.394.375,73	R\$ 26.928.018,42	R\$ 21.190.628,06	R\$ 9.684.246,90	R\$ 13.192.136,50	R\$ 6.322.560,36
	BCC-CSM1 (RCP 8,5)	R\$ 7.123.027,26	R\$ 4.052.711,99	R\$ 4.052.711,99	R\$ 6.142.733,12	R\$ 13.044.979,33	R\$ 15.247.218,56	R\$ 18.090.734,62	R\$ 15.247.218,56	R\$ 26.780.861,25	R\$ 21.043.470,88	R\$ 9.537.089,72	R\$ 13.044.979,33	R\$ 6.175.403,18
	CanESM2 (RCP 4,5)	R\$ 6.774.690,40	R\$ 5.794.396,26	R\$ 5.794.396,26	R\$ 5.794.396,26	R\$ 12.696.642,47	R\$ 14.898.881,70	R\$ 17.742.397,76	R\$ 14.898.881,70	R\$ 26.432.524,39	R\$ 20.695.134,03	R\$ 9.188.752,87	R\$ 12.696.642,47	R\$ 5.827.066,33
	CanESM2 (RCP 8,5)	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 13.748.507,34	R\$ 16.592.023,40	R\$ 13.748.507,34	R\$ 25.282.150,03	R\$ 19.544.759,66	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10
	CCSM4 (RCP 4,5)	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 16.224.983,52	R\$ 13.381.467,46	R\$ 24.915.110,15	R\$ 19.177.719,79	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46
	CCSM4 (RCP 8,5)	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18	R\$ 24.441.190,81	R\$ 18.703.800,44	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18	R\$ 15.751.064,18
	CESM1-CAM5 (RCP 4,5)	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 16.224.983,52	R\$ 13.381.467,46	R\$ 24.915.110,15	R\$ 19.177.719,79	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46	R\$ 13.381.467,46
	CESM1-CAM5 (RCP 8,5)	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37
	inmcm4 (RCP 4,5)	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 23.949.068,10	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73	R\$ 18.211.677,73
	inmcm4 (RCP 8,5)	R\$ 8.623.026,77	R\$ 8.623.026,77	R\$ 8.623.026,77	R\$ 8.623.026,77	R\$ 12.130.916,37	R\$ 14.333.155,60	R\$ 17.176.671,66	R\$ 14.333.155,60	R\$ 25.866.798,29	R\$ 20.129.407,93	R\$ 8.623.026,77	R\$ 12.130.916,37	R\$ 8.623.026,77
	MIROC5 (RCP 4,5)	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 13.748.507,34	R\$ 16.592.023,40	R\$ 13.748.507,34	R\$ 25.282.150,03	R\$ 19.544.759,66	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10	R\$ 11.546.268,10
	MIROC5 (RCP 8,5)	R\$ 6.769.245,39	R\$ 5.821.621,32	R\$ 5.821.621,32	R\$ 5.821.621,32	R\$ 12.691.197,46	R\$ 14.893.436,69	R\$ 17.736.952,75	R\$ 14.893.436,69	R\$ 26.427.079,38	R\$ 20.689.689,02	R\$ 9.183.307,85	R\$ 12.691.197,46	R\$ 5.821.621,32

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 42 – Matriz de arrependimento

		CENÁRIOS												
		EQUAÇÃO OFICIAL	BCC-CSM1 (RCP 4,5)	BCC-CSM1 (RCP 8,5)	CanESM2 (RCP 4,5)	CanESM2 (RCP 8,5)	CCSM4 (RCP 4,5)	CCSM4 (RCP 8,5)	CESM1-CAM5 (RCP 4,5)	CESM1-CAM5 (RCP 8,5)	inmcm4 (RCP 4,5)	inmcm4 (RCP 8,5)	MIROC5 (RCP 4,5)	MIROC5 (RCP 8,5)
ALTERNATIVAS	EQUAÇÃO OFICIAL	R\$ 0,00	R\$ 3.294.381,94	R\$ 2.558.596,06	R\$ 816.911,78	R\$ 986.992,01	R\$ 1.354.031,88	R\$ 1.827.951,23	R\$ 1.354.031,88	R\$ 3.276.305,67	R\$ 2.320.073,94	R\$ 402.343,74	R\$ 986.992,01	R\$ 789.686,73
	BCC-CSM1 (RCP 4,5)	R\$ 658.876,39	R\$ 0,00	R\$ 147.157,18	R\$ 495.494,03	R\$ 1.645.868,40	R\$ 2.012.908,27	R\$ 2.486.827,61	R\$ 2.012.908,27	R\$ 3.935.182,05	R\$ 2.978.950,32	R\$ 1.061.220,13	R\$ 1.645.868,40	R\$ 500.939,04
	BCC-CSM1 (RCP 8,5)	R\$ 511.719,21	R\$ 735.785,88	R\$ 0,00	R\$ 348.336,86	R\$ 1.498.711,22	R\$ 1.865.751,10	R\$ 2.339.670,44	R\$ 1.865.751,10	R\$ 3.788.024,88	R\$ 2.831.793,15	R\$ 914.062,96	R\$ 1.498.711,22	R\$ 353.781,87
	CanESM2 (RCP 4,5)	R\$ 163.382,36	R\$ 2.477.470,15	R\$ 1.741.684,28	R\$ 0,00	R\$ 1.150.374,37	R\$ 1.517.414,24	R\$ 1.991.333,58	R\$ 1.517.414,24	R\$ 3.439.688,02	R\$ 2.483.456,29	R\$ 565.726,10	R\$ 1.150.374,37	R\$ 5.445,01
	CanESM2 (RCP 8,5)	R\$ 4.934.960,06	R\$ 8.229.341,99	R\$ 7.493.556,12	R\$ 5.751.871,84	R\$ 0,00	R\$ 367.039,87	R\$ 840.959,22	R\$ 367.039,87	R\$ 2.289.313,65	R\$ 1.333.081,93	R\$ 2.923.241,34	R\$ 0,00	R\$ 5.724.646,79
	CCSM4 (RCP 4,5)	R\$ 6.770.159,42	R\$ 10.064.541,35	R\$ 9.328.755,48	R\$ 7.587.071,20	R\$ 1.835.199,36	R\$ 0,00	R\$ 473.919,34	R\$ 0,00	R\$ 1.922.273,78	R\$ 966.042,05	R\$ 4.758.440,70	R\$ 1.835.199,36	R\$ 7.559.846,15
	CCSM4 (RCP 8,5)	R\$ 9.139.756,14	R\$ 12.434.138,07	R\$ 11.698.352,19	R\$ 9.956.667,92	R\$ 4.204.796,08	R\$ 2.369.596,72	R\$ 0,00	R\$ 2.369.596,72	R\$ 1.448.354,44	R\$ 492.122,71	R\$ 7.128.037,42	R\$ 4.204.796,08	R\$ 9.929.442,87
	CESM1-CAM5 (RCP 4,5)	R\$ 6.770.159,42	R\$ 10.064.541,35	R\$ 9.328.755,48	R\$ 7.587.071,20	R\$ 1.835.199,36	R\$ 0,00	R\$ 473.919,34	R\$ 0,00	R\$ 1.922.273,78	R\$ 966.042,05	R\$ 4.758.440,70	R\$ 1.835.199,36	R\$ 7.559.846,15
	CESM1-CAM5 (RCP 8,5)	R\$ 16.381.528,33	R\$ 19.675.910,26	R\$ 18.940.124,38	R\$ 17.198.440,11	R\$ 11.446.568,27	R\$ 9.611.368,91	R\$ 7.241.772,19	R\$ 9.611.368,91	R\$ 0,00	R\$ 4.781.158,64	R\$ 14.369.809,61	R\$ 11.446.568,27	R\$ 17.171.215,06
	inmcm4 (RCP 4,5)	R\$ 11.600.369,69	R\$ 14.894.751,62	R\$ 14.158.965,75	R\$ 12.417.281,47	R\$ 6.665.409,63	R\$ 4.830.210,27	R\$ 2.460.613,55	R\$ 4.830.210,27	R\$ 956.231,73	R\$ 0,00	R\$ 9.588.650,97	R\$ 6.665.409,63	R\$ 12.390.056,42
	inmcm4 (RCP 8,5)	R\$ 2.011.718,72	R\$ 5.306.100,66	R\$ 4.570.314,78	R\$ 2.828.630,50	R\$ 584.648,27	R\$ 951.688,14	R\$ 1.425.607,48	R\$ 951.688,14	R\$ 2.873.961,92	R\$ 1.917.730,19	R\$ 0,00	R\$ 584.648,27	R\$ 2.801.405,45
	MIROC5 (RCP 4,5)	R\$ 4.934.960,06	R\$ 8.229.341,99	R\$ 7.493.556,12	R\$ 5.751.871,84	R\$ 0,00	R\$ 367.039,87	R\$ 840.959,22	R\$ 367.039,87	R\$ 2.289.313,65	R\$ 1.333.081,93	R\$ 2.923.241,34	R\$ 0,00	R\$ 5.724.646,79
	MIROC5 (RCP 8,5)	R\$ 157.937,35	R\$ 2.504.695,21	R\$ 1.768.909,33	R\$ 27.225,05	R\$ 1.144.929,36	R\$ 1.511.969,23	R\$ 1.985.888,57	R\$ 1.511.969,23	R\$ 3.434.243,01	R\$ 2.478.011,28	R\$ 560.281,09	R\$ 1.144.929,36	R\$ 0,00

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Com base no exposto, pôde-se aplicar os critérios de tomada de decisão desejados. A Tabela 43 mostra as melhores alternativas baseadas nos critérios de valor esperado, minimin, minimax e savage.

Tabela 43 – Tomada de decisão pelos critérios do Valor Esperado, Minimin, Mínimax e Savage

		Critérios de tomada de decisão			
		Valor Esperado	Minimin	Minimax	Savage
ALTERNATIVAS	EQUAÇÃO OFICIAL	R\$ 12.384.564,52	R\$ 6.611.308,05	R\$ 26.269.142,04	R\$ 3.294.381,94
	BCC-CSM1 (RCP 4,5)	R\$ 12.354.864,62	R\$ 3.316.926,11	R\$ 26.928.018,42	R\$ 3.935.182,05
	BCC-CSM1 (RCP 8,5)	R\$ 12.275.626,14	R\$ 4.052.711,99	R\$ 26.780.861,25	R\$ 3.788.024,88
	CanESM2 (RCP 4,5)	R\$ 12.248.830,99	R\$ 5.794.396,26	R\$ 26.432.524,39	R\$ 3.439.688,02
	CanESM2 (RCP 8,5)	R\$ 13.945.084,04	R\$ 11.546.268,10	R\$ 25.282.150,03	R\$ 8.229.341,99
	CCSM4 (RCP 4,5)	R\$ 14.933.268,32	R\$ 13.381.467,46	R\$ 24.915.110,15	R\$ 10.064.541,35
	CCSM4 (RCP 8,5)	R\$ 16.646.669,02	R\$ 15.751.064,18	R\$ 24.441.190,81	R\$ 12.434.138,07
	CESM1-CAM5 (RCP 4,5)	R\$ 14.933.268,32	R\$ 13.381.467,46	R\$ 24.915.110,15	R\$ 10.064.541,35
	CESM1-CAM5 (RCP 8,5)	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 22.992.836,37	R\$ 19.675.910,26
	inmcm4 (RCP 4,5)	R\$ 18.653.015,45	R\$ 18.211.677,73	R\$ 23.949.068,10	R\$ 14.894.751,62
	inmcm4 (RCP 8,5)	R\$ 12.910.706,34	R\$ 8.623.026,77	R\$ 25.866.798,29	R\$ 5.306.100,66
	MIROC5 (RCP 4,5)	R\$ 13.945.084,04	R\$ 11.546.268,10	R\$ 25.282.150,03	R\$ 8.229.341,99
	MIROC5 (RCP 8,5)	R\$ 12.250.925,23	R\$ 5.821.621,32	R\$ 26.427.079,38	R\$ 3.434.243,01
	CUSTO MÍNIMO	R\$ 12.248.830,99	R\$ 3.316.926,11	R\$ 22.992.836,37	R\$ 3.294.381,94

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Dentre os valores esperados para cada alternativa, o que apresenta o menor custo total é o referente ao uso do modelo CanESM2 (RCP 4,5), representando um valor de R\$ 12.248.830,99.

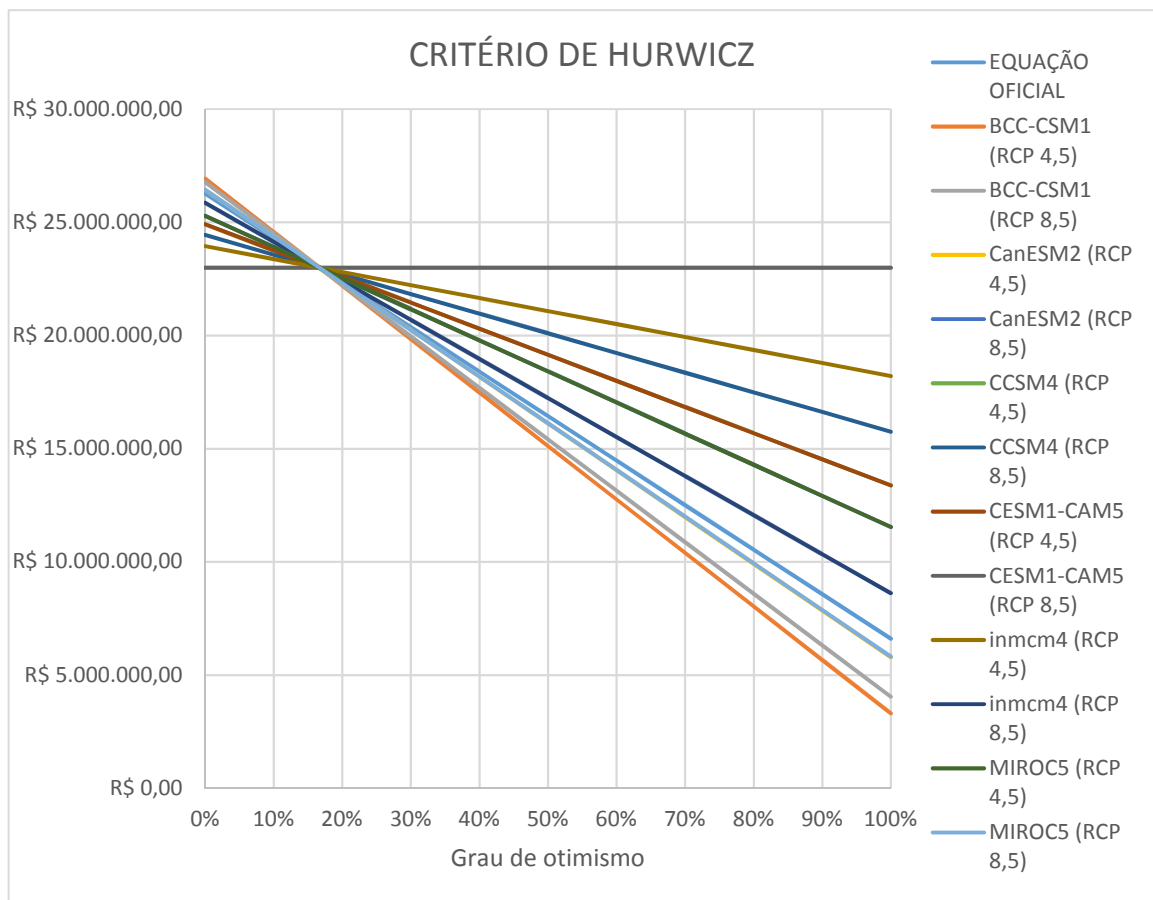
Para a escolha da melhor alternativa, utilizando o critério Minimin, obteve-se o menor custo dentre o conjunto de menores custos das alternativas analisadas. O valor encontrado foi de R\$ 3.316.926,11 proveniente dos dados gerado pelo modelo BCC-CSM1 (RCP 4,5).

Utilizando o critério Minimax, procedeu-se à escolha do menor dentre o conjunto de maiores custos das alternativas estudadas, chegando ao valor de R\$ 22.992.836,37 baseado no modelo CESM1-CAM5 (RCP 8,5).

Pelo critério de Savage, foram analisados os dados referentes à matriz de arrependimento, escolhendo a alternativa que representava o menor dentre o conjunto de máximos custos de arrependimento de implantação dos cenários. O valor encontrado foi de R\$ 3.294.381,94 referente ao uso dos dados pluviométricos da equação oficial de Fortaleza.

Também foram obtidos resultados utilizando-se o critério de Hurwicz que baseia a tomada de decisão do planejador utilizando o seu grau de otimismo. Utilizando-se um grau de otimismo de até 16,67% deve-se utilizar o modelo CESM1-CAM5 (RCP 8,5). Entretanto, caso seja estimado um otimismo acima desse valor, deve-se proceder à utilização dos dados do modelo BCC-CSM1 (RCP 4,5). O resumo dessas alternativas pode ser visto na Figura 62.

Figura 62 – Tomada de decisão pelo critério de Hurwicz



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

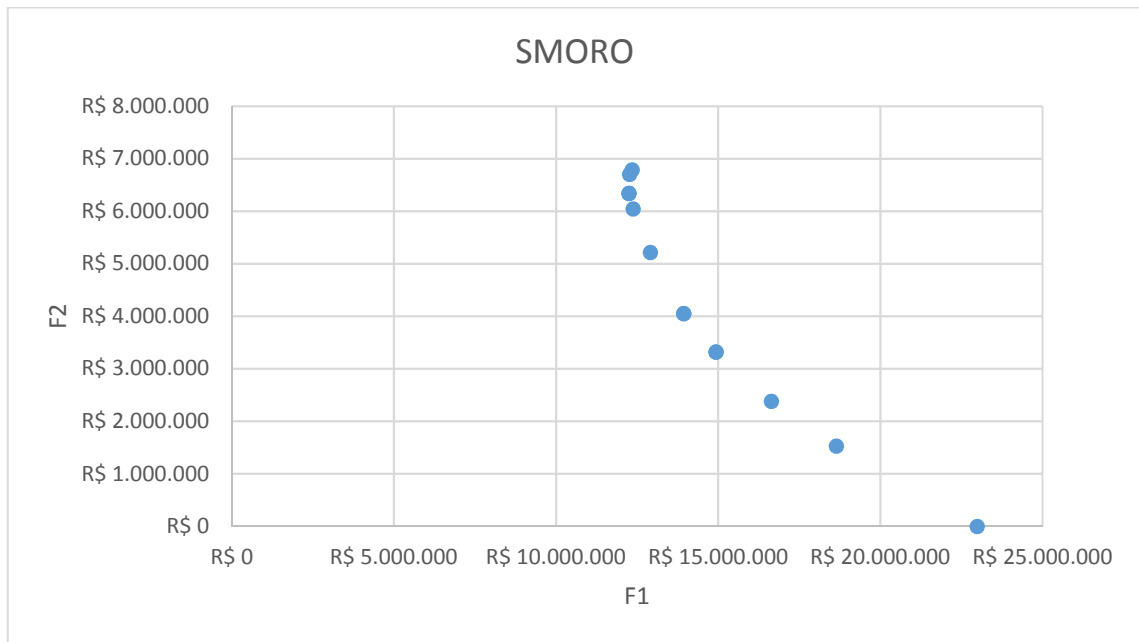
Já o último critério analisado, SMORO, forneceu um conjunto de soluções ótimas baseadas na minimização dos custos médios esperados (F1) e dos desvios (F2), conforme exposto na Tabela 44 e Figura 63.

Tabela 44 – Aplicação do método SMORO

		MINIMIZAÇÃO DAS FUNÇÕES	
		F1	F2
ALTERNATIVAS	EQUAÇÃO OFICIAL	R\$ 12.384.564,52	R\$ 6.045.819,39
	BCC-CSM1 (RCP 4,5)	R\$ 12.354.864,62	R\$ 6.789.606,90
	BCC-CSM1 (RCP 8,5)	R\$ 12.275.626,14	R\$ 6.702.717,90
	CanESM2 (RCP 4,5)	R\$ 12.248.830,99	R\$ 6.340.902,72
	CanESM2 (RCP 8,5)	R\$ 13.945.084,04	R\$ 4.047.825,13
	CCSM4 (RCP 4,5)	R\$ 14.933.268,32	R\$ 3.321.282,44
	CCSM4 (RCP 8,5)	R\$ 16.646.669,02	R\$ 2.382.783,57
	CESM1-CAM5 (RCP 4,5)	R\$ 14.933.268,32	R\$ 3.321.282,44
	CESM1-CAM5 (RCP 8,5)	R\$ 22.992.836,37	R\$ 0,00
	inmcm4 (RCP 4,5)	R\$ 18.653.015,45	R\$ 1.528.838,71
	inmcm4 (RCP 8,5)	R\$ 12.910.706,34	R\$ 5.216.368,30
	MIROC5 (RCP 4,5)	R\$ 13.945.084,04	R\$ 4.047.825,13
	MIROC5 (RCP 8,5)	R\$ 12.250.925,23	R\$ 6.333.238,80

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Por meio da aplicação do referido método, obtém-se um conjunto de soluções ótimas, como pode-se observar na Figura 63. Entretanto, optou-se por escolher a alternativa relativa à implantação do sistema de drenagem baseada no modelo CanESM2 (RCP 4,5) por apresentar o menor valor da variável F1.

Figura 63 – Aplicação do método SMORO

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Após a aplicação dos seis métodos de tomada de decisão, tem-se a Tabela 45 e a Tabela 46 que demonstram o resumo das melhores alternativas baseadas na utilização de cada um desses métodos.

Tabela 45 – Melhores alternativas relativas a cada critério utilizado

CRITÉRIO UTILIZADO		MELHOR ALTERNATIVA
VALOR ESPERADO		CanESM2 (RCP 4,5)
MINIMIN		BCC-CSM1 (RCP 4,5)
MINIMAX		CESM1-CAM5 (RCP 8,5)
SAVAGE		EQUAÇÃO OFICIAL (AUMEF)
HURWICZ	Otimismo até 16,67%	CESM1-CAM5 (RCP 8,5)
	Otimismo acima de 16,67%	BCC-CSM1 (RCP 4,5)
SMORO		CanESM2 (RCP 4,5)

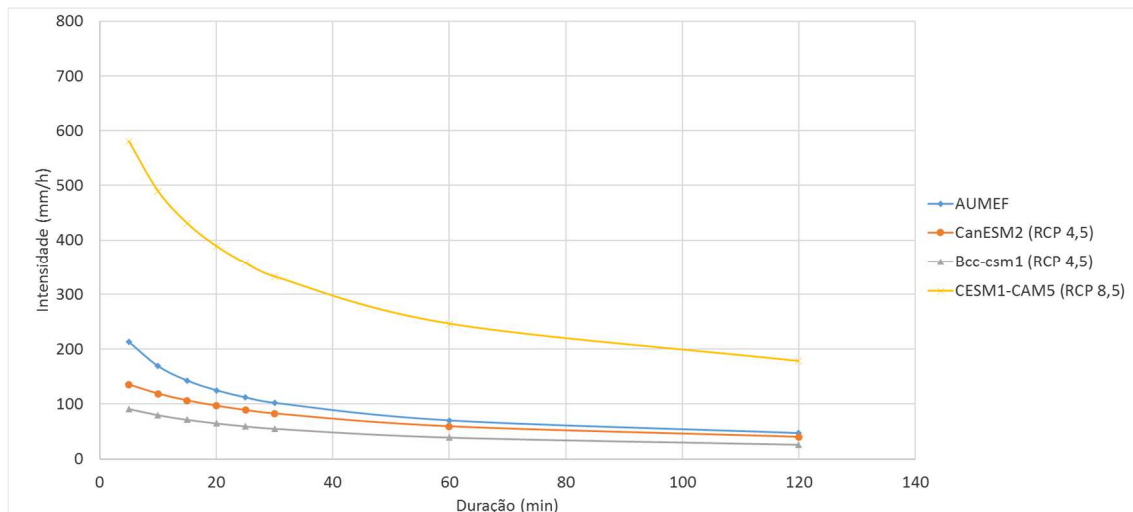
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 46 – Resumo das alternativas vencedoras

ALTERNATIVA DE DIMENSIONAMENTO	NÚMERO DE VEZES EM QUE É ESCOLHIDA COMO MELHOR ALTERNATIVA
CanESM2 (RCP 4,5)	2
BCC-CSM1 (RCP 4,5)	2
CESM1-CAM5 (RCP 8,5)	2
EQUAÇÃO OFICIAL (AUMEF)	1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Após a seleção das melhores alternativas, construiu-se as curvas IDF (Figura 64) referentes a esses cenários previamente escolhidos, com o intuito de visualizar os cenários de precipitação que mais se adequariam a realidade futura

Figura 64 – Curvas IDF das melhores alternativas selecionadas

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Percebe-se que dos três cenários selecionados, dois apresentaram valores abaixo da equação da AUMEF. Enquanto que apenas um dos cenários apresentam intensidades de precipitação bem mais elevadas às que são utilizadas atualmente como parâmetros para o projeto de obras hidráulicas na cidade de Fortaleza.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A equação IDF utilizada atualmente pela AUMEF para o projeto de obras hidráulicas foi desenvolvida com base em dados pluviométricos de 1928 a 1975. Diante das mudanças climáticas previstas por vários centros de pesquisa, entende-se que essa equação não venha a exprimir a realidade em um futuro próximo. Conforme exposto nesse trabalho, podem existir várias possibilidades em torno da mudança de comportamento dessa curva IDF, baseadas nas projeções dos vários modelos GCM utilizados.

As projeções dos modelos do CMIP 5 analisadas (RCP 4,5 e RCP 8,5) apresentaram grande variabilidade entre si, demonstrando o enorme grau de incertezas inerentes às mudanças climáticas. Os seis modelos GCM analisados forneceram dados de precipitação muito divergentes, demonstrando como o estudo da previsão climática ainda é impreciso.

Para a realização do downscaling estatístico dos dados desses modelos foi utilizado o “Método da Correspondência dos Quantis Equidistantes” que se mostrou eficaz e de fácil aplicação, sendo capaz de corrigir o viés estatístico presentes nos dados de precipitação oriundos dos modelos GCM em conjunto com os dados históricos do pluviógrafo local. Além disso, o método possui baixo uso de recurso computacional, tornando seu uso bem mais factível do que a utilização do downscaling dinâmico o qual pode dispender um esforço de processamento que, muitas vezes, torna a sua aplicação praticamente inviável por pesquisadores.

Os modelos de circulação regional (downscaling dinâmico) possuem uma resolução espacial bem superior à dos modelos globais. Contudo, o seu uso requer um alto uso de tempo de processamento computacional, tornando a sua utilização bastante restritiva atualmente. Recomenda-se que, futuramente, com o surgimento de hardwares mais avançados, esses modelos sejam utilizados com mais frequência na análise de precipitação em escalas mais detalhadas. Dessa forma, as projeções climáticas futuras tenderiam a ser ainda mais fidedignas.

A quantificação dos custos de implantação do sistema de drenagem modelado também demonstrou como esses valores podem ter grandes variações a depender da curva IDF utilizada no seu dimensionamento, o que exprime a importância do conhecimento de previsões climáticas futuras como instrumento de gestão na drenagem urbana.

Por isso, os critérios de tomada de decisão surgem como uma excelente ferramenta para auxiliar na escolha do cenário de mudança climática a ser adotado para o futuro.

Inicialmente, havia 13 cenários possíveis de dimensionamento, incluindo: equação oficial (AUMEF) e seis modelos GCM, cada um com duas projeções futuras (RCP 4,5 e RCP 8,5).

Após a utilização dos seis critérios de tomada de decisão abordados, o número de opções foi reduzido para apenas quatro, dos quais uma delas é a própria equação utilizada pela AUMEF, outras duas apresentaram intensidades de precipitação inferiores ao que já é usado e apenas uma opção demonstrou que deve-se admitir um considerável aumento na intensidade de precipitação das chuvas máximas na cidade de Fortaleza.

Caso o projetista deseje ser mais cauteloso, deve utilizar a equação baseada no modelo CESM1-CAM5 (RCP 8,5) que é uma das situações mais pessimistas e onerosas, mas que será mais eficiente para escoar as águas pluviais com segurança, evitando enchentes e alagamento.

Ao contrário, adotando uma postura mais otimista, pode continuar utilizando a equação da AUMEF ou das projeções dos modelos CanESM2 (RCP 4,5) e BCC-CSM1 (RCP 4,5) que também são bem mais baratas que a situação pessimista. Porém, existe uma maior probabilidade de ocorrerem transtornos causados por chuvas de intensidades mais elevadas.

Essa restrição na escolha dos cenários pode ser de grande ajuda, principalmente para os planejadores e engenheiros municipais, reduzindo os riscos e incertezas intrínsecos à tomada de decisão em cenário de mudança climática, fazendo com que possa ser selecionado um cenário de dimensionamento robusto, econômico e viável sob o ponto de vista técnico. Também recomenda-se que, em estudos posteriores, sejam utilizados outros critérios de tomada de decisão, com vistas a tornar a escolha ainda mais robusta.

Diante das incertezas inerentes à previsão climática, sugere-se que os sistemas de drenagem urbana continuem sendo dimensionados baseando-se nas intensidades de precipitação provenientes da equação utilizada pela AUMEF. Enquanto que a vazão excedente, proveniente do provável aumento das chuvas intensas da região devido às mudanças climáticas futuras, seja calculada por meio da metodologia proposta e solucionada por meio de técnicas compensatórias de drenagem urbana, conforme proposto por Souza Filho e Araújo (2016), essas medidas incluiriam: construção de bacia de detenção/retenção; melhoria da condição de escoamento dos rios e riachos; implantação de valas de infiltração e utilização de pavimentos permeáveis; implementação de áreas de infiltração e reservatórios e obras lineares de infiltração.

Conforme exposto ao longo deste trabalho, entende-se que a nova metodologia robusta de dimensionamento de sistema de drenagem urbana incorporando as possíveis mudanças climáticas, mostrou-se ser uma possibilidade a ser considerada nos projetos de

drenagem urbana, pois integrou diferentes projeções geradas por modelos GCM e ainda utilizou diferentes critérios de tomada de decisão baseados nos custos de implantação do sistema de drenagem urbana referente a cada cenário climático considerado, algo inédito até o momento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e técnicas para análise de decisão**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ed., 1989. 377p.

ANDERIES, J. M., JANSSEN, M. A., OSTROM, E. (2004). **A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective**. *Ecology and Society* 9(1): 18.

ALLAN, R. P.; SODEN, B. J. **Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes**. *Science*, v. 321, n. 5895, p. 1481-1484, Sept. 2008

BEKMAN, O. R.; COSTA NETO, P. L. O. **Análise estatística da decisão**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 124p.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988, atualizada até a Emenda Constitucional nº 91, de 18 de fevereiro de 2016.

BRASIL. LEI Nº 6.766, DE 19 DE DEZEMBRO DE 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 20 de dezembro de 1979.

BRASIL. LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 de janeiro de 1997.

BRASIL. LEI Nº 11.445, DE 05 DE JANEIRO DE 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 de janeiro de 2007.

BRASIL. LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 de maio de 2012.

CARLSON, J.M.; DOYLE, J. (2002) **Complexity and robustness**. *PNAS*, v. 99, suppl. 1, p. 2538-2545.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal, 2012, Fortaleza**. Disponível em: http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/pbm-2012/Fortaleza.pdf. Acesso em fevereiro/2016

EMORI, S.; BROWN, S. J. _2005_. “**Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate**” *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17706.

FERRET. **An Analysis Tool for Gridded and Non-Gridded Data**. 04 de dezembro de 2015. Disponível em: <[http:// http://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/home](http://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/home)>. Acesso em: 19 de julho de 2016.

FORTALEZA. Lei N.º 5.530 de 17 De Dezembro 1981. Código de Obras e Posturas do Município de Fortaleza. Dispõe sobre o Código de Obras e Posturas do Município de Fortaleza e dá Outras Providências. **Diário Oficial do Município**, Poder Executivo, Fortaleza, CE, 18 de dezembro de 1981.

FORTALEZA. Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente. Plano Municipal de Saneamento Básico. **Diagnóstico das atuais condições de drenagem do município de Fortaleza. 2013, Fortaleza.** Disponível em: http://www.fortaleza.ce.gov.br/sites/default/files/drenagem_situacao_de_fortaleza.pdf. Acesso em fevereiro/2016

FORTALEZA. Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente. **Apresentação do Plano Municipal de Saneamento Básico. 2015, Fortaleza.** Disponível em: http://www.fortaleza.ce.gov.br/sites/default/files/apresentacao_plano_de_drenagem_24_03_2015_revisado.pdf. Acesso em fevereiro/2016

GLOBO. **Veja fotos da chuva em Fortaleza nesta sexta-feira**. Fortaleza, 22 de junho de 2012. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ceara/fotos/2012/06/veja-fotos-da-chuva-em-fortaleza-nesta-sexta-feira.html#F484660>>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2016.

GLOBO. **Fortaleza tem maior chuva do estado, alagamentos e queda de árvores**. Fortaleza, 20 de fevereiro de 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ceara/noticia/2016/02/fortaleza-tem-maior-chuva-do-estado-alagamentos-e-queda-de-arvores.html>>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2016.

HASSANZADECH, E.; NAZEMI, A.; ELSHORBAGY, A. (2013) **Quantile-Based Downscaling of Precipitation using Genetic Programming: Application to IDF Curves in the City of Saskatoon**. *Journal of Hydrologic. Engineering*, v. 19, n. 5, p. 943-955

IPCC, 2007: **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor e H.L. Miller (Ed.)].

IPCC, 2012: **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi,

M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC. Summary for Policymakers. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

KANG, D.; LANSEY, K. (2013) **Scenario-Based Robust Optimization of Regional Water and Wastewater Infrastructure**. J. Water Resour. Plann. Manage. 139:325-338.

KARAMOUZ, M.; HOSSEINPOUR, A.; NAZIF, S. (2011) **Improvement of Urban Drainage System Performance under Climate Change Impact: Case Study**. Journal of hydrologic engineering. 16:395-412.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em excel**. 2ª ed. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2004. 384p.

MAILHOT, A.; DUCHESNE, S. (2010) **Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change**. Journal Of Water Resources Planning And Management. 136:201-208.

MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H. S.; ZEE, D. M. W. (2013). Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. FBDS, 76p.

MIRHOSSEINI, G.; SRIVASTAVA, P.; STEFANOVA, L. (2013) **The impact of climate change on rainfall Intensity–Duration– Frequency (IDF) curves in Alabama**. Regional Environmental Change, Volume. 13, n. S1, pp. 25–33

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 5ª edição. Rio de Janeiro: ABES, 2012. 524p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 552p.

OECD (2015), Environment at a Glance 2015: OECD Indicators, OECD Publishing, Paris.

OECD (2016), Water Governance in Cities: Policy Highlights.

O POVO. **Por que tantos casos de alagamento no Papicu?** Fortaleza, 06 de janeiro de 2015. Disponível em: <<http://www.opovo.com.br/app/opovo/cotidiano/2015/01/06/noticiasjornalcotidiano,3372357/por-que-tantos-casos-de-alagamento-no-papicu.shtml>>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2016.

PHILLIP, R. (2011). Kit de Treinamento SWITCH: **Gestão Integrada das Águas na Cidade do Futuro. Módulo 4 – MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS: Explorando opções**. 1ª Edição. São Paulo, 54p.

PHILLIP, R.; ANTON, B.; STEEN, P. V. D. (2011). **Kit de Treinamento SWITCH: Gestão Integrada das Águas na Cidade do Futuro. Módulo 1 – Planejamento estratégico: Preparando-se para o futuro.** 1ª Edição. São Paulo, 53p.

OLSSON, J.; AMAGUCHI, H.; ALSTERHAG, E.; DÅVERHÖG, M.; ADRIAN, P.; KAWAMURA, A. (2013). “**Adaptation to climate change impacts on urban storm water: A case study in Arvika, Sweden.**” *Clim. Change*, 116(2), 231–247.

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. (2014). **Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves under Climate Change.** *Water Resour Manage* 28, pp. 2539–2562.

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. P. (2014). **Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de são paulo sob efeito de mudanças climáticas.** *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 19, n.4, pp. 176-185.

SCHARFFENBERG, W. A. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS.** User’s Manual, 2013.

SHS-NORDESTE – Consultoria e Projetos (1995). **Diagnóstico do sistema de macrodrenagem do Riacho Tauapé (Sub-Bacia B-1).**

SILVA, F. O. E.; JÚNIOR, F. F. R. P.; CAMPOS, J. N. B. (2013). **Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC.** *Revista DAE*, edição 192, 30 pp. 48-59.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; COSTA, A. C.; CABRAL, S. L. (2013) **Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região nordeste do brasil, amazônia e bacia do prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5.** *RBMET – Revista Brasileira de Meteorologia*, Volume 28, n. 3, pp. 317-330.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V.; (2016) **Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura.** *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 21, n.2, pp. 416-428.

SOUZA FILHO, F.A.; ARAÚJO, C.B.C; **Projeto: Análise da Drenagem Urbana de Fortaleza. Relatório Final.** Fortaleza, 2016. 56p.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. (2014). **Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves under Climate Change.** *Water Resour Manage* 28, pp. 2539–2562.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SLOBODAN P. SIMONOVIC. (2015) **Computerized Tool for the Development of Intensity-Duration-Frequency Curves under a Changing Climate.** Technical Manual. London, Ontario, Canada: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, 2011. Water Resources Research. Report no. 089.

TAYLOR, K. E., R. J.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. (2012). **An overview of CMIP5 and the experiment design**, Bull. Am. Meteorol. Soc., 93, 485–498.

TRIBUNA DO CEARÁ. **Chuva em Fortaleza derruba várias árvores, e carros flutuam em ruas alagadas**. Fortaleza, 20 de fevereiro de 2016. Disponível em: <<http://tribunadoceara.uol.com.br/noticias/cotidiano-2/chuva-em-fortaleza-derruba-varias-arvores-e-carros-flutuam-em-ruas-alagadas/>>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2016.

TUCCI, C. E. M. (organizador). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, UFRGS. EDUSP/ABRH, 1993. 943p.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (organizadores). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995. 428p.

UNISDR, 2009. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland.

VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; ROSE, S. K. **The representative concentration pathways: an overview**. Climatic Change, v. 109, n. 1-2, p. 5–31, 2011.

WILKEN, P. S. **Engenharia de Drenagem Superficial**. São Paulo: CETESB, 1978. 477p.

ZHOU, Q. (2012). **Urban drainage design and climate change adaptation decision making**. 94p. PhD Thesis. DTU, Environment Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark

APÊNDICE A – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE TOMADA DE DECISÃO

Critério Maximax ou Minimin

Tabela 47 – Exemplo de aplicação critério maximax ou minimin

Alternativa	Cenários			Lucro Máximo	Custo Mínimo
	1	2	3		
A	15	18	20	20	15
B	10	15	12	15	10
C	18	15	10	18	10
D	16	19	17	19	16

Na Tabela 47, temos um exemplo do critério do maximax (ou minimin), no caso de maximização dos lucros a alternativa A é a mais adequada. Entretanto, no caso de minimização de custos, as alternativas B ou C devem ser escolhidas.

Critério Maximin ou Minimax

Tabela 48 – Exemplo de aplicação do critério maximin ou minimax

Alternativa	Cenários			Lucro Máximo	Custo Mínimo
	1	2	3		
A	15	18	20	15	20
B	10	15	12	10	15
C	18	15	10	10	18
D	16	19	17	16	19

No exemplo da Tabela 48, se o problema for de maximização de lucros, a melhor opção será a alternativa D. Caso o problema seja de minimização de custos, deverá optar-se pela alternativa B.

Critério do Valor Esperado

Tabela 49 – Exemplo de aplicação do critério de valor esperado

	Cenários			Valor Esperado	
Probabilidades	25,00%	25,00%	50,00%		
Alternativa	1	2	3		
A	15	18	20	18,25	Lucro máximo
B	10	15	12	12,25	Custo mínimo
C	18	15	10	13,25	
D	16	19	17	17,25	

Nesse exemplo Tabela 49, observa-se que o lucro máximo será obtido pela alternativa A, enquanto o custo mínimo será oriundo da implantação da alternativa B.

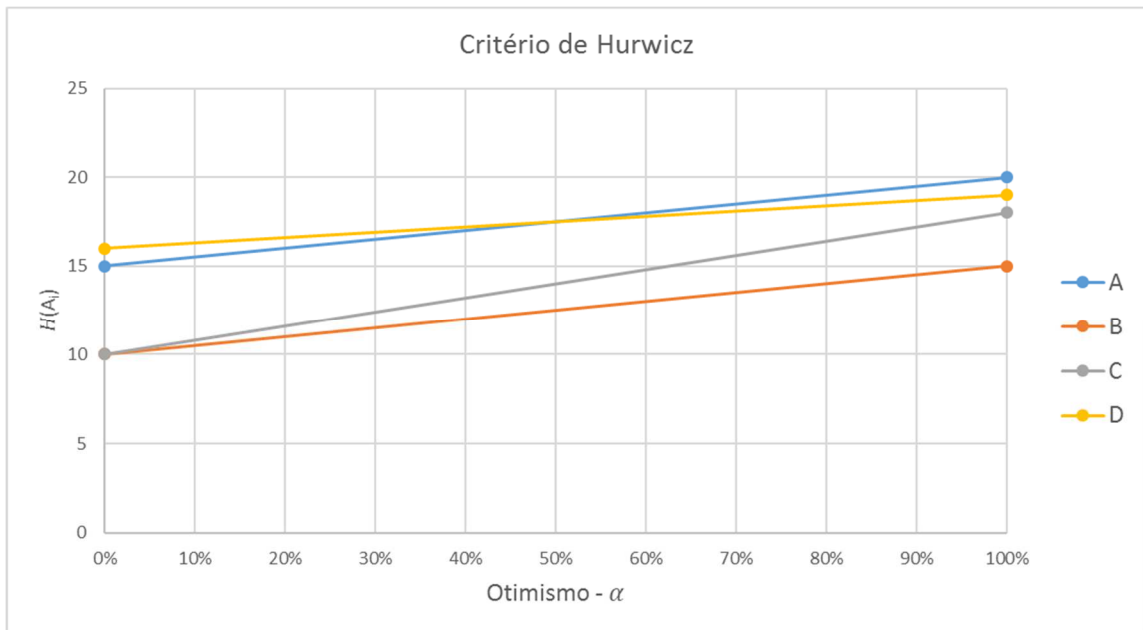
Critério de Hurwicz

Tabela 50 – Exemplo de aplicação do critério de Hurwicz

	Cenários			Valor esperado máximo	Valor esperado mínimo	Hurwicz
Alternativa	1	2	3			
A	15	18	20	20	15	15,5
B	10	15	12	15	10	10,5
C	18	15	10	18	10	10,8
D	16	19	17	19	16	16,3

Aplicando o critério de Hurwicz no exemplo da Tabela 50, e considerando o valor do coeficiente de otimismo de 10%, percebe-se que a alternativa D apresenta o maior valor.

Figura 65 – Comportamentos dos cenários em função da variação do coeficiente de otimismo



A Figura 65 exprime com clareza qual cenário deve ser escolhido de acordo com o coeficiente de otimismo adotado. Caso adotemos um otimismo de menor que 50%, a alternativa D é a mais vantajosa. Contudo, se o coeficiente de otimismo for superior a 50% deve-se optar pela alternativa A.

Critério de Savage

Tabela 51 – Exemplo de aplicação do critério de Savage (Maximização de lucro)

Alternativa	Cenários			Arrependimento			Arrependimento Máximo
	1	2	3				
A	15	18	20	3	1	0	3
B	10	15	12	8	4	8	8
C	18	15	10	0	4	10	10
D	16	19	17	2	0	3	3
Lucro máximo	18	19	20				

No caso da maximização de lucros, exemplificado na Tabela 51, temos que as melhores escolhas a serem realizadas são as alternativas A e D. Pois, apresentaram os menores arrependimentos máximos.

Tabela 52 – Exemplo de aplicação do critério de Savage (Minimização de custo)

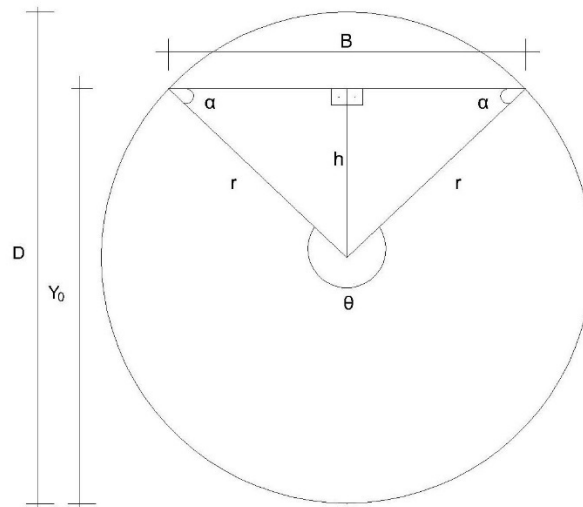
Alternativa	Cenários			Arrependimento			Arrependimento Mínimo
	1	2	3				
A	15	18	20	5	3	10	10
B	10	15	12	0	0	2	2
C	18	15	10	8	0	0	8
D	16	19	17	6	4	7	7
Custo mínimo	10	15	10				

Na Tabela 52, tem-se um caso de minimização de custos, onde o primeiro passo da resolução do problema seria calcular os custos mínimos, e em seguida, os menores arrependimentos máximos. No problema descrito, utilizando-se o critério do mínimo arrependimento, deve-se escolher a alternativa B, devido ao fato de apresentar o menor arrependimento futuro.

APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Considerando uma seção circular, pode-se facilmente deduzir as equações que exprimem os valores da área molhada, perímetro molhado e raio hidráulico. Fatores que são essenciais no dimensionamento de redes de drenagem de águas pluviais.

Figura 66 – Conduto de seção circular



Sabendo que a lei dos senos é representada por:

$$\frac{a}{\text{sen } A} = \frac{b}{\text{sen } B} = \frac{c}{\text{sen } C} \quad (48)$$

Pode-se relacionar as variáveis Figura 66 com os valores referentes ao diâmetro dos condutos e ao ângulo θ .

Primeiramente, deduz-se o valor da variável B .

$$\frac{\frac{B}{2}}{\text{sen} \left(\frac{360 - \theta}{2} \right)} = \frac{r}{\text{sen} (90)} \therefore \frac{B}{2} = r \cdot \text{sen} \left(\frac{360 - \theta}{2} \right) \therefore B = D \cdot \text{sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (49)$$

De forma análoga, calcula-se o valor de h .

$$\begin{aligned} \frac{h}{\operatorname{sen}(\alpha)} &= \frac{r}{\operatorname{sen}(90)} \therefore h \cdot \operatorname{sen}(90) = r \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2} - 90\right) \therefore h \\ &= r \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2} - 90\right) \end{aligned} \quad (50)$$

Conhecendo a seguinte identidade trigonométrica:

$$\operatorname{sen}(a \pm b) = \operatorname{sen} a \cdot \cos b \pm \operatorname{sen} b \cdot \cos a \quad (51)$$

Aplicando a equação (51) em (50), obtém-se:

$$\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2} - 90\right) = \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos(90) - \operatorname{sen}(90) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = -\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (52)$$

Dessa forma, obtém-se uma nova expressão para a equação (50):

$$h = -r \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = -\frac{D}{2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (53)$$

Conhecendo-se as equações referentes às variáveis B e h , é possível obter a equação que exprime o valor total da área molhada da seção. Primeiramente, calcula-se a área triangular referente à Figura 66 que será denominada de A_{TRI} .

$$A_{TRI} = \frac{B \cdot h}{2} = \frac{\left(D \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \cdot \left(-\frac{D}{2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)}{2} = -\frac{D^2}{4} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (54)$$

Sabendo-se que existe a seguinte identidade trigonométrica:

$$\operatorname{sen}(2\theta) = 2 \cdot \operatorname{sen}(\theta) \cdot \cos(\theta) \therefore \frac{\operatorname{sen}(2\theta)}{2} = \operatorname{sen}(\theta) \cdot \cos(\theta) \quad (55)$$

Substituindo a equação (55) em (54), obtém-se:

$$A_{TRI} = -\frac{D^2}{4} \cdot \frac{\operatorname{sen}(\theta)}{2} = -\frac{D^2}{8} \cdot \operatorname{sen}(\theta) \quad (56)$$

Em seguida, calcula-se a área relativa à abrangência do ângulo θ , que foi denominada de A_θ .

$$A_\theta = \frac{\theta \cdot r^2}{2} = \frac{\theta \cdot D^2}{8} \quad (57)$$

A área molhada total, que será denominada de A_M , pode ser obtida a partir da soma da área relativa à abrangência do ângulo θ e da área triangular presente na Figura 66, da seguinte maneira:

$$A_M = A_{TRI} + A_\theta = \left(-\frac{D^2}{8} \cdot \text{sen}(\theta) \right) + \left(\frac{\theta \cdot D^2}{8} \right) = D^2 \cdot \left(\frac{\theta - \text{sen}(\theta)}{8} \right) \quad (58)$$

O perímetro molhado da seção circular, representado por P_M , é dado por:

$$P_M = \frac{\theta D}{2} \quad (59)$$

De posse das equações referentes à área molhada da seção e do perímetro molhado, pode-se calcular o seu raio hidráulico (R_H) a partir da equação (60):

$$R_H = \frac{A_M}{P_M} = \frac{D^2 \cdot \left(\frac{\theta - \text{sen}(\theta)}{8} \right)}{\frac{\theta D}{2}} = \frac{D}{4\theta} \cdot (\theta - \text{sen}(\theta)) = \frac{D \cdot \left(1 - \frac{\text{sen}(\theta)}{\theta} \right)}{4} \quad (60)$$

A altura total da lâmina d'água é calculada por:

$$Y_0 = \frac{D}{2} + h = \frac{D}{2} + \left(-\frac{D}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \right) = \frac{D - D \cdot \cos \frac{\theta}{2}}{2} = D \cdot \left(\frac{1 - \cos \frac{\theta}{2}}{2} \right) \quad (61)$$

Desenvolvendo a equação (61), encontramos o valor do ângulo θ :

$$\theta = 2 \text{ arc cos} \left(\frac{1 - 2Y_0}{D} \right) \quad (62)$$

APÊNDICE C – DADOS DO PLUVIÓGRAFO DA UFC

Na Tabela 53 temos os dados referentes às chuvas máximas registradas pelo pluviógrafo da UFC.

Tabela 53 – Dados do pluviógrafo da UFC

ANO	TOTAL ANUAL (mm)														1 dia (mm)
		5min (mm)	10min (mm)	15min (mm)	20min (mm)	25min (mm)	30min (mm)	60min (mm)	120min (mm)	360min (mm)	720min (mm)	1080min (mm)	1440min (mm)		
1970	642,8	5,0	10,0	13,8	15,0	17,5	20,0	34,0	42,0	65,4	81,9	86,3	86,4	86,3	
1971	1.773,9	7,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	87,9	142,0	147,7	147,7	148,5	148,5	
1972	1.145,3	6,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	36,0	37,4	50,0	57,4	57,4	57,4	57,4	
1973	1.727,5	6,4	10,5	15,0	20,0	25,0	30,0	31,7	47,7	75,3	91,8	95,1	103,5	85,6	
1974	1.852,5	5,8	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	44,0	62,0	108,5	123,4	123,4	123,4	123,4	
1975	1.445,2	9,2	13,0	18,0	23,0	27,0	31,0	36,8	37,4	56,4	56,4	58,2	63,6	56,4	
1976	1.117,8	5,0	10,0	14,7	19,0	20,2	20,7	26,3	32,0	67,4	87,2	91,2	91,2	90,4	
1977	1.291,0	8,3	13,0	18,0	22,0	27,0	31,0	59,0	77,0	84,7	85,4	85,4	85,4	85,4	
1978	1.084,6	10,0	14,0	16,0	21,0	25,0	30,0	46,0	69,6	110,0	110,0	110,0	110,7	110,0	
1979	1.016,7	6,2	10,0	15,0	20,0	22,0	24,0	27,5	39,5	55,3	64,6	67,0	69,4	64,6	
1980	974,7	11,0	11,0	15,0	20,0	25,0	30,0	41,0	55,8	70,4	93,5	93,5	93,5	88,3	
1981	881,6	7,0	12,0	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	65,0	85,3	85,3	91,8	95,3	80,3	
1982	1.086,9	16,0	20,0	26,7	32,7	36,0	42,7	47,1	47,1	52,0	55,5	59,0	63,4	55,5	
1983	934,7	15,0	19,0	23,5	23,5	24,5	35,0	41,5	47,8	66,8	75,2	78,1	81,9	66,8	
1984	1.936,7	13,8	16,0	21,0	24,5	28,5	30,5	36,0	59,3	82,0	85,5	85,5	100,6	85,5	
1985	2.755,7	18,3	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	66,2	69,3	85,0	110,4	113,7	140,7	113,7	
1986	1.898,3	8,3	13,3	18,3	20,8	25,0	30,0	40,0	55,3	86,1	107,9	108,3	113,0	103,8	
1987	1.227,2	7,4	10,0	15,0	20,0	23,5	26,0	36,5	47,5	82,5	83,8	95,4	102,9	83,8	
1988	1.767,8	7,8	12,8	17,8	22,8	27,8	32,8	55,0	62,7	91,5	117,0	117,0	117,0	117,0	
1989	1.760,0	7,3	10,0	12,8	15,0	18,7	19,5	27,7	38,4	62,6	65,7	65,7	78,1	65,7	
1990	921,1	9,5	10,5	12,5	15,5	17,0	18,5	28,0	37,3	50,3	57,5	57,5	57,5	57,5	
1991	1.440,8	9,8	15,9	20,1	24,1	26,6	29,5	47,1	71,1	102,8	104,4	110,5	112,7	109,4	
1992	1.028,1	6,0	9,2	11,2	14,5	17,3	20,3	33,6	46,3	60,4	79,7	79,7	79,7	76,7	
1993	919,6	8,6	13,1	19,0	24,5	26,5	28,5	38,5	63,6	82,5	103,5	116,6	116,6	102,4	
1994	2.297,6	9,7	19,3	22,0	26,2	28,2	30,7	51,5	66,2	73,7	89,8	90,2	97,6	96,1	
1995	2.047,6	10,4	19,4	29,1	38,7	48,3	57,9	73,9	89,6	164,4	171,2	171,2	174,5	164,6	
1996	1.160,6	7,2	10,0	15,0	20,0	25,0	27,5	42,0	53,0	60,7	80,6	81,0	85,4	80,7	
1997	888,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	90,0	137,1	212,9	237,7	238,5	238,5	238,5	
1998	1.020,7	5,6	10,2	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	79,0	80,9	81,9	81,9	81,9	81,9	
1999	1.225,3	6,7	11,0	15,0	20,0	24,8	28,6	31,3	38,5	63,5	66,6	84,1	95,2	80,5	

APÊNDICE D – DADOS DOS MODELOS GCM

Tabela 54 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo inmcm4 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5

ANOS	SÉRIE HISTORICAL	ANOS	CENÁRIO RCP 4,5	CENÁRIO RCP 8,5
1970	19,92	2070	25,39	19,28
1971	23,17	2071	20,85	23,42
1972	20,89	2072	25,08	17,81
1973	25,34	2073	19,05	19,85
1974	18,22	2074	22,03	17,07
1975	17,28	2075	20,16	22,59
1976	22,31	2076	19,00	23,16
1977	18,29	2077	19,64	19,81
1978	24,04	2078	18,29	18,32
1979	17,85	2079	21,26	19,99
1980	18,06	2080	18,06	19,00
1981	17,88	2081	19,48	21,03
1982	18,02	2082	17,85	19,57
1983	22,30	2083	18,25	23,40
1984	19,88	2084	15,64	16,97
1985	22,25	2085	17,62	21,54
1986	17,94	2086	20,58	17,85
1987	18,74	2087	19,27	20,45
1988	21,25	2088	23,21	19,28
1989	17,51	2089	21,53	21,58
1990	22,04	2090	20,06	19,04
1991	20,68	2091	21,34	18,79
1992	19,03	2092	19,29	18,98
1993	20,71	2093	35,37	21,11
1994	19,83	2094	23,10	17,87
1995	19,71	2095	19,48	18,19
1996	18,55	2096	19,62	20,65
1997	19,03	2097	17,62	18,05
1998	19,47	2098	20,26	20,11
1999	18,38	2099	18,92	21,68

Tabela 55 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo bcc_csm1 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5

ANOS	SÉRIE HISTORICAL	ANOS	CENÁRIO RCP 4,5	CENÁRIO RCP 8,5
1970	289,00	2070	129,70	173,10
1971	93,30	2071	133,20	116,90
1972	164,90	2072	137,80	129,50
1973	170,40	2073	122,50	146,00
1974	240,40	2074	126,80	156,80
1975	206,50	2075	173,60	216,10
1976	226,50	2076	97,70	102,90
1977	211,90	2077	136,00	139,70
1978	148,90	2078	110,50	132,90
1979	127,50	2079	126,90	155,30
1980	182,20	2080	117,30	127,90
1981	149,50	2081	133,00	148,90
1982	123,40	2082	95,70	148,60
1983	114,50	2083	161,40	129,70
1984	89,40	2084	107,90	168,60
1985	99,50	2085	143,90	105,50
1986	55,80	2086	88,40	181,40
1987	147,00	2087	150,00	200,90
1988	142,00	2088	113,60	118,30
1989	228,80	2089	103,80	125,10
1990	203,20	2090	152,00	113,80
1991	220,80	2091	110,10	150,30
1992	123,00	2092	97,60	127,90
1993	173,80	2093	163,30	120,90
1994	141,10	2094	128,40	121,90
1995	137,50	2095	105,00	168,00
1996	228,10	2096	132,40	139,70
1997	136,00	2097	134,50	128,30
1998	107,90	2098	87,20	84,80
1999	136,20	2099	206,80	113,70

Tabela 56 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo CCSM4 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5

ANOS	SÉRIE HISTORICAL	ANOS	CENÁRIO RCP 4,5	CENÁRIO RCP 8,5
1970	25,70	2070	93,90	44,90
1971	46,10	2071	43,10	89,20
1972	43,70	2072	57,30	57,60
1973	65,70	2073	49,90	42,70
1974	32,00	2074	57,20	102,30
1975	52,50	2075	56,60	140,40
1976	50,40	2076	66,80	112,50
1977	97,40	2077	45,90	50,20
1978	51,90	2078	31,70	59,30
1979	154,60	2079	36,90	102,40
1980	118,30	2080	118,70	109,00
1981	56,00	2081	53,20	44,30
1982	28,50	2082	57,90	101,70
1983	61,20	2083	198,30	42,10
1984	38,10	2084	54,10	91,40
1985	48,90	2085	19,80	27,40
1986	120,50	2086	26,00	51,80
1987	107,30	2087	69,00	137,20
1988	58,30	2088	48,20	98,90
1989	84,30	2089	64,50	83,00
1990	85,00	2090	52,50	96,80
1991	82,60	2091	61,70	49,20
1992	34,50	2092	34,50	53,60
1993	43,40	2093	127,00	109,00
1994	68,50	2094	101,90	36,30
1995	34,10	2095	48,00	33,90
1996	58,50	2096	45,00	160,90
1997	44,00	2097	50,80	136,40
1998	74,80	2098	42,60	55,00
1999	82,50	2099	128,90	56,40

Tabela 57 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo CanESM2 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5

ANOS	SÉRIE HISTORICAL	ANOS	CENÁRIO RCP 4,5	CENÁRIO RCP 8,5
1970	20,40	2070	15,14	24,90
1971	15,75	2071	19,42	24,70
1972	84,29	2072	20,50	34,70
1973	41,71	2073	47,80	28,20
1974	41,98	2074	23,04	16,30
1975	31,15	2075	25,35	47,90
1976	35,75	2076	27,73	44,60
1977	15,03	2077	7,97	26,80
1978	72,25	2078	44,59	8,70
1979	54,45	2079	64,36	33,10
1980	38,35	2080	31,83	28,70
1981	20,02	2081	38,61	77,50
1982	17,95	2082	50,68	26,40
1983	15,49	2083	35,44	57,40
1984	19,56	2084	17,56	16,40
1985	22,56	2085	67,97	27,70
1986	69,15	2086	18,27	91,10
1987	70,93	2087	29,54	29,30
1988	39,85	2088	58,34	80,30
1989	17,97	2089	17,57	81,30
1990	23,78	2090	15,46	39,40
1991	72,18	2091	30,91	24,90
1992	45,35	2092	38,60	54,30
1993	12,24	2093	15,66	86,70
1994	10,78	2094	50,95	29,70
1995	35,93	2095	17,34	52,50
1996	35,02	2096	45,28	39,00
1997	62,40	2097	20,96	50,00
1998	53,27	2098	31,12	13,00
1999	24,09	2099	51,29	36,00

Tabela 58 – Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo MIROC5 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5

ANOS	SÉRIE HISTORICAL	ANOS	CENÁRIO RCP 4,5	CENÁRIO RCP 8,5
1970	21,79	2070	21,85	29,00
1971	21,99	2071	24,64	22,76
1972	21,22	2072	24,03	23,98
1973	46,98	2073	30,17	27,05
1974	31,74	2074	44,95	26,05
1975	22,99	2075	30,42	24,08
1976	24,36	2076	43,12	27,56
1977	22,08	2077	24,14	23,47
1978	26,57	2078	23,22	23,55
1979	26,28	2079	28,34	21,26
1980	34,95	2080	33,51	41,99
1981	23,61	2081	35,69	28,59
1982	28,60	2082	25,48	17,99
1983	36,32	2083	20,43	25,82
1984	35,72	2084	17,50	33,60
1985	43,01	2085	26,53	20,99
1986	27,71	2086	49,26	22,39
1987	25,38	2087	36,49	41,13
1988	34,11	2088	38,73	28,86
1989	29,44	2089	28,52	41,26
1990	28,74	2090	23,65	29,63
1991	21,18	2091	22,28	22,09
1992	22,85	2092	31,65	21,49
1993	18,57	2093	27,02	22,85
1994	26,97	2094	33,45	19,31
1995	35,55	2095	36,31	20,70
1996	29,66	2096	21,92	22,46
1997	28,53	2097	18,94	29,24
1998	19,08	2098	35,56	26,42
1999	44,52	2099	27,52	16,29

Tabela 59 - Chuvas máximas diárias geradas pelo modelo CESM1-CAM5 referentes à série historical, cenários RCP 4,5 e RCP 8,5

ANOS	SÉRIE HISTORICAL	ANOS	CENÁRIO RCP 4,5	CENÁRIO RCP 8,5
1970	33,20	2070	117,80	152,60
1971	35,00	2071	152,60	56,00
1972	38,10	2072	71,50	191,60
1973	82,20	2073	45,90	84,30
1974	26,20	2074	38,10	42,10
1975	40,50	2075	120,80	100,50
1976	181,20	2076	50,60	52,40
1977	31,00	2077	38,00	34,20
1978	35,50	2078	91,70	211,70
1979	31,10	2079	54,80	134,00
1980	43,70	2080	58,50	37,90
1981	129,10	2081	73,90	104,20
1982	61,00	2082	41,20	193,60
1983	27,40	2083	68,50	127,70
1984	25,50	2084	33,60	253,00
1985	34,40	2085	107,30	106,30
1986	61,90	2086	112,30	101,10
1987	90,00	2087	58,50	182,10
1988	89,10	2088	82,20	57,60
1989	56,20	2089	36,00	219,70
1990	75,50	2090	69,40	110,20
1991	57,10	2091	31,10	57,90
1992	107,00	2092	131,30	188,60
1993	31,30	2093	150,70	187,20
1994	32,90	2094	32,40	156,80
1995	42,60	2095	101,00	35,60
1996	56,80	2096	96,10	84,60
1997	23,50	2097	38,80	202,60
1998	42,10	2098	94,70	202,80
1999	94,40	2099	134,80	43,40