



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO CABRAL DA SILVA

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PLUVIOSIDADE DA REGIÃO
METROPOLITANA DE RECIFE

Recife

2018

EDUARDO CABRAL DA SILVA

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PLUVIOSIDADE DA REGIÃO
METROPOLITANA DE RECIFE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisitos parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S586v Silva, Eduardo Cabral da.
Viabilidade espaço-temporal da pluviosidade da região metropolitana de Recife / Eduardo Cabral da Silva - 2018.
115folhas, Il.; Tabs.; Abrev.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Chuvas intensas. 3. Relação intensidade-duração-frequência. 4. Posição geográfica. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2019 - 012

EDUARDO CABRAL DA SILVA

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PLUVIOSIDADE DA REGIÃO
METROPOLITANA DE RECIFE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisitos parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Aprovada em: 20/02/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcus Metri Correa (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Paulo Frassinete de Araújo Filho (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

As minhas mães, Cícera Cabral e Jandira Feijó, ao meu pai, Ivanildo Cabral, que sempre serão os meus maiores exemplos de vida; a minha esposa e ao meu filho, Luciana de Omena Gusmão e Guilherme de Omena Cabral, por todo o amor, carinho e compreensão DEDICO.

Aos meus amados irmãos e irmãs João Roberto Cabral, Maria das Graça Cabral, Ricardo Cabral e Silvana Cabral e a todos os meus familiares OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Luciana de Omena Gusmão, por todo amor, carinho, compreensão e ajuda prestada em todos os momentos da nossa caminhada.

Ao meu filho, Guilherme de Omena Cabral, por todo carinho, amor e momentos de descontração.

As minhas duas mães, Cícera Cabral da Silva e Jandira Feijó Cavalcanti, por ter me acolhido desde o meu nascimento e ter me dado todo o amor e carinho que todo ser humano desejaria ter, a vocês duas, toda a minha gratidão.

Ao meu pai, Ivanildo Cabral Feijó, o homem que mais admiro na vida, não pelo seu conhecimento em física, matemática ou engenharia, mas justamente, por desconhecer as ciências e a pedagogia e ser um grande educador.

Aos meus irmãos e irmãs, Ricardo Cabral da Silva, João Roberto Cabral da Silva, Maria das Graças Cabral da Silva e Silvana Cabral da Silva, que acumularam a função de pais e mães e me orientam constantemente e cautelosamente com muito amor e carinho.

Aos meus sobrinhos Amarílis da Silva Cabral, Gabriel Cabral Carvalho da Silva, Maria Clara da Silva Cabral, Natália Sobral da Silva e Tiago Cabral Carvalho da Silva pela colaboração e momentos de descontração.

Ao meu cunhado José Carlos Carvalho da Silva, mais um pai que me abençoou em toda a minha vida com seus conselhos e ensinamentos.

A minhas cunhadas Maria de Fátima da Silva e Núbia Roberta Sobral pelo apoio, conselhos e momentos de descontração.

Aos meus tios José Cabral, Arnaldo Cabral, Antônio Cabral e Luís Cabral pelo carinho, incentivo e momentos de descontração.

A meu sogro e a minha sogra, José de Gusmão Cabral e Carmen Lúcia de Omena Gusmão, por todo o amor, acolhimento e conselhos. Deus me presenteou com mais um lar e pais maravilhosos, muita gratidão.

Aos meus primos e cunhados José Lucas de Omena Gusmão e Rubiana de Omena Moreno Gusmão da Rocha pelo companheirismo, conselhos e momentos de descontração.

A todos os demais familiares que contribuíram para a minha formação.

Aos colegas do GRH pelo companheirismo e momentos de descontração nesse longo trajeto, em especial a Ana Cláudia Villar, Albert Einstein Espíndola, Alzira Gabrielle Soares Saraiva Souza, Felipe Alcântara, Jussara Freire, Larissa Ferreira David Romão Batista, Pedro Oliveira, Tatiane Barbosa Veras de Albuquerque, Valdemar Corrêa, Victor Hugo Coelho, José Yure Gomes.

Ao Prof. Antônio Celso Dantas Antonino por me recepcionar e acolher na UFPE. Por me encaminhar ao GRH, pela amizade e conhecimentos transmitidos. Muita gratidão por tudo.

A Prof.^a Suzana Maria Gico Lima Montenegro pela oportunidade em trabalhar em um de seus projetos e por me acolher no GRH.

Ao Prof. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, meu pai orientador, pelos planejamentos realizados, conselhos dados e inúmeros conhecimentos transmitidos. É uma honra imensurável aprender, conviver e trabalhar ao lado um profissional de tamanha dedicação e detentor de extraordinário conhecimento.

Ao Professor José Roberto Gonçalves de Azevedo pela amizade, conhecimento transmitido, cooperação na execução do trabalho e por aceitar fazer parte da comissão avaliadora.

A Prof.^a. Leijdane pelo apoio de sempre, amizade e conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Paulo Frassinete de Araújo Filho pelos ensinamentos, companheirismo e por aceitar fazer parte da comissão avaliadora.

Ao Prof. Marcus Metri pela amizade, companheirismo e por aceitar fazer parte da comissão avaliadora.

Ao Prof. Alfredo Ribeiro Neto pelos ensinamentos em SIG, companheirismo e por aceitar fazer parte da comissão avaliadora.

Aos professores do GRH, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva e Sylvana Melo dos Santos por todo o conhecimento transmitido e companheirismo.

Aos funcionários do GRH e da Pós em Engenharia Civil, Janaina (Jana), Kildare Carvalho de Quiroz, Severino Lopes da Silva Filho, Simone Maria Soares Ferreira, Andréa Negromonte Vieira Matoso, Claudiana de Araújo Pereira e Jecicleide Luckwu Marques pela grande contribuição direta ou indireta para a execução desse trabalho.

Ao Prof. Anildo Monteiro Caldas pela amizade, colaboração e momentos de descontração.

Ao Prof. André Maciel Netto pelos ensinamentos em geoestatística.

Aos colegas de longas datas, Ronabson Cardoso Fernandes, André Luiz de Carvalho e Antônio Marcos Vianna, pela colaboração em todos os momentos da minha vida acadêmica.

Aos amigos Helton José dos Santos Golveia e Jarcicleide de Oliveira Golveia pelas grandes contribuições na aquisição de dados junto a APAC e a CPRM, assim como, pela grande amizade.

Ao meu orientado de graduação em Engenharia Civil pelo Centro Universitário do Vale do Ipojuca – UNIFAVIP, Felipe Alves de Lima pela contribuição no desenvolvimento dos trabalhos relacionados as chuvas intensas.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE e a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC pelas bolsas concedidas.

Aos companheiros da APAC Thiago, Romilson, Fabiano, Rony, Vinícius e Patrice pelo suporte e companheirismo.

RESUMO

A Região Metropolitana de Recife (RMR) é composta de 15 municípios, com população estimada para 2017 de 4.044.948 habitantes, dos quais 97% vivem em áreas urbanas. Devido a sua localização geográfica a RMR recebe inúmeros sistemas meteorológicos de grande escala, responsáveis pelos altos totais pluviométricos anuais e por ocasionar os fenômenos de chuvas intensas. Aliado aos problemas inerentes a acelerada urbanização, a RMR tem 75% do seu território composto de morros, o que reflete em diversos problemas de enchentes e deslizamento de massa. A necessidade de uma nova organização do uso e ocupação do solo, assim como, de medidas estruturais e não estruturais na RMR é clara e evidente, no entanto, é necessário que existam estudos que apontem os caminhos para o planejamento e as tomadas de decisões. Por meio do presente trabalho objetiva estudar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica, chuvas intensas e relação de intensidade-duração-frequência (IDF) e suas relações com o relevo, urbanização e as mudanças climáticas. A metodologia incluiu a coleta de dados pluviométricos, realização do tratamento dos dados, tratamento estatístico, espacialização e análise dos resultados. O período avaliado no estudo da variabilidade espacial da chuva e sua relação com o relevo, assim como, para as relações IDF foi de 2003 a 2013. Nessas etapas foram consideradas a RMR e sua área circunvizinha. Os estudos sobre eventos extremos ficaram restritos ao período 2010 a 2016 devido a indisponibilidade de dados com espacialização e discretização requeridas. Os resultados apontam que existem grande variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica na RMR e, que esta, encontra-se fortemente relacionada ao relevo, principalmente no período mais seco da região – outubro a dezembro. O desenvolvimento das equações de chuvas intensas para os municípios da RMR permitiu a conclusão que existe grande heterogeneidade das relações IDF, não sendo portanto, recomendado a utilização de uma única equação de chuvas intensas para toda a RMR. O estudo com dados diários de precipitação entre 2003 e 2013, ainda permitiu a conclusão que os maiores valores das médias dos totais anuais de precipitação ocorreram na cidade de Recife, enquanto, os máximos anuais ocorreram no município de Cabo de Santo Agostinho. As observações dos fenômenos de chuvas intensas na RMR,

permitiu observar que a variabilidade interanual dos totais pluviométricos relaciona-se de forma similar com a ocorrência dos eventos extremos, ou seja, nos anos de maiores totais pluviométricos anuais, observa-se maior incidência de eventos extremos, enquanto, nos anos de baixos totais pluviométricos anuais observa-se um número reduzido de eventos de chuvas intensas. Para os anos observados, ocorreram 179 eventos que ultrapassaram 50,0 mm de chuva em 24h, destacando-se os anos de 2011 e 2012, por apresentarem o maior e o menor número de eventos extremos, respectivamente.

Palavras-chave: Chuvas intensas. Relação de intensidade-duração-frequência. Posição geográfica.

ABSTRACT

The Metropolitan Region of Recife (Recife Metropolitan Region - RMR) is composed of 15 counties, with an estimated population of 4.044,948 inhabitants, of which 97% lives in urban areas. Due to its geographic location, the RMR receives numerous large-scale meteorological systems, responsible for high annual rainfall levels and for causing intense rainfall phenomena. In addition to the problems resulted by the accelerated urbanization, the RMR has 75% of its territory composed of hills, which reflects in several problems of flooding and landslide. The necessity of a new organization for the soil's use and occupation, as well as structural and non-structural measures in the RMR is clear and evident, however, there is a need for studies that point the way to plan and making decisions. The present thesis aims to study the spatial-temporal variability of rainfall, intense rains and intensity-duration-frequency relation (intensidade-duração-frequência - IDF) and its relation with relief, urbanization and climatic changes. The methodology included the collection of rainfall data, the processing of data, processing of statistics, spatialization and analysis of results. The period evaluated in the study of the spatial variability of rainfall and its relation with the relief was from 2003 to 2013, during which the RMR and its surrounding area were considered. For the studies of the IDF relations two series of data were used, the first and broadest one was from 2003 to 2013, due to the greater availability of data, and the second was a discontinuous series of more than 30 years of data, available only for four seasons rainfall in the RMR. The studies on extreme events were restricted to the period 2010 to 2016 due to the unavailability of data with required spatialization and discretization. The results show that there are large spatial and temporal variability of rainfall in RMR and that it is strongly related to relief, especially during the dry season in the region - from October to December. The development of the intense rainfall equations for the counties of RMR allowed the conclusion that there is a great heterogeneity of the IDF relations, and therefore it is not recommended to use a single intense rainfall equation for the entire RMR. The study, with daily precipitation data from 2003 to 2013, still allowed the conclusion that the highest values of the mean annual precipitation totals occurred in the city of Recife, while the annual maximums occurred in the county of Cabo de Santo Agostinho. The observations

of the intense rainfall phenomena in the RMR showed that the interannual variability of rainfall totals is similarly related to the occurrence of extreme events, that is, in the years of greatest annual rainfall, there is a higher incidence of events extremes, while in the years of total annual lower rainfall there is a reduced number of intense rainfall events. For the observed years, 179 events occurred that exceeded 50.0 mm of rain in 24 hours, highlighting the years of 2011 and 2012, as they presented the higher and lower number of extreme events, respectively.

Keywords: Rainfall intense. Intensity-duration-frequency ratios. Geographic position.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	-	Efeitos da urbanização sobre áreas naturais. A – balanço hídricos, B – escoamento e C – resposta da geometria do escoamento.....	33
Figura 2	-	Componentes principais das gestão das águas.....	34
Figura 3	-	Cronologia da Legislação sobre drenagem urbana no Brasil.....	35
Figura 4	-	Estações pluviométricas e pluviográficas, com seus respectivos períodos de dados, utilizadas para obtenção da equação de chuvas intensas do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife.....	42
Figura 5	-	Área de estudo - Região Metropolitana Recife.....	44
Figura 6	-	Postos pluviométricos utilizados para determinação das Equações de Chuvas Intensas.....	56
Figura 7	-	Área de estudo – Região Metropolitana de Recife – RMR - com os limites municipais, Modelo de Elevação do Terreno (m), localização dos postos pluviométricos da Agência Pernambucana de Águas e Clima e do Centro de Alerta e Monitoramento de Desastre Naturais.....	60
Figura 8	-	Variabilidade sazonal da precipitação acumulada média mensal, em mm, utilizando todas as estações em estudo...	
Figura 9	-	Variabilidade espacial mensal da precipitação pluvial, em mm, para a RMR e áreas circunvizinhas.....	70
Figura 10	-	Espacialização anual da precipitação pluviométrica, em mm, da RMR e áreas circunvizinhas.....	71
Figura 11	-	Isolinhas de intensidade máximas de precipitação (mm/h), com duração de 10 minutos e Tr de 2 (a), 5 (b) e 10 (c) anos, geradas através de krigagem para a RMR.....	84
Figura 12	-	Isolinhas de intensidade máximas de precipitação, com duração de 30 minutos e Tr de 2 (a), 5 (b) e 10 (c) anos, geradas através de krigagem para a RMR.....	85
Figura 13	-	Isolinhas de intensidade máximas de precipitação, com duração de 60 minutos e Tr de 2 (a), 5 (b) e 10 (c) anos, geradas através de krigagem para a RMR.....	86

Figura 14 -	Isolinhas dos valores máximos anuais de precipitação (mm/dia) para o período de 2003 a 2013, geradas através de krigagem, para a RMR.....	88
Figura 15 -	Isolinhas das médias dos totais anuais de precipitação, geradas através de krigagem, para a RMR.....	88
Figura 16 -	Variação sazonal da precipitação pluviométrica na Região Metropolitana de Recife para o período de 2010 a 2016.....	89
Figura 17 -	Média dos totais anuais para os 81 postos pluviométricos analisados. A linha contínua simboliza a média climatológica da estação do INMET em Recife e a tracejada a média dos totais anuais para o período de 2010 a 2016 dos 81 postos pluviométricos.....	90
Figura 18 -	Distribuição dos eventos de chuvas intensas ocorridos na Região Metropolitana de Recife entre os anos de 2010 a 2016.....	91
Figura 19 -	Variabilidade espacial da ocorrência dos picos de eventos Altamente Intensos (AI) na RMR para o período compreendido entre 2010 e 2016.....	96
Figura 20 -	Variabilidade Temporal da soma dos totais horários de precipitação para os 64 postos do CEMADEN analisados na RMR no evento de chuva intensa do dia 30 de maio de 2016.....	98
Figura 21 -	Variabilidade espacial das horas mais chuvosas do evento de chuva intensa ocorrido na RMR no dia 30 de maio de 2016 - a) 07:00 às 08:00 (10Z às 11Z); b) 08:00 às 09:00 (11Z às 12Z); c) 09:00 às 10:00 (12Z às 13Z*).....	99
Figura 22 -	Cartas sinóticas de superfície e altitude; imagens de satélite GOES-13 realçada do dia 30 de maio de 2016. A, B e C são cartas sinóticas de altitude a 250 hPa; D, E e F são cartas sinóticas de superfície; G, H e I são imagens de satélite GOES-13 realçada.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Coeficientes de desagregação de chuva obtidos pelo CETESB (1980) e por Silva (2010).....	39
Tabela 2 -	Postos pluviométricos utilizados na presente etapa da pesquisa e para obtenção das curvas IDF.....	50
Tabela 3 -	Valores adotados como precipitações mínimas a serem consideradas como chuvas intensas para cada duração.	57
Tabela 4 -	Classes de eventos extremos de precipitação pluviométrica	61
Tabela 5 -	Coeficientes utilizados para estimativa da precipitação pluvial mensal e anual e, seus respectivos coeficientes EM, EMA, EQM, REMQN, NSE, EV, PBIAS%, D e R2, para a RMR.	65
Tabela 6 -	Valor absoluto do teste de Kolmogorov-Smirnov (D_n , max) para o ajuste da distribuição de Gumbel, para cada duração considerada.	72
Tabela 7 -	Coeficientes das equações de chuvas intensas para os municípios da RMR e áreas circunvizinhas	74
Tabela 8 -	Intensidades máximas anuais (mm/h) das precipitações calculadas pelas equações de chuvas intensas elaboradas para os municípios da Região Metropolitana de Recife (Tabela 7) para os tempos de retorno de 2 e 5 anos.	76
Tabela 9 -	Intensidades máximas anuais (mm/h) das precipitações calculadas pelas equações de chuvas intensas elaboradas para os municípios da Região Metropolitana de Recife (Tabela 7) para os tempos de retorno de 10 e 25 anos.	77
Tabela 10 -	Tabela 10 Intensidade máxima das chuvas obtidas por meio das equações de chuvas intensas de Recife. Incremento percentual relacionado a equação apresentada pela FIDEM.	80
Tabela 11 -	Eventos extremos classificados como “altamente intensos” ocorridos na RMR entre os anos de 2010 e 2016. Data de ocorrência do evento, precipitação diária máxima registrada, nome do município e código do posto que registrou a precipitação máxima e percentual de abrangência do evento na Região Metropolitana de Recife.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
AESA	AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS
APAC	AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA
CCM	COMPLEXO COVECTIVO DE MESOESCALA
CJNB	CORRENTES DE JATO DO NORDESTE BRASILEIRO
CEMADEN	CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTA DE DESASTRES NATURAIS
CETESB	COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO
CPTEC	CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS
DOL	DISTÚRPIO ONDULATÓRIO DE LESTE
ENOS	EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL
EMBRAPA	EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGRAPECUÁRIA
GPT	GRUPO DE PREVISÃO DE TEMPO
INMET	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA
LAMEPE	LABORATÓRIO DE METEOROLOGIA DE PERNAMBUCO
MDE	MODELO DE ELEVAÇÃO DIGITAL
ODP	OSCILAÇÃO DECADEAL DO PACÍFICO
OL	ONDAS DE LESTE
OMM	ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL
PDDU	PLANO DIRETOR DE DRENAGEM URBANA
RMR	REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE
SRTM	SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION
UFPE	UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
VCAN	VÓRTICE CICLÔNICO DE ALTOS NÍVEIS
ZCAS	ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL
ZCIT	ZONA DE CONVERGÊNCIA INTERTROPICAL

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	HIPÓTESE.....	19
1.2	OBJETIVO GERAL	19
1.3	OBJETIVOS EPECÍFICOS	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DA TESE	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	21
2.2	ALTERAÇÕES NAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS DEVIDO A URBANIZAÇÃO	23
2.2.1	Radiação Solar	24
2.2.2	Temperatura do ar	25
2.2.3	Precipitação Pluviométrica.....	27
2.3	ALTERAÇÕES NO CICLO HIDROLÓGICO DEVIDO A URBANIZAÇÃO	29
2.4	DRENAGEM URBANA	30
2.5	PRECIPITAÇÃO E EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS	36
2.5.1	Equações de chuvas intensas para a Região Metropolitana de Recife.....	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	44
3.2	FISIOGRAFIA E CLIMATOLOGIA DA RMR	46
3.3	VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA.....	49
3.3.1	Variabilidade da precipitação diária relacionada ao relevo	49

3.4	EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS.....	54
3.5	ESTUDO DOS EVENTOS EXTREMOS OCORRIDOS NA RMR	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
4.1	VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO DIÁRIA	63
4.1.1	Coeficientes da equação de regressão	64
4.1.2	Análise dos parâmetros estatísticos	66
4.1.3	Espacialização sazonal da precipitação pluviométrica	68
4.2	EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS	72
4.3	EVENTOS DE CHUVA INTENSA OCORRIDOS NA RMR	89
4.3.1	Generalidades sobre os eventos de chuvas intensas na RMR...	89
4.3.2	Análise dos eventos de chuvas intensas por ano hidrológico.....	93
4.3.3	Variabilidade Espacial do Número de Ocorrências de Eventos Altamente Intensos - Al.....	95
4.3.4	Evento do dia 30/05/2016	97
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
6	RECOMENDAÇÕES	105
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

A expansão urbana descontrolada é uma realidade das grandes cidades e acarreta diversas consequências indesejadas no ambiente. É fato que essa expansão causa alterações significativas nos elementos meteorológicos, tais como, a distribuição da temperatura do ar, os padrões de vento e a qualidade do ar, assim como, altera a distribuição espaço temporal das precipitações. Dentre as principais causas dessas alterações estão a impermeabilização dos solos, supressão da vegetação, aumento das edificações e a poluição atmosférica. Lombardo (1985) afirma que o uso desordenado do solo em metrópoles, as quais crescem rapidamente e, geralmente, com poucos recursos técnicos, pode ocasionar problemas sérios a qualidade de vida da população.

A Região Metropolitana do Recife (RMR) tem um alto crescimento demográfico e industrial seguido de intenso adensamento construtivo. O crescimento urbano causa impermeabilização de superfícies e reduz a capacidade de infiltração do solo. Devido a esse fato, a RMR sofre impactos ambientais e sociais por conta de eventos frequentes de alagamento, principalmente nos meses chuvosos – maio, junho e julho. Esse fato se agrava devido à localização geográfica da região, a qual está inserida na costa leste do nordeste. Essa região é submetida a precipitações de grande intensidade associadas principalmente a sistemas de grande escala (MOLION e BERNARDO, 2002).

Devido às mudanças no ambiente urbano supracitado, há uma necessidade de estudar as variáveis meteorológicas, e hidrológicas a fim de se conhecer os seus efeitos sobre os recursos hídricos, em especial nas relações de intensidade-duração-frequência (IDF) das precipitações e sua distribuição espaço-temporal, o que subsidiará, dentre outros, informações para projetos de drenagem urbana.

O entendimento da variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica, assim como, das relações IDF na RMR torna-se de grande relevância para os estudos hidrológicos, manejo das águas pluviais e gestão dos

recursos hídricos, a fim de reduzir os impactos das chuvas intensas e otimizar o uso dos recursos hídricos.

Por meio do presente estudo, objetiva-se a conhecer melhor a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica na RMR. O estudo também estende-se nos estudos dos eventos extremos e das relações IDF.

1.1 HIPÓTESE

A Região Metropolitana de Recife (RMR) apresenta distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica com diversas heterogeneidades. Por isso, os projetos que necessitam do cálculo de chuvas intensas devem levar em consideração a variabilidade espacial e temporal da precipitação.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal do presente trabalho é analisar a variabilidade espaço-temporal da precipitação pluviométrica, eventos extremos e intensidade das chuvas na Região Metropolitana de Recife (RMR), buscando entender como essas são influenciadas pelo relevo, urbanização, localização geográfica e alterações climáticas locais e de escala sinótica.

1.3 OBJETIVOS EPECÍFICOS

Avaliar a distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica em escala diária e subdiária para fins de gerenciamento e tomada de decisão a nível de reservatórios e, planejamento de obras de drenagem urbana, respectivamente.

Buscar um melhor entendimento das chuvas intensas, com o objetivo de avaliar as heterogeneidades ao longo da RMR;

Avaliar e caracterizar os eventos de chuvas intensas ocorridos na RMR no período compreendido entre 2010 e 2016.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos e considerações finais. O primeiro capítulo, o presente, é a introdução. O segundo capítulo trata-se da descrição da área de estudo, o terceiro aborda a revisão de literatura, que inicia-se com uma abordagem sobre as mudanças climáticas e seus impactos nas variáveis meteorológicas e no ciclo hidrológico. Esse tópico aborda ainda os conteúdos de drenagem urbana, precipitação e equação de chuvas intensas. O quarto capítulo menciona a metodologia utilizada para a realização de cada etapa executada, já o quinto capítulo, apresenta os resultados encontrados em cada etapa de execução. Por fim, tem-se as considerações finais do trabalho e as recomendações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente tópico constam os principais conteúdos relacionados a temática central do que se propôs a avaliar. Uma introdução a mudanças climáticas, originadas tanto por origem antropogênica, quanto por fatores naturais, assim como, a influência dessas sobre as variáveis meteorológicas. Os subtópicos se estendem para os objetivos específicos, tais como, a influência das alterações no uso e ocupação do solo com a espacialização espaço-temporal da precipitação pluviométrica e com os eventos de chuvas intensas.

A revisão de literatura busca trazer pontos de vista de diversos trabalhos nacionais e internacionais atualizados sobre a temática abordada, o que deu suporte para a discussão dos resultados de forma mais aprofundada e coerente.

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

É sabido que a superfície e a atmosfera da Terra, desde a sua formação, passou por diversas alterações em sua composição. As condições dos componentes atmosféricos e a temperatura terrestre hoje existente levaram bilhões de anos para se concretizarem e, continuam em processo dinâmico de evolução.

Segundo os estudos de Kandel (2007), as temperaturas terrestres já estiveram em níveis bem mais altos do que os atuais, mesmo antes do surgimento do homem.

O clima representa as condições médias dos elementos meteorológicos em um determinado local numa escala de tempo suficientemente representativa, 30 anos segundo a Organização Meteorológica Mundial – OMM.

As mudanças climáticas são responsáveis pelas alterações das variáveis meteorológicas em diferentes escalas espaço-temporais, conduzindo por vezes, a condições de extremos climáticos e favorecendo a ocorrência de eventos extremos. Segundo Seneviratne et al. (2012), os extremos temporais e climáticos ocorrem mesmo sem a intervenção do homem no meio ambiente, ou seja, por

uma condição de variabilidade natural do clima, no entanto, há fortes evidências que as ações antropogênicas intensificam e/ou aceleram ciclos de extremos.

Duas correntes científicas, os céticos e os alarmistas, buscam identificar a causa principal das mudanças do clima e justificar o aquecimento de cerca de 0,6 °C na temperatura média do globo ocorrida no século XX, o qual é consenso para ambas. Os céticos defende a teoria de que as alterações climáticas ocorrem como consequência de alterações naturais, tais como, a ocorrência de ciclos solares, mudança de parâmetros na órbita terrestre, erupções vulcânica e, consideram as fontes antropogênicas como interlocutoras locais de pequenas proporções em escala global, assim como, ao contrário dos alarmistas, afirmam que estamos vivenciando um resfriamento do globo. Os alarmistas, apesar de considerar as alterações naturais do clima, afirmam que os efeitos decorrentes das ações do homem sobre o ambiente é a principal causa da ocorrência das mudanças climáticas e, conseqüentemente, da ocorrência dos eventos extremos ocorridos no Planeta, os quais, segundo eles, tendem a se intensificar ao longo dos anos, caso seja mantido o mesmo grau de interferência antropogênica.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, na sigla em inglês IPCC (Intergovernmental Panel Climate Change), órgão científico-político vinculado a Organização das Nações Unidas (ONU), tem como objetivo principal realizar estudos avançados e divulgar assuntos relacionados a mudanças climáticas globais. Esse órgão utiliza como base para os seus estudos os Modelos de Previsão do Clima Global (MCG), os quais utilizam equações matemáticas para representar a complexidade do sistema climático.

O IPCC no seu IV relatório apresenta a hipótese da intensificação do aquecimento global, aumento da temperatura média do ar no globo, como resultado do aumento da concentração de gases estufas oriundos das ações antrópicas (IPCC AR IV, 2007). Ações como, a queima de combustíveis fósseis para alimentar a crescente frota de veículos, gerar eletricidade e alimentar as indústrias, assim como, os desmatamentos e as queimadas das florestas liberam para a atmosfera uma grande quantidade de CO₂, CH₄, entre outros. O aumento desses gases estufa aprisionam radiação térmica próximo a superfície, fazendo com que a temperatura média do ar se eleve. O aumento da temperatura média global vem ocasionando o derretimento do gelo, a redução da cobertura de neve

e a elevação dos níveis dos mares (IPCC AR IV, 2007; NOBRE et al., 2012). Esse trabalho do IPCC teve uma grande repercussão mundial e levou ao desenvolvimento de vários trabalhos científicos com o intuito de estudar as prováveis influências das atividades humanas sobre o clima terrestre.

Um dos estudos com grande abrangência e expressividade no Brasil, sustentados nas informações do IPCC, avaliou o impacto do desmatamento na Amazônia sobre as mudanças climáticas. Os resultados afirmam que o desmatamento da Floresta tem causado alterações no clima, no ciclo hidrológico e nos eventos extremos, afetando assim, a disponibilidade em escala local e global dos recursos hídricos (MARENGO et al., 2011).

Segundo Cruz et al. (2014), existem diversos trabalhos relatando alterações em diversas variáveis meteorológicas (principalmente com relação à temperatura e à precipitação), no entanto, as séries histórica de dados utilizadas são muito curtas, por isso, torna-se muito arriscado falar de “mudança climática”, quando em muitos trabalhos os “ciclos climáticos” sequer são mencionados.

Seja um efeito, preponderantemente, natural ou antropogênico os efeitos das mudanças climáticas são desastrosos para a população, principalmente nos grandes centros urbanos, nos quais os aglomerados populacionais, imobiliários e de bens são intensos. Em regiões do interior os problemas também são agravados, haja vista que as cidades interioranas geralmente se desenvolvem próximas a corpos hídricos e, dependem da atividade agropecuária para sua subsistência. Em situações extremas os rios transbordam ou secam atingido negativamente as atividades socioeconômicas da população.

2.2 ALTERAÇÕES NAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS DEVIDO A URBANIZAÇÃO

O ambiente urbano possui um microclima particular criado devido a grande interferência humana no ambiente, o grande número de veículos, indústrias, prédios e a supressão das áreas vegetadas em substituição por concreto fazem com que as distribuições de temperatura do ar, direção e

velocidade dos ventos, teor de umidade atmosférica e o padrão local das chuvas se alterem.

Os processos meteorológicos são alterados como consequência das modificações na camada limite atmosférica, a qual é influenciada pelas alterações dos balanços de energia, de massa e de momento na interface atmosfera-superfície terrestre (CARRAÇA e COLLIER, 2008).

O fenômeno das ilha de calor, originado pelo processo de urbanização, é caracterizado pelo aquecimento desigual entre as áreas urbanas (mais aquecidas) e sua adjacência. Esse fenômeno altera a circulação atmosférica local e influencia o comportamento de diversas variáveis do ambiente.

2.2.1 Radiação Solar

A radiação solar é a variável determinante do clima e que impulsiona os mecanismos da atmosfera. A entrada, a saída e a manutenção da radiação solar no sistema terrestre é ditado pela composição da atmosfera. A poluição oriunda da queima de combustível fóssil, das indústrias, dos automóveis e dos processos de geração de energia, é um componente que intensifica a quantidade de gases de efeito estufa, aprisionando assim, a radiação térmica emitida pela superfície terrestre e elevando a temperatura média local dos ambientes urbanos. Por outro lado, a grande quantidade de aerossóis lançadas nas grandes cidades reduzem a quantidade de radiação global que entram no sistema. Segundo alguns pesquisadores (ROSENFELD et al., 2014; STEVENS e BEINGOLD, 2009) o impacto dos aerossóis no balanço radiativo terrestre ainda não é bem entendido e se constitui como uma das maiores incertezas para o entendimento das alterações climáticas.

O saldo de radiação é uma variável dependente da natureza da superfície e, portanto, é bastante influenciado pelo albedo e temperatura das superfícies. As alterações no albedo terrestre devido aos processos de urbanização se caracterizam pelas alterações da geometria das superfícies, cobertura de neve, aerossóis e poluição atmosférica (KRÜGER e GONZALES, 2016).

Estudos de Wang et al. (2014), utilizando dados do Arquivo do Balanço de Energia Global, na sigla em inglês GEBA, mostraram que, em média, os impactos dos aerossóis urbanos sob a média e a tendência de radiação solar global foram de $0,2 (\pm 11,2 \text{ W m}^2)$ e $0,1 (\pm 6,6 \text{ W m}^2)$ por década entre 1961 e 1990, respectivamente. O estudo aponta ainda que para a Europa, China e Japão, em média, o impacto das alterações da concentração de aerossóis é baixo, no entanto, para outras localizações pode ser bastante significativa. Outros estudos abordando o mesmo tema (ALPERT et al. 2005; ALPERT e KISHCHA, 2008) já comprovaram que há redução mais significativa da radiação global em áreas urbanas quando comparada com as rurais.

Rao et al. (2004), analisando dados meteorológicos de 11 estações em uma região da Índia, detectaram que há uma grande variabilidade da taxa de redução da radiação solar entre as estações, com tendências negativas em 10 delas. O número de horas de brilho solar também foi avaliada pelos pesquisadores nesse estudo, os resultados para essa variável foi de diminuição significativa para nove das estações.

2.2.2 Temperatura do ar

A diferença entre a temperatura da região central com relação a sua periferia identifica o fenômeno das ilhas de calor, fenômeno típico das grandes cidades e ocasionado por uma série de fatores antropogênicos locais, tais como, a supressão da vegetação em substituição pelo asfalto e o adensamento das construções.

Diversos estudos realizados por todo o globo mostram a existência das ilhas de calor em grandes centros urbanos. Os dados e as metodologias utilizados para caracterização desse fenômeno são bastante diversificadas devido a limitações de séries longas de dados e/ou de metodologias adequadas a região de estudo, por isso, os resultados são veemente criticadas por muitos especialistas.

Schatz e Kucharik (2014), buscando identificar a variabilidade espaço-temporal das ilhas de calor na Cidade de Madson – capital do estado norte-

americano de Wisconsin, concluíram que a densidade das edificações e a falta de vegetação foram os fatores que mais impactaram para a variação da temperatura. Os pesquisadores também constataram que durante o verão, principalmente a noite e em condições de céu claro, o aquecimento é mais intenso. Os pesquisadores da Universidade de Wisconsin também ressaltam a importância de séries de dados representativas para a área de estudo. O trabalho foi baseado em dados de 151 sensores de temperatura do ar com discretização temporal de 15 minutos nos anos de 2012 e 2013 em diversas áreas de Madison.

Wang et al. (2014), avaliaram o impacto da urbanização sob a temperatura média anual dos últimos 60 (1951-2012) anos em Pequim. Os resultados mostraram que a temperatura média aumentou tanto em áreas urbanas como nas rurais, contudo, os aumentos mais intensos nas áreas urbanas, 1989 a 1998, ocorreram no período de acelerado desenvolvimento urbano.

Diversos estudos já foram realizados no Brasil buscando a caracterização das ilhas de calor urbanas e suas consequências nas variáveis meteorológicas (MOURA et al. 2008; COSTA et al. 2010; MOREIRA e GALVÍNIO, 2009). Para a Cidade de São Paulo, o estudo pioneiro sobre o assunto foi realizado por Lombardo (1985) e buscou identificar, entre outros, a sua variação diurna, sazonal e espacial com dados de temperatura e umidade relativa do ar e dados de sensoriamento remoto. Estudos recentes (FERREIRA et al. 2013; FERREIRA et al. 2012) versam sobre o mesmo tema utilizando metodologias mais robustas para entender a interferência dos processos físicos na variação diurna e sazonal da ilha de calor urbana. As metodologias empregadas nesses estudos utilizam as metodologias tradicionais, medições de temperatura e umidade relativa do ar em estações fixas em diferentes usos do solo, aliadas a variáveis como fluxo de calor sensível e latente e saldo de radiação.

O estudo desenvolvido por Barros e Lombardo (2016), avaliou as relações dos diferentes usos do solo e o fenômeno das ilhas de calor no município de São Paulo/SP. Os pesquisadores detectaram que a abundância de concreto, asfalto e telhados de zinco, amianto e alumínio são os principais responsáveis por armazenar calor, elevando a temperatura do ar em mais de 8°C quando comparados com áreas rurais. Os autores recomendam a preservação de áreas

vegetadas, assim como, a expansão do arboreto urbano em geral a fim de amenizar as temperaturas das superfícies.

Souza e Alvalá (2014), observaram o efeito da ilha de calor na Cidade de Manaus analisando dados de temperatura e umidade relativa do ar entre os anos de 2000 e 2008. Os autores detectaram um aumento da temperatura do ar ($\sim 3^{\circ}\text{C}$) na área urbana e uma redução da umidade relativa do ar (1,7%) quando comparado a área rural.

Os telhados verdes aparecem como uma solução promissora para amenizar os efeitos das ilhas de calor urbanas. Catuzzo (2013), comparou as temperaturas e as umidades relativas do ar para dois telhados, um com telhado verde intensivo e outro concretado, numa mesma área no município de São Paulo. O estudo revelou que o telhado verde intensivo é uma possível alternativa para redução do impacto do microclima das estruturas, reduzindo em $5,3^{\circ}\text{C}$ a temperatura média e aumentando em mais de 15% a umidade relativa do ar.

2.2.3 Precipitação Pluviométrica

O processo de urbanização e o efeito das ilhas de calor urbano, além de outros fatores, tais como, a poluição atmosférica, têm um papel importante na alteração do regime de chuvas das grandes cidades. Um exemplo clássico de uma região que vem passando por grandes alterações em seu regime de chuvas é a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Segundo a publicação de Pivetta (2012), a terra da garoa se transformou em megalópole da tempestade, o termo utilizado se refere a constatação do aumento de 425 mm de chuva na Região em 80 anos. A média anual de precipitação passou de 1200 mm em 1930 para 1600 mm nos anos 2000. Segundo o autor, a pluviosidade da região não apenas aumentou, mas alterou o seu padrão, com aumento dos dias com chuva forte ou moderada, provocando inclusive tempestades no inverno, época normalmente seca. Segundo o mesmo autor, a mesma tendência de elevação do número de dias com chuvas intensas foi detectada na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), embora, com menos nitidez.

Os resultados apresentados por Pivetta (2012), foram confirmados através do trabalho de Marengo et al. (2013). Nesse trabalho, utilizou-se dados desde a década de 30 da estação meteorológica da Universidade de São Paulo. Os resultados do trabalho mostraram que houve um aumento do total de chuva e do número de eventos de chuva intensa e um decréscimo dos eventos de chuvas fracas (< 5 mm).

Yang et al. (2014), através da modelagem numérica baseada no Modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model) investigaram o impacto da urbanização sobre as precipitações intensas na Cidade de Milwaukee, maior centro urbano de Wisconsin e rodeado pelo lago de Michigan, nos Estados Unidos. Os resultados das simulações mostram que a urbanização desempenham papel importante na distribuição espacial da precipitação, mesmo quando analisada em grande escala. Os autores também descobriram que as perturbações termodinâmicas produzidas pela urbanização nos campos de temperatura e pressão acentuam a intrusão da brisa vinda do lago e facilitam a formação de uma zona de convergência, criando condições favoráveis para convecção profunda sobre a Cidade.

Burian e Shepherd (2005), analisando dados de 19 pluviômetros situados dentro e nas áreas circunvinhas da cidade americana de Houston, no intuito de quantificar os efeitos da urbanização sobre o padrão de chuvas, identificaram que houve um aumento de 25% no total de chuvas na estação quente entre os períodos pré e pós-urbanos.

Carraça e Collier (2007), buscaram modelar os impactos das grandes construções em áreas urbanas na gênese da precipitação. Os autores utilizaram um modelo para avaliar o impacto da heterogeneidade urbana sob o de fluxo de calor sensível na superfície. Os resultados mostraram que a variação espacial da rugosidade e a estabilidade da camada limite atmosférica podem alterar o fluxo de calor sensível a superfície e que tais variações podem levar a iniciação ou a inibição da convecção. Os autores ainda detectaram que a morfologia urbana modifica o fluxo de calor sensível e influencia no desenvolvimento convectivo.

Song et al. (2014), desenvolveram um estudo em Pequim buscando investigar as tendências espaço-temporais da precipitação em meio ao processo de urbanização crescente da região. Os resultados apontam que houve uma redução da precipitação aliado a uma crescente demanda por água o que exige um gerenciamento mais eficaz dos recursos hídricos na região. Os pesquisadores estimaram que houve um decréscimo na quantidade de precipitação entre os anos de 1950 e 2012, uma redução da precipitação anual em torno de 32%, uma taxa decadal de 28,5 mm. As maiores reduções foram observadas no verão, justamente onde ocorre a demanda hídrica de pico. Com relação a variabilidade espacial da precipitação, não foram observadas alterações significativas, no entanto, sutis aumentos foram observados nas áreas mais urbanizadas e de relevo mais alto. A intensidade das precipitações tem aumentado substancialmente, especialmente na escala horária, evidenciando o aumento de ocorrência dos eventos extremos.

2.3 ALTERAÇÕES NO CICLO HIDROLÓGICO DEVIDO A URBANIZAÇÃO

O ciclo hidrológico é a permuta da água, em suas diferentes fases, entre a superfície terrestre, os corpos d'água e a atmosfera. Cerca de 97% da água está depositada nos oceanos e apenas um percentual dos 3% restantes são de água doce disponível para consumo direto pela população. Naturalmente a água que cai sobre a superfície terrestre segue diversos caminhos, evapora e retorna a atmosfera, infiltra no solo e alimenta os lençóis subterrâneos, escoam pelos rios e córregos até chegar nos lagos e oceanos.

O processo de urbanização, através da impermeabilização das superfícies, supressão da vegetação e da emissão de poluentes para o ambiente, altera de forma significativa os componentes do ciclo hidrológico, com consequentes impactos para todos os seres vivos. Nas áreas urbanas os efeitos são mais expressivos, haja vista que as mudanças no ambiente são intensas, assim como, as densidades populacionais, construtiva e automobilística. Nessas áreas de intensa modificação, a taxa de evapotranspiração é reduzida devido a substituição da vegetação pelo asfalto. A impermeabilização da superfície reduz

a taxa de infiltração de água no solo e, conseqüentemente, aumenta a taxa de escoamento superficial. A intensificação do escoamento superficial direto nas áreas urbanas, em conseqüências dos altos índices de impermeabilização, ocasiona o aumento e antecipação dos picos de vazões máximas.

Segundo Tucci (2008), o avanço do processo de urbanização e a intensificação do processo de canalização implicam em maiores vazões iniciais de escoamento.

Inicialmente os problemas de drenagem urbana buscavam soluções exclusivamente estruturais, as quais, demandam alto emprego tecnológico e de capital, se tornando, por vezes, inviável para determinadas áreas. No entanto, abordagens modernas buscam, de forma distribuídas ao longo da bacia, controlar os fluxos de água. O conceito de drenagem sustentável busca respeitar o funcionamento natural do ciclo da água.

2.4 DRENAGEM URBANA

O crescimento populacional brasileiro nas últimas décadas levou a expansão das cidade, criando metrópoles em quase todos os Estados da nação. As regiões metropolitanas, como são chamados os aglomerados urbanos formado por um núcleo mais desenvolvido circundado por municípios que acompanham seu desenvolvimento, possuem um crescimento desorganizado e, portanto, ocupando áreas irregulares, desobedecendo a regulamentação urbana relacionadas com o Plano Diretor e normas específicas de loteamento (TUCCI, 2002). Segundo o autor, a expansão das áreas urbanas irregular atinge as áreas de mananciais de abastecimento humano, comprometendo a sustentabilidade hídrica das cidades.

Cardoso e Baptista (2011), afirmam que a produção e a ocupação indevida dos espaços urbanos ocasionam diversas modificações nas condições naturais do meio. A alteração do ciclo hidrológico e a canalização de rios e córregos reduzem o tempo de concentração das bacias hidrográficas e

aumentam os volumes escoados, acarretando assim, eventos mais frequentes de enchentes.

As enchentes provocadas pela urbanização ocorrem devido a diversos fatores, tais como, o grande parcelamento do solo com altos percentuais de impermeabilizações, ocupações de áreas ribeirinhas e de inundação, obstrução de canalizações por detritos e sedimentos, subdimensionamento dos sistemas de drenagem, entre outros (POMPÊU, 2000).

Alterações das condições naturais das superfícies devido ao processo de urbanização, impermeabilizações, são responsáveis pela redução da infiltração de água no solo, aumento do escoamento superficial e das vazões máximas, antecipando assim, seus picos no tempo. Concomitantemente, observa-se a redução do escoamento subterrâneo, haja vista que a alimentação do lençol freático é minimizada. A redução da cobertura vegetal e, conseqüentemente, do armazenamento de água no solo é o responsável pela minimização da taxa de evapotranspiração (Figura 1).

Outros efeitos decorrentes da urbanização sobre o contexto da drenagem urbana também são observados, tais como, o aumento na produção de sedimentos e a degradação da qualidade da água, assim como a contaminação dos aquíferos. A produção de sedimentos ao longo do processo de urbanização é bastante significativa devido ao carreamento de materiais oriundos de preparo de áreas para construções e materiais utilizados para esse fim. Como consequência dessa produção de sedimentos pode-se ter o assoreamento do sistema de drenagem e o transporte de substância poluente.

Numa busca de neutralizar os efeitos da urbanização e das condições mais próximas da natural – pré-urbanizada - é fundamental a escolha correta de cada sistema de drenagem e o tratamento adequado dos cursos de água. Assim, torna-se bastante relevante a adoção de abordagens ambientalmente integradoras sobre a temática e a implementação da drenagem sustentável (CHRISTOFIDIS, 2010; KOBAYASHI et al., 2008).

O conceito higienista, no qual o excesso das águas urbanas era conduzido de forma rápida para um ponto a jusante, tornou-se inviável, haja vista que houve um crescimento da malha urbana em torno do núcleo, logo, essa medida se torna

uma transferência de problemas de enchentes para outros pontos. Segundo Silva (2010), o sistema clássico de drenagem, como era conhecido o sistema higienista, era baseado na coleta de água pluvial e servida através de caixas coletoras ligadas a condutos subterrâneos, geralmente de concreto, buscando o encaminhamento das águas para um sistema de micro drenagem maior ou para um sistema de macro drenagem que, no caso de Recife, são compostos por rios, riachos ou canais.

Em alguns países o conceito higienista já era questionado desde a década de 60, no entanto, apenas na década de 90 se iniciou, mais amplamente, as discussões sobre o destino das águas no meio urbano.

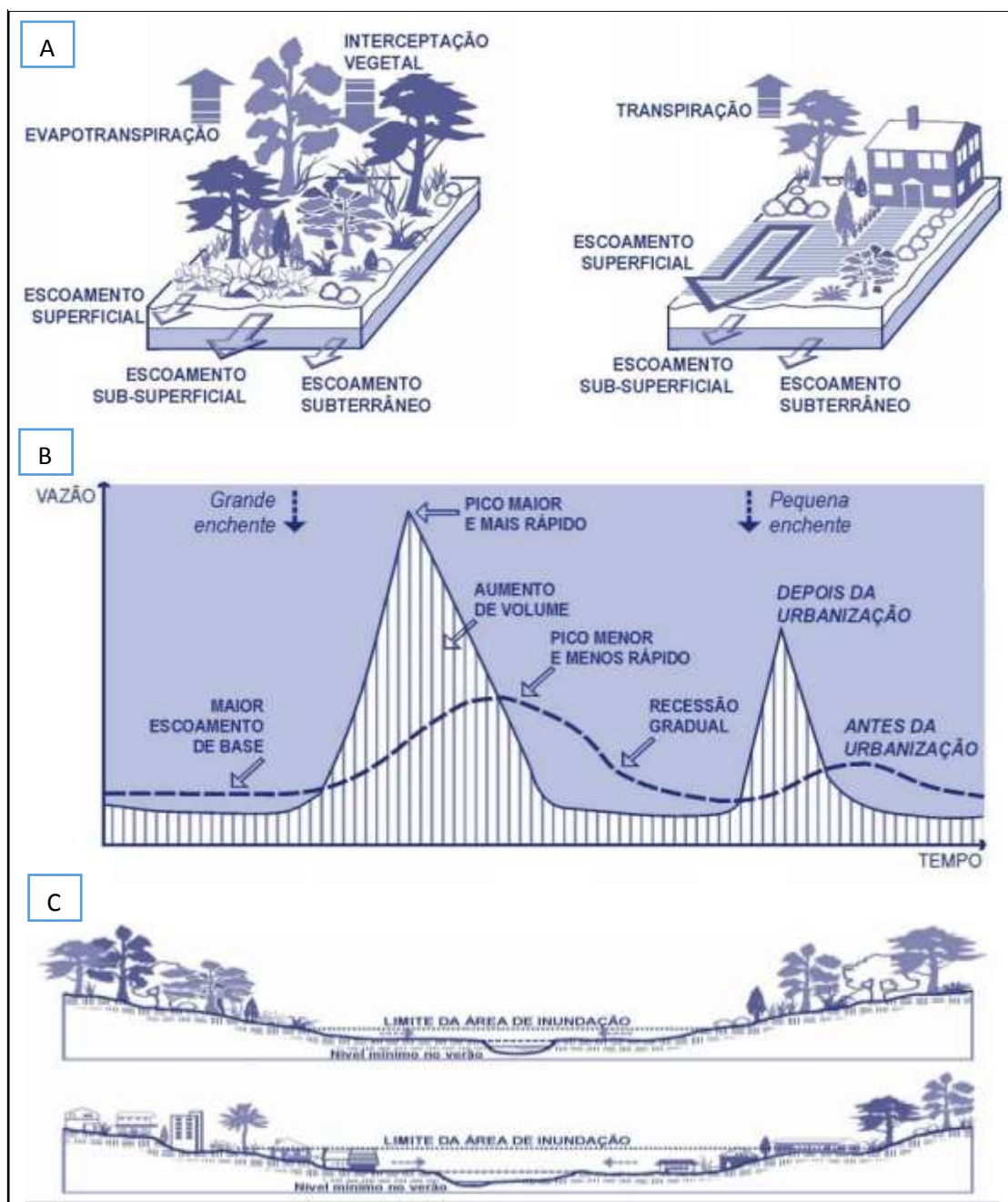
Atualmente discute-se amplamente o conceito de drenagem urbana sustentável, ou ainda, gestão sustentável e integrada das águas urbanas. Trata-se de uma nova abordagem que contempla não apenas as áreas urbanas, mas também o seu entorno. Esse conceito busca a manutenção e a recuperação de ambientes saudáveis através de técnicas integradoras e sustentáveis (VIOLA, 2008).

Um programa de drenagem urbana sustentável objetiva-se a promover, em articulação com as políticas de desenvolvimento urbano, de uso e ocupação do solo e de gestão das respectivas bacias hidrográficas, a gestão sustentável da drenagem com ações estruturais e não-estruturais dirigidas à recuperação de áreas úmidas, à prevenção, ao controle e à minimização dos impactos provocados por fatores climáticos e ação antrópica gerando enchentes urbanas e ribeirinhas e problemas de macrodrenagem, bem como, o controle dos efeitos da dinâmica marítima na zona costeira (POMPÊU, 2000).

A Figura 2 traz uma representação dos principais fatores integrantes da gestão das águas, ficando evidente a adoção de um modelo com participação efetiva da população e integrado a políticas de desenvolvimento socioeconômico e de estrutura das cidades. O processo de educação torna-se evidentemente crucial para o processo de boa gestão dos recursos hídricos no aspecto da drenagem urbana, haja vista que, o processo de conscientização ambiental e a consequente melhoria na qualidade de vida é dependente desse processo.

Não menos importante para uma boa gestão das águas urbanas, são as ações públicas quando a bacia ainda está em fase de urbanização. Contudo, torna-se de extrema necessidade a elaboração de um Plano Diretor Urbano, as Legislações Municipais, Estaduais, assim como o Plano Diretor de Drenagem das águas pluviais e do esgotamento sanitário, entre outras.

Figura 1 - Efeitos da urbanização sobre áreas naturais. A – balanço hídrico, B – escoamento e C – resposta da geometria do escoamento.



Fonte: Manual de drenagem urbana, 2002

Figura 2 - Componentes principais das gestão das águas



Fonte: TUCCI, 2008.

A legislação da drenagem urbana brasileira é relativamente recente (Figura 3), sendo a Cidade de Belo Horizonte a pioneira a discutir no seu Plano de Desenvolvimento Urbano, em 1996, a possibilidade de impermeabilização total de áreas desde que fossem aplicadas técnicas compensatórias, nesse caso, por meio da implementação de reservatórios na proporção de 30 litros por metro quadrado de área impermeabilizada (CRUZ et al., 2007; CARMO e MARCHI 2013).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada em 2008, apenas 14 municípios do Estado de Pernambuco, de um total de 185, possuem um Plano de Drenagem Urbana (PDU). Na capital pernambucana, dentre os principais instrumentos que auxiliam a gestão da drenagem urbana estão a Lei Orgânica do Município do Recife, o Código do Meio Ambiente da Cidade do Recife, a Lei de Uso e Ocupação do Solo da Cidade do Recife, instituído pela Lei nº 16.176/1996, e da recente Lei Nº 18.112/2015, que dispõe, entre outras, sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação dos telhados verdes e da construção de reservatórios de retenção de águas pluviais.

Figura 3 - Cronologia da Legislação sobre drenagem urbana no Brasil.

Cidade	Ano	Assunto
Belo Horizonte	1996	Plano de Desenvolvimento Urbano -> implantação de reservatórios na proporção de 30 litros por metro quadrado de área impermeabilizada.
Niterói – RJ	1997	A Lei nº 1620/1997 -> limite para a taxa de impermeabilização em 90% para a Zona Urbana.
Federação	1997	Lei n.º 9.433 -> Política Nacional de Recursos Hídricos.
Santo André - SP	1997	Lei Municipal 7.606/97 -> Cobrança de taxa sobre o volume lançado no sistema de coleta de pluviais.
Porto Alegre - RS	1999	Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental (PDDUA) -> controle das vazões geradas excedentes à condição de pré-ocupação da área.
Guarulhos –SP	2000	O Código de Obras de Guarulhos (Lei nº 5.617/1997) prevê, a obrigatoriedade do uso de reservatórios de retenção das águas pluviais para imóveis com área superior a 1 ha.
São Paulo	2001	Conselho Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (CADES) alterou a Lei n.º 11.228/92, para reservação de águas pluviais.
Curitiba	2003	Programa de Conservação e Uso Racional de Água nas Edificações (PURA)
Federação	2007	Lei n.º 11.445/2007. Dispõe sobre a Política e Plano de Saneamento Básico.

Fonte: Adaptado de Carmo e Marchi, 2013

O Plano Diretor de Gestão e Manejo das Águas Pluviais e Drenagem Urbana de Recife está em fase de conclusão e constituirá mais uma ferramenta, em consonância com outros planos urbanísticos e com o Plano Diretor da Cidade, para o desenvolvimento planejado da Cidade, com o objetivo principal de gerir o sistema de drenagem, minimizando o impacto ambiental devido ao escoamento das águas pluviais. O Plano, estimado em R\$ 6 milhões, define uma série de obras estruturais de curto, médio e longo prazos e diretrizes não estruturais de drenagem, sobretudo nos pontos críticos de alagamento. Contudo, o Plano constituirá apenas uma ferramenta norteadora para o desenvolvimento da Cidade, sendo fundamental a participação da sociedade para que esse desenvolvimento seja eficaz. A grande quantidade de lixo jogado nas ruas e, posteriormente, arrastadas até as galerias, assim como, a supressão dos riachos urbanos e da vegetação mínima nas margens dos canais são exemplos de fatores contribuintes da sociedade para o agravamento das enchentes na Cidade.

A Cidade de Recife já contava com o Plano Diretor de Macrodrenagem da Região Metropolitana de Recife elaborado em 1980. Em 1997 também foi elaborado o Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica das Bacias dos Rios Beberibe, Capibaribe e Jaboatão (PQA). Por fim, elaborado em

2001, o Plano de Gerenciamento de Drenagem de Águas Pluviais e do Esgotamento Sanitário para a Região Metropolitana de Recife.

2.5 PRECIPITAÇÃO E EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS

Do ponto de vista hidrológico, precipitação é toda água oriunda do meio atmosférico que chega a superfície terrestre, e suas formas mais variadas, tais como, neblina, granizo, orvalho, chuva, etc. Por sua capacidade de produzir escoamento, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para hidrologia (BERTONI e TUCCI, 2007).

O conhecimento do regime hidrológico de uma região torna-se fundamental para o planejamento das atividades industriais, agropecuárias e urbanas. Conhecer a disponibilidade de água anual numa bacia e a intensidade da precipitação de um evento de chuva são essenciais para a irrigação de culturas e controle de inundações, respectivamente.

As chuvas são caracterizadas pela espessura média da lâmina precipitada, também chamada de altura pluviométrica (medida em mm), duração e intensidade. O tempo de retorno também é um termo de grande relevância para a hidrologia, representando o número médio de anos durante o qual se espera que a precipitação analisada seja igualada ou superada (BERTONI e TUCCI, 2007). Segundo Back (2002), o tempo de retorno pode ter significados diferentes dependendo do tipo de série a ser analisado, anuais ou parciais. O período de retorno (T) também pode ser entendido como o inverso da probabilidade - $P(x)$ - de um evento (X) atingir ou superar um valor r , dado pela Equação 1 (NERILO et al. 2002).

$$T = \frac{1}{P(X \geq r)} \quad (1)$$

O estudos das séries históricas das chuvas intensas, classificadas como de grande intensidade e curtas durações, ocorridas em uma área ou bacia

hidrográfica são essenciais para a determinação das vazões de projeto, haja vista que as medidas de vazão são escassas em pequenas e médias bacias. A vazão de projeto é um parâmetro fundamental para o dimensionamento adequado de obras hidráulicas, tais como, galerias de águas pluviais, bueiros, sarjetas, reservatórios de retenção, sistemas de drenagem agrícola e vertedouros de barragens. Contudo, é de grande necessidade o conhecimento da equação que relaciona intensidade, duração e frequência (IDF) (Equação 2) da precipitação pluvial para a área de interesse.

$$i_m = \frac{K T r^a}{(t+b)^c} \quad (2)$$

Em que i_m é a intensidade máxima média da chuva (mm/h), T_r é o período de retorno (anos), t é a duração da chuva (min) e k , a , b e c são os coeficientes de ajustamento específico para cada localidade.

Além da grande relevância para engenheiros projetistas de drenagem urbana, a equação de chuvas intensas constitui-se como um importante instrumento para a Política de Drenagem Urbana e Rural, nas áreas de sociologia e hidrologia estatística, por exemplo. Na primeira destaca-se os aspectos socioeconômicos da comunidade atendida, haja vista que o custo da obra está relacionado com o período de retorno escolhido para um projeto e, no segundo, está o respeito ao risco hidrológico e na determinação das chuvas de projeto.

A análise estatística para o desenvolvimento da equação de chuvas intensas utiliza, na maioria das vezes, série de máximos anuais, ou seja, na seleção das maiores precipitações dentro do ano hidrológico. No entanto, em algumas situações, tais como, quando se dispõe de séries pequenas e com grande número de falhas, que se faça uso das séries de duração parcial. Essa metodologia contempla os valores que excedem um certo limiar permitindo a obtenção de amostras de tamanho superior ao número de anos de registro (PICKBRENNER et al. 2013).

O desenvolvimento preciso das equações de chuvas intensas (IDF) exige uma longa série de dados, recomendado no mínimo 30 anos, de chuvas máximas com vários tempos de duração extraídas de equipamentos registradores, pluviógrafos ou data loggers configurados para registros contínuos com pequenas discretizações temporais. Segundo Back et al. (2012), no Brasil existe uma grande quantidade de registros diários de precipitação, no entanto, registros subdiários são escassos e/ou falhos e com pequenas séries devido à falta de equipamentos registradores nos pontos de amostragem e da deficiência na densidade de estações. Outros autores (LIMA et al. 2005; OLIVEIRA et al. 2008; BACK, 2009) também relatam a dificuldade em obter longas séries de dados de precipitação, principalmente de registros pluviográficos.

Devido à escassez dos dados subdiários e de séries longas de precipitação, os pesquisadores brasileiros vêm desenvolvendo diversas metodologias para obter equações de chuvas intensas que representem bem a realidade local de interesse. Nesse cenário, destacam-se duas metodologias, o método de Bell (BELL, 1969) e o de desagregação de chuva de 24h.

Bell relacionou a estimativa da altura de chuva com duração de até 120 minutos com as chuvas diárias e período de retorno de 10 anos. O trabalho desenvolvido por Oliveira et al. (2008) utilizou o método de Bell. O estudo obteve boa precisão no ajuste dos dados de chuva para alguns municípios de Goiás, mostrando que o método funciona como uma boa alternativa para a obtenção das alturas de chuva intensas a partir de séries curtas.

Já o método de desagregação de chuva tem sido bastante utilizado por diversos pesquisadores (OLIVEIRA, 2008; SILVA e ARAÚJO, 2013) em todo o território brasileiro devido a sua simples utilização e por apresentar bons resultados com grande similaridade para diversos lugares, o que lhe outorga validade regional (BACK et al. 2012). Esse método utiliza precipitações de diferentes durações para desagregar a chuva máxima diária em chuvas com duração inferior. Na Tabela 1 estão dispostos os coeficientes de desagregação desenvolvidos pelo DAEE/CETESB (1980) baseado no trabalho pioneiro de equações de chuvas intensas no Brasil (PFAFSTETTER, 1957). Na mesma Tabela encontram-se os coeficientes encontrados por Silva (2010), baseados na equação de chuvas intensas desenvolvida para o Plano Diretor de Gestão e

Manejo das Águas Pluviais e Drenagem Urbana de Recife, o qual encontra-se em fase de conclusão.

Tabela 1. Coeficientes de desagregação de chuva obtidos pelo CETESB (1980) e por Silva (2010)

Relação entre durações	CETESB (1980)	Silva (2014)
5min/30min	0,34	0,34
10min/30min	0,54	0,54
20min/30min	0,81	0,81
30min/1h	0,74	0,74
1h/24h	0,42	0,42
2h/24h	-	0,48
3h/24h	-	0,54
6h/24h	0,72	0,72
12h/24h	0,85	0,85
24h/1dia	1,14	1,10

Fonte: O autor, 2018

2.5.1 Equações de chuvas intensas para a Região Metropolitana de Recife

A primeira equação de chuvas intensas desenvolvida para a RMR foi oriunda do estudo do Engenheiro Otho Pfafstetter (1957). Como resultado desse estudo, foram geradas equações para 98 postos pluviográficos em várias regiões brasileiras, inclusive para a Cidade de Olinda. Para essa Cidade, foi utilizada uma série de dados de 29 anos, correspondente ao período de 1926 a 1954, da qual foi gerada a Equação 4.

$$P = T^{\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}}} [a * t + b * \log(1 + c * t)] \quad (4)$$

Onde:

T – tempo de retorno (anos)

t – duração da chuva (horas)

P – altura de precipitação de duração t (mm)

α e β – parâmetros atribuídos conforme a duração t:

t	5min	15min	30min	1h	2h	4h	8h	14h	24h
α	0,108	0,122	0,136	0,156	0,166	0,174	0,176	0,174	0,170
β	0,04	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

A empresa de consultoria ENCIBRA S.A elaborou uma equação IDF para a prefeitura de Recife. Utilizou-se para a confecção da equação (Eq. 5) uma série pluviográfica de 51 anos (1926-1977) do posto do Curado.

$$i = \frac{335,47T^{0,218}}{(t+4)^{0,539}} \quad (5)$$

Em que, i é a intensidade máxima da chuva (mm/h), T é o tempo de retorno (anos) e t é a duração da chuva (min).

Um conjunto de equações IDF foi desenvolvido pela empresa ACQUA-PLAN para a RMR na década de 80 junto ao Plano Diretor de Macrodrenagem da RMR elaborado pela Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Recife - Fidem (FIDEM, 1979). As equações (Eq. 6 e 7) foram desenvolvidas a partir de pluviogramas das estações de Olinda (1926-1933, 1936, 1937, 1939, 1941-1943, 1954) e do Curado (1960, 1961, 1963, 1970-1976). A recomendação do Plano é que se utilize o maior valor de intensidade de chuva fornecido pelas equações.

$$i_1 = \frac{456,768*(T-1,5)^{0,117}*(1-4,54*10^{-21}*t^8)}{(t+6)^{0,58111}} \quad (6)$$

$$i_2 = \frac{72,153 \cdot (T-1,75)^{0,173}}{\left(\frac{t}{60}+1\right)^{0,74826}} \quad (7)$$

Onde:

i_1 e i_2 - são as intensidades de chuva (mm/h)

T – período de retorno (anos)

t – duração da chuva (minutos)

Ramos e Azevedo (2010) desenvolveram uma equação (Eq. 8) de chuvas intensas para a Cidade de Recife com base nos dados pluviográficos do aeroporto da Cidade, no total, uma série de 39 anos de dados (1968-2007).

$$i = \frac{1423,977T^{0,1124}}{(t+21)^{0,7721}} \quad (8)$$

Em 2013 a prefeitura de Recife anunciou a realização do Plano Diretor de Gestão e Manejo das Águas Pluviais e Drenagem Urbana que, a princípio, deveria ter ficado pronto em agosto de 2014, e atualmente está em fase de conclusão. O Plano foi orçado em R\$ 6.000.000,00 e segundo dados prévios divulgados pela prefeitura já foram realizados mapeamento de 160 pontos críticos de alagamentos, 99 canais e cinco rios que cortam a Cidade. Além disso, 1,5 km de galerias foram cadastradas na rede de microdrenagem e identificado que 37% das áreas do Recife estão sujeitas a alagamento. Segundo a empresa contratada para a realização do Plano, a ABF consultoria, será necessário um investimento de R\$ 1 bilhão para a realização das obras previstas.

Como um dos produtos desse Plano, uma nova equação de chuvas intensas foi originada para a Cidade de Recife. Utilizou-se nessa etapa uma série de dados pluviométricos e pluviográficos. Segundo Recife (2016), o objetivo foi de criar uma equação de chuva intensa com o máximo de informações de estações pluviográficas e, na ausência desses, a série seria preenchida por

precipitações máximas anuais das estações pluviométricas descritas na Figura 4 as quais totalizam 85 anos de dados.

Figura 4 - Estações pluviométricas e pluviográficas, com seus respectivos períodos de dados, utilizadas para obtenção da equação de chuvas intensas do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife.

Estação	Código LAMEPE	Latitude	Longitude	Período de dados
Recife (Caxagá)	307	-8,03	-34,88	1927 – 1969
Recife (Várzea)	30	-8,05	-34,91	1970 – 1985
Recife (Curado)	834007*	-8,05	-34,91	1986 – 1993
Recife (Várzea)	30	-8,05	-34,91	1994 - 2011

Fonte: Silva (2014).

Os dados pluviográficos foram obtidos de duas fontes distintas, a saber, posto meteorológico do INMET – Curado (2005 – 2013) e as precipitações máximas anuais que geraram a equação IDF do Plano Diretor da Macrodrenagem da RMR em 1985 (25 anos de dados não sequenciados).

Como base nos dados supracitados, foram geradas duas equações IDF, uma apenas com os dados pluviométricos (Eq. 9).

$$i = \frac{991,3142 * T_r^{0,1763}}{(t+9,5745)^{0,7424}} \quad (9)$$

De maneira mais completa, utilizando dados pluviométricos e pluviográficos foi elaborada uma nova equação (Eq. 10) para o plano diretor de drenagem urbana da cidade de Recife (RECIFE, 2016).

$$i = \frac{611,3425 * T_r^{0,1671}}{(t+7,3069)^{0,6348}} \quad (10)$$

Segundo Recife (2016), a equação determinada por registros de dados pluviográficos e pluviométricos (Eq. 10) indicou resultados melhores que a equação definida por registros exclusivamente de dados pluviométricos (Eq. 9).

O estudo da variabilidade da chuva ao longo do tempo reforça a hipótese que as equações de chuvas intensas necessitam de atualizações constantes, haja vista, que o processo natural de mudanças do clima e o efeito das mudanças de uso no solo alteram o regime de chuvas das regiões. Outra questão, não menos importante, é a avaliação da variabilidade espacial das relações IDF. No caso da RMR uma única equação de chuvas intensas é utilizada para representar toda a região, no entanto, já foi comprovada a existência de uma grande variabilidade espacial da precipitação nessa área (SILVA et al. 2016), sendo portanto, de extrema necessidade averiguar as diferenças espaciais nas relações IDF. Silveira (1997), realizou um estudo nessa temática com o acervo de dados pluviográficos do Projeto Dilúvio para uma bacia de 80 km² em Porto Alegre, no período de 1978 a 1982. O autor detectou variações significativas nas relações IDF entre áreas urbanas e rurais, assim como, aumento das intensidades de precipitação em áreas urbanas. O autor recomenda que esses efeitos devam ser considerados nos projetos e operação de sistema de drenagem urbana.

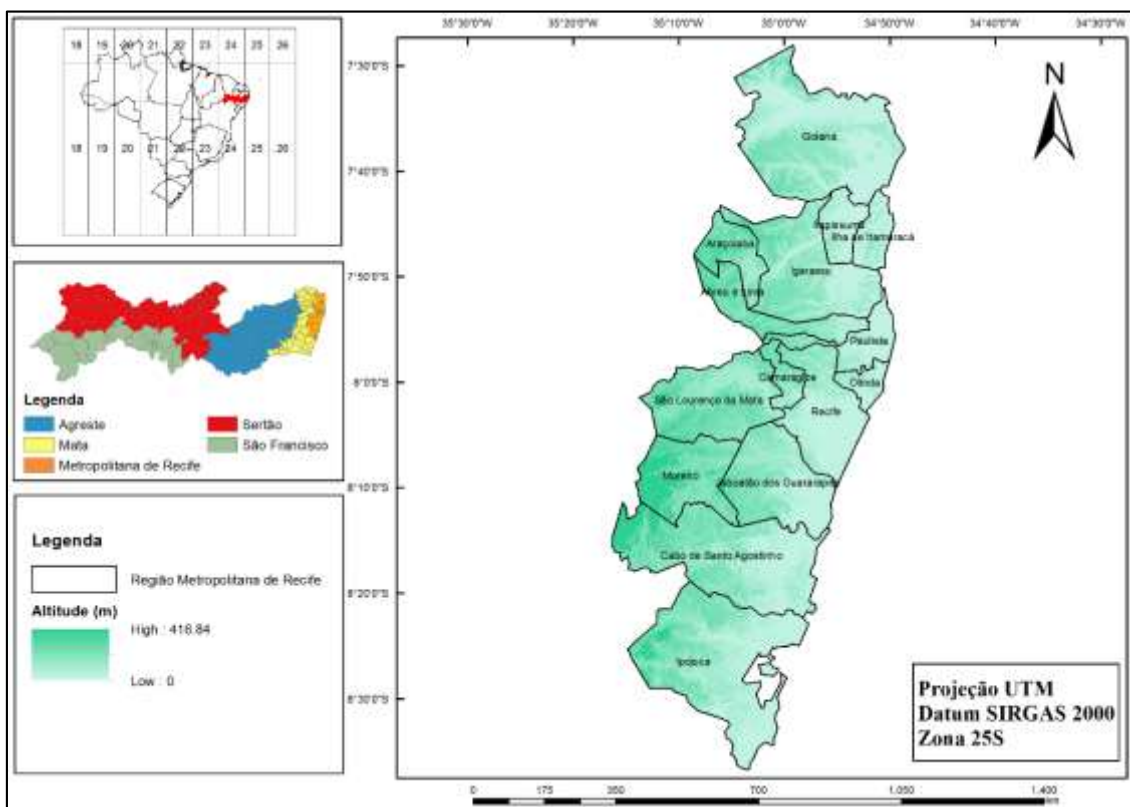
3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente tópico são apresentados os materiais e o processo metodológico adotado para execução deste trabalho. A área de estudo é definida e caracterizada no primeiro momento, em seguida, apresenta-se

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Região Metropolitana de Recife (RMR) é composta de 15 municípios* (Figura 1) e tem uma área de aproximadamente 3.216 km², correspondente a 3,3% da área do Estado de Pernambuco. Está localizada entre as latitudes 7,68 e 8,41 sul e longitudes 34,82 e 35,23 oeste e pertencente ao fuso 25.

Figura 5 - Área de estudo - Região Metropolitana Recife



Fonte: O autor, 2018.

* O município de Goiana foi incorporado, por meio da lei complementar número 382, a Região Metropolitana de Recife em janeiro de 2018.

A população estimada da RMR para 2017 foi de 4.044.948 habitantes (IBGE, 2017), o que representa mais de 58% da população do Estado, sendo que mais de 97% dos que vivem na RMR estão em áreas urbanas.

O Grande Recife, como é conhecida a RMR, é o principal aglomerado urbano do Estado de Pernambuco, o maior do Norte-Nordeste, a oitava maior do Brasil e a terceira área metropolitana mais densamente habitado do país (IBGE, 2015). O município de Goiana foi o mais recente a ser integrado a RMR, no dia 09 de janeiro de 2018, por meio da lei complementar número 382, publicada no Diário Oficial do dia 10 de janeiro de 2018. As pesquisas descritas na presente tese foram realizadas até o ano de 2017 e não incluíram o município de Goiana. Dentre os 15 municípios que compõem a RMR, os maiores núcleos urbanos são Recife (1.633.697 habitantes), Jaboatão dos Guararapes (695.956 habitantes), Olinda (390.771 habitantes) e Paulista (328.353 habitantes).

Recife, a capital pernambucana, é uma cidade litorânea marcada pelo processo de urbanização desorganizado e, como consequência, palco de grandes inundações provocadas pelas águas pluviais urbanas, deslizamentos de terras em áreas de ocupação indevida e grandes perdas de vidas e socioeconômicas.

Além da Cidade de Recife, outros municípios que compõem a RMR também passam pela mesma problemática. Aliado aos problemas da urbanização desorganizada, a própria geomorfologia da Região dificulta o escoamento das águas pluviais. A combinação desses fatores contribui para enfraquecer o sistema de drenagem, o qual, por vezes, é subdimensionado e sem manutenção e limpeza, provocando inundações frequentes. Não esqueçamos, também, os problemas desencadeados pela precariedade do nosso sistema educacional, o qual influencia diretamente na educação ambiental das pessoas, contribuindo assim para a contaminação dos rios e córregos por meio do lançamento de dejetos, despejo de lixo nas redes de drenagem, supressão dos riachos urbanos e calhas dos rios, entre outros.

O Estado de Pernambuco, em especial a RMR, possui um histórico de inundações que perdura de muitos anos. A primeira enchente oficialmente registrada ocorreu em 1632 e deixou um grande número de desabrigados. Após

esse evento, vários outros de bastante expressividade também foram registrados, tais como, os de 1854 – considerado um dos maiores da história – e o de 1869, o qual destruiu pontes e casas em Recife. Esse último evento foi retratado pelo pintor pernambucano Teles Júnior (1851-1914), a obra, intitulada “Cheia dos Remédios”, pertence ao acervo do Museu do Estado e mostra o desespero das pessoas diante do alagamento da Estrada dos Remédios. Também merecem destaque os eventos trágicos de 30 de maio 1966, com 63 mortos e mais de 8 mil desabrigados, e o de julho de 1975, o qual deixou um saldo de mais de 100 pessoas mortas e cerca de 350 mil desabrigados. (JC ONLINE, 2015).

A realidade da região no que tange o histórico de alagamentos poderá ser perdurada ou agravada diante das alterações no ciclo hidrológico associados a mudanças climáticas.

3.2 FISIOGRAFIA E CLIMATOLOGIA DA RMR

A RMR possui 75% do seu território composto por morros, abrangendo parte dos domínios geomorfológicos dos tabuleiros costeiros e do planalto rebaixado litorâneo, tendo como ponto culminante a Serra do Urucu, com 424 m de altitude, situada no município de Cabo de Santo Agostinho (ALHEIROS, 1998).

Na área da RMR, são encontradas seis tipologias básicas de relevo: serras, morros altos, tabuleiros, morros baixos, colinas e planícies costeiras, as quais se mostraram com feições e comportamentos geológico e geotécnicos diferenciados para os topos, encostas e planícies (ALHEIROS, 1998).

A RMR possui, de uma forma geral, relevo suave, na sua planície litorânea, com alguns pontos, praticamente ao nível do mar. Ao deslocar-se para oeste, saindo da RMR para o interior do estado, são encontrados alguns picos de montanhas que podem atingir alturas de 1000m. Na transição da zona da mata para o agreste pernambucano é encontrada a borda ocidental, referenciado

ao município de Recife, do Planalto da Borborema, no qual fica localizada a Serra das Russas, cuja altitude de suas escarpas variam de 400m a 800m.

Fatores como o urbanização e relevo também são determinantes para influenciar o regime pluviométricos de uma região. Fernandes e Carvalho (2013), estudando a variabilidade da precipitação na Cidade de Piranhas/AL observaram que, climatologicamente, 96,2% da precipitação pluvial anual estão relacionadas com a altitude local. Ainda, segundo os pesquisadores, evidenciam que, apesar da variabilidade temporal provocado pelos fenômenos climáticos e meteorológicos, a altitude foi crucial para a variabilidade espacial da precipitação pluvial.

O estudo do regime pluviométrico, assim como, da distribuição espacial da precipitação é fundamental para o planejamento adequado de atividades agropecuárias, de abastecimento de água urbano-industrial, de obras de contenção de enchentes, e de drenagem urbana. Essa última atividade é de grande relevância para os grandes centros urbanos, haja vista que, esses apresentam crescimento desorganizado, com as construções ocupando as calhas dos rios, as áreas de morro e os riachos urbanos (CABRAL et al., 2014). Essas ocupações indevidas impossibilitam o curso natural das águas, causando entre outros problemas enchentes e deslizamento de terras.

A precipitação pluviométrica é considerada a variável meteorológica mais importante na região tropical devido a sua grande variabilidade espaço-temporal. O Nordeste brasileiro (NEB) possui regimes pluviométricos distintos com picos de precipitação em diferentes meses do ano e com totais pluviométricos altamente variáveis ao longo de sua extensão. A variabilidade espaço-temporal interanual da distribuição de chuvas sobre o NEB são determinadas, em grande parte, pelas alterações nas configurações de circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano-atmosfera no Pacífico e no Atlântico (MOLION e BERNARDO, 2002). Os fenômenos oceânicos que ocorrem devido a anomalias de temperaturas no Oceano Pacífico, El-Niño e La-Niña, assim como, o Dipolo do Atlântico são responsáveis por alterar o regime pluviométrico no NEB e causar situações extremas dessa variável (MOURA et al., 2009).

Segundo o estudo de Nobrega e Santiago (2014) para Pernambuco, tanto o El-Niño/La-Niña e Dipolo do Atlântico exercem influência na precipitação do estado.

Salgueiro (2015) buscou avaliar a influência das interações oceano-atmosféricas no Pacífico e no Atlântico com os eventos de precipitação extrema máxima no leste do Nordeste. O autor utilizou na metodologia as etapas de detecção de tendências e mudanças no comportamento da precipitação pluviométrica pela análise das alterações na frequência e, posteriormente, verificou a influência da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) nos eventos extremos máximos, a partir da precipitação diária máxima anual – PDMA. Os resultados mostraram que houve crescimento dessas variáveis nas regiões úmidas e subúmidas, evidenciando o dipolo do Atlântico como o sistema mais responsável pelos eventos extremos máximos, considerando também a favorabilidade de La Niña sobre a pouca influência do episódio El Niño.

Algumas alterações nos padrões oceânicos/atmosféricos de ciclos maiores também podem alterar os padrões de circulação geral da atmosfera, e consequentemente, o regime pluviométrico no globo, como por exemplo, a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (MOLION, 2005).

Alguns sistemas sinóticos causadores de precipitações na costa leste do Nordeste são bastante estudados, tais como a Zona de Convergência Inter Tropical (ZCIT) (REBOITA ET AL., 2012; FERREIRA e MELLO, 2005), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) (RODRIGUES et al., 2006), Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN) (SANTOS et al., 2011), Ondas ou Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) (REBOITA, 2012; MOLION e BERNARDO, 2002), entre outros. Sistemas de escala inferior ao supracitados, de mesoescala, também atuam na Região em questão e são causadores de grandes totais pluviométricos, tais como, os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (FEDOROVA et al., 2004), as Correntes de Jato do Nordeste Brasileiro (CJNB) (CAMPOS, 2010) e as Brisas (MOLION e BERNARDO, 2002).

3.3 VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

A precipitação pluviométrica possui uma grande variabilidade espaço-temporal, sendo influenciada por diversos fatores, tais como, a altitude, temperatura do ar e direção e intensidade dos ventos (SANTOS et al., 2011).

As técnicas da geoestatística são empregadas para caracterizar a distribuição espaço-temporal de variáveis regionalizadas, como por exemplo, a precipitação pluviométrica. A krigagem é uma das técnicas mais conhecidas e aplicadas da geoestatística. Através dessa técnica é possível calcular um valor de uma dada propriedade para cada centro da célula de uma malha tridimensional, valor este condicionado aos dados existentes e a uma função de correlação espacial entre estes dados (NERY, 2009).

3.3.1 Variabilidade da precipitação diária relacionada ao relevo

Para a análise da variabilidade espacial da precipitação e a estimativa da precipitação pluviométrica, foram utilizados dados diários de precipitação, os quais foram acumulados mensalmente, dos postos pluviométricos da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) na RMR, que dispunham de uma série de dados dentro do período a ser analisado, de 2003 a 2014 (Tabela 2). A determinação do período de estudo se deu pela disponibilidade de dados dos postos pluviométricos da região, ou seja, observou-se o período nos quais os postos dispunham de uma série de dados contínuas. Para tornar mais significativa a extrapolação dos dados, utilizou-se alguns postos pluviométricos circunvizinhos a RMR e também a estação meteorológica do INMET em Recife.

Os dados de precipitação foram utilizados para a determinação dos coeficientes, obtidos através da regressão múltipla, os quais foram utilizados no modelo (Eq. 11), que tem a precipitação pluvial como variável dependente e, a latitude, a longitude e a altitude como variáveis independentes.

$$P = \beta_0 + \beta_1 * LON + \beta_2 * LAT + \beta_3 * ALT \quad (11)$$

Onde P (mm) é a precipitação total mensal e anual, LAT (Graus) a latitude, LON (Graus) a longitude e ALT (m) a altitude, β_0 , β_1 , β_2 e β_3 são os coeficientes do modelo adotado.

Tabela 2. Postos pluviométricos utilizados na presente etapa da pesquisa e para obtenção das curvas IDF

POSTO	CODIGO	LONGITUDE (Grau)	LATITUDE (Grau)	ALTITUDE (m)	PERÍODO
Abreu e Lima	198	-34,9000	-7,9281	48	2003-2014
Cabo (GURJAU)	490	-35,0294	-8,2903	38	2003-2014
Cabo (SUAPE)	491	-35,0150	-8,3678	53	2003-2014
Camaragibe	201	-34,9922	-8,0217	46	2003-2014
Chã da Alegria	522	-35,211	-7,999	163	2003-2014
Chã Grande	117	-35,459	-8,242	163	2003-2006; 2013; 2015
Goiana	487	-34,9489	-7,6442	90	2003-2014
Gravatá	58	-35,543	-8,201	479	2003-2006; 2013; 2014
Igarassu	100	-34,9150	-7,8281	48	2003-2014
INMET (Curado)	A-301	-34,959	-8,059	11	1970-2014
Itamaracá	524	-34,8378	-7,8086	4	2003-2014
Itambé	27	-35,179	-7,408	163	2003-2014
Itapissuma	520	-34,9058	-7,8003	48	2003-2014
Jaboatão	202	-34,9228	-8,1636	12	2003-2014
Moreno	205	-35,1003	-8,1122	113	2003-2014
Nazaré da Mata	97	-35,223	-7,741	73	2003-2014
Olinda	199	-34,8589	-7,9989	24	2003-2014
Paudalho	98	-35,167	-7,918	167	2003-2014
Paulista	451	-34,8847	-7,9428	19	2003-2014

Pombos	127	-35,396	-8,139	192	2003; 2005-2010; 2013; 2014
Recife (ALTO B)	265	-34,9353	-8,0014	72	2003-2014
Recife (VÁRZEA)	30	-34,9167	-8,0500	11	2003-2014
São Lourenço	267	-35,1653	-8,0403	150	2003-2014
Sirinhaem	111	-35,119	-8,619	68	2003-2014
Vitória	488	-35,303	-8,129	168	2005-2014

Fonte: O autor, 2018.

No intuito de analisar a variabilidade espacial da precipitação associada com o relevo, a altitude foi estimada pelo Modelo Digital de Elevação (MDE) da EMBRAPA, missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 90 m.

Para o tratamento estatístico dos dados utilizou-se o software R (R, 2014), o pacote estatístico hydroGOF (ZAMBRANO-BIGIARINI, 2014), e para elaboração dos mapas de relevo e das precipitações (Krigagem) foi utilizado o SURFER 9.0.

A interpolação dos dados pluviométricos foi realizada pelo método geoestatístico da Krigagem, a qual regionaliza as variáveis, permitindo que os dados amostrados em determinados pontos sejam utilizados para parametrizar a estimativa de pontos ausentes de medidas. O semivariograma (Eq. 12) é ferramenta principal da geoestatística, o qual é capaz de descrever a estrutura de dependência espacial e, a determinação do preditor estatístico (SEIDEL e OLIVEIRA, 2013).

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{t=1}^{N(h)} \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2 \quad (12)$$

Em que $y(h)$ corresponde à semivariância estimada para uma distância h , $N(h)$ é o número de pares amostrais da precipitação (z) separados por uma distância h ,

x_i e x_{i+h} é a distância entre os pontos dessas amostragens e $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$ são os valores de precipitação medidos nesses locais.

A partir dos dados estimados (S_i), comparou-se com os dados observados (O_i), avaliando estatisticamente a validade do modelo, assim, utilizaram-se as seguintes metodologias para avaliar os resultados:

O primeiro parâmetro a ser analisado é o Erro Médio (EM) entre S_i e O_i , nas mesmas unidades deles, dado pela Eq. 13.

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad (13)$$

N é o número de amostras, igual a 13. Assim, o EM deve ser muito próximo de zero, ou seja, os valores preditos estão próximos dos valores observados. Em que, EM corresponde a soma dos erros dividido pelo comprimento da série temporal.

O Erro Médio Absoluto (EMA) entre S_i e O_i , em módulo, nas mesmas unidades deles caracteriza-se por ser a média dos erros cometidos pelo modelo, em módulo, dado pela Eq. 14.

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - O_i| \quad (14)$$

O Erro Quadrático Médio (EQM) entre S_i e O_i , nas mesmas unidades desses, com o tratamento de valores preditos, resulta no desvio padrão do erro de previsão do modelo. Quanto menor o valor de EQM melhor o desempenho do modelo, dado pela Eq. 15.

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (15)$$

A Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático Normalizado (REMQN) entre S_i e O_i é dado em percentagem e descrito pela Eq. 16.

$$REMQN = \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) * \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \quad (16)$$

O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância de dados de medição (NASH E SUTCLIFFE, 1970). Em que, S_i e O_i são os valores preditos e observados, respectivamente. NSE pode variar entre infinito negativo a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste. O coeficiente é obtido por meio da Eq. 17.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (17)$$

A Eficiência volumétrica (EV) entre S e O, foi proposta a fim de contornar alguns problemas associados à eficiência Nash-Sutcliffe, e tem variação entre 0 a 1, sendo obtido por meio da Eq. 18 (CRISS e WINSTON, 2008).

$$EV = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N (O_i)} \quad (18)$$

O PBIAS, dado pela Eq. 19, relaciona o viés das precipitações simuladas em relação as observadas, ou seja, descreve se o modelo superestima ou subestima as observações. Quanto mais próximo de zero o valor deste coeficiente, melhor o modelo representa a realidade, ou seja, sem tendência nas estimativas. Moriasi et al. (2007), recomenda o PBIAS como uma das medidas que devem ser incluídos para averiguar o desempenho do modelo.

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (19)$$

O Índice de Acordo (D), também conhecido como índice de concordância de Willmott, é uma medida normalizada do grau de erro de previsão do modelo variando entre 0 e 1, onde o valor 1 indica uma concordância perfeita entre observação e previsão e 0 indica completa discordância (WILLMOTT, 1981). Esse índice pode detectar aditivo e diferenças proporcionais nas médias e variâncias observadas e simuladas; no entanto, é excessivamente sensível a valores extremos, devido às diferenças ao quadrado (LEGATES e MCCABE, 1999). O Índice de Acordo é calculado pela Eq. 20.

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (20)$$

Em que, Si são valores preditos, Oi valores observados e $\bar{O}$ é a média do observado.

O Coeficiente de Determinação (R^2) é um indicativo do ajustamento do modelo estatístico com relação aos valores observados, dado pela Eq. 21.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)(S_i - S_{med})}{[\sum_{i=1}^N (O_i - O_{med})^2]^{0,5} [\sum_{i=1}^N (S_i - S_{med})^2]^{0,5}} \right\}^2 \quad (21)$$

Onde Smed é a média das simulações do modelo.

3.4 EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS

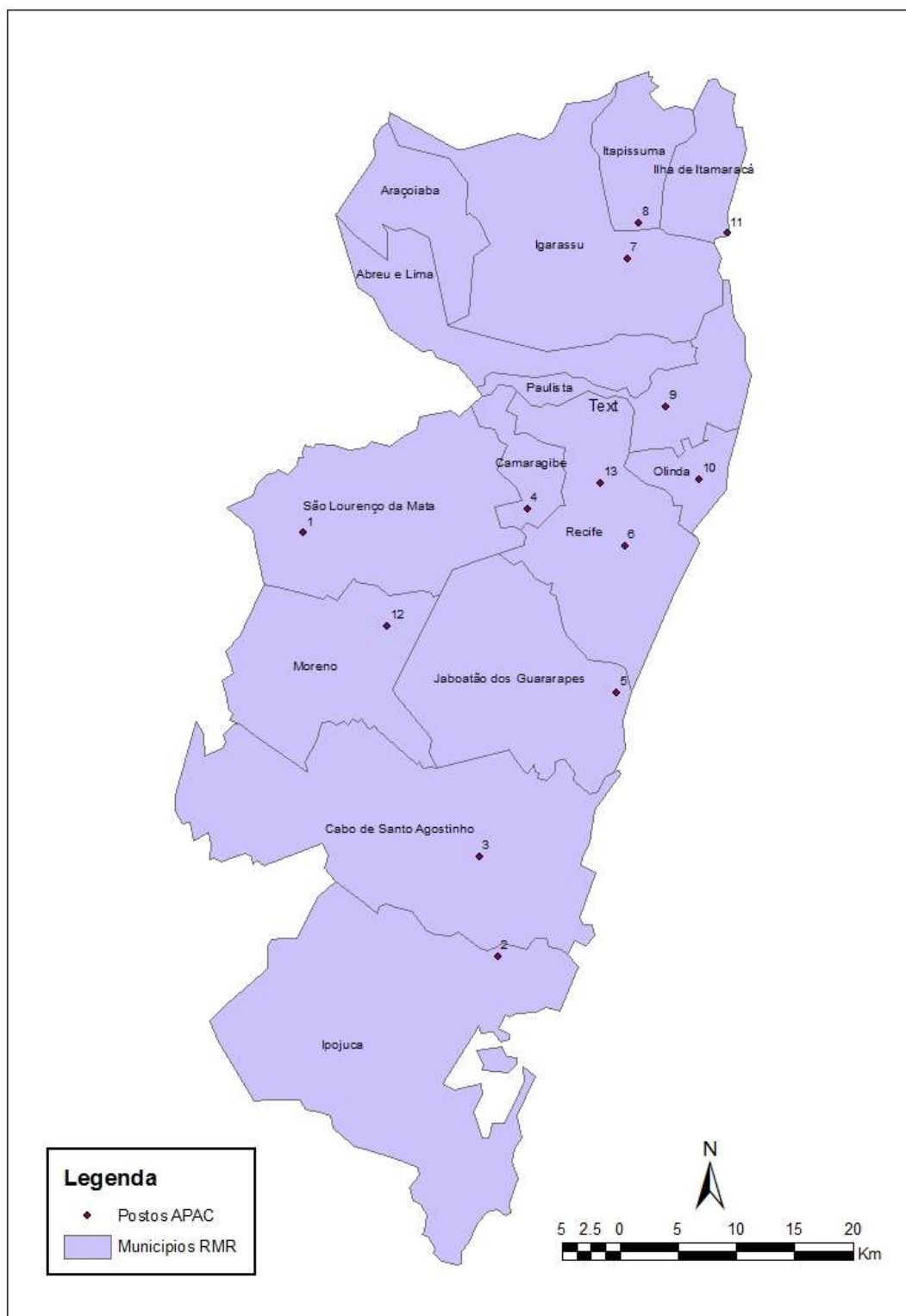
Para a determinação das curvas IDF da RMR e áreas circunvizinhas foram utilizados dois conjuntos de dados pluviométricos disponibilizados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). A escolha dos postos contidos na RMR se deu pela disponibilidade de dados históricos. Ao todo foram 16 postos pluviométricos selecionados (Tabela 3), sendo 13 para a série de 10 anos e 4 para a série com mais de 30 anos de dados (desses 4 postos utilizados na série com mais de 30 anos, 3 foram utilizados para a série de 10 anos). Abaixo detalhes dos conjuntos de dados utilizados para a estimativa das IDF.

- Valores diários de precipitação no intervalo de janeiro de 2003 a dezembro de 2013, contabilizando uma série de 10 anos de dados;
- Valores diários de precipitação com séries históricas superiores a 30 anos de dados de forma não contínua;

A Figura 6 mostra a distribuição espacial dos postos pluviométricos contidos na RMR e áreas circunvizinhas. Os postos são administrados pela APAC, a qual disponibiliza os dados diários no seu sítio na Internet. Os horários para o cômputo da precipitação diária utilizados pela APAC são os mesmos estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), às 09:00.

A fase de aquisição de dados deu-se por meio do sítio da APAC na Internet, no qual são disponibilizados os valores diários das alturas pluviométricas para cada posto.

Figura 6 - Postos pluviométricos utilizados para determinação das Equações de Chuvas Intensas.



Fonte: O autor, 2018.

Em posse das séries pluviométricas de 10 anos (2003-2013) e das que tinham mais de 30 anos (intervalos não sequenciados), o próximo passo foi a extração dos valores máximos das precipitações anuais, séries anuais. Em seguida foram utilizados os coeficientes de desagregação de chuva sugeridos pelo DAEE/CETESB para estabelecer as alturas precipitadas máximas anuais para cada duração de 5, 10, 20, 25, 30, 60, 120, 180, 360, 480, 600, 720, 1440 minutos, para cada posto pluviométrico. A seleção das precipitações máximas com relação a um valor mínimo para cada duração foi realizada com base nos valores utilizados por Recife (2016) (Tabela 3) no desenvolvimento da equação de chuvas intensas para o Plano Diretor de Drenagem Urbana da Cidade de Recife.

Tabela 3. Valores adotados como precipitações mínimas a serem consideradas como chuvas intensas para cada duração.

Recife (2016) - Plano Diretor de Drenagem Urbana de Recife		Pfaffstetter (1957)	Wilken (1978)	Valores adotados
Duração	P (mm)	P (mm)	P (mm)	P (mm)
5	8	8	10	8
10	10	-	12	10
30	20	20	20	20
60	25	25	25	25
120	30	30	30	30
180	33	-	33	33
360	40	-	-	40
720	47	47	-	47
1440	55	55	-	55

Fonte: Adaptado de Recife (2016)

A obtenção das precipitações máximas possíveis de serem igualadas ou superadas a cada 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos, a partir das séries anuais, foi através da distribuição estatística de valores extremos de Gumbel para máximos, ou simplesmente distribuição de Gumbel (Eq. 22). Para a verificação

da representatividade da distribuição de Gumbel utilizou-se o teste estatístico não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, o qual Naghettini e Pinto (2007) descrevem em detalhes.

$$P_t = \bar{x} + (y - y_n) \frac{S}{S_n} \quad (22)$$

em que: P_t (mm) é a precipitação máxima com período de retorno T anos, $\bar{x}$ é a média da série de máximas anuais (mm), S é o desvio padrão da série de máximas anuais (mm), Y_n é a média da variável reduzida, S_n é o desvio padrão da variável reduzida e Y é a variável reduzida, calculada pela Equação 23.

$$Y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (23)$$

em que T é o período de retorno em anos.

A determinação dos coeficientes da equação de chuvas intensas, se iniciou pela substituição do numerador da Eq. 24 pelo coeficiente C , ou seja, $C=aT^b$, gerando assim a Eq. 25. Esse procedimento foi necessário para a aplicação das propriedades dos logarítmicos. Em seguida, foi realizado o processo de linearização, para poder chegar finalmente na estimativa da intensidade de chuva.

$$i = \frac{aT^b}{(t+c)^d} \quad (24)$$

em que:

$$i = \frac{C}{(t+c)^d} \quad (25)$$

onde: i é a intensidade da chuva (mm/h), T é o período de retorno (anos), t é a duração (minutos) e a , b , c , d são parâmetros relativos à localidade.

Com a determinação dos parâmetros a , b , c e d , foram obtidas as equações de chuvas intensas para os 14 municípios da RMR (ver Tabela 1). Para efeitos de comparação entre os valores das intensidades máximas de precipitação calculados pela distribuição de Gumbel e os determinados pelas equações IDF recém geradas, foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2) (Eq. 26).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T}) \times (M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2 \times \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}} \right]^2 \quad (26)$$

onde: M_i são os valores calculados pela Equação de Chuvas Intensas, T_i são os valores calculados pela distribuição de Gumbel, N são os números de pares de variáveis calculadas (pela distribuição e pela equação), $\bar{M}$, $\bar{T}$ são as médias dos calculados pela Equação de chuvas Intensas e pela distribuição de Gumbel, respectivamente.

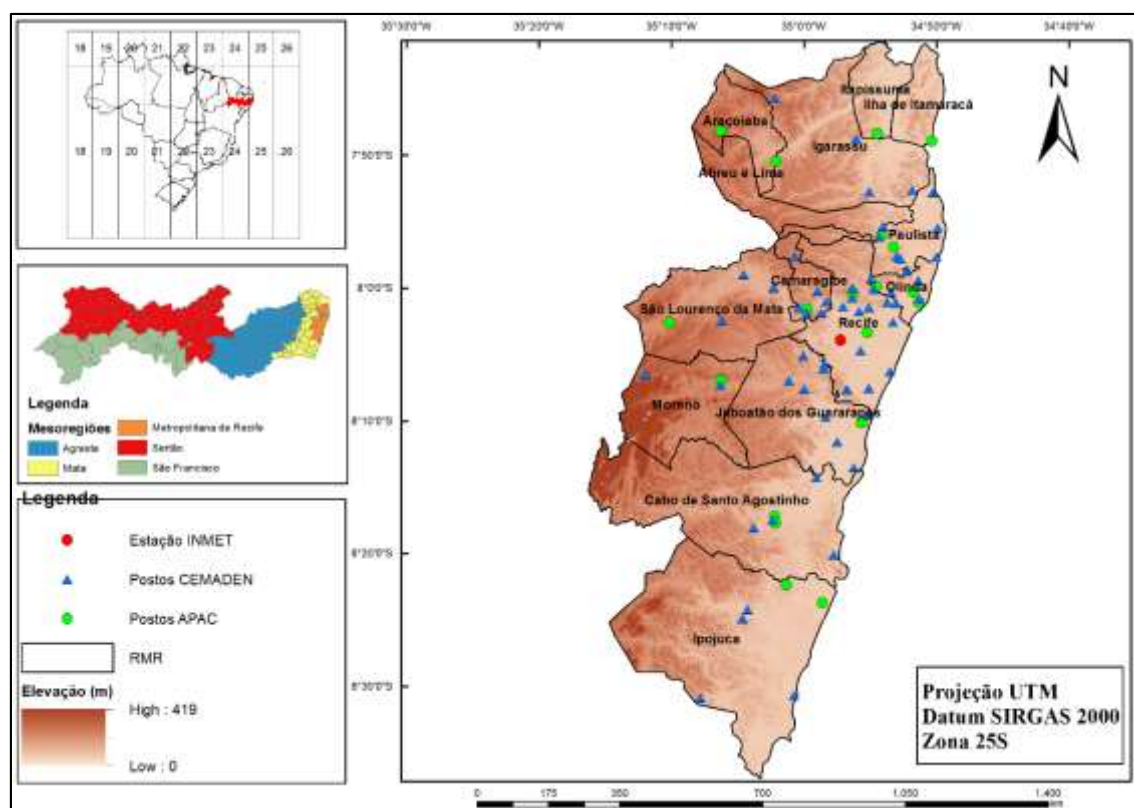
3.5 ESTUDO DOS EVENTOS EXTREMOS OCORRIDOS NA RMR

Essa etapa do projeto objetivou-se em quantificar, caracterizar e analisar os eventos extremos ocorridos na Região Metropolitana do Recife no período compreendido entre os anos de 2010 e 2016, baseando-se em dados pluviométricos, imagens de satélites e cartas sinóticas.

Os dados de precipitação pluviométrica utilizados no presente trabalho foram obtidos nos sítios da Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e do Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais – CEMADEN na Internet. Foram avaliados os dados de 81 postos pluviométricos na RMR, sendo 22 da APAC (discretização

temporal de 24h) e 59 do CEMADEN (registro de dados a cada 10 minutos). Também foram utilizados os registros pluviométricos do posto do INMET em Recife. A distribuição espacial dos postos pluviométricos na RMR (Figura 7) não é uniforme, apresentando densidade alta de estações nos municípios de Jaboatão dos Guararapes, Recife, Camaragibe, Olinda e Paulista e, nos demais - porções norte, sul e oeste - baixa densidade, ou até, tendo ausência de postos pluviométricos. O período analisado no presente estudo foi entre os anos de 2010 e 2016, no entanto, o detalhamento dos eventos em escala subdiária só foi possível a partir de 2014, haja vista que o início do monitoramento pluviométrico pelo CEMADEN iniciou-se plenamente nesse ano.

Figura 7 - Área de estudo – Região Metropolitana de Recife – RMR - com os limites municipais, Modelo de Elevação do Terreno (m), localização dos postos pluviométricos da Agência Pernambucana de Águas e Clima e do Centro de Alerta e Monitoramento de Desastre Naturais.



Fonte: O autor, 2018.

Na literatura não há uma definição concisa sobre eventos extremos de precipitação. Nos seus estudos sobre variabilidade interanual de eventos

extremos de precipitação para o Estado de São Paulo, Liebman et al. (2001), definiu os eventos extremos como aquele que excedia um percentual da sua média sazonal ou anual. Teixeira e Satyamurty (2007), consideraram que um evento extremos seria aquele que a isoietas de 50,0 mm em 24 horas varresse uma área superior a 10.000 km². Loureiro et al. (2014), após uma avaliação geral dos dados de precipitação em cinco estações meteorológicas do INMET no município de Belém para o ano de 2009, selecionou os dados maiores ou iguais a 25 mm em um período de 24 horas e que fosse registrado em pelo menos uma das estações analisadas.

O presente estudo considerou eventos significativos todos os registros que se igualavam ou superavam o valor de 50 mm em 24 horas. O limiar foi estabelecido mediante a aplicação da técnica dos percentis nas séries de dados das estações pluviométricas das cidades da RMR com maior adensamento populacional e que são mais afetadas pelas chuvas intensas. Para esses postos, os totais de precipitação em 24 horas correspondentes ao percentil 99 superaram o limiar.

Os eventos de chuva que se igualaram ou ultrapassaram o limiar foram submetidos ao método estatístico dos percentis ou análise dos quantis (LOUREIRO et al., 2014) e selecionados os limites de 34% e 66%. Os eventos foram classificados como Intensos (I) - precipitação em 24 horas foi entre 50,0 e 67,0 mm – Muito Intenso (MI) – precipitação em 24 horas foi entre 67,1 e 84,0 mm – e Altamente Intenso (AI) – precipitação em 24 horas superou 84,0 mm (Tabela 4).

Tabela 4. Classes de eventos extremos de precipitação pluviométrica.

Classes	Precipitação (mm)
Intenso - I	50,0 – 67,0
Muito Intenso – MI	67,1 – 84,0
Altamente Intenso - AI	> 84,0

Foi estudada a variabilidade espaço-temporal dos eventos considerados Altamente Intensos (AI), com abrangência maior que 50% da RMR e que ocasionaram grandes impactos socioeconômicos, com o intuito de melhor entendê-los. Os mapas de variabilidade espacial foram realizados por meio de software em ambiente SIG – Sistema de Informação Geográfica – utilizando o método do Inverso do Quadrado da Distância.

Para caracterizar a situação sinótica associada aos eventos Altamente Intensos (AI) selecionados, foram utilizadas imagens do canal infravermelho realçado (IRR) do Satélite *Geoestationary Operational Environmental Satellite* (GOES), além de cartas sinóticas elaboradas pelo Grupo de Previsão de Tempo (GPT) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPCTE/INPE em baixos e altos níveis da atmosfera. Para análise de fenômenos associados a sistemas de mesoescala foram utilizados os produtos gerados pelo modelo regional ETA, numa grade de 15x15 km, disponibilizados pelo CPTEC/INPE.

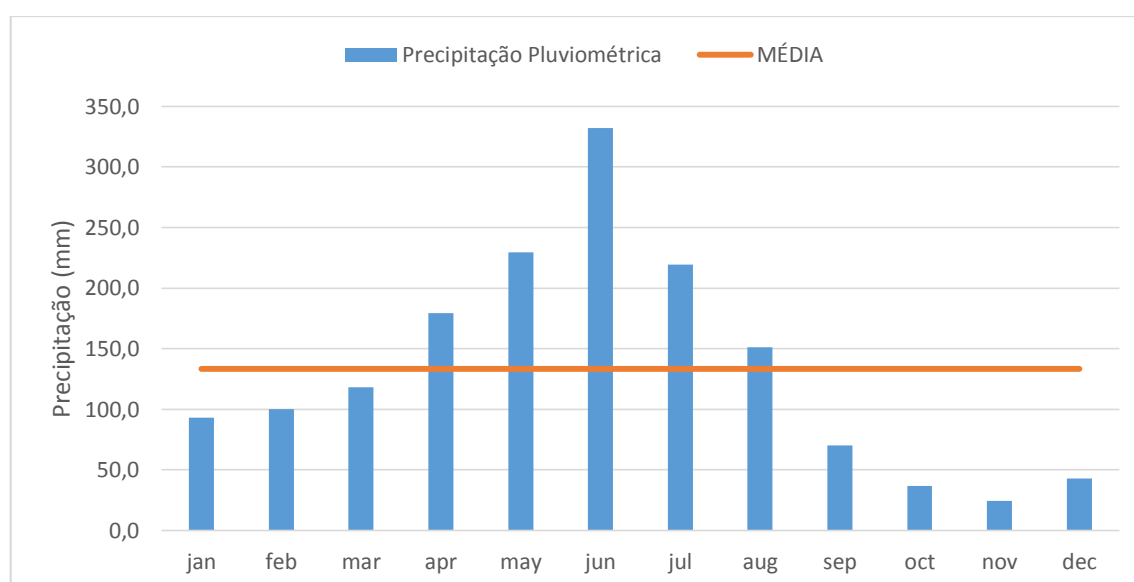
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente tópico apresenta os resultados alcançados pelo trabalho, assim como, as discussões que se desenvolveram ao longo do estudo.

4.1 VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO DIÁRIA

A Figura 8 mostra a variação sazonal das médias dos acumulados mensais de todos os postos pluviométricos para o todo o período analisado na presente pesquisa. Os meses de abril a agosto compõem o período chuvoso da região, correspondendo por quase 70% da precipitação anual. Os valores extremos se deram nos meses de junho, maior valor (332,2 mm), e em novembro, menor valor (24,3 mm). Os meses de janeiro a março constituem um período de precipitações intermediárias, com valores variando entre 93,0 mm e 118,2 mm. Os meses de setembro a dezembro foram os mais secos da região, nos quais o valor máximo foi inferior a 70 mm, e cuja soma desses não ultrapassou 174,0 mm.

Figura 8 - Variabilidade sazonal da precipitação acumulada média mensal, em mm, utilizando todas as estações em estudo.



Fonte: O autor, 2018.

4.1.1 Coeficientes da equação de regressão

Na Tabela 5 estão contidos os coeficientes obtidos através da regressão linear múltipla, assim como o Erro Médio (EM), o Erro Médio Absoluto (EMA), O Erro Quadrático Médio (EQM), o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a Eficiência Volumétrica (EV), o PBIAS, o Índice de Acordo (D) e o Coeficiente de Determinação (R^2), considerando as alturas pluviométricas mensais e anuais, medidas e estimadas, nos postos pluviométricos listados na Tabela 2.

De acordo com o valor de R^2 (Tabela 5), para o período considerado, nota-se que a variabilidade da precipitação pluviométrica anual se relaciona com as condições de relevo em mais de 85% dos casos. Na escala mensal observa-se que os meses que compõem o período chuvoso da região (abril, maio, junho, julho e agosto) apresentaram as melhores correlações, destacando o mês de junho por apresentar o maior valor de R^2 (0,867). Por sua vez, o mês de novembro teve o mais baixo índice de correlação ($R^2=0,52$). A alta (baixa) relação precipitação/altitude no período mais chuvoso (seco) pode ser explicada pela regularidade (irregularidade) com que os sistemas causadores de precipitação na região atuam. Nos meses chuvosos os sistemas causadores de precipitação são bem definidos e atuam regularmente, com menor ou maior intensidade, dependendo de fatores oceânicos e/ou atmosféricos. Já no período seco, o padrão de atuação dos sistemas atuantes é inconstante, por exemplo, as diferentes posições dos Vórtices Ciclônicos sobre o Nordeste do Brasil, o qual pode ocasionar chuvas intensas ou períodos de estiagem em determinadas áreas, dependendo da localização da sua borda. Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Silva et al. (2011), em que, a variabilidade da precipitação pluvial no Nordeste do Brasil é menor no período chuvoso que no período seco.

Tabela 5. Coeficientes utilizados para estimativa da precipitação pluvial mensal e anual e, seus respectivos coeficientes EM, EMA, EQM, REMQN, NSE, EV, PBIAS%, D e R², para a RMR.

	COEFICIENTES												
	β_0	β_1	β_2	β_3	EM	EMA	EQM	REMQN	NSE	EV	PBIAS %	D	R ²
Jan	5738,722	-31,943	168,470	0,067	0,000	11,970	15,027	50,6	-0,033	0,871	0,0	0,916	0,733
Fev	4771,200	-20,875	138,061	0,034	-0,013	13,239	17,329	60,5	0,299	0,868	0,0	0,870	0,618
Mar	6285,000	-60,770	189,700	0,000	0,560	14,681	16,857	42,1	0,69	0,876	0,5	0,946	0,814
Abr	9675,302	-86,525	290,354	-0,058	0,000	24,453	30,023	44,5	0,686	0,864	0,0	0,940	0,793
Mai	12970,000	-95,610	385,000	0,056	-1,585	26,428	32,295	38,5	0,659	0,885	-0,7	0,956	0,845
Jun	14370,086	-108,933	425,122	-0,011	0,000	24,318	30,854	35,7	0,818	0,927	0,0	0,963	0,867
Jul	13390,000	-47,860	386,600	0,091	4,996	20,159	29,493	42,1	0,568	0,908	2,3	0,947	0,820
Ago	6445,091	-78,522	197,254	-0,050	0,000	16,667	18,984	40,3	0,676	0,890	0,0	0,951	0,830
Set	4177,503	123,728	-28,560	0,029	0,000	9,982	13,031	53,2	0,161	0,857	0,0	0,908	0,704
Out	1885,274	-24,220	58,274	0,012	0,001	7,052	8,956	64,3	0,358	0,808	0,0	0,849	0,568
Nov	650,545	-8,460	19,759	-0,010	0,000	5,581	7,047	81,5	0,042	0,771	0,0	0,669	0,305
Dez	1196,044	-15,868	36,433	-0,025	0,000	6,880	8,853	67,7	0,472	0,839	0,0	0,826	0,520
Anual	81553,126	2418,819	-608,145	0,023	-4,658	126,925	179,892	37,0	0,756	0,921	-0,3	0,960	0,857

Fonte: O autor, 2018.

A variabilidade sazonal dos valores do intercepto (β_0) se comportaram similarmente à precipitação pluviométrica, apresentando valores mais elevados no período chuvoso (máximo no mês de junho, igual a 13.390,000) e mais baixos no período de seco (mínimo de 650,545 no mês de novembro). O valor anual foi de 81553,12.

Com relação ao coeficiente latitudinal (β_1), observa-se comportamento similar ao intercepto, no entanto, os valores são negativos. Os valores extremos para esse coeficiente se deu para os mesmos meses, mínimo em junho (-108,933mm/°) e máximo em novembro (-8,460mm/°).

Os coeficientes longitudinais (β_2) tiveram uma grande variabilidade, tendo seus extremos nos meses de junho (425,122 mm/°) e setembro (12,736 mm/°).

O coeficiente (β_3) que representa a variabilidade da precipitação relacionado a altitude, apresentou uma alternância de seu comportamento sazonal, fazendo com que alguns meses tivessem redução da precipitação com a altitude (abril, maio, junho, agosto, novembro e dezembro) e em outros o efeito contrário (janeiro, fevereiro, março, julho, setembro e outubro). Nota-se que os meses do período chuvoso, com exceção de julho, apresentaram correlação negativa desse parâmetro, ou seja, nos meses do período chuvoso fica mais nítido a presença das chuvas orográficas e consequentemente a redução da precipitação com a altitude.

4.1.2 Análise dos parâmetros estatísticos

Os valores do Erro Médio (EM) foram próximos de zero em quase todos meses do ano, o que significa que os valores preditos estão próximos dos observados nesses meses. Os meses em que o EM se afastou mais de zero foram julho (4,996 mm), maior (-1,585 mm) e março (-0,013 mm). O valor anual foi de -4,658 mm.

Os valores do Erro Médio Absoluto (EMA) foram mais elevados nos meses considerado chuvosos, devido a maior variabilidade espacial e temporal da precipitação nesses meses, mostrando assim, que a média dos erros do modelo

foram maiores. Os valores extremos de EMA foram 26,428 mm no mês de maio e 5,581 mm no mês de novembro.

Comportamento similar ao EMA, também foi observado no Erro Quadrático Médio (EQM), inclusive nos meses que ocorreram os valores extremos, maio (32,295 mm) e novembro (7,047 mm). Os meses de abril, junho e julho tiveram um EQM de 30,023 mm, 30,854 mm e 429,493 mm, respectivamente. Levando-se em consideração apenas esse parâmetro estatístico para medir o desempenho do modelo, pode-se deduzir que, para o período chuvoso o modelo apresentou os piores resultados. Isso se confirma também quando se avalia o EMA e EQM, os quais nesses meses apresentam valores acentuados.

No entanto, os parâmetros normalizados (Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático Normalizado - REMQN e Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe - NSE) indicam que, nos meses mais chuvosos a adequação do modelo foi mais satisfatória, uma vez que, esses parâmetros levam em consideração a amplitude da lâmina de precipitação mensal e, portanto, são mais significativos para avaliar a adequação do modelo. O menor valor de REMQN se deu no mês de junho (35,7 mm), implicando em melhor adequação do modelo, e o maior no mês de novembro (81,5 mm), menor adequação do modelo. O valor anual de REMQN foi de 37 mm. Essa perda da eficiência do modelo no período do verão deve-se a alta variabilidade da precipitação nesse período, tanto espacial quanto temporal. Nóbrega et al. (2014), sugeriram um estudo mais aprofundado da variabilidade espacial da precipitação no Estado de Pernambuco devido à grande variabilidade climática interanual e intrasazonal dessa variável e também pelo fato das temperaturas da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico desempenharem papel primordial nas chuvas no Estado.

Quanto aos valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe - NSE, quanto mais próximos de 1 melhor o ajuste do modelo. Observa-se que o NSE para o mês de junho foi o que apresentou resultado mais próximo de 1, com valor de 0,818, já o mês de janeiro apresentou comportamento inverso, chegando a - 0,033 e, portanto, pode-se afirmar nesse caso, que a média observada representaria melhor preditor do que o modelo, uma vez que, a variância residual (numerador da equação do NSE) é maior que a variância dos dados

(denominador da equação do NSE). O valor anual também ficou abaixo de zero (-0,3) e também seria melhor representado pela média observada ao invés do modelo.

Os valores da Eficiência Volumétrica - EV foram maiores nos meses chuvosos, apresentando os extremos nos meses de junho (0,927) e em novembro (0,771).

A tendência das estimativas é avaliada pelo viés (PBIAS). Observa-se que para todos os meses os valores de PBIAS foram próximos de zero, no entanto para os meses de março (0,5 mm) e julho (2,3 mm) o modelo superestimou os valores observados, já no mês de maio (-0,7 mm) houve uma subestimativa.

Segundo o Índice de Acordo (D), que quando mais próximo de 1 melhor o ajuste do modelo, então, a maioria desses meses estiveram próximo de 1, indicando que os dados estimados estão de acordo com os dados médio observado. Os índices variaram de 0,963 (Jun) a 0,669 (nov).

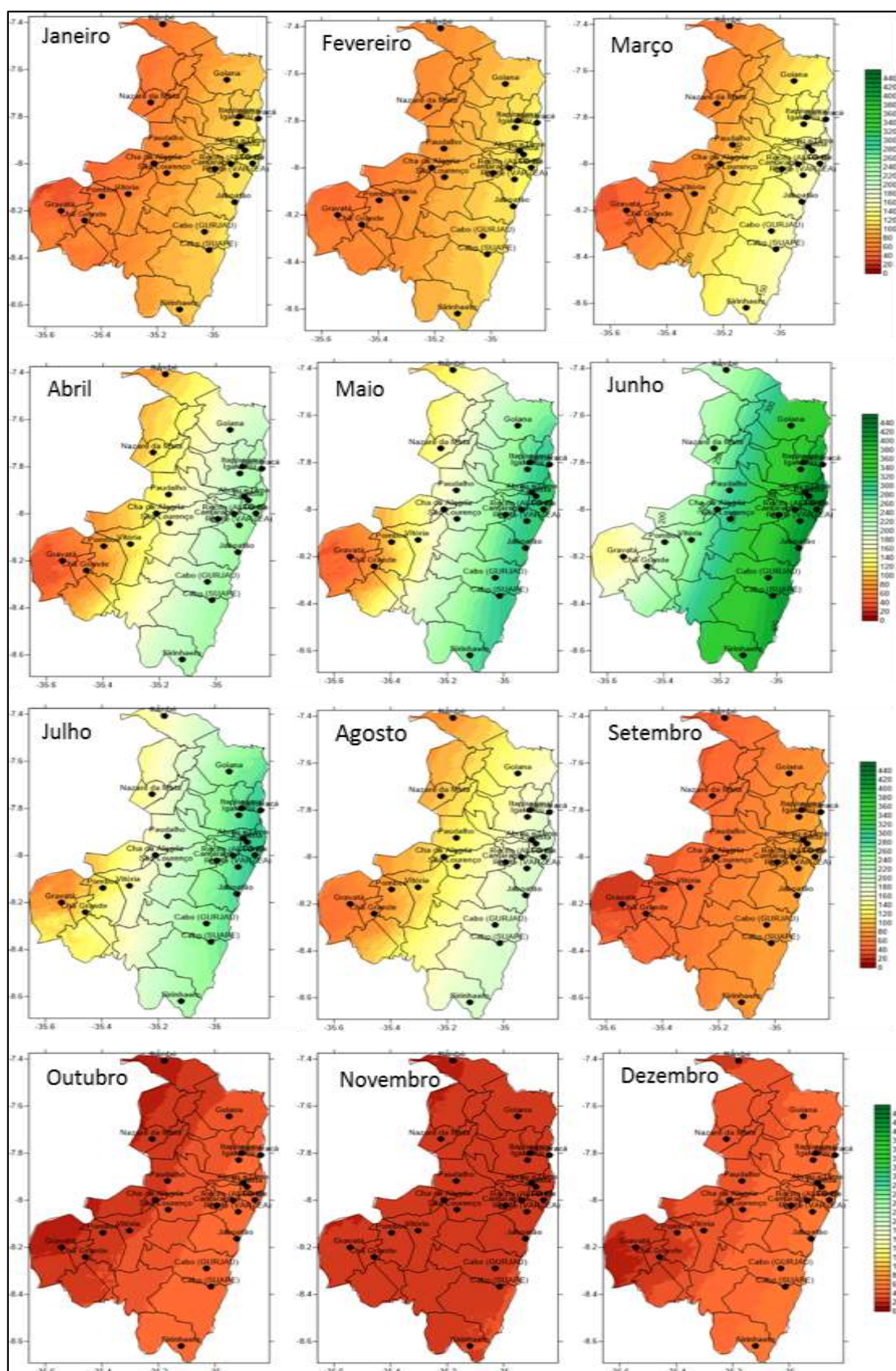
4.1.3 Espacialização sazonal da precipitação pluviométrica

A espacialização sazonal da precipitação pluviométrica para a RMR e áreas circunvizinhas está apresentada na Figura 9. Nota-se em todos os meses do ano os maiores totais pluviométricos são observados na parte litorânea da RMR. Na zona de transição da zona da mata e o agreste, onde as massas de ar vindas do oceano encontram a Serra das Russas, ocorrem as precipitações orográficas, as quais atingem os municípios de Vitória de Santo Antão e Pombos com mais intensidade. Os municípios de Chã da Alegria e Gravatá, por estarem acima da Serra, têm totais pluviométricos menores, uma vez que, as massas de ar ao chegarem a esses municípios já se encontram com baixa quantidade de vapor d'água. No sentido norte-sul, é notório, principalmente nos meses mais chuvosos, a ocorrência de maiores valores pluviométricos na porção sul da região em estudo quando comparado a região norte, no entanto, os totais pluviométricos mais expressivos na região são encontrados na porção central, nos municípios de Olinda.

Verifica-se que de janeiro a março, as alturas pluviométricas assemelham-se. O período chuvoso da região compreende os meses de abril a agosto. Nesse período diversos sistemas meteorológicos atuam sobre a região, tais como as extremidades frontais, os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) e as Ondas de Leste (OL). Segundo Silva et al. (2011), os maiores valores de número de dias de chuva em grande parte da região Nordeste do Brasil ocorrem no primeiro semestre do ano devido a atuação da ZCIT e dos DOLs. No período de julho a dezembro, as precipitações começam a reduzir gradativamente. Porém, o mês de novembro foi o mês com as menores alturas pluviométricas registradas no presente estudo.

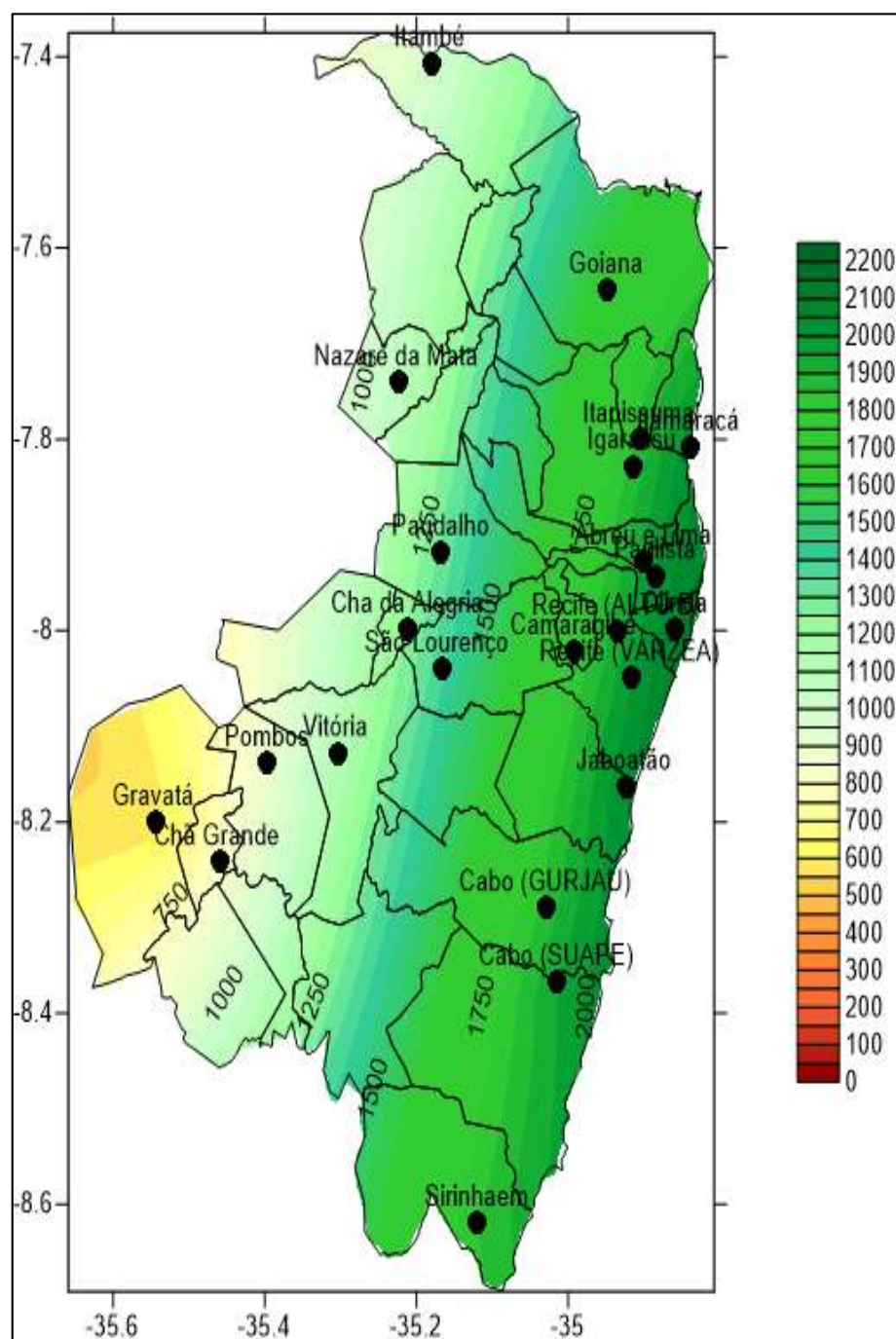
A variabilidade anual da precipitação pluvial na RMR e áreas circunvizinhas está disposta na Figura 10. Observa-se que os maiores totais anuais se encontram na faixa litorânea, principalmente na porção central da RMR, reduzindo à medida que desloca para oeste do continente. Na escala anual também se verifica a redução da precipitação no decorrer da subida das Serra das Russas, na zona de transição entre a zona da mata e o agreste pernambucano.

Figura 9 - Variabilidade espacial mensal da precipitação pluvial, em mm, para a RMR e áreas circunvizinhas.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 10 - Espacialização anual da precipitação pluviométrica, em mm, da RMR e áreas circunvizinhas.



Fonte: O autor, 2018.

4.2 EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS

A determinação das equações de chuvas intensas para as cidades da RMR foi iniciada pela análise de frequência das séries anuais de precipitação máxima, no qual foi feito o ajuste da distribuição de Gumbel.

O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov foi aplicado para avaliar o ajuste da distribuição de Gumbel com nível de significância de 5%. Esse teste consiste em rejeitar a hipótese de adequação do ajuste caso o valor encontrado pela diferença máxima entre os valores observados e ajustados for superior ao crítico, para um determinado nível de significância. A Tabela 6 mostra os valores do teste supracitado (D_n , max) para cada duração considerada, assim como, o número de amostra (n) e os valores limites de acordo com o grau de significância e o número de amostras (D_n , crítico). Os valores do teste de aderência para todas as durações foram inferiores ao valor limite para o nível de significância de 5%, o que atesta a boa aderência da distribuição de Gumbel aos dados observados.

Tabela 6. Valor absoluto do teste de Kolmogorov-Smirnov (D_n , max) para o ajuste da distribuição de Gumbel, para cada duração considerada.

Duração (minutos)	D_n , max	n	D_n crítico (5% de significância)
5	0,31	8	0,41
10	0,28	8	0,41
20	0,28	8	0,41
25	0,25	8	0,41
30	0,25	8	0,41
60	0,29	8	0,41
120	0,23	8	0,41
180	0,21	8	0,41
360	0,26	8	0,41
480	0,27	8	0,41
600	0,34	8	0,41
720	0,32	8	0,41
1440	0,26	8	0,41

Fonte: O autor, 2018.

Com a comprovação da aderência da distribuição de Gumbel através do teste estatístico, foi realizada a determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. A Tabela 7 mostra os coeficientes das equações de chuvas intensas, assim como as respectivas equações para 16 postos, dos quais 13 são na RMR, que dispunham de dados entre 2003 e 2013 (série de 10 anos).

A fim de confirmar a hipótese da existência de heterogeneidade das relações IDF na RMR, foram realizadas as etapas de elaboração de duas Tabelas (Tabelas 8 e 9) contendo as intensidade máximas de precipitação obtidas pelas equações desenvolvidas no presente trabalho para os municípios da RMR. Foram utilizados os tempos de retorno de 2, 5 10 e 25 anos e as durações de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 360, 480, 720 e 1440 minutos. Os resultados mostraram que houve variabilidade da intensidade máxima de precipitação de 36%, 43%, 48% e 53% para os tempos de retorno de 2, 5, 10 e 25 anos, respectivamente. Esses valores máximos foram observados entre as IDF desenvolvidas para as cidades de Cabo de Santo Agostinho (maiores valores de intensidade) e Itamaracá (menores valores de intensidade). A alta variabilidade das intensidades máximas de precipitação confirmam a hipótese da heterogeneidade das relações IDF na RMR e ratificam a conclusão de Carvalho et al. (1993) que a distribuição espacial da precipitação na RMR não é homogênea e, portanto, não seria adequado utilizar uma única IDF para toda essa área.

Adiante encontra-se os resultados do estudo da variabilidade espacial das relações IDF para a RMR, os quais, conjuntamente como a etapa supracitada, corroboram para a confirmação da heterogeneidade das relações IDF na RMR e que, portanto, não é recomendado a utilização de uma única equação de chuvas intensas para RMR.

Tabela 7. Coeficientes das equações de chuvas intensas para os municípios da RMR e áreas circunvizinhas

c	a	b	c	d	Equação
Ipojuca	952,91	0,1901	9	0,7299	$i = \frac{952,91 * T^{0,1901}}{(t + 9)^{0,7299}}$
Cabo (Gurjau)	1103,783	0,266032	9	0,729948	$i = \frac{1103,78 * T^{0,266}}{(t + 9)^{0,7299}}$
Cabo (Suape)	924,0104	0,174215	9	0,729948	$i = \frac{924,01 * T^{0,1742}}{(t + 9)^{0,7299}}$
Camaraçibe	818,3388	0,14299	9	0,729948	$i = \frac{818,34 * T^{0,143}}{(t + 9)^{0,7299}}$
Goiana	882,1509	0,142552	9	0,730865	$i = \frac{882,15 * T^{0,1426}}{(t + 9)^{0,7309}}$
Igarassu	832,5162	0,139577	9	0,729948	$i = \frac{832,52 * T^{0,1396}}{(t + 9)^{0,7299}}$
Itamaracá	772,6687	0,13983	9	0,729948	$i = \frac{772,67 * T^{0,1398}}{(t + 9)^{0,7299}}$
Itapsissuma	878,8344	0,161663	9	0,729948	$i = \frac{878,83 * T^{0,1617}}{(t + 9)^{0,7299}}$
Jaboatão	813,3806	0,158097	9	0,731389	$i = \frac{813,38 * T^{0,1581}}{(t + 9)^{0,7314}}$
Olinda	952,8791	0,092052	9	0,729948	$i = \frac{952,88 * T^{0,0921}}{(t + 9)^{0,7299}}$

Paulista	880,0848	0,132999	9	0,729948	$i = \frac{880,08 * T^{0,133}}{(t + 9)^{0,7299}}$
Recife	1012,215	0,094174	9	0,729948	$i = \frac{1012,21 * T^{0,0942}}{(t + 9)^{0,7299}}$
São Lourenço	760,4612	0,193787	9	0,728739	$i = \frac{760,46 * T^{0,1938}}{(t + 9)^{0,7287}}$
Paudalho	924,76	0,0906	9	0,7384	$i = \frac{924,76 * T^{0,0906}}{(t + 9)^{0,7384}}$
Paudalho (Barragem)	870,98	0,0923	10	0,7381	$i = \frac{870,98 * T^{0,0923}}{(t + 9)^{0,7381}}$
Itambé	936,34	0,1703	9	0,7457	$i = \frac{936,34 * T^{0,1703}}{(t + 9)^{0,7457}}$

Fonte: O autor, 2018.

Tabela 8. Intensidades máximas anuais (mm/h) das precipitações calculadas pelas equações de chuvas intensas elaboradas para os municípios da Região Metropolitana de Recife (Tabela 7) para os tempos de retorno de 2 e 5 anos.

T (anos)	Municípios	Duração (min)										
		5	10	15	20	30	60	120	360	480	720	1440
2	Ipojuca	158.4	126.7	106.9	93.1	75.0	49.4	31.3	14.5	11.8	8.8	5.4
	Cabo (Gurjaú)	193.4	154.7	130.5	113.6	91.5	60.4	38.2	17.7	14.5	10.8	6.5
	Camaragibe	131.6	105.3	88.8	77.4	62.3	41.1	26.0	12.1	9.8	7.4	4.5
	Goiana	141.5	113.2	95.4	83.1	66.9	44.1	27.9	13.0	10.5	7.9	4.8
	Igarassu	133.6	106.9	90.1	78.5	63.2	41.7	26.4	12.3	10.0	7.5	4.5
	Itamaracá	124.0	99.2	83.7	72.9	58.7	38.7	24.5	11.4	9.3	6.9	4.2
	Itapissuma	143.2	114.6	96.6	84.2	67.8	44.7	28.3	13.1	10.7	8.0	4.8
	Jaboatão	131.7	105.3	88.8	77.3	62.3	41.0	26.0	12.0	9.8	7.3	4.4
	Olinda	148.0	118.4	99.8	87.0	70.0	46.2	29.3	13.6	11.1	8.3	5.0
	Paulista	140.6	112.5	94.9	82.6	66.6	43.9	27.8	12.9	10.5	7.9	4.8
	Recife	157.4	126.0	106.2	92.5	74.5	49.1	31.1	14.4	11.8	8.8	5.3
	São Lourenço	127.1	101.8	85.8	74.8	60.2	39.8	25.2	11.7	9.5	7.1	4.3
5	Ipojuca	188.5	150.9	127.2	110.8	89.2	58.9	37.3	17.3	14.1	10.5	6.4
	Cabo (Suape)	246.7	197.4	166.5	145.0	116.8	77.0	48.8	22.6	18.4	13.8	8.3
	Camaragibe	150.1	120.1	101.3	88.2	71.0	46.8	29.7	13.8	11.2	8.4	5.1
	Goiana	161.3	129.0	108.8	94.7	76.3	50.3	31.8	14.8	12.0	9.0	5.4
	Igarassu	151.8	121.5	102.4	89.2	71.9	47.4	30.0	13.9	11.3	8.5	5.1
	Itamaracá	141.0	112.8	95.1	82.8	66.7	44.0	27.9	12.9	10.5	7.9	4.8
	Itapissuma	166.1	132.9	112.1	97.6	78.6	51.8	32.8	15.2	12.4	9.3	5.6
	Jaboatão	152.2	121.8	102.6	89.4	72.0	47.4	30.0	13.9	11.3	8.5	5.1
	Olinda	161.0	128.8	108.6	94.6	76.2	50.2	31.8	14.8	12.0	9.0	5.4
	Paulista	158.8	127.1	107.2	93.3	75.2	49.6	31.4	14.6	11.9	8.9	5.4
	Recife	171.6	137.3	115.8	100.8	81.2	53.6	33.9	15.8	12.8	9.6	5.8

	São Lourenço	151.8	121.5	102.5	89.3	72.0	47.5	30.1	14.0	11.4	8.5	5.2
--	--------------	-------	-------	-------	------	------	------	------	------	------	-----	-----

Fonte: O autor, 2018.

Tabela 9. Intensidades máximas anuais (mm/h) das precipitações calculadas pelas equações de chuvas intensas elaboradas para os municípios da Região Metropolitana de Recife (Tabela 7) para os tempos de retorno de 10 e 25 anos.

T (anos)	Municípios	Duração (min)										
		5	10	15	20	30	60	120	360	480	720	1440
10	Ipojuca	215.1	172.1	145.1	126.4	101.8	67.1	42.5	19.7	16.1	12.0	7.3
	Cabo (Suape)	296.7	237.4	200.2	174.4	140.4	92.6	58.7	27.2	22.2	16.6	10.0
	Camaragibe	165.7	132.6	111.8	97.4	78.5	51.7	32.8	15.2	12.4	9.3	5.6
	Goiana	178.0	142.4	120.0	104.5	84.2	55.5	35.1	16.3	13.3	9.9	6.0
	Igarassu	167.2	133.8	112.8	98.3	79.2	52.2	33.1	15.4	12.5	9.3	5.7
	Itamaracá	155.3	124.3	104.8	91.3	73.5	48.5	30.7	14.3	11.6	8.7	5.3
	Itapissuma	185.8	148.6	125.3	109.2	87.9	58.0	36.7	17.1	13.9	10.4	6.3
	Jaboatão	169.9	135.9	114.5	99.7	80.3	52.9	33.5	15.5	12.6	9.4	5.7
	Olinda	171.6	137.3	115.8	100.8	81.2	53.6	33.9	15.8	12.8	9.6	5.8
	Paulista	174.1	139.3	117.5	102.3	82.4	54.4	34.4	16.0	13.0	9.7	5.9
	Recife	183.2	146.6	123.6	107.6	86.7	57.2	36.2	16.8	13.7	10.2	6.2
	São Lourenço	173.6	139.0	117.2	102.1	82.3	54.3	34.4	16.0	13.0	9.7	5.9
25	Ipojuca	256.0	204.9	172.7	150.5	121.2	79.9	50.6	23.5	19.1	14.3	8.7
	Cabo (Suape)	378.6	302.9	255.4	222.5	179.2	118.2	74.8	34.8	28.3	21.1	12.8
	Camaragibe	188.9	151.2	127.5	111.0	89.4	59.0	37.4	17.3	14.1	10.6	6.4
	Goiana	202.8	162.3	136.8	119.1	95.9	63.2	40.0	18.6	15.1	11.3	6.8
	Igarassu	190.1	152.1	128.2	111.7	90.0	59.3	37.6	17.4	14.2	10.6	6.4
	Itamaracá	176.5	141.3	119.1	103.8	83.6	55.1	34.9	16.2	13.2	9.9	6.0
	Itapissuma	215.4	172.4	145.4	126.6	102.0	67.2	42.6	19.8	16.1	12.0	7.3

	Jaboatão	196.4	157.0	132.4	115.3	92.8	61.1	38.7	17.9	14.6	10.9	6.6
	Olinda	186.7	149.4	126.0	109.7	88.4	58.3	36.9	17.1	14.0	10.4	6.3
	Paulista	196.7	157.4	132.7	115.6	93.1	61.4	38.9	18.1	14.7	11.0	6.7
	Recife	199.7	159.8	134.7	117.3	94.5	62.3	39.5	18.3	14.9	11.2	6.8
	São Lourenço	207.4	166.0	140.0	122.0	98.3	64.9	41.1	19.1	15.6	11.6	7.1

Fonte: O autor, 2018.

Ao longo das últimas décadas, diversas equações de chuvas intensas têm sido utilizadas para os cálculos de obras hidráulicas na RMR, a saber,

- Equação desenvolvida por Pfafstetter (1957) para o posto de Olinda;
- Equação elaborada pela ENCIBRA em 1978 para a cidade de Recife (SILVA E CABRAL, 2014).
- Equações desenvolvidas para o Plano Diretor de Macrodrenagem da RMR (FIDEM, 1979);
- Equação elaborada por Recife (2016) para o Plano Diretor de Drenagem Urbana de Recife.

Foi realizado um breve estudo comparativo entre as equações de chuvas intensas comumente utilizadas nos projetos de drenagem urbana na Região Metropolitana de Recife (FIDEM) com as equações desenvolvidas por Ramos e Azevedo (2010), Recife (2016) – Plano Diretor de Drenagem de Drenagem Urbana, e a equação desenvolvida no presente trabalho para a cidade de Recife - Posto 30 da APAC (Tabela 10).

Os incrementos percentuais apresentados na Tabela 10 são relacionados a equação apresentada pela FIDEM e apontam que para as menores durações (5, 10, 15, 20 e 30), cujas intensidades são maiores e, portanto, com maior potencial de alagamentos, chegam a ser 41% quando calculadas com as equações de Ramos e Azevedo (2010) e Recife (2016), assim como podem ser superior a 50% se o cálculo for realizado pela equação desenvolvida para o posto 30 da APAC, em Recife.

Os resultados supracitados são similares ao encontrado por Silva Junior e Silva (2016), os quais também identificaram incrementos superiores a 40% quando compararam as intensidades máximas de precipitação obtidas por equações de chuvas intensas atualizadas com relação a desenvolvida pela FIDEM.

Tabela 10. Intensidade máxima das chuvas obtidas por meio das equações de chuvas intensas de Recife. Incremento percentual relacionado a equação apresentada pela FIDEM.

Tr	Equações	Durações (min.)						Incremento (%)						Max.	Min.		
		5	10	15	20	30	60	5	10	15	20	30	60				
2	FIDEM	104.55	84.09	71.80	63.42	52.49	36.91										
	ENCIBRA	119.38	94.08	79.80	70.36	58.32	41.47	14%	12%	11%	11%	11%	12%	14%	11%		
	RAMOS E AZEVEDO (2010)	124.40	108.61	96.76	87.52	73.95	51.74	19%	29%	35%	38%	41%	40%	41%	19%		
	RECIFE (2016)	139.50	112.35	95.63	84.11	68.99	47.44	33%	34%	33%	33%	31%	29%	34%	29%		
	Posto 30 - Recife	157.42	125.97	106.22	92.52	74.53	49.14	51%	50%	48%	46%	42%	33%	51%	33%		
5	FIDEM	131.28	105.59	90.16	79.63	65.91	46.34										
	ENCIBRA	145.78	114.89	97.45	85.92	71.21	50.64	11%	9%	8%	8%	8%	9%	11%	8%		
	RAMOS E AZEVEDO (2010)	137.90	120.39	107.26	97.01	81.97	57.35	5%	14%	19%	22%	24%	24%	24%	5%		
	RECIFE (2016)	162.58	130.94	111.45	98.02	80.41	55.29	24%	24%	24%	23%	22%	19%	24%	19%		
	Posto 30 - Recife	171.61	137.33	115.80	100.86	81.24	53.57	31%	30%	28%	27%	23%	16%	31%	16%		
10	FIDEM	145.64	117.14	100.02	88.35	73.12	51.41										
	ENCIBRA	169.56	133.63	113.35	99.94	82.83	58.90	16%	14%	13%	13%	13%	15%	16%	13%		
	RAMOS E AZEVEDO (2010)	149.07	130.14	115.95	104.87	88.61	62.00	2%	11%	16%	19%	21%	21%	21%	2%		
	RECIFE (2016)	182.54	147.02	125.14	110.06	90.28	62.08	25%	26%	25%	25%	23%	21%	26%	21%		
	Posto 30 - Recife	183.19	146.59	123.61	107.66	86.73	57.19	26%	25%	24%	22%	19%	11%	26%	11%		
25	FIDEM	164.04	131.94	112.66	99.51	82.36	57.91										
	ENCIBRA	207.05	163.17	138.41	122.03	101.14	71.92	26%	24%	23%	23%	23%	24%	26%	23%		
	RAMOS E AZEVEDO (2010)	165.25	144.26	128.53	116.25	98.22	68.72	1%	9%	14%	17%	19%	19%	19%	1%		
	RECIFE (2016)	212.74	171.34	145.84	128.27	105.22	72.35	30%	30%	29%	29%	28%	25%	30%	25%		
	Posto 30 - Recife	199.71	159.81	134.75	117.37	94.54	62.34	22%	21%	20%	18%	15%	8%	22%	8%		

Fonte: O autor, 2018.

Para a constatação da variabilidade das relações IDF na RMR foram elaborados mapas utilizando a interpolação estatística Krigagem com o modelo linear. Os mapas contêm as intensidades máximas de precipitação obtidas pelas equações de chuvas intensas para os 15 postos estudados. Os mesmos foram elaborados para diferentes durações e tempo de retorno, para que os projetistas possam, de acordo com o propósito do seu projeto de microdrenagem, definir a melhor equação a utilizar.

Foram utilizados os tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos com durações de 10, 30 e 60 minutos.

A Figura 11 reúne informações das intensidades de precipitação com duração de 10 minutos para os tempos de retorno 2 (11a), 5 (11b) e 10 (11c) anos.

A Figura 11a mostra que dentro da RMR há uma grande variabilidade para a duração de 10 minutos com tempo de retorno de 2 anos. Pode-se dividir a RMR em áreas que apresentam certa homogeneidade, como por exemplo, as áreas que envolvem os municípios de Cabo de Santo Agostinho e Jaboatão dos Guararapes, com maiores valores de intensidade de precipitação máxima para essa duração e tempo de retorno. Na parte central da RMR encontram-se duas áreas distintas, a saber, uma que envolve a cidade de Olinda e o centro-sul de Recife, com valores de intensidade em torno de 120mm/h, e outra abrangendo a cidade de São Lourenço da Mata, Camaragibe e o sudoeste de Recife, com valores próximos a 100 mm/h. A parte norte da RMR apresenta valores de intensidade relativamente maiores que os observados na zona de transição com a parte central, porém menores que os observados em Olinda e na parte sul do Recife.

Devido a heterogeneidade observada na RMR para as intensidades de chuva com duração de 10 minutos para o tempo de retorno de 2 anos, não é recomendado o uso de uma única equação IDF para todas as áreas da RMR.

As Figuras 11b e 11c apresentam os dados das intensidades máximas de precipitação para a duração de 10 minutos e tempos de retorno de 5 e 10 anos, respectivamente, para a RMR. No primeiro caso, a RMR apresenta três áreas homogêneas, no entanto, a área de maiores valores de intensidade é a parte sul

da RMR, a qual apresenta valores máximos de 197 mm/h. Uma grande área, que abrange a parte central e norte da RMR apresentou-se bastante homogênea, com exceção de três pontos, a saber, uma pequena área dos municípios de Igarassu e Itamaracá, alguns municípios da região central mais a oeste, e uma parte de Jaboatão dos Guararapes, os quais apresentam intensidade máximas de precipitação menores.

A configuração das isolinhas contidas na Figuras 11c é semelhante às encontradas na Figura 11a, no entanto, nota-se um gradiente menos intenso na parte central da RMR, assim como, uma maior heterogeneidade na região norte.

As isolinhas de intensidade de precipitação para a duração de 30 minutos e tempos de retorno de 2 (12a), 5 (12b) e 10 (12b) anos são encontradas na Figura 12.

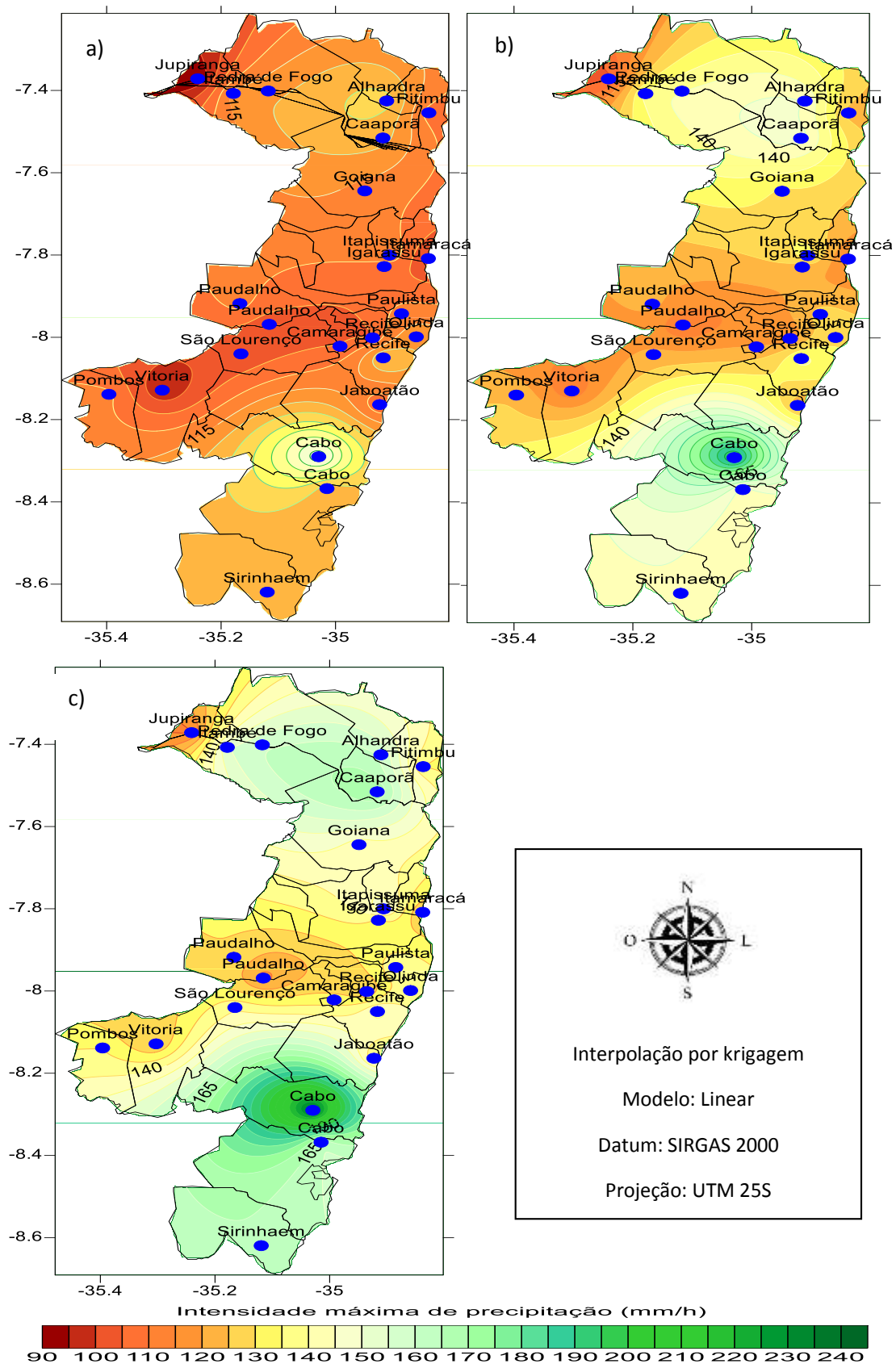
A Figura 12a tem um comportamento similar à da Figura 11a, apresentando as mesmas regiões homogêneas. A Figura 12b apresenta a configuração das isolinhas de intensidade máximas de precipitação similar às da Figura 12a. Esse mapa confirma os maiores valores de intensidade na região sul da RMR, com gradiente bem intenso, e também a homogeneidade de grande parte da região central com a região norte. A única exceção é uma mancha de valores mais baixas que ocorre na região central, mais a oeste. Com base na análise da Figura 12, recomenda-se a utilização de diferentes Equações de Chuvas Intensas pra a duração e períodos de retornos em questão ao longo da RMR. A Figura 12c apresenta o mesmo padrão de distribuição das isolinhas que a Figura 11c. O mapa mostra, como em todos os casos, maiores gradiente e valores de intensidades na região sul da RMR. Nesse mapa também pode-se notar maior homogeneidade das regiões centro e norte da RMR, com a presença de maiores valores em áreas próximas dos postos de Itapissuma, e também no sul de Recife.

A Figura 13 mostra os resultados da interpolação dos valores de intensidade máxima para a duração de 60 minutos e tempos de retorno de 2 (13a), 5 (13b) e 10 (13c) anos, respectivamente. Na região sul da RMR, confirma-se os maiores valores de intensidade máxima de precipitação, no entanto, com a presença de um gradiente menos expressivo. O arranjo das intensidades de

chuva disposto na Figura 13b indica uma configuração similar ao observado nas Figuras 11b e 12b para a área sul da RMR, no entanto, com o gradiente suavizado. Também é observada uma grande área homogênea que vai do centro ao norte da região. Diferenciando-se dessa última, está uma faixa com valores mais elevados que contempla o sul de Recife e o oeste de Goiana.

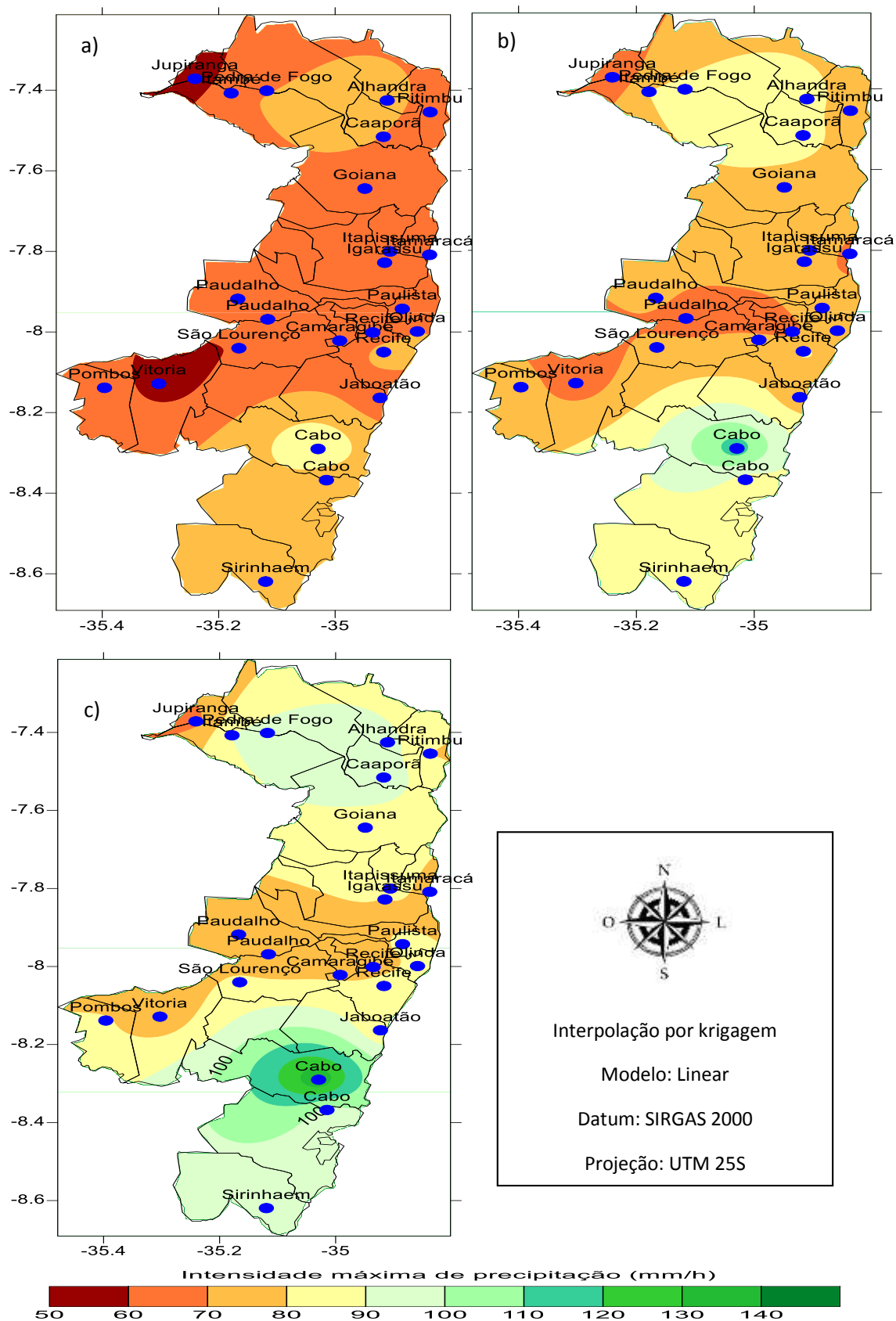
A espacialização das isolinhas de intensidade de chuva para a duração de 60 minutos e tempo de retorno de 10 anos, apontam para a existência de gradientes mais intensos na região sul da RMR, quando comparados com as intensidades de chuva de mesma duração, porém, com período de retorno de 5 anos.

Figura 11 - Isolinhas de intensidade máximas de precipitação (mm/h), com duração de 10 minutos e Tr de 2 (a), 5 (b) e 10 (c) anos, geradas através de krigagem para a RMR.



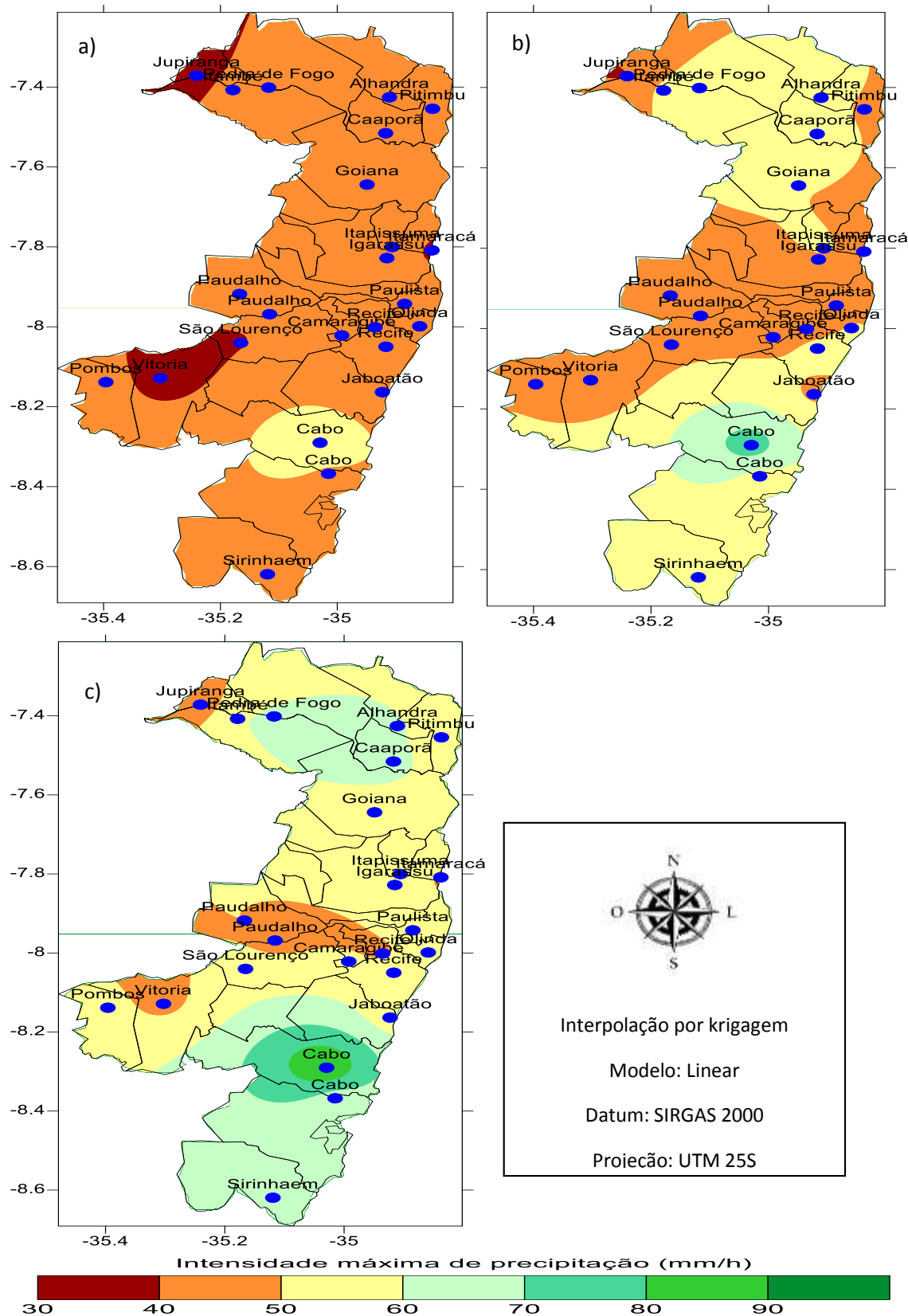
Fonte: O autor, 2018.

Figura 12 - Isolinhas de intensidade máximas de precipitação, com duração de 30 minutos e Tr de 2 (a), 5 (b) e 10 (c) anos, geradas através de krigagem para a RMR.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 13 - Isolinhas de intensidade máximas de precipitação, com duração de 60 minutos e Tr de 2 (a), 5 (b) e 10 (c) anos, geradas através de krigagem para a RMR.



Fonte: O autor, 2018.

Com o intuito de investigar a espacialização da precipitação, para o mesmo período utilizado para interpolar os mapas das intensidades máximas de precipitação, foram elaborados os mapas das Figura 14 e 15.

A Figura 14 mostra que os máximos anuais também se comportam diminuindo a medida que se afasta do oceano. Com relação aos centros de máximas, notamos que dois pontos apresentam, região do Cabo de Santo Agostinho e parte de Recife e Olinda, apresentam valores mais elevados. A cidade de São Lourenço apresenta os menores valores dos máximos. Esses valores se elevam suavemente a medida que se deslocam para a região norte da RMR, com um centro de máximos no município de Igarassu.

Na Figura 15 está apresentada a interpolação utilizando a Krigagem com modelo linear aplicado as médias dos totais anuais de precipitação. Nesse mapa nota-se uma diminuição das médias dos totais anuais a medida que se afasta do oceano Atlântico, assim como, uma heterogeneidade desses dados no sentido norte-sul na RMR. Nota-se que há uma inversão das áreas de máximos, quando esse mapa é comparado com os mapas de intensidade máxima de precipitação, anteriormente discutidos. A região de máximos anuais encontra-se na cidade de Recife (2.300 mm), o qual diminui nos sentidos oeste, norte e sul. Na região sul da RMR, a qual sempre teve valores maiores de intensidades máximas nos mapas anteriormente discutidos, também observamos valores superiores para as médias dos totais anuais com relação a região norte.

Figura 15. Isolinhas das médias dos totais anuais de precipitação, geradas através de krigagem, para a RMR.

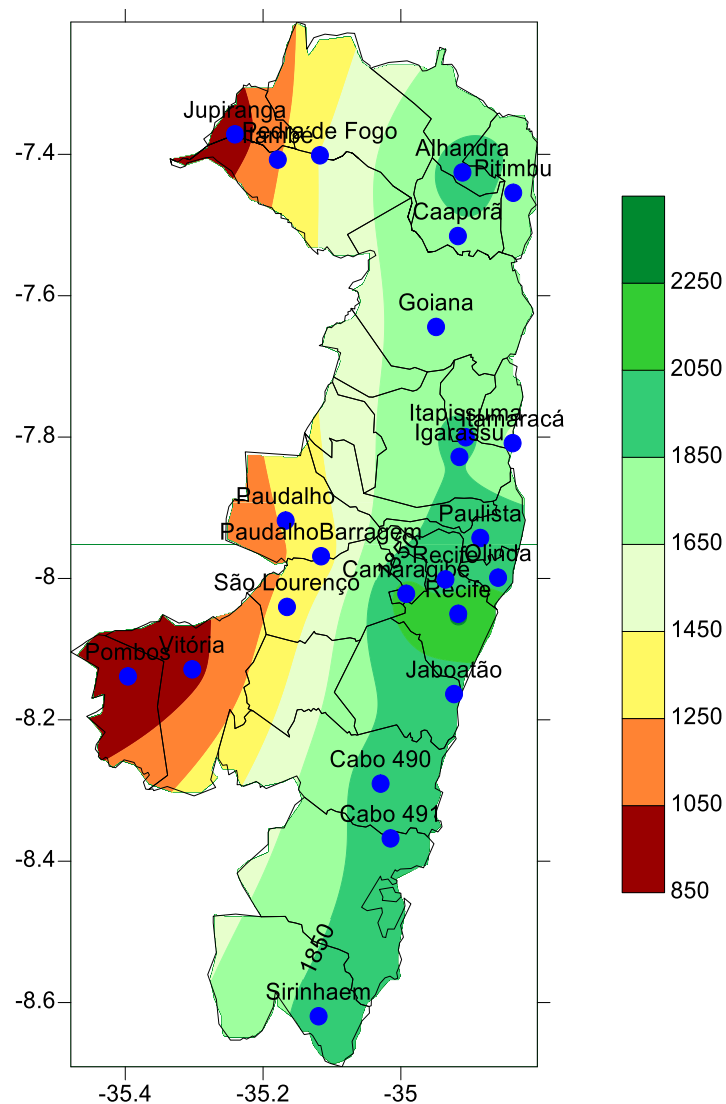
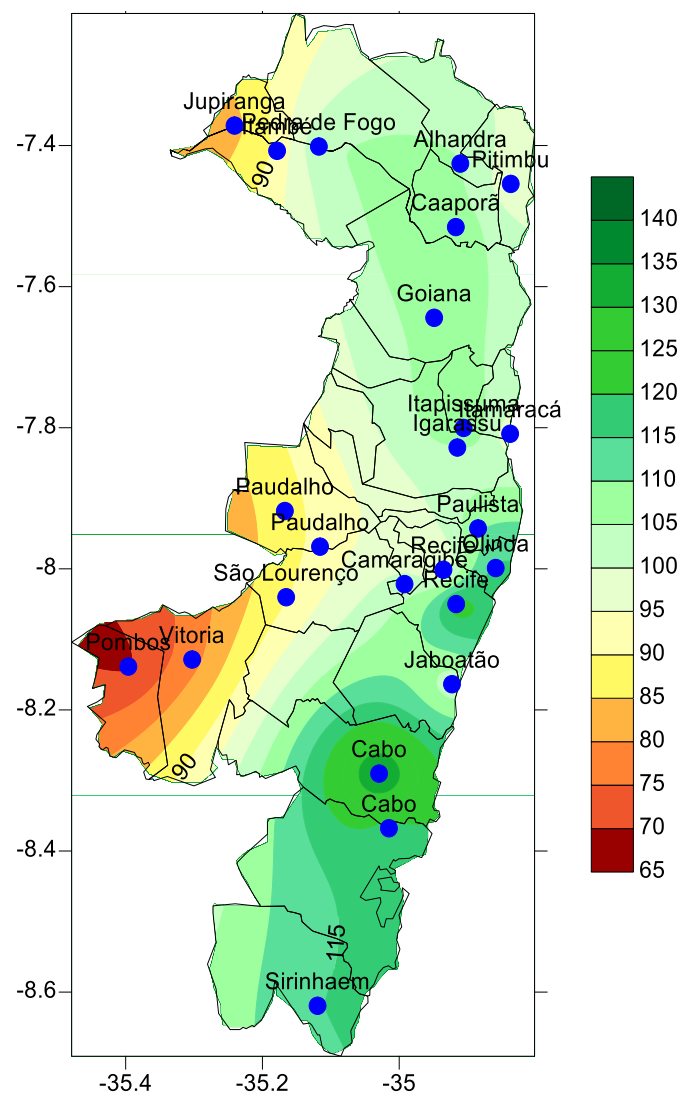


Figura 14. Isolinhas dos valores máximos anuais de precipitação (mm/dia) para o período de 2003 a 2013, geradas através de krigagem, para a RMR.



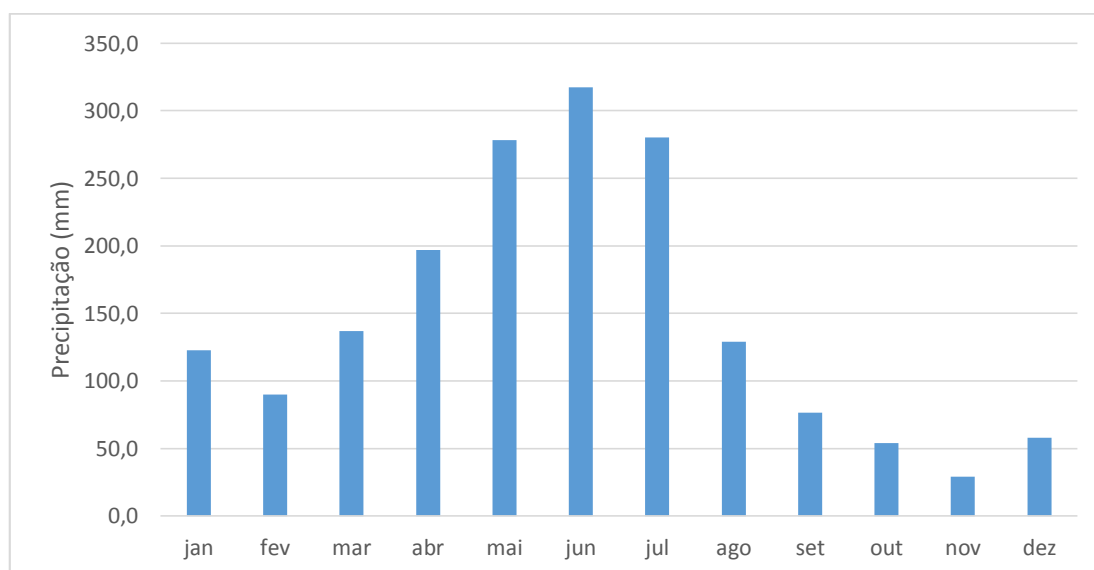
4.3 EVENTOS DE CHUVA INTENSA OCORRIDOS NA RMR

4.3.1 Generalidades sobre os eventos de chuvas intensas na RMR

Os eventos de chuva intensa ocorrem com mais frequência na RMR nos meses que compõem a época chuvosa (61%), entre os meses de abril a julho (Figura 16), no entanto, independente da época de ocorrência, esses eventos têm grande impacto e ocasionam grandes transtornos, perdas socioeconômicas e humanas.

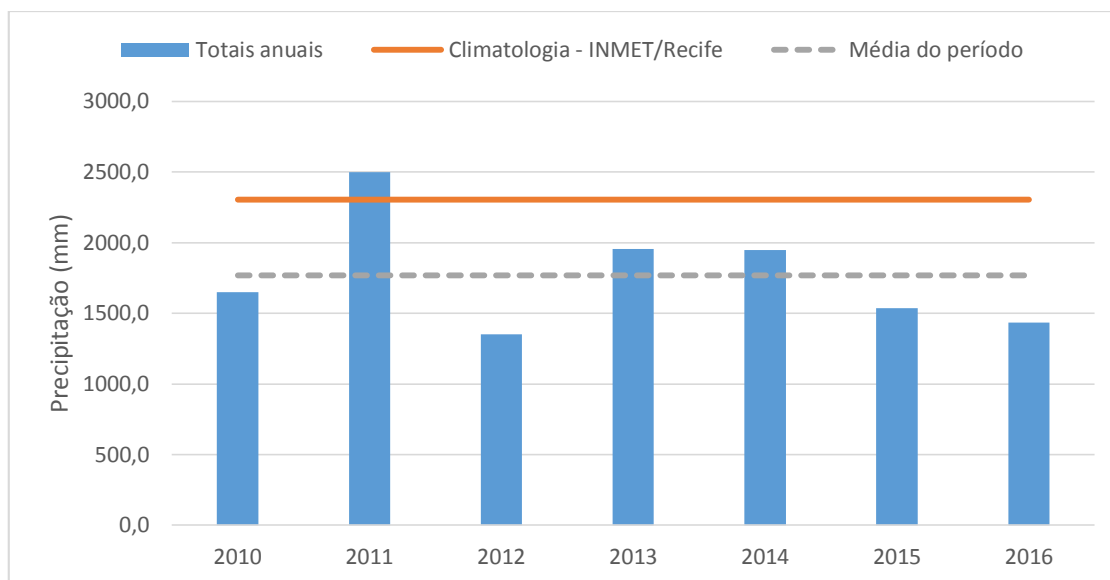
O total anual médio para a RMR no período analisado foi de 1.785,5 mm com destaque para os anos de 2011 (2.498,8 mm) e 2012 (1.352,8 mm) os quais apresentaram o maior e menor valor, respectivamente. Apenas os anos de 2011, 2013 (1.995,8 mm) e 2014 (1.949,0 mm) superaram a média do período (1.768,5 mm). Comparado a média climatológica (1962-2016) da precipitação anual na estação meteorológica do INMET em Recife (2.295,6 mm) com a média dos totais dos 81 postos pluviométricos no período analisado, percebe-se que, apenas, o ano de 2011 superou a climatologia (Figura 17).

Figura 16 - Variação sazonal da precipitação pluviométrica na Região Metropolitana de Recife para o período de 2010 a 2016.



Fonte: O autor, 2018.

Figura 17 - Média dos totais anuais para os 81 postos pluviométricos analisados. A linha contínua simboliza a média climatológica da estação do INMET em Recife e a tracejada a média dos totais anuais para o período de 2010 a 2016 dos 81 postos pluviométricos.

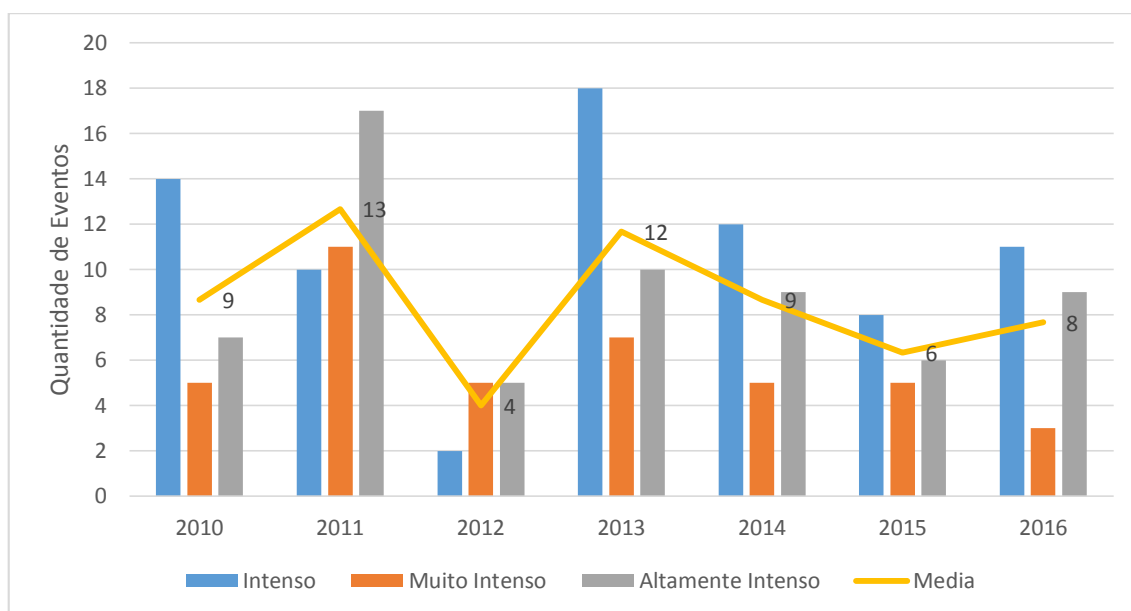


Fonte: O autor, 2018.

Foram observados 179 eventos que superaram 50,0 mm numa escala temporal de 24 horas no período analisado, sendo o ano de 2011 marcado pelo maior número de registros (21%) e 2012 pelo menor (7%) (Figura 17). Os picos de extremos chegaram a superar 350,0 mm/dia (Cabo de Santo Agostinho, 16 de junho de 2010, com abrangência de 61%), com 26% dos eventos superando 100 mm/dia.

O número de eventos extremos classificados como “intensos – 50,0 mm/dia a 67,0 mm/dia” predominam em quase todos os anos, com exceção dos anos de 2011 e 2012. Os eventos considerados como “Altamente intensos – 67,1 mm/dia – 84,0 mm/dia” superaram os classificados como “Muito intensos - > 84,0 mm/dia” em todos o período observado, com exceção de 2012, no qual esses eventos ocorreram na mesma quantidade. Para todo o período analisado, os eventos extremos intensos corresponderam a 45%, muito intenso a 18% e altamente intenso a 36%.

Figura 18 - Distribuição dos eventos de chuvas intensas ocorridos na Região Metropolitana de Recife entre os anos de 2010 a 2016.



Fonte: O autor, 2018.

A Tabela 11 pontua os eventos de chuvas intensas classificadas como “altamente intensos”, assim como, os postos nos quais os picos foram registrados e sua abrangência na RMR. Os dados contidos na Tabela permitem a análise de alguns eventos significativos com relação a limites pluviométricos, percentual de abrangência na região em estudo e a ocorrência dos eventos por períodos.

Tabela 11. Eventos extremos classificados como “altamente intensos” ocorridos na RMR entre os anos de 2010 e 2016. Data de ocorrência do evento, precipitação diária máxima registrada, nome do município e código do posto que registrou a precipitação máxima e percentual de abrangência do evento na Região Metropolitana de Recife.

Ano	Data do Evento	P _{max}	Posto Pluviométrico		Abrangência
			Município*	Código	
2010	13/5	118.0	Cabo	490	13%
	5/6	172.0	Cabo	491	17%
	14/6	148.0	Cabo	490	22%
	16/6	358.0	Cabo	490	61%
	17/6	121.0	Cabo	491	70%
	18/6	161.0	Ipojuca	387	100%
	10/12	87.0	Olinda	199	9%
2011	13/2	113.0	Recife	30	16%

	14/2	104.5	Olinda	551	40%
	18/4	94.8	Recife	30	36%
	19/4	128.9	Jaboatão	202	32%
	21/4	122.6	Jaboatão	202	48%
	30/4	139.3	Igarassu	100	56%
	2/5	101.0	Olinda	551	48%
	4/5	84.3	Paulista	451	56%
	5/5	106.6	Cabo	491	68%
	20/5	143.1	Itapissuma	520	64%
	24/5	101.2	Jaboatão	202	56%
	17/6	87.7	Recife	378	100%
	22/6	87.5	Olinda	199	55%
	15/7	108.3	Recife	378	4%
	16/7	115.2	Recife	378	70%
	17/7	156.9	Itapissuma	520	90%
	31/7	91.8	Ipojuca	387	30%
2012	23/1	100.0	Itamaracá	524	68%
	18/2	96.0	Recife	30	48%
	25/3	85.8	Recife	30	12%
	14/6	130.0	Olinda	209	84%
	2/7	146.5	Itapissuma	520	100%
2013	20/4	152.0	Cabo	490	68%
	17/5	138.4	Jaboatão	604	48%
	18/5	178.4	Igarassu	263	64%
	9/6	139.9	Abreu e Lima	198	60%
	22/6	101.4	Igarassu	269	50%
	12/7	92.0	Cabo	301	28%
	18/8	111.7	Cabo	490	20%
	10/9	100.8	Cabo	491	16%
	19/12	126.0	Jaboatão	604	40%
	20/12	92.2	Jaboatão	268	28%
2014	22/4	155.7	Ipojuca	387	52%
	30/4	110.5	Olinda	199	74%
	29/5	85.0	Recife	265	32%
	25/6	104.0	Itamaracá	524	16%
	26/6	105.3	Jaboatão	202	28%
	27/6	167.0	Ipojuca	387	64%
	13/7	106.4	Recife	30	52%
	9/9	115.0	Recife	265	12%
	7/10	122.0	Cabo	490	20%
2015	25/6	137.5	Ipojuca	387	12%
	29/6	194.6	Jaboatão	604	68%
	4/7	130.2	Cabo	301	72%
	5/7	94.2	S. Lourenço	267	44%
	6/3	88.8	Ipojuca	602	54%

2016	9/3	129.8	Cabo	301	87%
	19/1	95.9	S. Lourenço	267	8%
	4/3	92.2	Araçoiaba	309	8%
	30/3	106.8	Cabo	490	36%
	16/4	134.8	Paulista	451	76%
	17/4	129.5	Igarassu	294	60%
	9/5	106.4	Jaboatão	604	36%
	10/5	194.6	Olinda	209	92%
	30/5	205.6	Olinda	199	68%
	31/5	89.5	Olinda	209	4%

* Município que registrou o maior total pluviométrico em 24h.

Fonte: O autor, 2018.

4.3.2 Análise dos eventos de chuvas intensas por ano hidrológico

Em 2010 86% dos eventos ultrapassaram 100,0 mm em 24 horas, o mesmo percentual representa os eventos ocorridos no período chuvoso da região, 71% das precipitações máximas ocorreram na Cidade do Cabo de Santo Agostinho, 43% dos eventos ocorridos nesse ano tiveram mais de 50% de abrangência na RMR. Destaca-se o evento do dia 18 de junho, com precipitação máxima de 161,0 mm registrada na Cidade de Ipojuca, pela sua abrangência ao longo da RMR (100% dos postos). As chuvas ocasionadas pelos Distúrbios Ondulatórios de Leste – DOLs - deixaram 13 municípios pernambucanos em emergência, nove pessoas morreram e mais de 10 mil tiveram que abandonar suas casas devido ao grande número de deslizamento de terras e alagamentos. As perdas e danos no Estado de Pernambuco chegaram a R\$ 3,4 bilhões (superior a 4% do PIB - Produto Interno Bruto) (BANCO MUNDIAL, 2012).

O ano hidrológico de 2011 foi o mais chuvoso dentre os avaliados. No posto 30 da APAC, na Cidade do Recife, o total pluviométrico anual superou 3.200,0 mm. Dos eventos considerados altamente intensos, 70% estiveram acima de 100,0 mm, 65% desses eventos ocorreram no período chuvoso da região, 53% dos eventos tiveram abrangência superior a 50% da RMR, sendo a Cidade de Recife a que mais registrou picos de extremos (30%). Os eventos dos dias 17 de junho e 17 de julho se destacaram, o primeiro pela sua abrangência (100% da RMR) e o segundo pelos totais pluviométricos registrados ($P_{\max}=156,9$

mm/dia em Itapissuma com 90% de abrangência da RMR). As chuvas que atingiram a faixa leste do Nordeste entre os dias 15 e 17 de julho de 2011 causaram uma série de transtornos e perdas para a população dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Nesses dois últimos estados, 11 mortes foram registradas, ocorreram vários deslizamentos de terra e alagamentos devido à elevação do nível dos rios e córregos.

No ano de 2012, apenas 5 eventos foram classificados como altamente intenso, sendo que 60% desses superaram os 100,0 mm em 24 horas, 40% estiveram dentro do período chuvoso da região e Recife foi a Cidade que mais registrou os picos de precipitações (40%). Nesse ano, se destacou o evento ocorrido no dia 02 de julho, com precipitação máxima de 146,5 mm registrado em Itapissuma e com abrangência de 100% da RMR. O evento de chuva foi ocasionado por Distúrbio Ondulatório de Leste (DOL) associado à pulsos da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

O total anual de 2013 superou a média do período em 11%. Nesse ano, 80% dos eventos altamente intensos superaram 100 mm em 24 horas, 70% desses ocorreram no período chuvoso, sendo a Cidade do Cabo de Santo Agostinho a que registrou o maior número de picos de precipitações (40%). O evento de destaque para esse ano foi o ocorrido no dia 18 de maio, com precipitação máxima de 178,4 mm registrado em Igarassu com abrangência de 64% da RMR. O fenômeno meteorológico que ocasionou os grandes totais pluviométricos foram os Distúrbios Ondulatórios de Leste.

Com comportamento similar a 2013, 2014 também teve total anual (1949,0 mm) que superou em pouco mais de 10% a média do período (1768,5 mm). Dos eventos altamente intensos, 89% ultrapassaram o total diário de 100,0 mm, 77% ocorreram dentro do período chuvoso, sendo a cidade de Recife a que mais registrou as precipitações máximas (33%). Nesse ano destaca-se o evento ocorrido no dia 27 de julho, com precipitação máxima diária de 167,0 mm registrada na cidade de Ipojuca e que abrangeu 64% da RMR. O sistema meteorológico atuante nos dias 26 e 27 de junho de 2014 é comum para a região nessa época do ano, trata-se dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL). Apesar do sistema ter características visuais, por meio de imagens de satélite,

similares as Ondas de Leste clássicas, a observação detalhada de outros campos meteorológicos permite fazer uma diferenciação dos dois sistemas.

Já bastante inferior aos totais anuais observados no biênio 2013/2014, os quais superaram a média do período, o ano de 2015 ($P_{\text{anual}}=1.537,0$ mm) teve um déficit com relação essa em 13%. Dos eventos altamente intensos, 66% foram superiores a 100,0 mm/dia, com o mesmo percentual para os que ocorreram no período chuvoso. O evento de destaque para esse ano ocorreu no dia 29 de junho, com precipitação máxima diária registrada em Jaboatão dos Guararapes, 194,6 mm, com 68% de abrangência na RMR. Nesse evento foram registrados vários deslizamento de terras, que ocasionaram mortes inclusive, vários pontos de alagamento nas cidades da RMR, queda de árvores, semáforos com avarias e muitos transtornos à população.

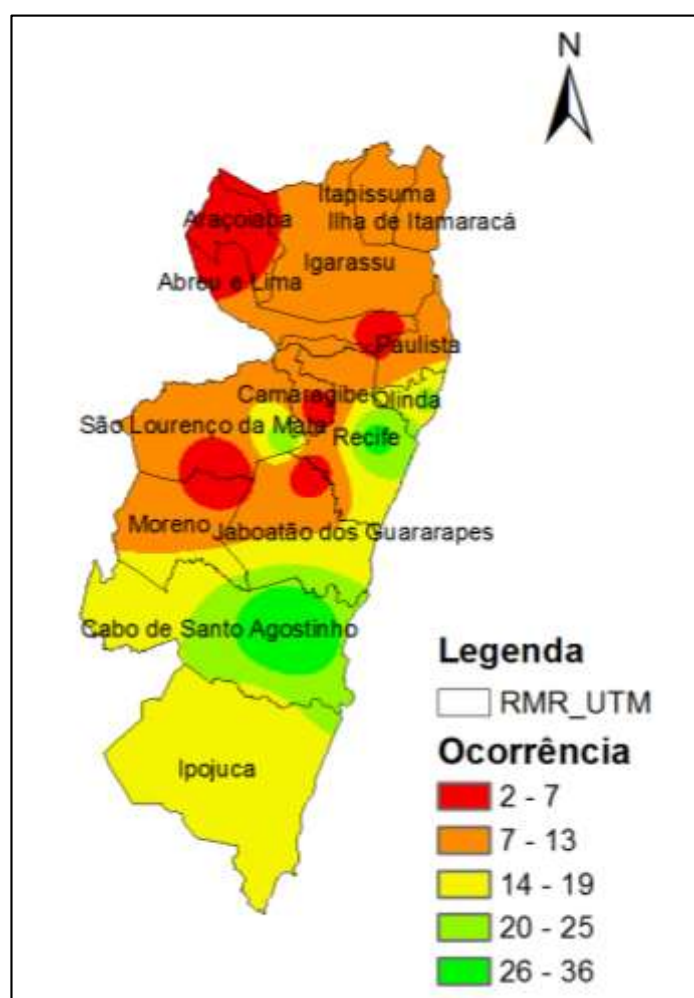
O último ano da série de estudo, 2016, registrou o segundo mais baixo total pluviométrico anual do período, com 19% de déficit com relação a média da RMR – $P_{\text{anual}}=1.435,2$ mm. Nesse ano, 67% dos eventos considerados altamente intensos foram superiores a 100,0 mm em 24 horas, 44% ocorreram no período chuvoso da região, sendo a Cidade de Olinda a que mais registrou precipitações máximas (33%). Nesse ano podemos destacar os eventos dos dias 09 de maio ($P_{\text{max}}=194,6$ mm em Olinda com 92% de abrangência na RMR) e 30 de maio ($P_{\text{max}}=205,6$ mm também em Olinda com 68% de abrangência na RMR).

4.3.3 Variabilidade Espacial do Número de Ocorrências de Eventos Altamente Intensos - AI

A distribuição espacial do número de ocorrências dos picos dos eventos classificados como altamente intensos – AI na RMR (Figura 19) permitiu observar que a porção nordeste do município de Cabo de Santo Agostinho foi a área que apresentou o maior número de registro, entre 26 e 36. Comportamento similar foi observado nas porções centro-norte de Recife, centro de Olinda e extremo leste de São Lourenço da Mata. As regiões circunvizinhas as supracitadas registraram ocorrências que variaram de 20 a 25 eventos classificados como AI. A área em amarelo na Figura 19 delimita as áreas que

registraram entre 14 e 19 eventos AI, com destaque para o município de Ipojuca, oeste de Cabo de Santo Agostinho, sul de Moreno e trechos de Jaboatão dos Guararapes, Recife, Olinda e São Lourenço. Menores ocorrências dos eventos AI foram observados nas porções central e norte da RMR, o que permite fazer uma caracterização bem definida da região, com a afirmação que a porção sul da RMR, incluindo a faixa litorânea que se estende até o município de Olinda, assim como, o extremo leste de São Lourenço da Mata como as áreas com maior ocorrência de picos de chuvas intensas.

Figura 19 - Variabilidade espacial da ocorrência dos picos de eventos Altamente Intensos (AI) na RMR para o período compreendido entre 2010 e 2016.



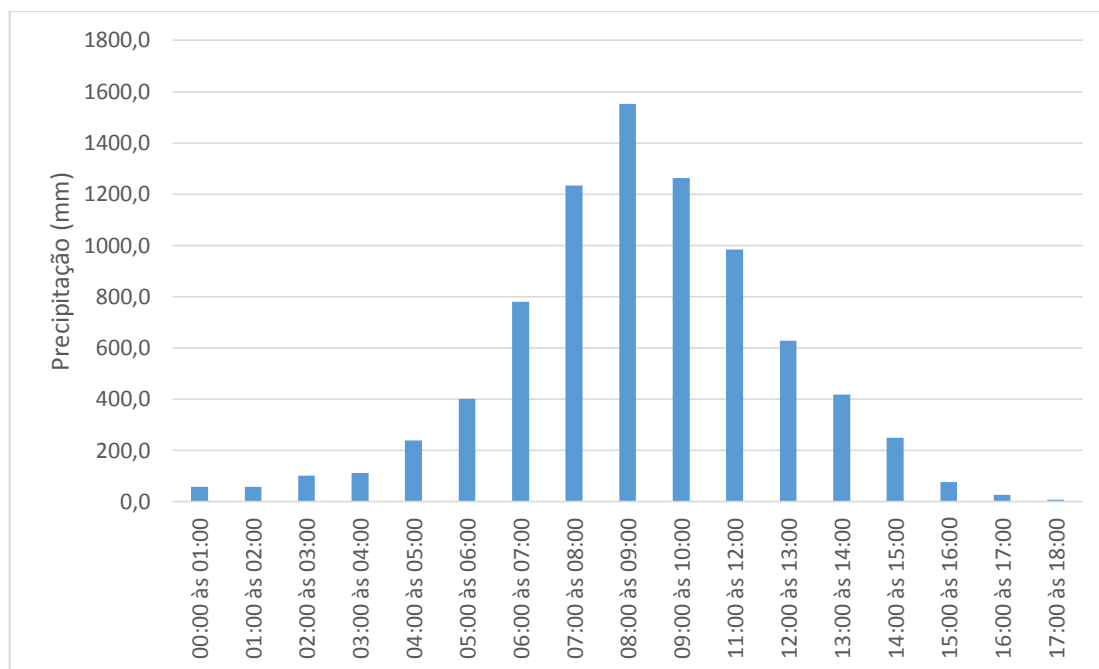
Fonte: O autor, 2018.

4.3.4 Evento do dia 30/05/2016

No dia 30 de maio de 2016, em consequência da convergência de umidade em baixos e médios níveis da atmosfera aliados ao cisalhamento do vento em médios níveis, chuvas de grande intensidade deixaram um rastro de destruição e perdas humanas na RMR. Os totais pluviométricos chegaram a 241,5 mm em 13 horas no bairro de Jardim Fragoso, Cidade de Olinda. Os pluviômetros do CEMADEN registraram o intervalo das 08:00 às 09:00 (hora local) como a hora mais chuvosa, atingindo 66,0 mm no posto de Jardim Fragoso e 70,4 mm no posto do Porto de Recife. Quatro postos pluviométricos na RMR registraram totais diários acima de 200,0 mm, sendo três desses em Olinda.

A variabilidade temporal da soma dos totais horários de precipitação dos 64 postos pluviométricos do CEMADEN na RMR (Figura 20) mostra que o pico da chuva ocorreu entre às 08:00 e 09:00 da manhã (hora local) daquela segunda-feira. Os registros pluviométricos horários revelam que as chuvas se iniciaram às 00:00 do dia 30/05/2015 e se estenderam até às 15:00 do mesmo dia, contudo, o intervalo entre às 07:00 e 10:00 foi o que registrou os maiores totais horários, representando 50% da chuva total do evento. Valores bastante significativos ocorreram entre às 06:00 e 12:00, com totais horários, em alguns postos, acima de 60,0 mm.

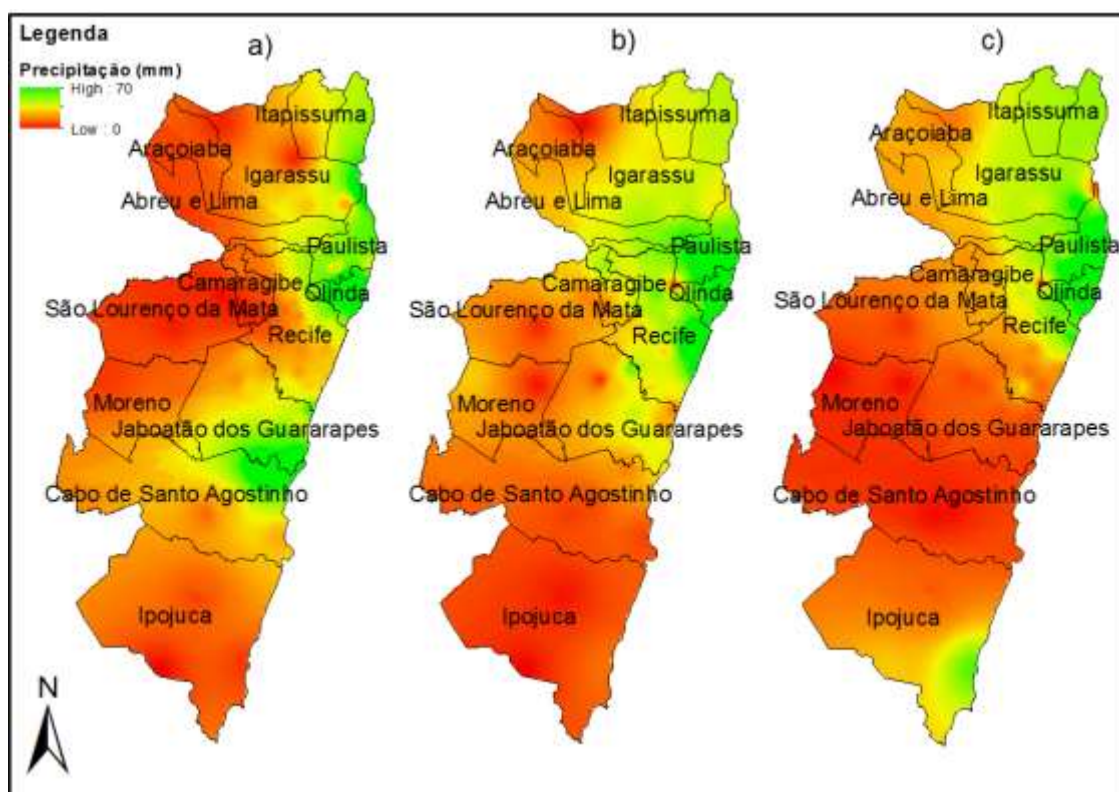
Figura 20 - Variabilidade Temporal da soma dos totais horários de precipitação para os 64 postos do CEMADEN analisados na RMR no evento de chuva intensa do dia 30 de maio de 2016.



Fonte: O autor, 2018.

Os mapas da variabilidade espacial da precipitação do dia 30 de maio de 2016, nas três horas mais chuvosas – 07:00 às 10:00, apontam que na primeira hora as chuvas mais intensas atingiram a faixa litorânea das cidades de Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Paulista, Igarassu e Itapissuma (Figura 21). Nessa mesma hora já haviam registro de chuvas de intensidade moderada em diversos pontos da RMR. Na segunda hora em questão, nota-se a ocorrência dos picos de precipitação nos municípios de Recife, Olinda e Paulista, com propagação das precipitações mais para leste nas porções central e norte da RMR e com redução na porção sul. Na terceira hora analisada fica evidente o deslocamento dos picos de precipitação para a porção norte da RMR, com destaque para os municípios de Recife, Olinda e Paulista.

Figura 21 - Variabilidade espacial das horas mais chuvosas do evento de chuva intensa ocorrido na RMR no dia 30 de maio de 2016 - a) 07:00 às 08:00 (10Z às 11Z); b) 08:00 às 09:00 (11Z às 12Z); c) 09:00 às 10:00 (12Z às 13Z*).



Fonte: O autor, 2018.

O fenômeno meteorológico associado ao evento de chuvas intensas do dia 30/05/2016 teve sua gênese no dia 28/05/2016, ainda no oceano, com forte confluência dos ventos em baixos níveis da atmosfera e com a presença de uma cavado em altos níveis, o que intensificou o sistema meteorológico.

No dia 30 às 00:00Z pequenos conglomerados de *cumulus* se aproximaram da costa. Em altos níveis da atmosfera observou-se a presença de uma cavado, o que, a princípio, não caracterizou uma situação favorável precipitações de grande intensidade. No entanto, a chegada de novos distúrbios e vapor d'água próximo à costa subsidiaram o sistema a ganhar força e ocasionar chuvas de grande intensidade.

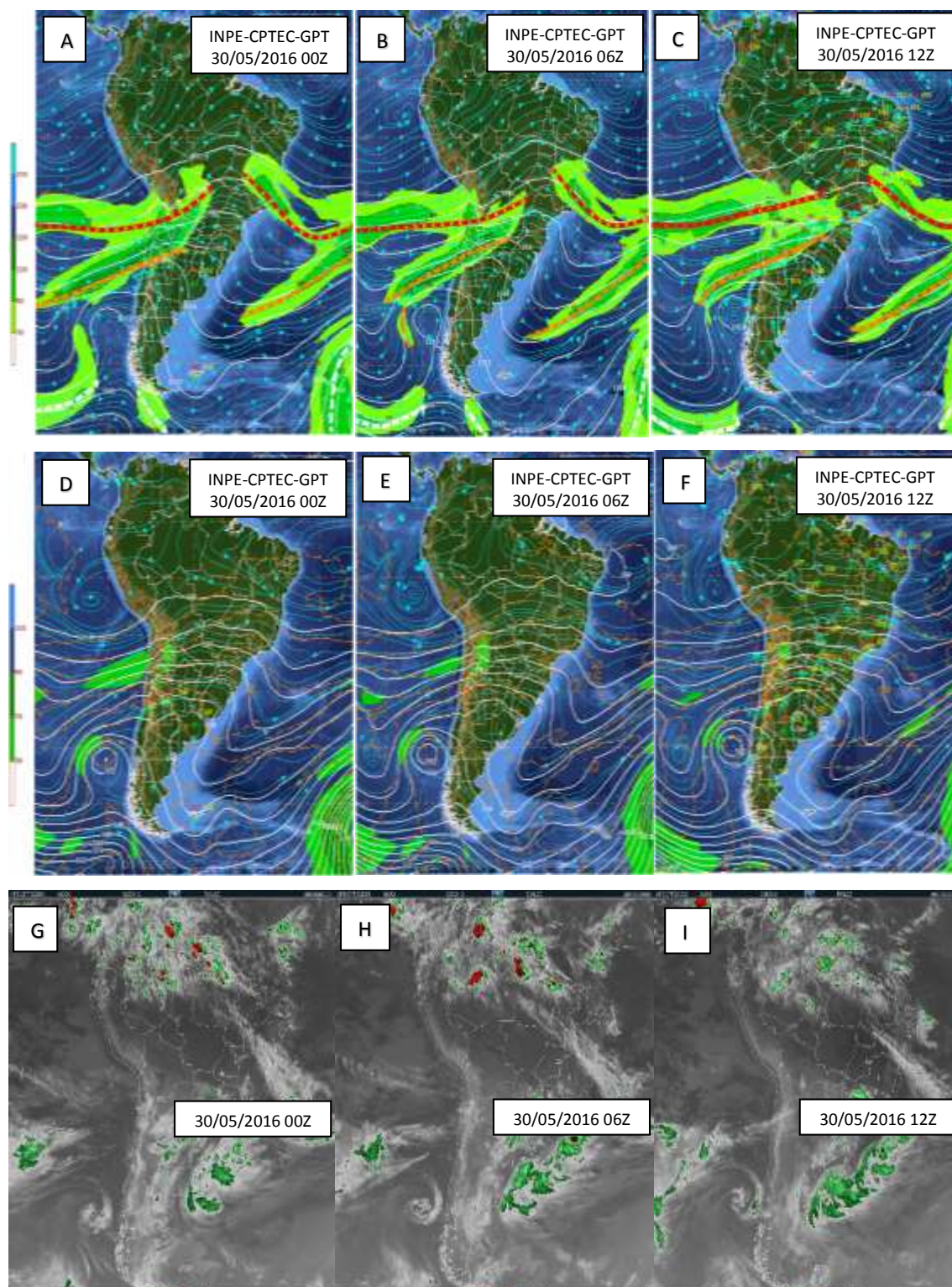
Ao chegar sobre o continente, sobre o LNEB, houve desenvolvimento das nuvens tipo *cumuliformes* associadas as atividades convectivas. Com isso, o sistema meteorológico desenvolveu-se verticalmente, com topos de nuvens

registrando temperaturas inferiores a -80°C , que favorecem a ocorrência de aguaceiros na RMR.

Devido ao sistema depender da realimentação da umidade em baixos níveis e as condições para tal não foram favoráveis, o sistema perdeu força. A dissipação ocorreu ainda no dia 30 de maio, logo após aos eventos AI. Embora a nebulosidade persistiu, porém sem ocasionar precipitações. O horário de maior atividade convectiva foi entre às 09:00Z e 12:00Z (Figura 22). A dissipação completa do sistema ocorreu no dia 31/05/2016 às 12:00Z.

A grande intensidade do referido evento de chuva causou diversos transtornos à população. Os alagamentos deixaram intransitáveis praticamente todas as grandes avenidas dos municípios de Recife e Olinda, foram registrados diversas quedas de árvores e deslizamentos de encostas. Desse último sinistro, o caso de Águas Compridas – Olinda – se destacou por deixar três mortos e dois feridos. Um quarto óbito foi registrado na zona norte da capital pernambucana com a queda de uma encosta (PORTAL G1, 2017).

Figura 22 - Cartas sinóticas de superfície e altitude; imagens de satélite GOES-13 realçada do dia 30 de maio de 2016. A, B e C são cartas sinóticas de altitude a 250 hPa; D, E e F são cartas sinóticas de superfície; G, H e I são imagens de satélite GOES-13 realçada.



Fonte: O autor, 2018.

Os resultados mostram que durante o período chuvoso da RMR, mesmo em períodos climatologicamente anômalos secos, há possibilidades de eventos Altamente Intensos. Os dados mostram que a suscetibilidade dos eventos extremos podem ocorrer anualmente, com potencial causador de deslizamento de terra, alagamentos, transtornos sociais e até mesmo perdas humanas.

Com os resultados obtidos, pode-se obter a classificação de eventos extremos de forma mais precisa e focada a região mais populosa de Pernambuco. Tal classificação tende a direcionar planejamentos de drenagem urbana, principalmente nas extrapolações de cenários futuros de mudanças climáticas.

Ainda, os resultados mostraram uma variabilidade anual dos eventos extremos. Maiores estudos sobre como atuaram os oceanos e as condições climáticas podem acrescentar os resultados em trabalhos futuros, ainda, a possibilidade de previsão de quantidade de eventos AI.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos da relação da variabilidade espacial da precipitação e sua relação com o relevo na Região Metropolitana de Recife (RMR) apontaram que existe grande correlação entre o elemento meteorológico e o fator em questão, principalmente, nos meses que compõem o período mais seco da região, entre outubro e dezembro, haja vista que no período chuvoso os sistemas de escala sinótica afetam praticamente toda a RMR e áreas circunvizinhas.

O desenvolvimento das equações de chuvas intensas para os municípios da RMR permitiu a conclusão que existe grande heterogeneidade das relações IDF, não sendo portanto, recomendado a utilização de uma única equação de chuvas intensas para toda a RMR. O estudo com dados diários de precipitação entre 2003 e 2013, ainda permitiu a conclusão que os maiores valores das médias dos totais anuais de precipitação ocorreram na cidade de Recife, enquanto, os máximos anuais ocorreram no município de Cabo de Santo Agostinho.

O comparativo das equações de chuvas intensas comumente utilizadas para o dimensionamento de obras de drenagem urbana na RMR (FIDEM) com as mais atuais permitiram visualizar para a equação do PDDU/Recife um incremento de 21% para um tempo de retorno de 10 anos e duração de 60 minutos, enquanto para a da APAC/POSTO 30, um incremento de 11% para o mesmo tempo de retorno e duração.

Devido a disponibilidade de dados pluviométricos na RMR, o estudo de eventos extremos de precipitação se deu no período compreendido entre 2010 e 2016, com destaque para os anos de 2014, 2015 e 2016, nos quais já se dispunha de dados com discretização temporal subdiária e bem espacializados. As observações da pluviometria nesse período, permitiu observar que a variabilidade interanual dos totais pluviométricos relaciona-se de forma similar com número de ocorrência dos eventos extremos, ou seja, nos anos de maiores totais pluviométricos anuais observa-se maior incidência de eventos extremos, enquanto que, nos anos de baixos totais pluviométricos anuais observa-se um número reduzido de eventos de chuvas intensas. Contudo, a intensidade dos

eventos de chuvas intensas independe da variabilidade interanual das chuvas, implicando que, mesmo em anos com baixos totais anuais pode-se ter eventos altamente intensos de precipitação. Para os anos observados, ocorreram 179 eventos que ultrapassaram 50,0 mm de chuva em 24h, destacando-se os anos de 2011 e 2012, por apresentarem o maior e o menor número de eventos extremos, respectivamente.

Os eventos de chuvas intensas que atingem a RMR ocorrem em todos os meses do ano, no entanto, são mais frequentes nos meses que compõem o período chuvoso, de abril a julho. A variabilidade espacial do número de eventos de chuvas intensas considerados altamente intensos na RMR, mostra que a porção sul e a faixa litorânea que se estende até a cidade de Paulista são as mais afetadas.

A entrada dos sistemas meteorológicos que originam os eventos de chuvas intensas ocorrem, predominantemente, na porção sul da RMR e deslocam-se para sul e sudeste, dependendo da época do ano. A localização geográfica da RMR e a direção predominante do vento - de sudeste - são os principais fatores que contribuem para esse comportamento.

6 RECOMENDAÇÕES

Em toda a RMR, destacando-se os municípios de Recife, Cabo de Santo Agostinho, Olinda, Jaboatão e Paulista, o poder público deve investir em aprimoramento dos projetos de drenagem urbana para lidar com os grandes totais pluviométricos e eventos extremos que atingem a RMR, a fim de minimizar os seus efeitos negativos.

O município de Cabo de Santo Agostinho, devido à alta frequência de ocorrência das chuvas intensas e dos maiores picos observados, deve desenvolver sistema de alertas, adaptação e convivência para lidar com os eventos extremos que atingem a região, e melhorar os projetos de adequação diante dos eventos extremos, principalmente se forem confirmadas as tendência de mudanças climáticas.

Em virtude da heterogeneidade espaciais da precipitação pluviométrica, as obras de drenagem urbana e de outras natureza que necessitarem de estudos hidrológicos na RMR, devem ser realizadas utilizando a equação de chuvas intensas desenvolvida para o município para o qual deseja-se desenvolver a obra, evitando o uso de uma única equação para toda a RMR.

REFERÊNCIAS

- Alheiros, M. M. **Riscos de Escorregamentos na Região Metropolitana de Recife**. 1998. 149 f. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 1998.
- Alpert, P.; Kishcha, P. Quantification of the effect of urbanization on solar dimming, *Geophys. **Geophysical Research Letters***, v.35, L08801, 2008. doi: 10.1029/2007GL033012.
- Alpert, P.; Kishcha, P.; Kaufman, Y. J.; Schwarzbard, R. Global dimming or local dimming?: Effect of urbanization on sunlight availability. ***Geophysical Research Letters***, v. 32, L17802. 2005. doi:10.1029/2005GL023320.
- BACK, A. J. Chuvas intensas e chuvas de projeto de drenagem superficial no estado de Santa Catarina. Florianópolis: Epagri, 2002. 65 p.
- _____. Relações entre precipitação intensas de diferentes durações ocorridas no município de Urussanga, SC. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v.13, p.170-175. 2009.
- Back, A. J.; Oliveira, J. L. R.; Henn, A. Duration-Frequency relationships of heavy rainfall in Santa Catarina, Brazil. ***Revista Brasileira de Ciências do Solo***, v.36, p.1015-1022, 2012.
- Banco Mundial. Avaliação de Perdas de Danos: inundações bruscas em Pernambuco – junho de 2010. **Relatório elaborado pelo Banco Mundial com apoio do Governo do Estado de Pernambuco**. Agosto de 2012. Disponível em: <http://mi.gov.br/pt/c/document_library/get_file?uuid=53d18df5-cf74-4be4-80c0-97ce3cebad14&groupId=10157>. Acesso em: 01 de novembro de 2016.
- Barro, H. U.; Lombardo, M. A. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo. ***Revista GeoUSP – Espaço e Tempo***, v. 20, n. 1, p. 160-177. 2016.
- Bell, F. G. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. ***Journal of Hydraulics Division***, v. 95, p. 311-327, 1969.
- Bertoni, J. C.; Tucci, C. E. M. Precipitação. In: **Tucci, C. E. M. Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. p.177-241.
- Burian, S. J. Shepherd M. Effects of urbanization on the diurnal rainfall pattern in Houston. ***Hydrologic Processes***. v. 19. p. 1089-1103. 2005. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.5647/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=www.google.com.br&purchase_site_license=LICENSE_DENIED>. Acesso em: 05 jul. 2016.
- Cabral, J. J. S. P.; Preuss, S. L. C.; Fonseca Neto, G. C. Capibaribe e seus afluentes na planície de Recife: visão multidisciplinar de um rio urbano e sua importância para o sistema de drenagem das águas pluviais. In: **XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, de 04 a 07 de novembro de 2014, Natal/RN. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/xiisrhn/apresentacoes/pap018397_jaimecabral_09h15_ok.pdf>. Acesso em: 20 de jun. 2015.

Campos, A. M. V. (2010). **Modelos conceituais de formação da corrente de jato no Nordeste brasileiro**. Dissertação Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Meteorologia) Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, 2010. 94f.

CARDOSO, A. S.; BAPTISTA, M. B. Metodologia para avaliação de alternativas de intervenção em cursos de água em áreas urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1. p. 129-139. 2011.

CARMO, W. J. E.; MARCHI, L. F. Uma visão holística do plano diretor de drenagem urbana. **Revista Jus Navigandi**, ISSN 1518-4862, Teresina, ano 18, n. 3796, 22 nov. 2013. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/25944>>. Acesso em: 30 jan. 2018.

Carraça, M. G. D.; Collier, C. G. Influence of the urban morphology on the rainfall distribution in Greater Manchester. In: **Proceedings of the International Conference CITIES and CLIMATE CHANGE**, 15-16 May 2008, Lisboa. Portugal: Centre of Geographical Studies of the University of Lisbon, URBKLIM Project.

Carraça, M. G. D.; Collier, C. G. Modelling the impact of high-rise buildings in urban areas on precipitation initiation. **Meteorological Applications**, v. 14, p. 149-161. 2007. DOI: 10.1002/met.15.

CARVALHO, F. A. T.; CABRAL, J. J. S. P.; CIRILO, J. A.; ROLIM JUNIOR, A. L. Análise de Regiões Hidrologicamente Homogêneas no Estado de Pernambuco, utilizando Técnicas de Análise de Agrupamento. In: X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1993, Gramado. **Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p. 239-246.

CATUZZO, H. **Telhado Verde: Impacto na temperatura e umidade do ar. O Caso da Cidade de São Paulo**. 2013. 206f. Tese (Doutorado) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Drenagem urbana – **Manual de projeto**. 3.ed. São Paulo: CETESB, 1986. 464p.

Costa, D. F.; Silva, H. R.; Peres, L. F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira/SP através da utilização de geotecnologias. **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 974-985, set/out 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n5/v30n5a19.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2016.

Christofidis, H. V. **Drenagem Urbana Sustentável: análise do uso do Retrofit**. Dissertação de Mestrado (Centro de Desenvolvimento Sustentável), Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2010. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/12216/4/2010_HugoDoValeChristofidis.pdf>. Acesso em: 27 de out. 2017.

Criss, R. E., Winston, W. E. Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 2723-2725. 2008.

CRUZ, J. C.; MELHORANÇA, A. L.; COELHO, A. M. **Cultivo do milho**, 2010. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/manejomilho.htm>. Acesso em: 25 de abr. 2016.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. **In: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2007. São Paulo/SP. CD-ROM.

DAEE/CETESB (1980). **Drenagem Urbana, Manual de Projeto**, Departamento de Águas e Energia Elétrica e Companhia de Tecnologia de Saneamento, São Paulo.

Damé, R. C. F.; Teixeira, C. F. A.; Terra, V. S. S. Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência para Pelotas-RS. **Revista Engenharia Agrícola**, v.28, p.245-255, 2008.

Dantas, L. G.; Santos, C. A. C.; Olinda, R. A. Tendências anuais e sazonais nos extremos de temperatura do ar e precipitação em Campina Grande – PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 423-434, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130088>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2017.

EMLURB. Relatório de Andamento do RAP - Caracterização da Área de Influência Direta – AID. **In: Estudo elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife**. (Versão concedida em visita técnica). Recife, out. 2013.

_____. Manual de drenagem urbana da cidade do Recife. **In: Estudo elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife**. (Versão concedida em visita técnica). Recife, Mai. 2014.

Fedorova, N. 2001. **Meteorologia Sinótica**. V.2, 242 p. Editora e gráfica Universitária-UFPel.

FEDOROVA, N.; KRICHAK, S. O.; LEVIT, V.; CARVALHO, M. H.; RODRIGUES, L. R. L. Verificação das trajetórias das parcelas de ar pelo modelo HYSPLIT no caso de CCM em Maceió-Alagoas. **In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza. Anais...(CD-ROM), 2004.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; FEDOROV, D. Fog and Stratus Formation on the Coast of Brazil. **Atmospheric Research**, USA, v. 87, p. 268-278, 2008.

Fernandes, R. C.; Carvalho, A. L. Espacialização da Precipitação Pluvial no Município de Piranhas, Alagoas. **Ciência e Natura**, v. 35, n. 2, dezembro, 2013. p. 295-303. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x12581>.

Federal Interagency Stream Restoration Working Group. **Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices**. 2001. Disponível em: <http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044574.pdf>. Acesso em 04 de out. 2016.

Ferreira, A. G.; Mello, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1. 2005. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/viewFile/25215/16909>>. Acesso em: 02 de mar. 2017.

FERREIRA, M. J. et al. Radiation balance at the surface in the city of São Paulo, Brazil: diurnal and seasonal variations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, p. 229-246, 2012.

FERREIRA, M. J.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Diurnal variation in stored energy flux in São Paulo city, Brazil. **Urban Climate**, v. 5. p. 36-51, 2013.

FIDEM – Fundação de Desenvolvimento Municipal (1979). Plano Diretor de Macrodrenagem da Região Metropolitana do Recife: Convenio SUDENE/FIDEM. **Minuta do Relatório Final**, Volume II, AQUAPLAN.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cidades@ -**

Pernambuco, Recife. Disponível em:

<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=2611606>>. Acesso em: 03 jul. 2016.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática. **IV Relatório do IPCC/ONU. Mudança climática 2007: a base da ciência física**. Novos Cenários Climáticos. Paris: IPCC/ONU, 2007.

Jornal do Comércio – JC online. **Cheia de 1975 no Recife – Uma tragédia em busca de memória**. Publicado em 25 de abr. de 2015. Disponível em:

<<http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/geral/noticia/2015/04/25/cheia-de-1975-no-recife---uma-tragedia-em-busca-de-memoria-178266.php>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2017.

KANDEL, R. **O reaquecimento climático**. São Paulo: Editora Loyola, 2007.

KOBAYASHI, Fabiana Y. et al. **Drenagem Urbana Sustentável**. São Paulo: USP, 2008.

Krüger, E. L.; Gonzales, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 89-106, jul./set. 2016.

Legates, D. R., McCabe Jr, G. J. Evaluating the use of "Goodness-of-Fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233–241. 1999.

Liebmann, B.; Jones, C.; Carvalho, L. M. Interannual Variability of daily extreme precipitation events in the state of São Paulo, Brazil. **Journal of Climate**, v. 14, n. 2, p. 208-218. 2001.

Lima, H. M. F.; Mata, I. P.; Lima, A. V. F. Aplicação e validação de um simulador estocástico de variáveis climáticas: O caso da precipitação. **Revista Ingenieria del Agua**, v.12, p.27-37, 2005.

Lombardo, M. A. 1985. **Ilha de Calor nas Metrôpoles**. São Paulo: Hucitec. 244p.

Loureiro, R. S.; Saraiva, J. M.; Saraiva, I.; Senna, R. C.; Fredo, A. S. Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no Estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. esp., p. 83-94, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130054>.

MARENGO, J. A.; BORMA, L. S.; RODRIGUEZ, D. A.; PINHO, P.; SOARES, W. R.; ALVES, L. M. Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation. **American Journal of Climate Change**, v. 2, p. 87-96. 2013.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CHOU, S. C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES, L. M.; OBREGON, G. O.; SOARES, W. R.; BETTS, R.; KAY, G.

Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil - Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. [S. L.]. INPE/Met Office, 2011.

Marengo JA, Valverde MC, and Obregon GO (2013) Assessments of observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo (MASP). **Climate Research**, v. 57, n. 01, p. 61-72. Disponível em: <<http://www.int-res.com/abstracts/cr/v57/n1/p61-72/>>. Acesso em 20 jul. 2016.

Medeiros, O. B. **Estudo da distribuição na área de chuvas intensas em bacias de médio porte**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). 216 p. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas/SP. 2002.

Molion, L. C. B. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. **Climanálise**, v. 8, agosto. 2005. Disponível em: <<http://www6.cptec.inpe.br/revclima/revista>>. Acesso em: 01 de mai. 2017.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p 1-10, 2002.

Moura, G. B. A.; Aragão, J. O. R.; Melo, J. S. P.; Silva, A. P. N.; Giongo, P. R.; Lacerda, F. F. Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 462-469, 2009.

Moura, M. O.; Zanella, M. E; Sales, M. C. L. Ilhas Térmicas na Cidade de Fortaleza/CE. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 28, n. 2, p. 33-45. 2008. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/3371/337127150003.pdf>>. Acesso em 19 jul. 2016.

Moreira, E. B. M.; Galvíncio, J. D. Análise multitemporal da ilha de calor urbana na cidade de Recife, através de imagem do Landsat TM-5. In: **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, 25 a 30 de abril de 2009, p.1441-1448. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.01.51.44/doc/1441-1448.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2016.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew Van, M. W. Bingner, R. L., Harmel, R. Veith, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885–900. 2007.

Naghetini, M.; Pinto, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Belo Horizonte, Brasil. 2007.

Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290. 1970.

Nery, J. T. Estudo geoestatístico da variabilidade da chuva na Bacia do Paranapanema. In: **Anais: X Congresso Argentino de Meteorologia e XIII Congresso Latinoamericano de Meteorologia**. 2009. Disponível em: <<http://www.ourinhos.unesp.br/Home/Pesquisa/GruposdeEstudo/Clima/Congressos313/032.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2016.

NERILO, N.; MEDEIROS, P. A.; CORDERO, A. **Chuvas intensas no estado de Santa Catarina**. Florianópolis: UFSC, 2002. 156 p.

Nobre C. A.; Reid, J.; Veiga, A. P. S. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. 44p. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/fundamentos_cientificos_mc_web.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2016.

Nóbrega, R. S.; Santiago, G. A. C. F. Tendência de temperatura na superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico e variabilidade de precipitação em Pernambuco. **Mercator**, Fortaleza, v. 13, n. 1, p. 107-118, jan./abr. 2014. DOI: 10.4215/RM2014.1301.

Oliveira, L. F. C; Antonini, J. C.; Griebeler, N. Métodos de estimativa de precipitação máxima para o Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.620-625, 2008.

Pannatier, Y. **VarioWin: Software for spatial data analysis in 2D**. New York: SpringerVerlag, 1996.

Pfaffstetter, O. **Chuvas intensas no Brasil: relação entre precipitação, duração e frequência de chuvas em 98 postos com pluviógrafos**. Rio de Janeiro: DNOCS, 1957. 419p.

Pickbrenner, K.; Weschenfelder, A. B.; Pinto, E. J. A. Metodologia para definição de equações intensidade-duração-frequência (IDF) e exemplo de aplicação para o município de Cristal, Rio Grande do Sul. In: **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 17 a 22 de nov. 2013, Bento Gonçalves/RS.

Pivetta, M. Da garoa à tempestade: Temporal se tornam mais frequentes e chuva aumenta 30% em São Paulo em 80 anos. **Revista Pesquisa FAPESP**. Ed. 195, maio de 2012. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/05/11/da-garoa-a-tempestade/?cat=ciencia>>. Acesso em 20 jul. 2016.

POMPÊO, C. A. Drenagem urbana sustentável. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 15-23, jan./mar. 2000.

Portal G1. **Chuva forte deixa quatro mortos no Recife e em Olinda**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pernambuco/noticia/2016/05/chuva-de-200-milimetros-deixa-quatro-mortos-no-recife-e-em-olinda.html>>. Acesso em: 13 nov. 2017.

R Core Team, 2014. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 28 jun. 2015.

Ramos, A. M., Azevedo, J. R. G., 2010. Equação de Chuvas Intensas para a cidade do Recife –Pernambuco. In: **X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Paraíba.

Ramos, A. M. **Influência das Mudanças Climáticas Devido ao Efeito Estufa na Drenagem Urbana de uma Grande Cidade**. 179p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco – CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 2010.

Rao, G. S. P.; Jaswal, A. K.; Kumar, M. S. Effects of urbanization on meteorological parameters. **Mausam**, v. 55, n. 3. p. 429-440. 2004. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/236177211_Effects_of_urbanization_on_meteorological_parameters>. Acesso em 19 jul. 2016.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; da ROCHA, R.P. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v.8, n.1, 34-50, 2012.

Recife, 2016. Elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas pluviais e drenagem urbana do Recife.

RODRIGUES, L. R. L.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Trovoadas na costa leste do nordeste do Brasil associadas a interação entre ondas nos ventos de leste e VCAN. In: **XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Florianópolis: SBMET, 2006b. v. CD1.

Rosenfeld, D.; Andreae, M. O.; Asmi, A.; Chin, M.; Leeuw, G.; Donavan, D. P.; Kahn, R.; Kinne, S.; Kivekäs, N.; Kulmala, M.; Lau, W.; Schmidt, K. S. Suni, T.; Wagner, T.; Wild, M.; Quaas, J. Global observations of aerosol-cloud-precipitation-climate interactions. **Reviews of Geophysics**, v. 52, n.4, p. 750-808. 2014. DOI 10.1002/2013RG000441

Salgueiro, J. H. P. B. (2015). **Eventos extremos máximos de precipitação na Sub-bacia 39 e o caso do alerta na Cidade de Recife-PE**. 212p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco – CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. Disponível em:

<<http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/17063/SEM%20ASSINATURAS-BC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em 05 jul. 2016.

Santos, D. M. B.; Fedorova, N. Lopes Segundo, M. M. CLIMATOLOGIA DOS VÓRTICES CICLÔNICOS DE MÉDIOS NÍVEIS EM 2010. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belém/PA. 13 a 17 de Setembro de 2010.

Santos, E. C. X.; Naghettini, M. Agregação do Coeficiente de Abatimento Espacial à Relação Intensidade-Duração-Frequência das Precipitações Sobre a Região Metropolitana de Belo Horizonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 8. N. 01 jan/mar 2003. P. 189-199.

Santos, E. H. M.; Griebeler, N. P.; Oliveira, L. F. C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial na bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite-GO. **Engenharia Agrícola**, Jabotical, v. 31, n. 1, p. 78-89, jan/fev. 2011.

Seidel, E. J., Oliveira, M. S. Proposta de uma generalização para os modelos de semivariogramas exponencial e gaussiano. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 34, p. 125-132. 2013.

Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A.

SILVA, S. R.; ARAÚJO, G. R. de S. Algoritmo para determinação da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 5, p. 1371-1383, 2013.

Song, X.; Zhang, J.; AghaKouchak, A.; Roy, S. S.; Xuan, y. Wang, G. He, R.; Wang, X.; Liu, C. Rapid urbanization and changes in spatiotemporal characteristics of precipitation in Beijing metropolitan area. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, p. 11250–11271. 2014. doi:10.1002/2014JD022084.

Sorteberg, C. Vera, and X. Zhang, 2012: Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation** [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.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.

Sepúlveda, S. (2011). **Avaliação da Precipitação Extrema na Ilha da Madeira**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa.

Schatz, J.; Kucharik, C. J. Seasonality of the Urban Heat Island Effect in Madison, Wisconsin. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**. v. 53, n. 10. 2014. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org/action/doSearch?AllField=Jason+Schatz>. Acesso em: 19 jul. 2016.

SCHUELLER, T. 1987. Controlling Urban Runoff: **A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs**.

Silva, B. M. Plano das águas pluviais: determinação da equação de chuva intensa para o município de Recife, utilizando dados obtidos e processados de pluviométricos e pluviográficos. **Relatório Final**, abril, 2014. 48 p.

Silva, E. C; Cabral, J. J. S. P.; Fernandes, R. C.; Gusmão, L. O.; Azevedo, J. R. G. Spatial variability of precipitation correlated with relief in Recife Metropolitan region and surrounding areas. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, Recife, v. 6, n. 5, p. 225-234. 2016.

Silva, P. O. **Análise de técnicas compensatória de drenagem urbana para atenuação de inundações em uma sub-bacia do rio Jiquiá no Recife**. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco – CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 2010.

SILVA, P. O.; CABRAL, J. J. S. P. Atenuação de Picos de Vazão em Área Problema: Estudo Comparativo de Reservatórios de Detenção em Lote, em Logradouros e em Grande Área da Bacia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 7-18, 2014.

Silva, R. D. **Análise da dinâmica do uso da terra e sua interferência em enchentes na área urbana do município de Americana-SP**. 89p. Trabalho de Conclusão de Curso (Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista), Rio Claro-SP. 2013. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121273/000790740.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 04 de out. 2016.

Silva, S. R.; Araújo, G. R. S. Algoritmo para Determinação da Equação de Chuvas Intensas. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 6, n. 5, 2013. P. 1371-1383.

Silva, W. L.; Dereczynski, C.; Chang, M. Freitas, M.; Machado, B. J.; Tristão, L.; Ruggeri, J. Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 2, p. 181-194, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130622>>. Acesso em 31 de fevereiro de 2017.

SILVEIRA, A. L. L. (2001). Abatimento espacial da chuva em Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p.5-13.

SILVEIRA, A.L.L., 1997. Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, jul./dez., p. 93-107. 1997.

Souza, D. O.; Alvalá, R. C. S. Observational evidence of the urban heat island of Manaus City, Brazil. **Meteorological Applications**, v. 21, p. 186-193. 2014. DOI: 10.1002/met.1340.

SOUZA, W. S.; ASSIS, J. M. O.; SILVA, R. F.; CORREIA, A. M. (2013). Análise do comportamento das chuvas durante os últimos 50 anos (1961 – 2011), na cidade do Recife/PE. **Revista Pernambucana de Tecnologia**. Recife, p. 6 - 14 out. 2013.

SOUZA, V. C. B. (2013). Gestão da drenagem urbana no Brasil: Desafios para a sustentabilidade. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, GESTA, v. 1, n. 1, p. 58 – 72, 2013.

Spångmyr, M. Global Effects of Albedo Change due to Urbanization. **Seminar series** n. 180. Department of Earth and Ecosystem Sciences, Lund University. 2010. 38 p. Disponível em: <<http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1856904&fileId=1856935>>. Acesso em: 19 jul. 2016.

Stevens, B.; Feingold, G. Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system, **Nature**, v. 461, p. 607–613, 2009.doi:10.1038 /nature08281.

Teixeira, M. S.; Satyamurty, P. Trends in the frequency of intense precipitation events in southern and southeastern Brazil during 1960-2004. **Journal of Climate**, v. 24, n. 7, p. 1913-1921. 2011.

TUCCI, C. E. M. **Águas Urbanas**. p. 97-112. Estudos Avançados. Vol. 22 (63) USP 336 pp. 2008.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n.1, jan/mar, p. 5-27. 2002.

Vasconcelos, R. Plano de drenagem será entregue em agosto. **Diário de Pernambuco Impresso**, caderno B2, 10 de maio de 2016.

Viola, H. **GESTÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS EM ÁREAS URBANAS – O ESTUDO DE CASO DA CIDADE DO SAMBA**. Dissertação (Programa de Pós-Grauação em Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 384 p. 2008.

Wang, K.; Ma, Q.; Wang, X. Y.; Wild, M. Urban Impact on mean and trend of surface incident solar radiation. **Gephysical Research Letters**. n. 41. p. 4664-4668. DOI:10.1002/2014GL060201.

Wang, Y.; Ji, W.; Yu, X.; Xu, X.; Jiang, D.; Wang, Z.; Zhuang, D. The Impact of Urbanization on the Annual Average Temperature of the Past 60 Years in Beijing. **Advances in Meteorology**, 2014. DOI: 10.1155/2014/374987.

WILKEN, P. S. (1978). **Engenharia de Drenagem Superficial**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, 477p.

Willmott, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184–194. 1981.

Yang, L.; Smith, J. A.; Baeck, M. L.; Bou-Zeid, E.; Jessup, S. M.; Tian, F.; Hu, H. Impact of urbanization on heavy convective precipitation under strong large-scale forcing: A case study over the Milwaukee-Lake Michigan region. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 1, p. 261-278. 2014.

Zambrano-Bigiarini, M. **hydroGOF: goodness of fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series**. R package version 0.38. 2014. Disponível em: <<http://CRAN.Rproject.org/package=hydroGOF>>. Acesso em: 28 jun. 2015.