



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
MESTRADO**

CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NAS ESCALAS SUBHORÁRIA E SUBDIÁRIA NO BRASIL

Filipe Carvalho Lemos

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre*



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
MESTRADO**

CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NAS ESCALAS SUBHORÁRIA E SUBDIÁRIA NO BRASIL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Filipe Carvalho Lemos

Orientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho

L557c Lemos, Filipe Carvalho.

Caracterização espaço-temporal da precipitação nas escalas subhorária e subdiária no Brasil / Filipe Carvalho Lemos. - João Pessoa, 2022.

59 f.

Orientação: Cristiano das Neves Almeida.

Coorientação: Victor Hugo Rabelo Coelho.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia civil e ambiental. 2. Eventos chuvosos. 3. Escalas espaço temporais. 4. Mínimo intervalo de tempo. 5. Variabilidade espacial. I. Almeida, Cristiano das Neves. II. Coelho, Victor Hugo Rabelo. III. Título.

UFPB/BC

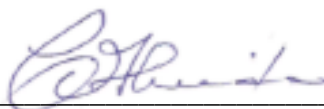
CDU 624:504(043)

Filipe Carvalho Lemos

**CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO NAS
ESCALAS SUBHORÁRIA E SUBDIÁRIA NO BRASIL**

Dissertação aprovada em 21/03/2022 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida – UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho – UFPB
(Coorientador)



Prof. Dr. Tarciso Cabral da Silva – UFPB
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Javier Tomasella – CEMADEN
(Examinador Externo)

Aos meus pais, Ana Juberlita de
Carvalho Lemos e Deluciano
Lemos de Araújo, a minha irmã
Maria Helena Carvalho Lemos e a
todos que de alguma forma
contribuíram e apoiaram para que
eu chegasse aqui.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, por sempre ter me guiado e permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar, por me permitir ultrapassar todos os diversos obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

À minha mãe, Ana Juberlita de Carvalho Lemos, ao meu pai, Deluciano Lemos de Araújo e minha irmã, Maria Helena Carvalho Lemos, deixo um agradecimento especial, por todas as lições de amor, companheirismo, amizade, dedicação, compreensão e perdão que vocês me dão a cada novo dia. Minhas conquistas são inteiramente para vocês!

À minha família, tios(as), primos(as) e avós, por apoiarem de todas as formas possíveis e compreenderem as minhas ausências inúmeras vezes ao longo dessa caminhada. Sinto-me orgulhoso e profundamente privilegiado por ter uma família tão especial e unida

Aos amigos (as) que Deus colocou em meu caminho, em especial; Ana Luiza, Andressa Kelly, Aline Medeiros, Maria Isabel, Milla Gomes e Gustavo Chaves, aqueles que conheci na época da graduação e levarei para o resto da vida. Mesmo com a distância vocês sempre estiveram presentes e me ajudaram durante o Mestrado, com um gesto de carinho ou uma palavra amiga. É muito bom saber que tenho vocês sempre comigo. Amo vocês!

Ao meu orientador, Professor Cristiano das Neves Almeida, que acreditou e me deu uma oportunidade de trabalhar junto a ele ainda na graduação. Obrigado por acreditar em mim, pela confiança e por me atender com paciência todas as vezes que precisei. Agradeço por todos os ensinamentos compartilhados de forma admirável e por buscar, constantemente, contribuir com a vida profissional de todos os seus orientandos. Muito obrigado por tudo!

Ao meu coorientador, professor Victor Hugo Rabelo Coelho, por toda disponibilidade e grandiosa ajuda durante a realização deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para a concretização de todas as etapas desta pesquisa. Muito obrigado!

Aos professores do programa de pós-graduação, por terem inovado na forma de ensino e buscado estabelecer as melhores relações possíveis diante de tempos tão difíceis e desafiadores.

Agradeço imensamente aos meus amigos do LARHENA – UFPB, que sempre me ajudaram durante o desenvolvimento deste trabalho, Abner Lins, Geraldo Moura, Marcela Meira e em especial ao Emerson Freitas, que contribuiu diretamente durante toda a pesquisa, com discussões, ideias e reuniões. Muito Obrigado!

Aos Professores Tarciso Cabral e Javier Tomasella, membros da Banca Examinadora, pelo interesse, disponibilidade e ponderações, que guiaram a confecção final deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado!

RESUMO

O estudo das propriedades dos eventos de chuva em várias escalas espaço temporais é de grande importância para a compreensão de processos e variáveis ambientais, bem como atividades socioeconômicas. Esses estudos sobre as características das chuvas, principalmente em resoluções sub-horárias, não são realizados em grandes áreas da América do Sul devido à falta de dados. O Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) implementou gradativamente desde 2011 uma rede de monitoramento sub-horário, composta por aproximadamente 3.500 pluviômetros automatizados distribuídos no Brasil, abrindo novas oportunidades para estudos hidrológicos nesse vasto país tropical. Para preencher essa lacuna de conhecimento, este estudo analisou a dinâmica e a correlação espaço-temporal da chuva e suas características no Brasil em escalas temporais subdiárias e sub-horárias, utilizando sete anos de dados (de 2014 a 2020) fornecidos pelo CEMADEN. O tempo mínimo entre eventos (MIT) e a lâmina mínima (MRD = 1 mm) foram usados para definir os eventos de chuva. Sete MIT's (i.e., 30, 60, 120, 180, 360, 720 e 1440 min) foram considerados para avaliar as características dos eventos de chuva e sua inter-relação. O algoritmo de agrupamento *Gaussian Mixture Models* (GMM) foi aplicado para identificar regiões com padrões de chuva semelhantes de acordo com o MIT considerado. Foram identificados 6 grupos com padrões pluviométricos semelhantes no Brasil, e, mesmo havendo proximidade de alguns grupos em uma propriedade específica, eles são consideravelmente diferentes em outras. Os resultados mostram que o MIT tem forte influência sobre as propriedades da precipitação, sendo o tempo seco (variação de 4.812%) e o número de eventos (variação de 45%) as variáveis mais sensíveis a variação de tal parâmetro. A costa do Nordeste é a região onde mais ocorrem eventos de precipitação, com mais de 200 eventos por ano (MIT < 60 min). Em oposição, a região Semiárida apresentou o menor número de eventos do Brasil, com uma média de 69 por ano e chegando a apenas 38 eventos com MIT de 1440 minutos. As regiões Central (principalmente), Semiárida, Norte e a costa Sudeste possuem chuvas muito intensas, podendo provocar, com maior facilidade; inundações, alagamentos e enchentes. A Costa do Nordeste, o Sul e o Sudeste possuem o volume de chuva acumulada como principal fator de alerta. Em termos de coeficiente de correlação espacial entre as estações, quanto menor o intervalo de medição, menor é a correlação para uma mesma distância. Em termos de correlação espacial entre os dados das estações, considerando a resolução de 10 minutos, em média, 2,5 km é a distância necessária para garantir um coeficiente de correlação de 0,7 entre as estações pluviométricas do Brasil. Os resultados deste estudo fornecem uma melhor compreensão da precipitação e suas características no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Mínimo intervalo de tempo, eventos chuvosos, variabilidade espacial.

ABSTRACT

The study of the properties of rainfall events at various spatio-temporal scales is of great importance for the understanding of environmental processes and variables, as well as socioeconomic activities. These studies on rainfall characteristics, mainly in sub-hourly resolutions, are not carried out in large areas of South America due to lack of data. The National Center for Monitoring and Alerting Natural Disasters (CEMADEN) has gradually implemented, since 2011, a sub-hourly monitoring network, composed of approximately 3,500 automated rain gauges distributed in Brazil, opening new opportunities for hydrological studies in this vast tropical country. To fill this knowledge gap, this study analyzed the dynamics and spatio-temporal correlation of rainfall and its characteristics in Brazil on sub-daily and sub-hourly time scales, using seven years of data (from 2014 to 2020) provided by CEMADEN. The minimum time between events (MIT) and the minimum depth (MRD = 1 mm) were used to define the rainfall events. Seven MITs (i.e., 30, 60, 120, 180, 360, 720 and 1440 min) were considered to assess the characteristics of rainfall events and their interrelationship. The Gaussian Mixture Models (GMM) clustering algorithm was applied to identify regions with similar rainfall patterns according to the considered MIT. Six groups with similar rainfall patterns were identified in Brazil, and even though some groups are close in a specific property, they are considerably different in others. The results show that the MIT has a strong influence on the properties of precipitation, with dry weather (variation of 4,812%) and the number of events (variation of 45%) being the most sensitive variables to the variation of this parameter. The Northeast coast is the region where the most precipitation events occur, with more than 200 events per year (MIT < 60 min). In contrast, the Semiarid region presented the lowest number of events in Brazil, with an average of 69 per year and reaching only 38 events with an MIT of 1440 minutes. The Central regions (mainly), Semi-arid, North and the Southeast coast have very intense rains, which can cause, with greater ease; floods, inundations and inundations. The Northeast, South and Southeast Coasts have the volume of accumulated rain as the main alert factor. In terms of the spatial correlation between stations, the smaller the measurement interval, the smaller the correlation for the same distance. In terms of spatial correlation between the data from the stations, considering the resolution of 10 minutes, on average, 2.5 km is the distance necessary to guarantee a correlation of 0.7 between the rainfall stations in Brazil. The results of this study provide a better understanding of precipitation and its characteristics in Brazil.

KEYWORDS: Minimum time interval, rainy events, spatial variability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS	4
2.1 ÁREA DE ESTUDO	5
2.2 BASE DE DADOS E CONTROLE DE QUALIDADE	8
2.3 DEFINIÇÃO DOS EVENTOS CHUVOSOS E SUAS PROPRIEDADES	9
2.4 GRUPOS DE ESTAÇÕES COM CARACTERÍSTICAS HOMOGÊNEAS	10
2.5 CORRELAÇÃO ENTRE AS SÉRIES DE DADOS DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
3.1 GRUPOS DE CARACTERÍSTICAS HOMOGÊNEAS	14
3.2 RELAÇÃO DAS PROPRIEDADES COM O MIT	19
3.3 PROPRIEDADES MÁXIMAS E GESTÃO DE RISCOS	24
3.3 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO POR REGIÃO	26
4. CONCLUSÃO	31
5. REFERÊNCIAS	32
6. APPENDICES	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo e rede de monitoramento do CEMADEN pós controle de qualidade.	5
Figura 2: Fluxograma do cálculo das propriedades médias, máximas e desvio padrão (DP) dos eventos durante cada ano, estação e MIT.....	10
Figura 3: Cálculo das correlações entre as estações para as diferentes escalas temporais.	14
Figura 4: a) Seis grupos de precipitação identificados no Brasil com dados sub-horários do CEMADEN e b) Regionalização das estações pelo método de Thiessen.	15
Figura 5: Comportamento das propriedades: a) Número médio de eventos chuvosos; b) Lâmina média; c) Duração média; d) Intensidade média e e) Tempo seco médio, em função do MIT.	20
Figura 6: Box plot separados por grupo e propriedades analisadas: a) Precipitação anual; b) Número médio de eventos; c) Lâmina média; d) Duração média; e) Intensidade média e f) Tempo seco médio.	21
Figura 7: Variação das propriedades médias com MIT de 60 minutos (1h).....	22
Figura 8: Variação das propriedades com MIT de 180 minutos (3h).....	22
Figura 9: Variação das propriedades com MIT de 720 minutos (12h).	23
Figura 10: Variação das propriedades com MIT de 1440 minutos (24h).	23
Figura 11: Percentil 90% das propriedades médias com MIT de 60 minutos.	24
Figura 12: Propriedades máximas com MIT de 60 minutos.....	25
Figura 13: Relação entre a correlação e as distâncias para diferentes resoluções temporais na costa do Nordeste.....	26
Figura 14: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Norte e costa sudeste.....	27
Figura 15: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Sul.	27
Figura 16: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Central	28
Figura 17: Estações de alta qualidade do Estado de São Paulo com um raio de 2,5 km.	30
Figura 18: Variação das propriedades médias com MIT de 30 minutos.	42
Figura 19: Variação das propriedades médias com MIT de 120 minutos (2h).....	42
Figura 20: Variação das propriedades médias com MIT de 360 minutos (6h).....	42
Figura 21: Propriedades máximas com MIT de 30 minutos.....	43
Figura 22: Propriedades máximas com MIT de 120 minutos (2h).	43
Figura 23: Propriedades máximas com MIT de 180 minutos (3h).	43
Figura 24: Propriedades máximas com MIT de 360 minutos (6h).	44
Figura 25: Propriedades máximas com MIT de 720 minutos (12h).	44
Figura 26: Propriedades máximas com MIT de 1440 minutos (24h).	44
Figura 27: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Sudeste.....	45
Figura 28: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Semiárido.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da intensidade da precipitação (mm.h-1). Fonte: INMET.....	26
Tabela 2: Raio de influência de cada estação considerando correlação de 0,7.....	29
Tabela 3: Quantidade de estações pluviométricas por ano e quantidade de estações de alta qualidade resultantes do controle de qualidade manual.....	46
Tabela 4: Quantidade de anos que as estações funcionaram sem problema nos dados (2014- 2020).	46
Tabela 5: Propriedades médias e principais sistemas atmosféricos atuantes em cada grupo. .	47
Tabela 6: Equações das curvas ajustadas para os grupos de precipitação, onde Y é a propriedade analisada e x o valor do MIT.	49
Tabela 7: Equações das curvas ajustadas para os grupos 3, 4 e 5. Onde Y é a propriedade analisada e x o valor do MIT.	50

1. INTRODUÇÃO

A compreensão das propriedades dos eventos de precipitação em variadas escalas espaço-temporais é de grande importância para os estudos hidroclimáticos. A ocorrência das chuvas, bem como suas propriedades, estão diretamente relacionadas às interações entre sistemas atmosféricos (Reboita *et al.* 2010), massas de ar (Borsato & Massoquim, 2020) e orografia (Gonçalves & Back, 2018; Melo Júnior *et al.* 2006).

Os eventos chuvosos, em decorrência do seu tipo de formação e características, podem influenciar em diversos processos e variáveis ambientais (e.g., umidade do solo, evapotranspiração, recarga de aquífero, enchentes, escorregamentos de barreiras, alagamentos, assoreamento dos rios, interceptação do dossel), bem como em várias atividades socioeconômicas (e.g., agricultura, pecuária e geração de energia) (Paz, 2004; Dunkerley, 2008a; Rozante *et al.* 2018; Souza *et al.* 2012). Peng, Wang & Huang, (2019), por exemplo, apontam que os estudos das características das chuvas e dos padrões de precipitação de curta duração possuem fundamental importância para que grandes cidades desenvolvam seus sistemas de drenagem. Já Alang Othman *et al.* (2020) afirmam que, a compreensão das características da chuva possibilita o aprimoramento da gestão deste recurso natural. Dunkerley (2019) destaca a influência de chuvas com curta duração e alta intensidade em processos hidrológicos e geomórficos da superfície.

Considerando as mudanças ambientais globais e regionais, os estudos sistemáticos envolvendo a ocorrência de chuva em diversas escalas de tempo tornam-se cada vez mais necessários, relacionando-os às respectivas medidas de frequência, intensidade e duração, que podem ser usadas de forma eficaz na detecção e compreensão das mudanças ambientais (Haylock & Nicholls, 2000).

Diante da capacidade de interferir nos diversos setores mencionados anteriormente, o estudo da precipitação e suas características em escalas subdiárias, ou mesmo sub-horária, é considerada uma ferramenta fundamental de gestão e pesquisa (Mandal, 2013; Messakh, 2015). A ausência de abordagens em relação à definição e análise das propriedades dos eventos de chuvas e sua variabilidade espaço-temporal pode ser um problema quando se trata, por exemplo, de simulação de eventos de chuva, pois a ausência de conformações dos estudos por vezes acarreta na não correspondência entre o dado real e o simulado (Dunkerley, 2008b). Dada a relevância do conhecimento das características da precipitação, Dunkerley (2008a) analisou como a definição do MIT (intervalos sem chuva de uma duração determinada que deve ser

igualado ou superado antes e depois de cada evento) influencia nas propriedades dos eventos de chuva. O autor constatou significativa variação das propriedades dos eventos de chuva em relação os valores de MIT's adotados (15 min à 24 h). Dentre as propriedades dos eventos de precipitação, Dunkerley (2010; 2012; 2017; 2019) ressaltou a importância da variação de intensidade e a intermitência dos eventos da chuva quanto a infiltração e escoamento superficial. Além disso, Dunkerley (2015; 2020; 2021) constatou relação direta entre o MIT e a intermitência, e apontou que a intermitência afeta diretamente a infiltração e a produção de escoamento, influenciando os mecanismos envolvidos na partição e infiltração da água, na quebra de agregados do solo, o deslocamento e o transporte de sedimentos, e a profundidade e velocidade do fluxo superficial.

Haile *et al.* (2011) avaliaram, com base em oito estações pluviográficas e dois anos de dados, a variabilidade das cinco seguintes propriedades da precipitação na região superior do rio Nilo: lâmina, duração do evento, intensidade média, intensidade máxima e intermitência. Eles relacionaram essas propriedades às mudanças do MIT (do inglês *Minimum Inter-event Time*) de 30 minutos para 8 horas. Os resultados desse estudo apontaram que o parâmetro do MIT tem um forte impacto sobre os valores estimados das propriedades dos eventos, semelhante aos resultados encontrados anteriormente por Dunkerley, (2008a), que utilizou uma estação pluviográfica com cinco anos de dados na região oeste da Austrália.

Em outro estudo, Dunkerley (2019) realizou uma análise da intensidade da precipitação baseado no MIT de 5, 15, 30, 60 min e 24 h. Essa nova análise foi baseada em dois postos pluviográficos, com cerca de três e nove anos de dados, respectivamente. O autor constatou a variação sazonal da propriedade durante o ano e até mesmo durante o dia, onde os eventos mais intensos aconteceram de forma mais prevalente no fim da tarde. Outros trabalhos relacionando o MIT às propriedades dos eventos podem ser encontrados, incluindo Wang *et al.* (2016), Chin *et al.* 2016, Peng *et al.* (2019), Alang Othman *et al.* (2020).

Atualmente, há três formas principais de medir a precipitação, que são através de pluviômetros convencionais ou automáticos, radares climáticos e dados de sensoriamento remoto (Li *et al.* 2017). Dentre os três métodos, os pluviômetros apresentam maior precisão. Entretanto, as medições são pontuais e, para estudar grandes áreas, torna-se necessário uma densa rede desses equipamentos bem distribuídos espacialmente, uma vez que os eventos de precipitação têm elevada variabilidade espaço-temporal (Futrell *et al.* 2005; Chen *et al.* 2016).

Com isso, o custo de instalação, manutenção e operação de uma grande rede de monitoramento de chuva é elevado. Buscar um parâmetro de instalação “ideal”, em termos de

distância entre estações e intervalos de medição, é uma solução plausível para abranger de forma mais eficiente o monitoramento de territórios continentais como o Brasil.

Mishra (2013), por exemplo, avaliou, com base em 8 pluviômetros em uma área de 50x50 km, a variação na precipitação diária em função do espaçamento das estações. O autor constatou que os coeficientes de correlação diminuem de 82% para 21% conforme o espaçamento do medidor aumenta de 5 km para 40 km. Resultados semelhantes foram encontrados por Bega (2005).

No Brasil, além do déficit de cobertura espacial das estações em algumas regiões, também há escassez de dados em resolução sub-horária. Esses dois fatores configuram uma grande barreira para o desenvolvimento das pesquisas sobre os eventos chuvosos em escala sub-horária, principalmente em nível nacional. Westra *et al.* (2014), por exemplo, reportaram a ausência de estudos que abordam as características da precipitação na escala sub-horária na América do Sul devido à falta de dados.

Em outro estudo, Blenkinsop *et al.* (2018) identificaram apenas 45 estações no Brasil, a partir de coleta de dados de estações pluviográficas com pelo menos um ano de dados horários. Alguns dos poucos estudos de caracterização da chuva na escala subdiária realizados no Brasil são os de Coutinho *et al.* (2014), que avaliaram as características dos eventos pluviométricos de três bacias experimentais localizadas no nordeste do Brasil. A comparação dos hietogramas evidenciou que as duas bacias localizadas no semiárido possuem características semelhantes; Almeida *et al.* (2017), compararam as propriedades de eventos de dois pluviômetros em bacias experimentais no Nordeste. Os resultados mostraram uma boa relação entre os dados de chuva analisados; Brasil *et al.* (2018), avaliaram influência das características pluviométricas na vegetação do semiárido. Os autores concluíram que quando a intensidade é inferior a 15 mm/h e a duração da chuva é inferior a 100 minutos, as perdas de interceptação são geralmente superiores a 30%; Barbosa *et al.* (2018), definiram os eventos de chuva e classificaram seus tipos de hietógrafos, para comparar as principais propriedades da chuva em três bacia hidrográficas. Na região litorânea e semiárido oriental, os hietogramas foram predominantemente retangulares. Já no semiárido ocidental, a predominância foi de hietogramas unimodais com assimetria à esquerda; Gonçalves (2018), classificou e avaliou os padrões dos hietogramas em bacias hidrográficas no Brasil. Os resultados apontam que, independentemente da localidade, o tipo triangular esquerdo é o mais recorrente. Além disso, o comportamento dos hietogramas altera com a mudança do Mínimo Intervalo de Tempo entre eventos; Brasil *et al.* (2020) avaliaram a relação entre a intensidade da chuva e a interceptação da vegetação da Caatinga em diferentes estágios de desenvolvimento do dossel. Os autores

constatarem que no início da estação chuvosa da região a interceptação é baixa, devido a baixa folhagem da vegetação. Além disso, o aumento da densidade do dossel da vegetação abrandava a intensidade da chuva em até 40%; e Brasil *et al.* (2022), que identificaram o MIT mais representativo para a região do semiárido brasileiro. Foram utilizados dados de chuva com resolução temporal de 5 minutos, entre os anos de 2009 e 2020. Os autores concluíram que o MIT de 6 h é o mais adequado para caracterizar a distribuição das chuvas nesta região. É importante ressaltar que nenhum dos trabalhos mencionados abrange todo o território brasileiro, ficando restritos a bacias experimentais.

Entretanto, o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) vem implementando gradativamente desde 2011 uma rede de monitoramento da precipitação na escala sub-horária, composta atualmente por aproximadamente 3.500 pluviômetros automatizados distribuídos em todo o Brasil, o que abre novas oportunidades para estudos hidrológicos neste amplo país tropical.

Com base no exposto, este estudo propõe realizar o primeiro estudo sobre o comportamento espaço-temporal da precipitação e suas características nas escalas subdiária e sub-horária em escala nacional para o Brasil, utilizando sete anos de dados da rede de monitoramento do CEMADEN. Para tanto, esta pesquisa objetiva: (1) estudar o comportamento das características da precipitação nas diferentes regiões do Brasil, (2) analisar como o critério de mínimo intervalo de tempo (MIT) influencia nas características dos eventos de precipitação, (3) avaliar a variabilidade espacial das características da precipitação e identificando grupos de características similares, e (4) avaliar a correlação entre as estações em diferentes resoluções de monitoramento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico está dividido de acordo com os elementos que serão empregados na metodologia da pesquisa. Ao todo, esta seção está dividida em 5 subseções, a saber: I) Área de estudo; II) Base de dados e controle de qualidade; III) Definição dos eventos chuvosos e suas propriedades; IV) Grupos de estações com características homogêneas e V) Correlação entre as séries de dados das estações de monitoramento.

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado abrangendo todo o território brasileiro (Figura 1), que possui área de aproximadamente 8,5 milhões de km² entre as latitudes 5,267° N – 33,750° S e longitudes 34,783° W – 73,983° W. O Brasil é oficialmente dividido em 5 regiões geográficas: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

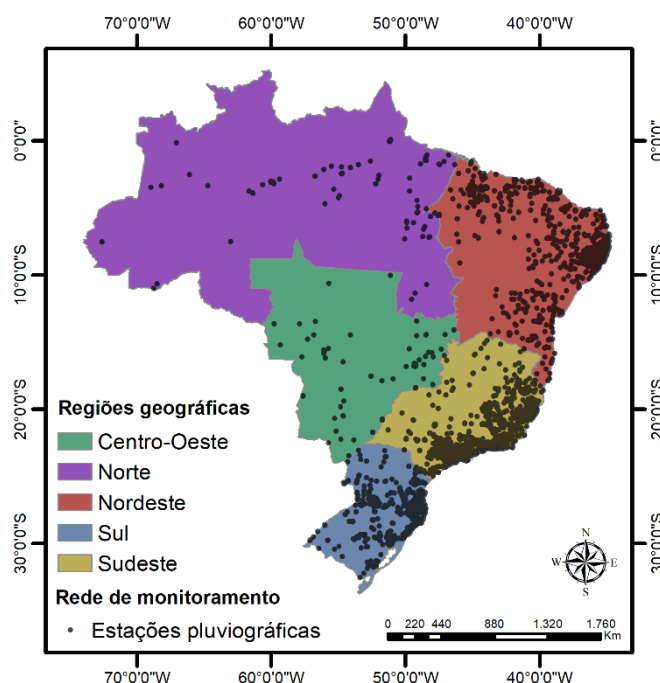


Figura 1: Localização da área de estudo e rede de monitoramento do CEMADEN pós controle de qualidade

A classificação climática de Köppen indica a ocorrência de 3 zonas climáticas no Brasil: A (Tropical), B (Árido) e C (Subtropical Úmida), além de suas subdivisões. De acordo com Alvares *et al.* (2013), a precipitação média anual no Brasil varia de 387 mm a mais de 3.000 mm, apresentando ainda variações na sua distribuição média mensal. A temperatura média anual na área de estudo varia de valores menores que 10° C a maiores que 26° C. Os dados levantados pelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) mostram altitudes variando de 0 m a valores superiores a 1.400 m.

O Brasil possui diversos regimes pluviométricos que variam até mesmo dentro de um mesmo estado da Federação (Freitas, 2019; Reboita *et al.* 2010). Esta diversidade é decorrente da abrangência territorial, das formas de relevo variadas e, consequentemente, da atuação de inúmeros sistemas atmosféricos. Os principais sistemas atuantes na área de estudo são resumidos a seguir:

Vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN): são definidos como sistemas de baixa pressão, de escala sinótica, que se formam na alta troposfera, possuem circulação horária (no hemisfério Sul) e centro mais frio que sua periferia (Gan, 1983). Os vórtices ciclônicos possuem uma vida média que varia de horas até semanas. Os VCAN podem ocasionar tempo estável em algumas regiões (centro do vórtice) ou chuvas fortes em outras (bordas dos vórtices), dependendo da posição do fenômeno e das condições atmosféricas (Lourenço *et al.* 1996; Silva, 2005 e Coutinho *et al.* 2010). Esses sistemas podem atuar de forma conjunta a outros sistemas, como as frentes frias (Kousky, 1979), distúrbios ondulatórios de Leste (Gomes, 2012) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Quadro, 1999), e Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Uvo, 1989).

Complexos convectivos de mesoescala (CCM): são aglomerados de nuvens que se formam devido à condições locais favoráveis como temperatura, relevo e pressão, desencadeando chuvas fortes, de baixa duração e comumente acompanhadas de fortes rajadas de vento (Ferreira & Mello, 2005). De acordo com Souza *et al.* (1998), ocorrem preferencialmente durante os meses de primavera e de verão no hemisfério sul, no período noturno e com um ciclo de vida médio de 10 horas.

Frentes frias: são sistemas meteorológicos cujo desenvolvimento é associado aos distúrbios baroclínicos provenientes do pacífico, que atravessam os Andes em latitudes médias (direção noroeste-sudeste) e deslocam sentido sudoeste para nordeste (Kousky, 1979; Satyamurty *et al.* 1998). Os estudos de Lemos & Calbete (1996), Cavalcanti & Kousky, (2009) e Andrade *et al.* (2012) identificaram que estes sistemas ocorrem em todas as estações do ano, entretanto, no inverno, eles avançam até latitudes mais baixas e são acompanhados por massas de ar mais frias provenientes de altas latitudes, podendo causar geadas e quedas de temperaturas nas regiões sul e sudeste do Brasil. Estes sistemas podem interagir com massas de ar de origem tropical tendo como consequência elevados acumulados de precipitação, principalmente na costa do Brasil entre o Sul e o Sul da Bahia (Cavalcanti & Kousky, 2009).

Zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS): é uma região de nebulosidade convectiva que tem direção preferencial noroeste/sudeste e são mais atuantes nos meses de novembro a março, sendo responsável pela precipitação de verão na região centro-sul do País, atingindo as regiões sudeste, centro-oeste, norte do Paraná e sul da Bahia (Abreu, 1998). Normalmente, três sistemas são necessários para a ocorrência de uma ZCAS: Alta da Bolívia, VCAN e uma frente fria (Silva *et al.* 2019; Rodrigues *et al.* 2016).

Zona de Convergência Intertropical (ZCIT): é um dos mais importantes sistemas meteorológicos atuando nos trópicos, que apresenta atividade convectiva oscilando entre 5°S e 10°N, aproximadamente (Uvo, 1989). A ZCIT é formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul, em baixos níveis, baixas pressões, altas temperaturas da superfície do mar e intensa atividade convectiva. Devido à sua estrutura física, a ZCIT tem se mostrado decisiva na caracterização das diferentes condições de tempo e de clima em diversas áreas (Moura & Vitorino, 2012). Segundo Ferreira & Mello, 2005, a ZCIT é o fator mais importante na determinação de quão abundante ou deficiente serão as chuvas no setor norte do Nordeste do Brasil.

Linhas de instabilidade (LI): estão associadas a uma grande quantidade de umidade e ar instável em grandes altitudes que dão origem a aglomerados convectivos alinhados, responsáveis por chuvas fortes (Houze *et al.* 1990; Breiland, 1958).

Brisa marítima e brisa terrestre: é uma forma de circulação do ar que pode dar origem a faixas de convecção sobre o continente ou oceano. Durante o dia o continente se aquece com velocidade superior ao oceano, provocando uma pressão inferior no continente. Isto faz com que o vento à superfície sopra do oceano para o continente, caracterizando a brisa marítima. A brisa terrestre segue o mesmo princípio. No período da noite, o continente perde calor mais rápido que o oceano, fazendo-o ficar com pressão inferior ao continente. Consequentemente, a circulação de ar se inverte, soprando do litoral para o mar (Mendonça, 2017; Ferreira & Mello, 2005).

Alta da Bolívia: é um anticiclone que ocorre na alta troposfera, no verão, sobre a América do Sul, (AS). Dependendo de sua posição, induz a subsidência em baixos níveis sobre a região Nordeste e facilita a penetração sistemas frontais sobre o continente (Gusmão, 1996). Além disso, é um dos sistemas necessários para a ocorrência da ZCAS.

Jato de baixos níveis (JBN): é um sistema de vento com altas velocidades abaixo de um ou dois quilômetros. Em todos os JBN, a umidade condensa frequentemente e precipita na região de convergência de baixo nível situada na saída do jato. Esses sistemas podem acontecer durante todo o ano, porém são observados com maior frequência entre os meses de dezembro e fevereiro (Santos *et al.* 2008; Marengo & Soares, 2002).

Distúrbios ondulatórios de leste (DOL): são sistemas que ocorrem na baixa troposfera, e quando se formam na região do Oceano Atlântico Sul apresentam deslocamentos característico

de leste a oeste, intensificando-se à medida que se aproximam da costa leste da Região Nordeste do Brasil (Chou, 1990; Silva, 2010). De acordo com Barbosa, (2005), os DOL podem potencializar os sistemas meteorológicos de perturbações convectivas.

2.2 Base de dados e controle de qualidade

A base de dados para este estudo é a rede de monitoramento automática de precipitação do CEMADEN, cujas instalação e operação iniciou em 2013. Atualmente, mais de 3 mil estações registram a precipitação a cada 10 minutos, durante sua ocorrência, e registra o valor 0 (zero) a cada 60 minutos, quando não há precipitação. A distribuição das estações utilizadas no estudo para os anos de 2014 a 2020 é ilustrada na Figura 1.

A grande disponibilidade de estações nem sempre é sinônimo de quantidade e qualidade de dados, pois parte das estações podem apresentar inconsistências ou ausência de registros, decorrentes de falhas. Desta forma, detectar e remover estações denominadas “ruins” é importante, uma vez que uma ampla gama de estudos pode ser comprometida por tais informações errôneas e inconsistentes. Lewis *et al.* (2018) afirmaram que os procedimentos de controle de qualidade são tipicamente uma operação manual. Já Hamada (2011) ressaltou que é extremamente trabalhoso fazer uma verificação visual das estações.

Na metodologia de controle de qualidade visual dos dados pluviométricos do CEMADEN, os registros de cada medidor de chuva, juntamente com as suas 5 estações mais próximas, foram analisados por meio de um gráfico de barras com a precipitação total mensal e um gráfico de dispersão com os registros de cada pluviômetro ao longo de cada ano (Freitas, 2019; Meira, 2021). Foram detectadas estações com longos períodos sem registro, estação com “outlier” e com longo período de valores constantes.

Ao todo, 2.913 postos foram considerados de alta qualidade. Deste total, 917 estações funcionaram ao menos um ano e duas estações funcionaram por 7 anos sem apresentar qualquer problema nos dados. O resultado mais detalhado da análise pode ser visto nas Tabelas 3 e 4 do apêndice.

2.3 Definição dos eventos chuvosos e suas propriedades

De acordo com Dunkerley (2008a), a precipitação pode ser definida como “evento” quando uma determinada lâmina mínima é alcançada ou excedida, com seu início e fim delimitados por intervalos sem chuva de uma duração determinada (MIT), que deve ser igualado ou superado antes e depois de cada evento. O intervalo de delimitação de eventos chuvosos não é fixo, dependendo do tipo de aplicação que se pretende realizar e da resolução temporal dos dados (Molina-Sanchis *et al.* 2016). Segundo Dunkerley, (2008b), há uma grande variedade de MIT's sendo utilizados, variando de 3 minutos até 24 horas, sendo o de 6 horas o mais comumente utilizado.

As propriedades da precipitação analisadas neste estudo foram: precipitação anual (mm), número de eventos (adimensional), precipitação média (mm), duração média (h), intensidade média (mm.h^{-1}), tempo seco médio (h), precipitação máxima (mm), duração máxima (h) e intensidade máxima (mm.h^{-1}). Além disso, também foram calculados os desvios padrão da lâmina média, duração média, intensidade média e tempo seco, totalizando treze parâmetros. O tempo seco é definido como período sem chuva durante a ocorrência do evento. Os eventos foram separados com base em sete valores de MIT's: 30, 60, 120, 180, 360, 720 e 1440 min. Adotou-se, ainda, uma lâmina mínima de 1 mm como critério para definição dos eventos chuvosos, a mesma utilizada por Dunkerley (2010) e Balme *et al.* (2006).

As propriedades médias foram calculadas para cada ano estudado, seguindo o fluxograma da Figura 2. Os valores das propriedades foram obtidos retirando-se a média dos eventos chuvosos de cada ano para cada estação e MIT. Os valores das propriedades máximas foram obtidos dentro dessa mesma etapa, sendo definidos como o maior valor encontrado no decorrer de todo o ano analisado em cada estação e MIT.

Em seguida, foi estimada a média anual global (2014 a 2020) de todas as propriedades calculadas anteriormente, considerando os anos em que a estação estava disponível nesse período.

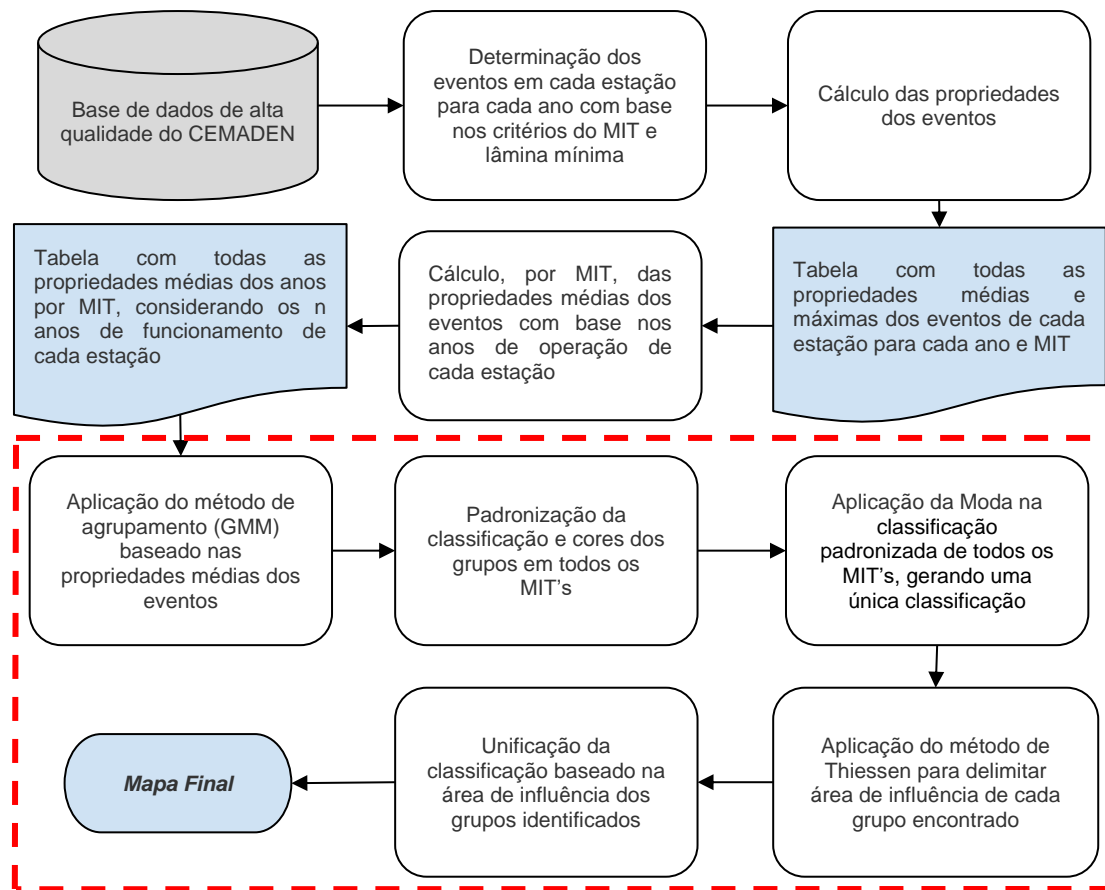


Figura 2: Fluxograma do cálculo das propriedades médias, máximas e desvio padrão (DP) dos eventos durante cada ano, estação e MIT

Como observado na figura anterior, após cálculo das propriedades médias foi possível aplicar métodos de agrupamento de dados, visando encontrar padrões na área de estudo, conforme etapas delimitadas pela linha tracejada na Figura 2.

2.4 Grupos de estações com características homogêneas

A separação de dados em grupos, de acordo com a similaridade das propriedades observadas, é uma forma de facilitar sua compreensão e interpretação. Modelos de Mistura de Gaussianas (GMM - *Gaussian Mixture Models*) (McLachlan *et al.* 2019) podem ser usados como método de agrupamento baseados em distribuições estatísticas específicas. Ao modelar a função de densidade de probabilidade de um conjunto de dados, o GMM automaticamente realiza um agrupamento do conjunto ao discriminar qual componente da mistura gerou cada elemento.

O GMM se baseia na suposição de que cada elemento do conjunto se origina a partir de um componente da mistura, com uma determinada probabilidade. Assim, ao inferir os parâmetros da mistura, essa probabilidade pode ser usada para associar cada elemento ao

componente com maior probabilidade de o ter gerado (Portela, 2015). Em outras palavras, cada agrupamento de estações é descrito por uma distribuição Gaussiana separada, que juntas formam a mistura (Reynolds, 2015). Desta maneira, dada uma amostra $X = \{\vec{X}_1, \vec{X}_2, \dots, \vec{X}_n\}$ com $\vec{X}_i \in \mathbb{R}^d$, assume-se que as observações são i.i.d (independentes e identicamente distribuídas) de uma densidade $p(\vec{X})$ e que a densidade $p(\vec{X})$ é uma mistura finita de K componentes (Gaussianas):

$$p(\vec{X}; \vec{\theta}) = \sum_{k=1}^k \pi_k p(\vec{X} | \vec{\mu}_k, \Sigma_k) \quad (1)$$

Onde:

$$\sum_{k=1}^k \pi_k = 1 \text{ e } \vec{\theta} = (\pi_1, \dots, \pi_k, \vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_k, \Sigma_1, \dots, \Sigma_k)$$

Considerando que as componentes $p(\vec{X} | \vec{\mu}_k, \Sigma_k)$ da Eq.1 são densidades Gaussianas multivariadas dadas por:

$$p(\vec{X} | \vec{\mu}_k, \Sigma_k) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma_k|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\vec{X} - \vec{\mu}_k)^T \Sigma_k^{-1} (\vec{X} - \vec{\mu}_k) \right\} \quad (2)$$

Para a execução do modelo GMM, é necessário estimar 3 parâmetros: o centroide $\vec{\mu}_k$, a forma do grupo (dado por Σ_k) e as proporções π_k (probabilidades de amostra pertencer a cada cluster). Para tanto é utilizado o método da máxima verossimilhança (*maximum likelihood estimation*), onde, dado um modelo estatístico que gera um conjunto X de observações, um conjunto de variáveis latentes Z e um vetor de parâmetros $\vec{\theta}$, temos que a função verossimilhança é dada por:

$$L(\vec{\theta}; X, Z) = p(X, Z | \vec{\theta}) \quad (3)$$

O estimador de máxima verossimilhança (EMV) do vetor de parâmetros $\vec{\theta}$ é determinado pela maximização da verossimilhança marginal dos dados observados:

$$L(\vec{\theta}; X) = p(X | \vec{\theta}) = \int p(X, Z | \vec{\theta}) dZ \quad (4)$$

Entretanto, não há solução analítica para a Eq.4, logo, a solução do método é baseada no algoritmo *Expectation Maximization* (EM), que é um método numérico iterativo para obter os estimadores de máxima verossimilhança de um modelo estatístico incompleto, em que as equações não podem ser resolvidas analiticamente. Tipicamente, isso ocorre porque tais modelos envolvem variáveis latentes além dos parâmetros desconhecidos e dos dados observados. Logo, o algoritmo EM busca encontrar o EMV da verossimilhança marginal iterativamente aplicando os dois passos a seguir:

1. *Expectation*: Calcular o valor esperado da log-verossimilhança com respeito a distribuição condicional de Z dado X , utilizando a estimativa atual dos parâmetros $\vec{\theta}$:

$$Q(\vec{\theta}; \vec{\theta}^{(t)}) = E_{Z|X, \vec{\theta}^{(t)}}[\log L(\vec{\theta}; X, Z)] \quad (5)$$

2. *Maximization*: Encontrar os parâmetros que maximizam essa quantidade:

$$\vec{\theta}^{(t+1)} = \underset{\vec{\theta}^{(t)}}{\operatorname{argmax}} Q(\vec{\theta}; \vec{\theta}^{(t)}) \quad (6)$$

Por fim, a variável latente (Z) indica a pertinência das amostras X pertencerem a um determinado grupo. A quantidade de grupos é uma variável livre do modelo. Logo, em alguns casos, fica a critério de quem analisa definir a quantidade de agrupamentos que melhor representa ou explica seu problema, sendo necessário encontrar um equilíbrio em que as observações que formam cada agrupamento sejam as mais homogêneas possíveis e os agrupamentos formados sejam os mais diferentes uns dos outros, gerando grupos com padrões de dados heterogêneos distintos.

Este modelo de reconhecimento de padrões está implementado no pacote “*Scikit-learn: Machine Learning in Python*”, possibilitando a representação da distribuição de probabilidade do GMM em grandes bases de dados (Pedregosa *et al.* 2011).

Neste trabalho, o teste relacionado à quantidade de grupos variou de quatro a sete. Ao todo, foram utilizadas as 13 propriedades mencionadas no item 2.3. É importante destacar que a localização das estações não entra em nenhuma etapa da análise do agrupamento, ou seja, o método não recebe informações sobre densidade local das estações de cada região. As únicas informações utilizadas são relacionadas às propriedades físicas dos eventos chuvosos, e, baseado nessas informações é que se realiza a análise dos possíveis grupos.

Considerando que a numeração dos grupos ocorre em ordem não padrão, ou seja, a cada MIT (ou execução do método) uma distribuição de valores dos grupos é realizada, torna-se necessária uma padronização, de modo que, por exemplo, o grupo de nomenclatura 1 represente a mesma região em todos os MIT's.

Em seguida, para contornar o efeito da influência do MIT nas propriedades e, consequentemente, na formação dos grupos, foi calculada a moda entre os agrupamentos de cada MIT. Desta forma, foi possível ajustar a classificação, onde cada estação seria definida como pertencente ao grupo em que ela foi classificada mais vezes.

Pontualmente algumas estações permaneceram aparentemente incoerentes com os seus vizinhos. Nesses casos específicos, foi realizada uma verificação gráfica do comportamento das propriedades médias, comparando a estação “duvidosa” com estações do grupo a qual foi originalmente classificada e estações do grupo que se esperava fazer parte, baseado na predominância local de classificação e literatura já conhecida. Após aplicação desse procedimento de verificação das estações incoerentes, foram selecionadas as áreas de predominância de cada grupo, baseado na espacialização do método de Thiessen. Todos os postos dentro de cada área delimitada foram classificados como sendo do grupo majoritário, ou seja, o mais recorrente.

2.5 Correlação entre as séries de dados das estações de monitoramento

Considerando a distribuição espacial das estações do CEMADEN, foi calculada a relação entre a correlação e a distância dos pluviômetros para diferentes resoluções temporais e diferentes regiões do Brasil. O objetivo dessa etapa é avaliar a distância média entre pluviômetros para realizar uma boa leitura da distribuição espacial da precipitação e quantidade de pluviômetros por área.

Para avaliar a correlação entre séries de duas estações pluviométricas para uma determinada resolução temporal, foi utilizado o Coeficiente de Correlação – CC (Eq. 7), em que “EstProx” é a n estação próxima à estação de referência (“EstRef”) e “ $\sigma_{EstProx}$ ”, “ σ_{EstRef} ” os respectivos desvios padrão. Esse coeficiente foi calculado ano a ano para cada estação, considerando a chuva acumulada nas seguintes resoluções temporais: mensal, semanal, diária, horária e 10 minutos.

$$CC = \frac{\frac{1}{n} \times \sum_i^N \left[\left(\text{EstProx}_i - \overline{\text{EstProx}} \right) \times \left(\text{EstRef}_i - \overline{\text{EstRef}} \right) \right]}{\sigma_{\text{EstProx}} \times \sigma_{\text{EstRef}}} \quad (7)$$

A correlação foi calculada entre uma estação de referência e suas estações vizinhas. Levando em conta a variabilidade da chuva, a distância considerada para seleção das estações próximas foi de um raio de até 100 km, conforme Figura 3.

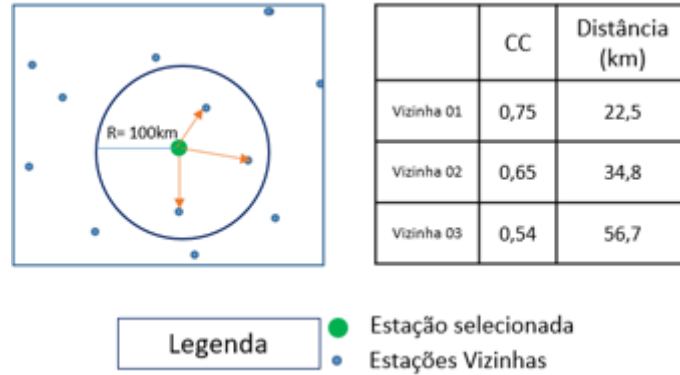


Figura 3: Cálculo das correlações entre as estações para as diferentes escalas temporais

Posteriormente, os resultados das correlações foram divididos em classes de distâncias de 1 em 1 km, onde foi calculada a média das correlações para cada classe, a fim de avaliar a influência da distância entre as estações na correlação. Isso foi feito para cada uma das séries temporais definidas e cada grupo de características homogêneas identificado na área de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Grupos de características homogêneas

Após análise, os agrupamentos com 4, 5 e 7 classes foram descartados devido às inconsistências encontradas em alguns grupos e fusão de outros, onde, considerando as características da precipitação no Brasil, não deveria ter acontecido. Dessa forma, o agrupamento em seis classes foi o mais apropriado para a separação das estações. Essa quantidade foi suficiente para diferenciar regiões que são conhecidamente distintas no Brasil em termos do comportamento da pluviometria, conforme estudos anteriores (e.g., Alvares *et al.* 2013; Reboita *et al.* 2010; Marinho *et al.* 2020).

Assim como mencionado por Dunkerley (2008a) e Wang *et al.* (2016), as propriedades da precipitação são alteradas em virtude do valor do MIT. Consequentemente, era esperado que os agrupamentos também tivessem alguma alteração com a variação de tal parâmetro. Além disso, ainda existe o fator de transição entre os agrupamentos, onde as estações nas

bordas dos grupos possuem características próximas aos seus diferentes grupos vizinhos, fazendo-as alterar de agrupamento com mais facilidade ao longo dos valores de MIT.

Após procedimento de ajustes e correções por análise gráfica das propriedades e delimitação dos grupos pelo método de Thiessen, foi possível chegar ao mapa contendo as divisões dos diferentes tipos de precipitação do Brasil, nomeados como; Norte e costa sudeste, Central, Sul, Sudeste, Costa do Nordeste e Semiárido (Figura 4B).

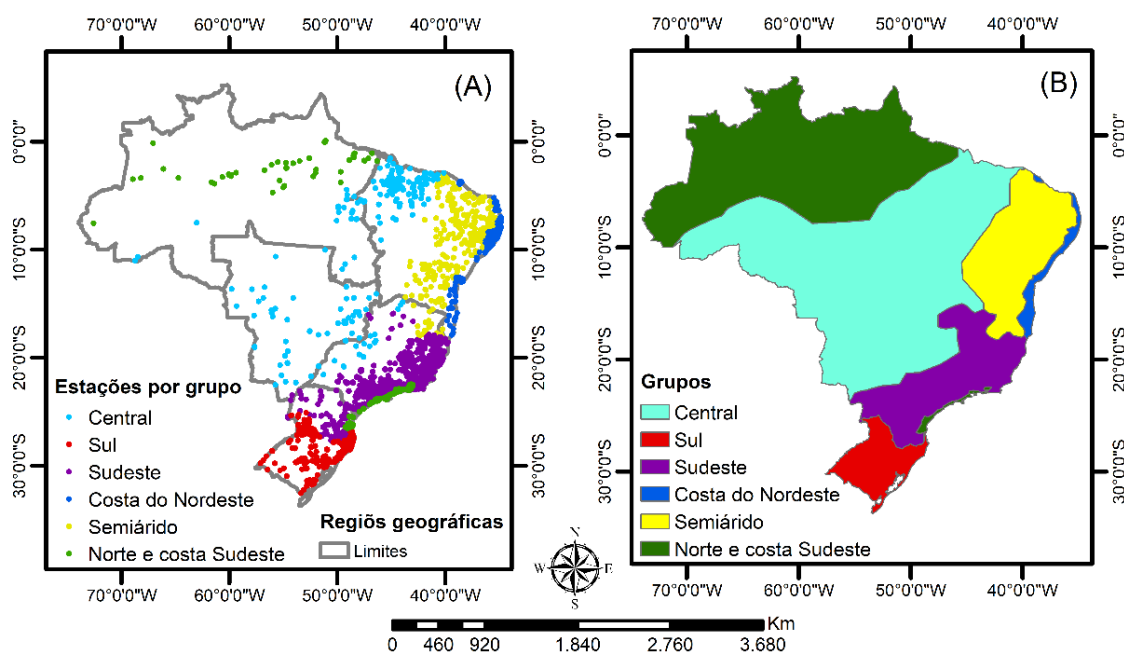


Figura 4: a) Seis grupos de precipitação identificados no Brasil com dados sub-horários do CEMADEN e b) Regionalização das estações pelo método de Thiessen

Os seis grupos distintos representam a grande variabilidade climática do país. Semelhante ao trabalho de Alvares *et al.* (2013), foi detectado uma região muito úmida, que em alguns pontos supera 3.000 mm, e outra seca, que chega a menos de 400 mm por ano. Baseado nas propriedades médias, os grupos serão mais detalhados nos tópicos abaixo:

Norte e costa sudeste: este é o grupo com as regiões mais úmidas do Brasil. Abrange a faixa norte da Amazônia e parte do litoral do Sudeste. A precipitação média é de 2.000 mm, chegando a superar 3.000 mm em alguns postos pluviométricos. O número de eventos, lâmina média e duração são elevados, sendo os maiores ou segundo maiores dentre os grupos definidos. A intensidade dos eventos é moderada em relação aos demais grupos. O tempo seco é maior que a duração total do evento para MIT's curtos, indicando que os eventos normalmente não são contínuos. Já para MIT's maiores, o tempo seco é inferior à duração, indicando maior continuidade da chuva.

Embora as chuvas das duas regiões possuam características parecidas, os mecanismos de formação são diferentes. As chuvas do norte da Amazônia são resultantes principalmente da atuação da ZCIT (Amanajás & Braga, 2012; Santos *et al.* 2015), linhas de instabilidade (Fisch *et al.* 1996; Alcântara, 2011) e o aquecimento radiativo da superfície, que pode gerar células e aglomerados convectivos típicos de regiões tropicais (CCM) (Nobre *et al.* 2009; Strong *et al.* 2005). Já na costa do Sudeste, os eventos de precipitação são provenientes de ZCAS, frentes frias e brisa marítima. Além disso, esses sistemas são potencializados pela orografia da região, relacionada à Serra do Mar (Blanco, 1999; Pellegatti & Galvani, 2010; Fritzsons *et al.* 2011; Borsato *et al.* 2012).

É importante destacar que a subdivisão da região amazônica está de acordo com os estudos de Marengo (2004) e Santos *et al.* (2015), que apontaram que as porções norte e sul possuem características e sistemas desencadeadores de chuva diferentes.

Central: estendendo-se da região central até parte do sul da Amazônia, este grupo abrange a maior área encontrada neste estudo. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.500 mm e o número de eventos varia de 50 (MIT = 1440 min) a 145 (MIT = 30 min). A principal particularidade desse grupo é a intensidade, sempre superior às outras regiões definidas. O volume médio por evento é elevado nos eventos de menor MIT. A duração dos eventos, em relação aos outros grupos, é curta, e o tempo seco, ou período sem chuva durante a ocorrência do evento, também é baixo. As chuvas desse grupo também são concentradas em um curto período do ano.

O principal sistema atmosférico atuante nessa área é a ZCAS, responsável por volumes consideráveis de chuva, fundamentalmente na faixa sul da Amazônia, Centro-Oeste e sul do Maranhão (Quadro, 1999 & Rosa *et al.*, 2007). Outro sistema que possui influência direta é a Alta da Bolívia (Fisch *et al.* 1998; Santos *et al.* 2015). Já a região localizada mais ao norte, faixa que chega ao Oceano Atlântico, a ZCIT, VCAN's, LI e DOL são responsáveis por grande parte dos eventos de precipitação (Menezes *et al.*, 2007; Nascimento, 2015).

Sul: localizado no sul do Brasil, esse grupo precipita anualmente cerca de 1.700 mm, distribuídos em eventos longos e de lâmina elevada. A intensidade nessa região costuma ser baixa em relação aos demais grupos. Para MIT's maiores (i.e., superior a 720), a relação duração e tempo seco aponta chuvas mais contínuas e de intensidade moderada em relação aos demais grupos.

Devido à posição geográfica desse grupo, as frentes frias são os sistemas mais recorrentes, sendo responsáveis por grande parcela dos totais pluviométricos anuais. Outros sistemas também contribuem com os totais pluviométricos anuais deste grupo, são eles: VCAN, CCM, ZCAS e cavados (Monteiro, 2001; Britto *et al.* 2008).

Sudeste: abrange partes do estado de Minas Gerais e interior de São Paulo, Rio de Janeiro e Paraná. Esse grupo possui precipitação média anual de 1.300 mm. O número de eventos varia de 48 (MIT de 24h) até 140 (MIT de 30 min), sendo superior apenas ao Semiárido. As chuvas dessa região tendem a ter duração mais elevada e uma intensidade mediana. O tempo seco entre os eventos também não é elevado, indicando que os eventos tendem a ser relativamente contínuos.

Nesse grupo, sistemas como ZCAS, frentes frias, JBN e VCAN's são os principais mecanismos formadores de chuvas (Schröder, 1955; Silva & Reboita, 2013). O estado de Minas Gerais, como observado na Figura 4, apresenta uma região úmida e outra seca. A região mais ao sul, pertencente ao grupo Sudeste, diferencia-se do resto do estado por questões topográficas, que induzem precipitações convectivas sobre essa área (Maia, 1986; Reboita *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2018).

Costa do Nordeste: compreende a extensão do litoral Leste do Nordeste brasileiro e região do entorno da cidade de Fortaleza. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.500 mm. Esse grupo é caracterizado fundamentalmente pelo elevado número de eventos de curta duração e baixa intensidade, resultado principalmente da brisa marítima. Em termos de duração, devido ao elevado tempo seco entre os eventos, indicando que a chuva é muito particionada, é possível observar dois cenários: 1) para MIT's curtos as durações dos eventos são pequenas, e 2) para MIT's longos os pequenos intervalos entre os eventos não são suficientes para separá-los em eventos distintos, deixando a duração total do evento muito elevada.

Em relação aos principais sistemas atmosféricos atuantes, podemos dividir esta região em zonas com sistemas distintos:

Zona da cidade de Fortaleza: essa área foi classificada como pertencente ao grupo Costa do Nordeste em decorrência de fatores que favorecem o aumento da frequência de eventos de chuva. A geometria côncava do litoral entre Fortaleza e o norte do Rio Grande do Norte, interação com os ventos alísios de Sudeste, geralmente quase paralelos à costa do norte do

Nordeste, e da intensidade da circulação, induzem a formação de um arco de convergência, proporcionando a ocorrência de chuvas em qualquer época do ano na região de atuação. Esse fenômeno resulta da brisa terrestre e foi reportado por Teixeira (2008) e Pessoa & Campos (2015). Os demais sistemas atuantes são semelhantes aos da porção norte e Noroeste do Semiárido, que podem ser potencializados pelos efeitos da brisa terrestre.

Zona do litoral Leste: Um dos principais sistemas atuantes nessa área são os DOL, provocando chuvas principalmente na Zona da Mata, que se estende desde o Recôncavo Baiano até o litoral do Rio Grande do Norte. Além desse sistema, a ZCIT (considerando o setor mais ao norte), brisa marítima, VCAN e CCM exercem influência sobre a área (Diniz & Oliveira, 2016; Silva *et al.* 2011; Diniz & Pereira, 2015).

Zona Sul da Bahia: possui os totais anuais fortemente atrelados à influência das frentes frias (Kousky, 1979) e ZCAS, que normalmente provocam chuva acima da média nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Porém, quando ocorre uma variabilidade na sua posição média, pode ocasionar precipitação no sul da região Nordeste do Brasil (Chaves & Cavalcanti, 2001; Lucas, 2007).

Semiárido: esse grupo é composto pelo interior do Nordeste e se estende até o norte de Minas Gerais. É o grupo mais seco do Brasil, possuindo precipitação média anual de aproximadamente 630 mm. Também possui a menor quantidade de eventos anuais e menor lâmina média por evento chuvoso. Considerando MIT's mais longos, a duração também é a menor dentre os demais grupos encontrados. Por ter o período chuvoso concentrado em um curto intervalo de tempo, a intensidade consequentemente é elevada, sendo a segunda maior intensidade da área de estudo e, consequentemente, um dos menores tempos secos, resultado das chuvas concentradas.

A porção norte e noroeste do Semiárido possui a ZCIT como principal mecanismo provedor de chuva. Além desse sistema, os VCAN e os CCM também podem desencadear eventos significativos. A faixa norte do Semiárido também é caracterizada por ser a única região do Brasil onde o clima semiárido chega ao litoral, em virtude das características geométricas da linha de costa (Diniz & Oliveira, 2016; Lyra *et al.*, 2020). Ao sul, a ZCAS e frentes frias são os sistemas mais representativos desse grupo em termos de totais anuais. Já na faixa leste do Semiárido, os DOL e os VCAN são os principais sistemas desencadeadores de chuvas (Zanella, 2014; Costa *et al.* 2019).

As regiões norte e nordeste do estado de Minas Gerais apresentam índices de umidade relativa média mais baixa e temperaturas mais elevadas do que as outras regiões do estado, caracterizando fatores desfavoráveis para formação de nuvens. Os principais sistemas atuantes normalmente não conseguem vencer o relevo, provocando ausência de chuvas ou, quando essas ocorrem, são em volume inferior às demais regiões do estado (Maia 1986).

Alguns trabalhos sobre homogeneidade da chuva são encontrados na literatura. Oliveira *et al.* (2017) avaliou grupos similares na região Nordeste baseado na precipitação mensal de 148 estações. Parte dos resultados dos autores divergem dos encontrados nesta análise. Em seus resultados, estações do litoral leste e semiárido foram classificadas como semelhantes. De acordo com os resultados deste estudo, com Silva *et al.* (2012) e Alvares *et al.* (2013) a diferença entre os totais anuais das duas regiões podem chegar até três vezes. A região semiárida pode receber totais inferiores a 600 mm e o litoral do Nordeste supera os 1.500 mm. Além disso, o período chuvoso entre as duas áreas são diferentes: maio a julho no litoral e janeiro a maio no semiárido (Silva *et al.* 2009; Santana *et al.* 2011). Logo, espera-se que as duas regiões sejam de grupos diferentes.

Em outro estudo, Marinho *et al.* 2020 realizaram a análise de agrupamentos baseado nos dados mensais interpolados de grade de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ para pontos. Além dos dados mensais, baseou-se na umidade relativa, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento. A junção do semiárido e áreas de transição, encontrado pelos autores, concordam com a delimitação encontrada nesta pesquisa.

3.2 Relação das propriedades com o MIT

Os resultados encontrados concordam com os apresentados por Dunkerley (2008a) e Wang *et al.* (2016), em que o aumento do MIT resulta na elevação da lâmina média, duração do evento e tempo seco, além da redução do número de eventos e intensidade. Esse comportamento foi encontrado para todas as estações analisadas nesse estudo, independente da região do país. A precipitação anual apresenta uma pequena variação positiva à medida que o MIT aumenta, entretanto, a variação não é relevante. A Figura 5 apresenta o comportamento geral das propriedades médias em função do MIT. Os valores da figura seguinte são as médias de todas as estações de cada uma das 6 regiões definidas no estudo.

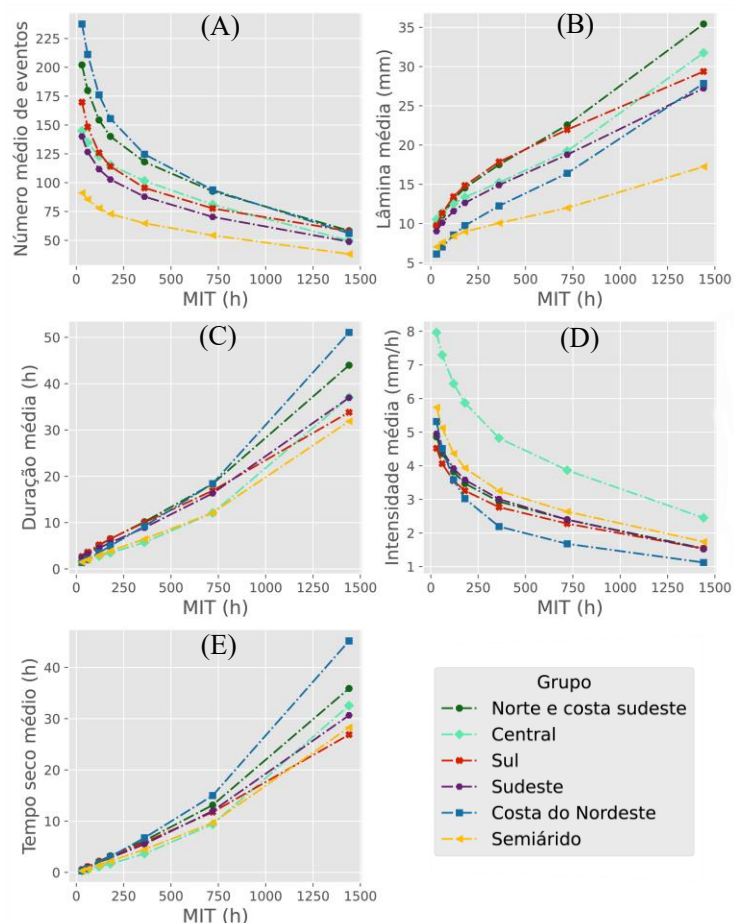


Figura 5: Comportamento das propriedades: a) Número médio de eventos chuvosos; b) Lâmina média; c) Duração média; d) Intensidade média e e) Tempo seco médio, em função do MIT

Os grupos possuem comportamento de variação distintos, sendo alguns mais intensos, como o Costa do Nordeste no tempo seco (Figura 5 E) e outros com uma variação mais estável e linear, a exemplo do Sudeste, que possui comportamento de variação suave e relativamente constante ao longo dos MIT's. As diferenças entre os valores das propriedades dos eventos tendem a aumentar com a elevação do MIT. Com isso, dependendo da propriedade, é possível o ajuste de curvas potenciais, logarítmicas e polinomiais, permitindo a estimação das propriedades médias para qualquer MIT e grupo, por meio de equações. As Tabelas 6 e 7 do apêndice apresentam todas as equações das curvas ajustadas.

Em termos de variação de cada propriedade dos eventos chuvosos, as análises foram baseadas em quatro MIT's (Figura 6) devido ao fato de conseguirem representar os demais MIT's, em decorrência da semelhança gráfica das propriedades.

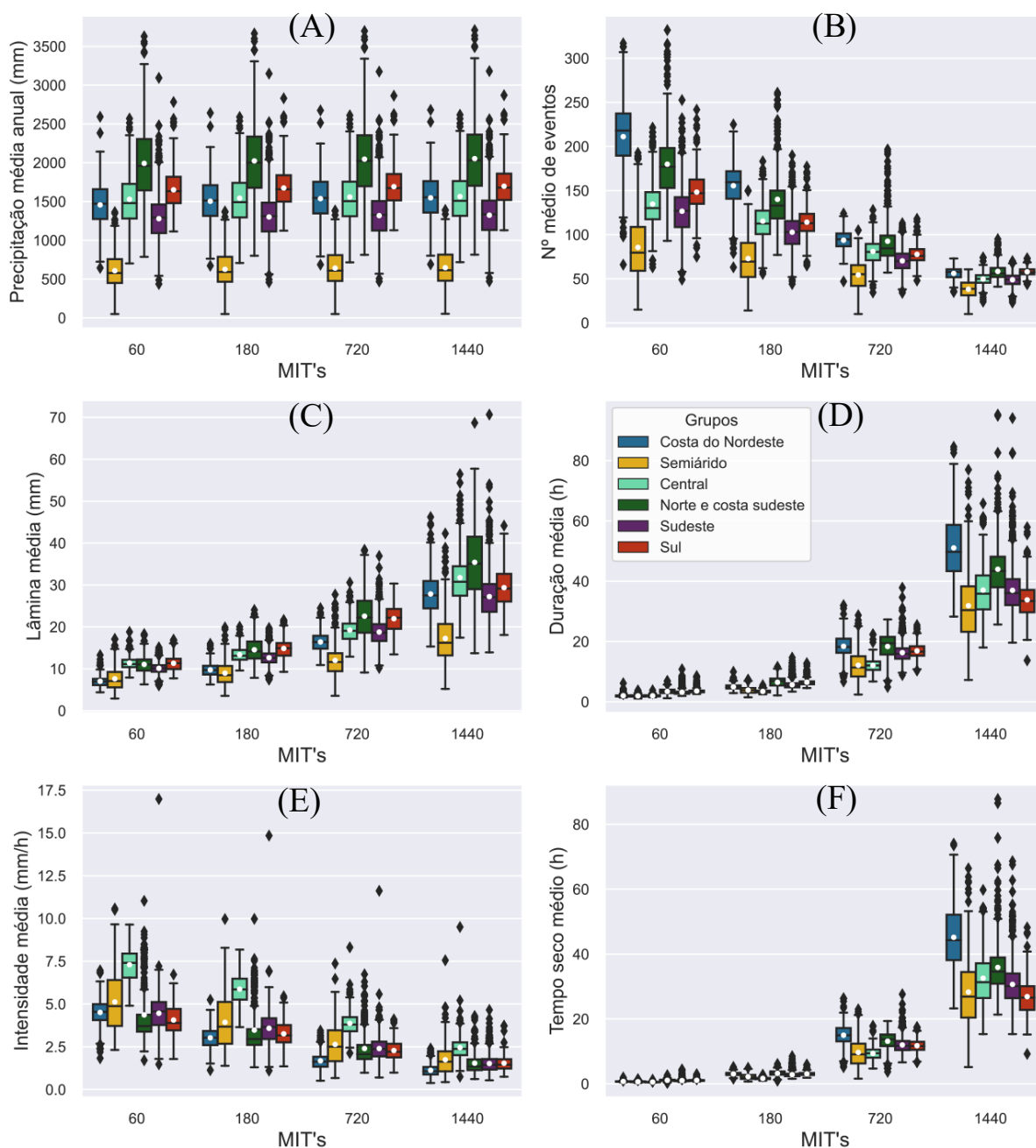


Figura 6: Box plot separados por grupo e propriedades analisadas: a) Precipitação anual; b) Número médio de eventos; c) Lâmina média; d) Duração média; e) Intensidade média e f) Tempo seco médio

A Figura 6 possibilita a análise da variação dos dados de cada grupo baseado no MIT e nas respectivas propriedades. É possível observar que a precipitação anual é a variável que menos é influenciada pela elevação do MIT. A região Norte e a costa sudeste é a que mais precipita, já o Semiárido é a região que recebe os menores índices pluviométricos. Além disso, é visível que, de fato, os grupos são distintos. Embora haja proximidade entre dois grupos em uma propriedade específica, eles são consideravelmente opostos em outras. Um exemplo são os grupos Central e Sul, que são parecidos em termos de número de eventos (Figura 6B) e consideravelmente diferentes quando se trata da intensidade (Figura 6E). Outro ponto a se

destacar é que o comportamento do tempo seco e duração dos eventos em relação aos MIT's curtos e longos ficam ainda mais evidentes na figura supracitada. Há um aumento considerável das duas propriedades devido à união dos eventos mais curtos nos MIT's maiores.

Outra análise possível é comparar as propriedades de cada grupo com os demais em um MIT específico, possibilitando uma melhor distinção entre as diferenças de cada região em termos da média das propriedades dos eventos. As Figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam os resultados da relação propriedade e MIT.

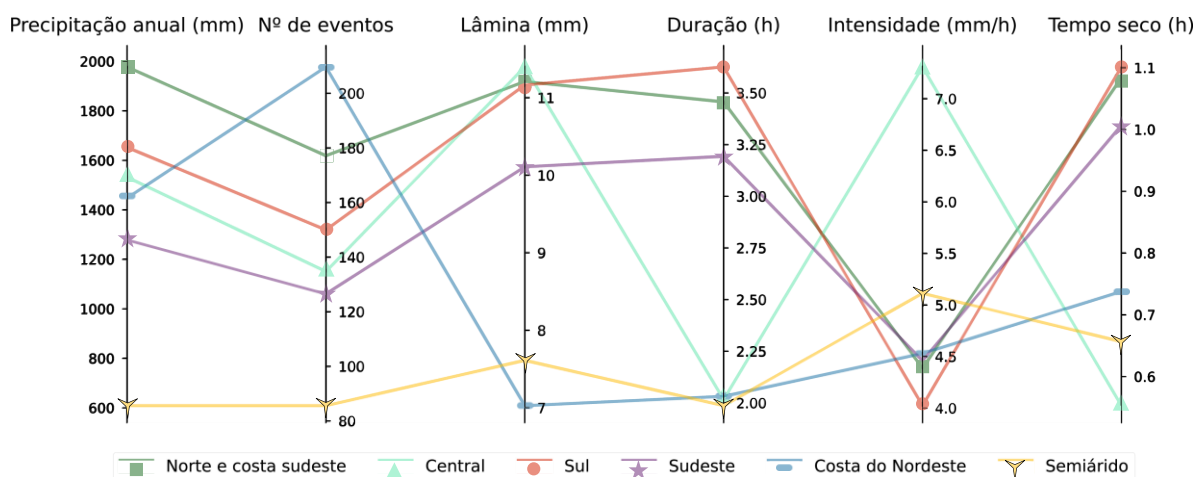


Figura 7: Variação das propriedades médias com MIT de 60 minutos (1h)

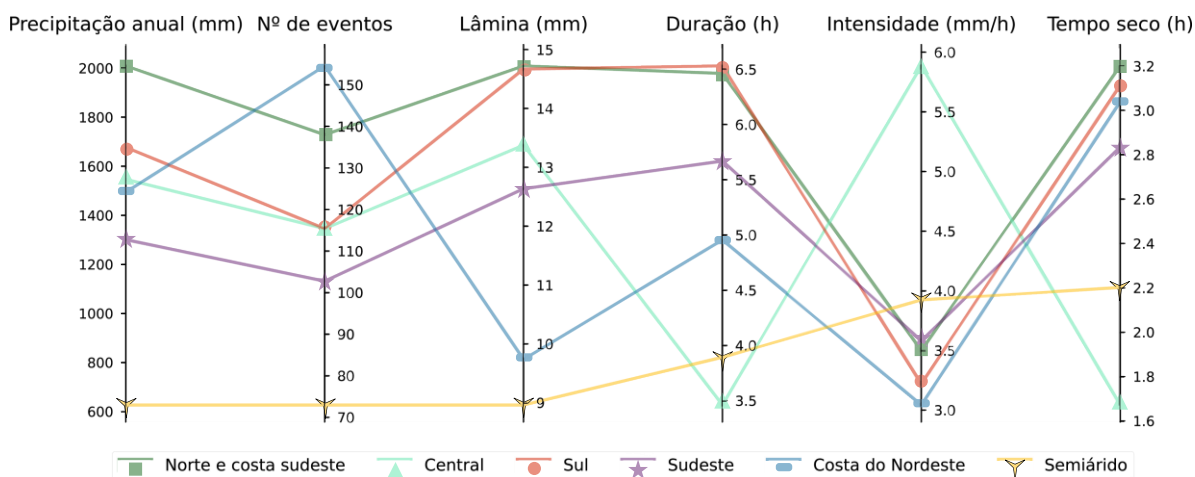


Figura 8: Variação das propriedades com MIT de 180 minutos (3h)

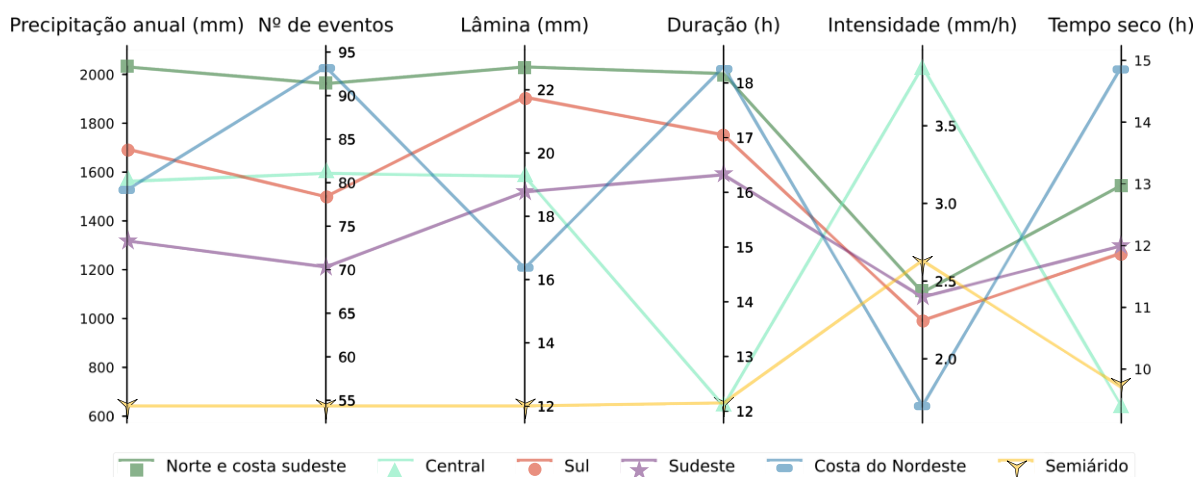


Figura 9: Variação das propriedades com MIT de 720 minutos (12h)

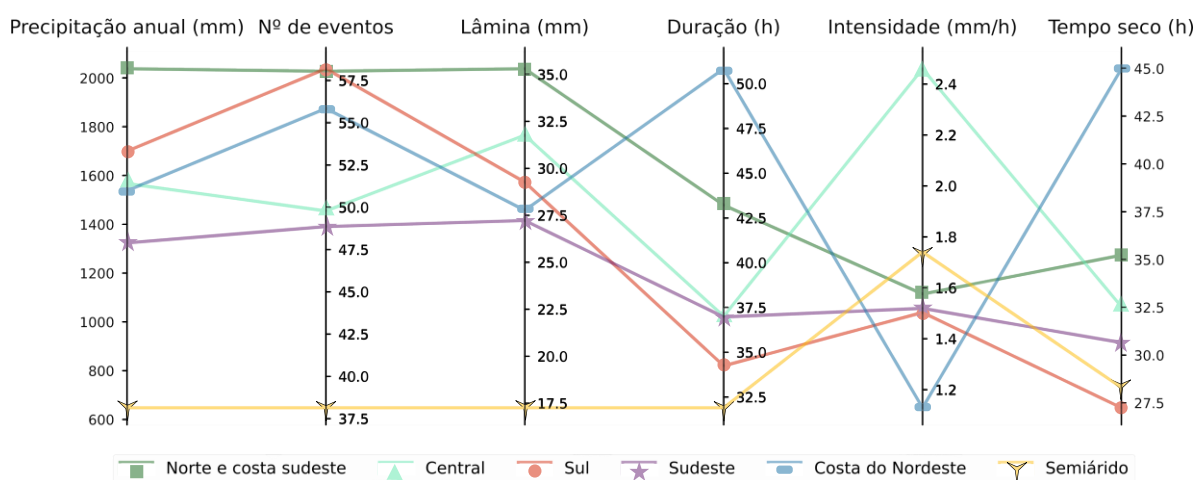


Figura 10: Variação das propriedades com MIT de 1440 minutos (24h)

O número de eventos foi uma das variáveis mais afetadas pelo aumento do MIT. No Semiárido, por exemplo, entre os MIT's de 60 minutos e 24 horas, houve um decréscimo de aproximadamente 45% no número de eventos. A média de redução entre os seis grupos foi de 36%. A menor redução ocorreu na costa do Nordeste, com cerca de 27%. É válido destacar que esta é a região onde, em média, mais ocorrem eventos de curta duração. Foi possível observar uma relação direta entre o número de eventos e o tempo seco. Normalmente as regiões onde ocorrem mais eventos o tempo seco tende a ser mais elevado, principalmente em MIT's menores. Isso é um indicativo de chuvas não contínuas. A região Central é uma exceção, pois as chuvas desse grupo possuem a particularidade de serem fortes e concentradas em um pequeno período do ano.

As médias da lâmina precipitada e da duração refletem diretamente na intensidade dos grupos. Normalmente, um elevado volume precipitado é relacionado a uma duração prolongada e, consequente, uma baixa intensidade. Há casos em que uma lâmina elevada ocorre em

períodos menores, implicando em altas intensidades. E casos em que, embora uma pequena lâmina ocorra nos eventos, a duração também é reduzida, resultando em intensidades elevadas, como é o exemplo do Semiárido, que possui a segunda maior intensidade média do Brasil. Esse comportamento ocorre independente de MIT.

O tempo seco foi a variável que sofreu mais influência com a mudança do MIT estabelecido, aumentando em média certa de 4.812%, sendo o grupo Costa do Nordeste mais sensível à essa variação. Esse fato é consequência das frequentes pancadas de chuva rápida da região. Em MIT's curtos os eventos são separados, mas em MIT's longos os intervalos entre dois eventos consecutivos não são suficientes para a separação, ocasionando chuvas de duração e tempo seco elevados.

Um resumo geral das propriedades médias e principais sistemas atmosféricos atuantes em cada região pode ser consultado na Tabela 5 presente no Apêndice.

3.3 Propriedades máximas e gestão de riscos

O principal objetivo do CEMADEN é a prevenção e gerenciamento perante eventuais desastres naturais em território brasileiro. Baseado nessa demanda tão importante, alguns grupos identificados na presente pesquisa requerem uma maior atenção quando se trata do impacto que os eventos de precipitação podem causar. Para tal análise, foi usado o percentil 90% (Figura 11) das propriedades médias e as propriedades máximas (Figura 12), ambas considerando o MIT de 60 minutos, pois os MIT's curtos melhor evidenciam os eventos com maior potencial de causar danos. Além disso, o MIT de 60 minutos possui comportamento semelhante ao de 30 min e 120 min.

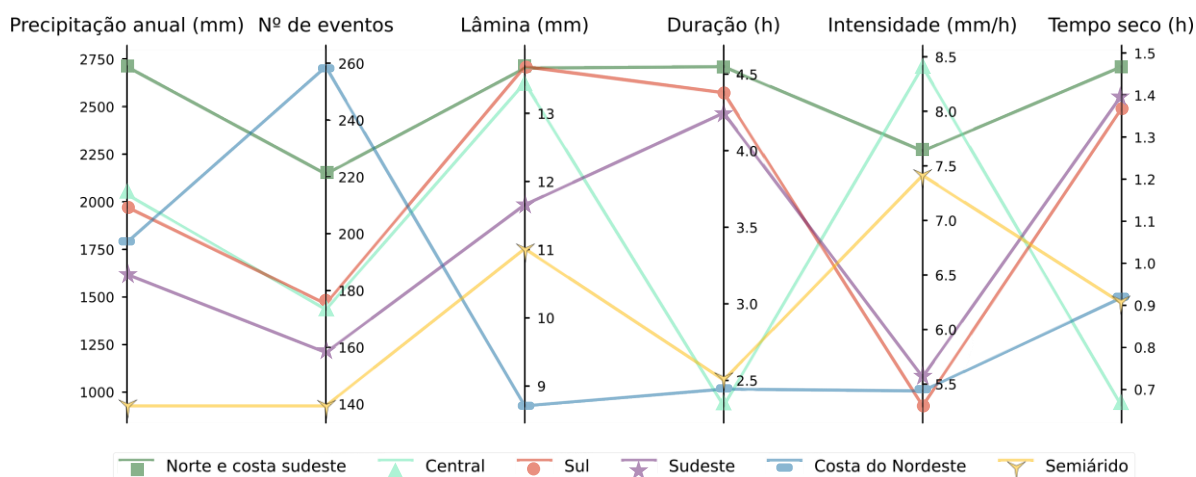


Figura 11: Percentil 90% das propriedades médias com MIT de 60 minutos

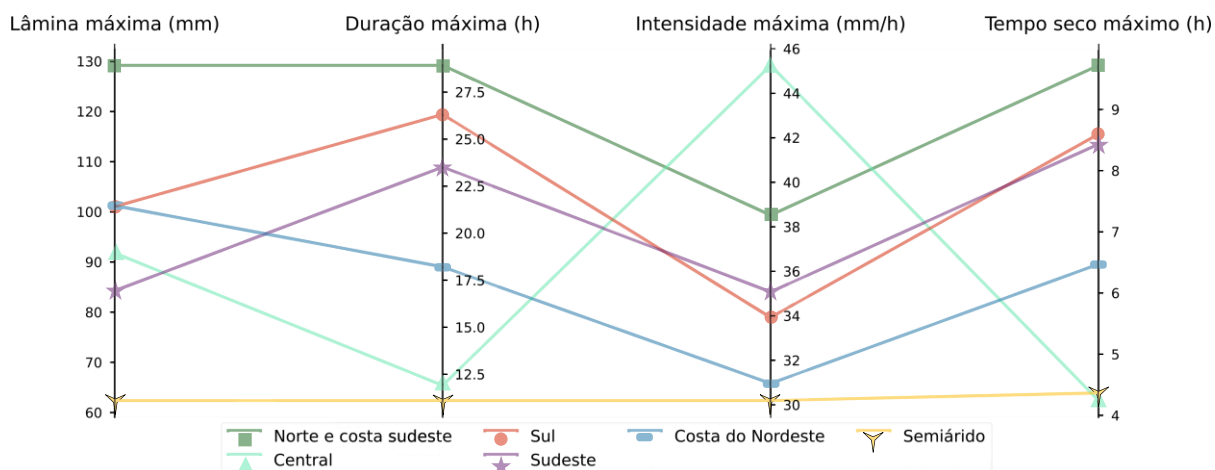


Figura 12: Propriedades máximas com MIT de 60 minutos

De acordo com a Figura 11, todos os grupos possuem características que propiciam a ocorrência de desastres provocados por fenômenos naturais, entretanto, cada região tem sua particularidade. Os grupos Central e Semiárido possuem chuvas de baixa duração, reduzido tempo seco e elevada intensidade, ou seja, os problemas relacionados às chuvas são mais imediatistas à ocorrência do evento, devido à intensidade. Já o Norte e costa sudeste, além de uma intensidade alta, apresenta uma elevada duração e volume dos eventos. É importante destacar que esse grupo possui uma grande frequência de eventos, fazendo com que o efeito acumulativo da chuva também seja um fator de alerta. Esse mesmo alerta, dobre a acumulação da chuva ao longo do tempo e eventos, ocorre para o grupo costa do Nordeste, que possui o maior número de eventos por ano de todos os grupos. Os grupos do Sul e Sudeste estão mais sujeitos aos efeitos acumulativos da chuva. Ao contrário da intensidade, o efeito acumulativo não ocorre de forma rápida e se intensifica ao longo do tempo, com o acúmulo de água nas diversas camadas do solo. Isso acontece principalmente devido a eventos de precipitação longos ou eventos sequenciais com pausas curtas que impossibilitam que o solo seque.

As propriedades máximas concordam com parte dos resultados apresentados no percentil de 90%. Entretanto, é importante destacar a diferença nas magnitudes dos eixos. Todas as intensidades podem ser consideradas como “muito forte” de acordo com a Tabela 1. Mas, de todos os grupos, a região Central novamente se destaca quanto ao risco de causar danos decorrentes desta propriedade. As chuvas intensas e pouco intermitentes podem facilmente provocar inundações, alagamentos e enchentes. Em termos de volume precipitado a região Norte e costa sudeste é que se destaca, pois as chuvas volumosas e longas facilitam processos de movimento de massas, por exemplo.

Tabela 1: Classificação da intensidade da precipitação (mm.h⁻¹). Fonte: INMET

Intervalo de precipitação (mm.h ⁻¹)	Intensidade da precipitação
5,0 – 10,0 mm	fraca
10,0 – 15,0 mm	moderadamente fraca
15,0 – 20,0 mm	moderada
20,0 – 25,0 mm	moderadamente forte
25,0 – 30,00 mm	forte
>30,0 mm	muito forte

3.3 Análise da correlação por região

Esta etapa buscou avaliar a distância média entre pluviômetros para realizar um monitoramento eficiente da distribuição espacial da precipitação e quantidade necessária de pluviômetros por área em cada região. Para essa análise, serão considerados os grupos: Costa do Nordeste (representando Sudeste e Semiárido devido semelhança dos resultados); Norte e costa sudeste; Sul; e Central. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 13, 14, 15, 16.

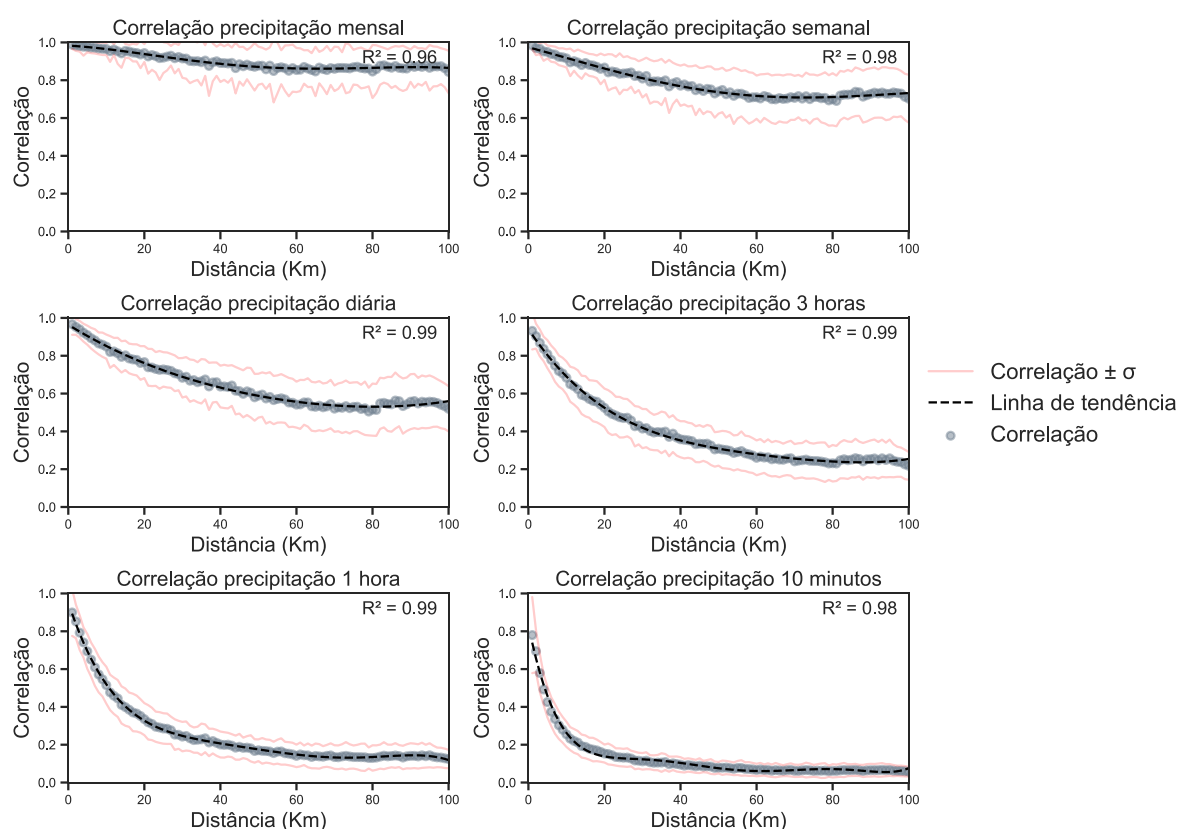


Figura 13: Relação entre a correlação e as distâncias para diferentes resoluções temporais na costa do Nordeste

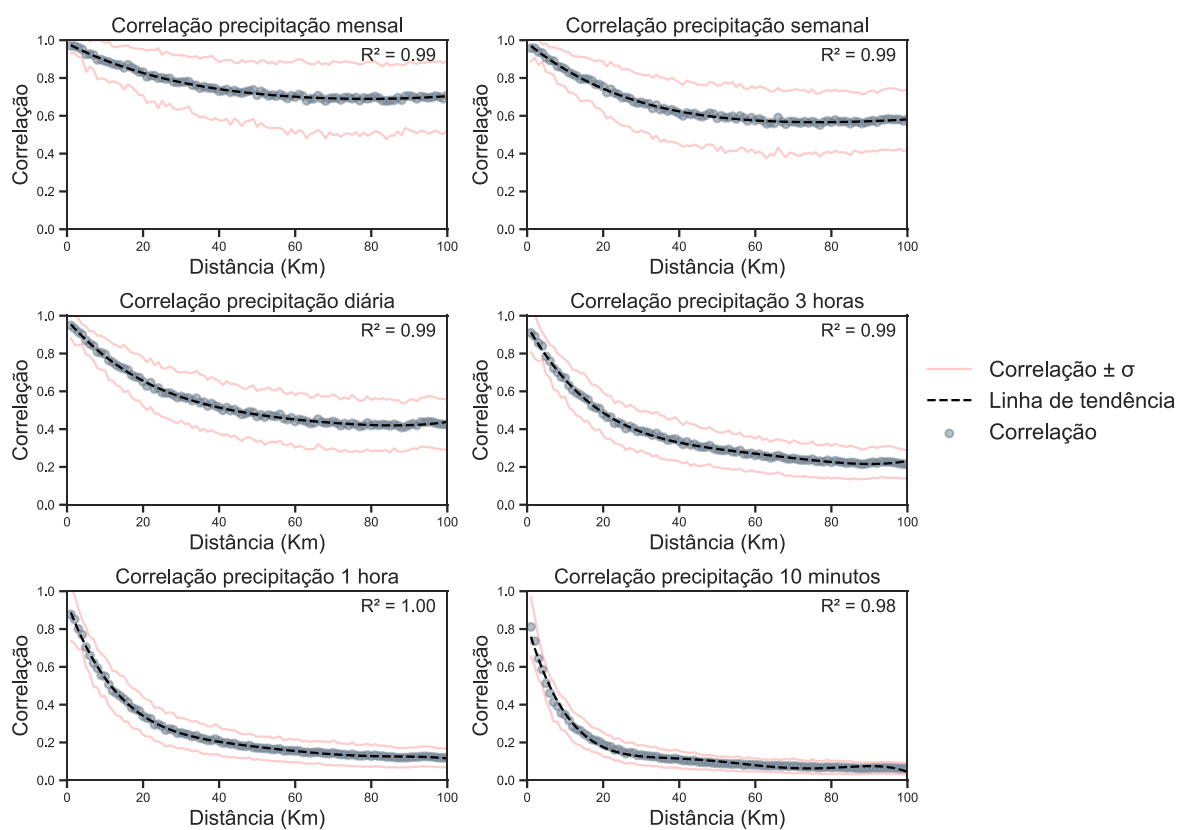


Figura 14: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Norte e costa sudeste

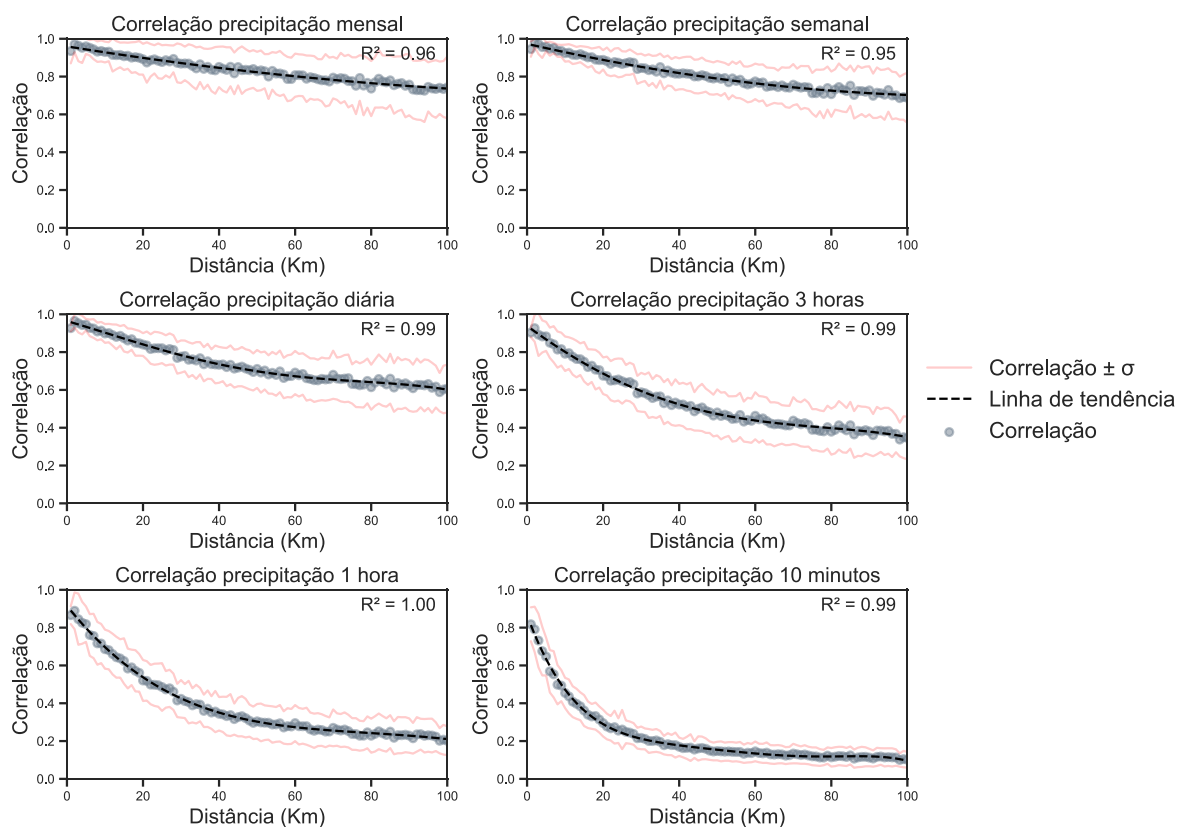


Figura 15: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Sul

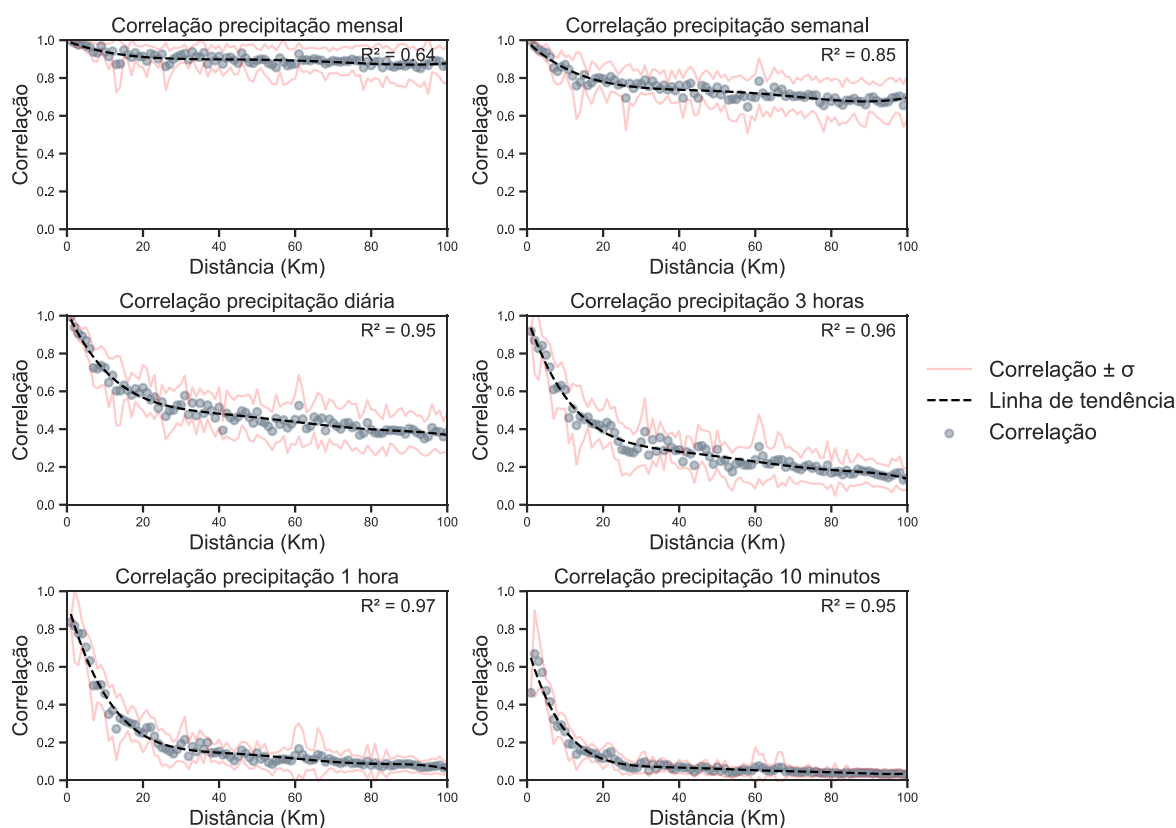


Figura 16: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Central

De maneira geral, é possível perceber que a correlação entre estações vizinhas diminui à medida em que o tempo de agregação das chuvas (mensal para 10 minutos) é reduzido ou a distância entre os medidores de chuva aumenta. Isso pode ser explicado pelo fato de que a distribuição da precipitação varia ao longo do tempo e do espaço, logo, quanto maior a distância entre as estações, menor é a probabilidade de que os eventos registrados em uma hora específica possuam volumes parecidos. Em contrapartida, analisando maiores períodos de agregação, há uma maior probabilidade de a precipitação registrada em dois pontos tenham volumes próximos, pois a acumulação da chuva ameniza o efeito da variação tempo-espaço.

Os resultados evidenciam que o decaimento da correlação com a distância é percebido em todas as resoluções temporais, sendo uma queda maior para os passos de tempos subdiários. Percebe-se ainda que, considerando o raio de até 100 km, na resolução mensal e semanal, a correlação permanece constante a partir de 60 km.

A resolução temporal de monitoramento da precipitação se dá mediante cada tipo de demanda. A medição de chuva para monitoramento de áreas de riscos, por exemplo, necessita de intervalos de monitoramento mais curtos que a medição para gestão hídrica de um

reservatório. Logo, levando em conta a variabilidade espaço-temporal da precipitação, este trabalho considerou que uma correlação de 0,7 seja aceitável.

Com isso, a tabela a seguir apresenta as distâncias aceitáveis entre estações para monitoramento da chuva em cada região e resolução temporal, considerando uma correlação mínima de 0,7.

Tabela 2: Raio de influência de cada estação considerando correlação de 0,7

Grupo	Resolução temporal de monitoramento			
	Diária	3h	1h	10 min
	Raio (km)	Raio (km)	Raio (km)	Raio (km)
Costa do Nordeste	23	10	6	2,5
Norte e costa sudeste	17	9	5	2,5
Sul	49	19	10	5
Central	16	6	4	1

A região do grupo Sul foi a que apresentou os maiores valores de correlação (49 km, 19 km, 10 km e 5 km para as resoluções diária, 3 h, 1h e 10 min, respectivamente). Alguns fatores podem ter contribuído para este resultado. O grupo Sul está localizado em uma região de características relativamente homogêneas em relação aos outros grupos e possui uma boa densidade de estações. Além disso, o principal sistema desencadeador de chuva é o mesmo em toda a região (frentes frias). Por conta disso, acredita-se que as estações dessa área apresentaram correlação superior as demais. Já a região Central foi a que apresentou as menores correlações. A principal explicação para esse resultado está relacionada à quantidade e à distância entre os equipamentos desse grupo.

Os grupos Costa do Nordeste e Norte e costa sudeste apresentaram resultados relativamente semelhantes, principalmente considerando resoluções de monitoramento inferiores a três horas. Com resolução de 10 minutos, ambos os grupos requerem um raio de no máximo 2,5 km para garantir correlação de 0,7 entre os dados dos equipamentos.

A Figura 17 representa o raio de influência das estações que garantiria uma correlação de 0,7 entre as medições dos equipamentos monitorando a chuva a cada dez minutos. É notório que de fato é possível melhor distribuir as estações em algumas regiões do país. Existe uma

quantidade considerável de estações próximas que caso fossem realocadas, respeitando a distância limite à resolução almejada, cobririam uma área de monitoramento muito maior.

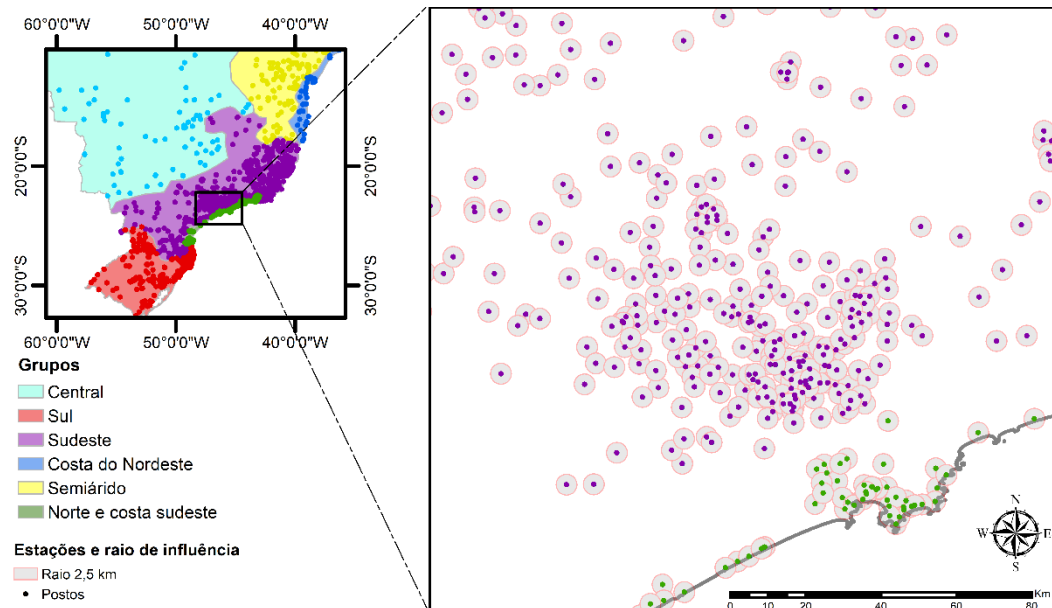


Figura 17: Estações de alta qualidade do Estado de São Paulo com um raio de 2,5 km

Considerando que na redistribuição dos postos pluviométricos a quantidade de equipamentos seria a mesma, a questão financeira seria um dos fatores preponderantes, pois seriam mantidos os custos de operação da rede ao mesmo tempo que a área de monitoramento direto seria ampliada. As cidades de médio e grande porte do país são os locais onde a proximidade elevada entre as estações foi mais recorrente.

4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho evidenciam a diversidade climatológica do Brasil. Seis grupos de precipitação com características distintas foram encontrados, e, mesmo havendo proximidade entre dois grupos em uma propriedade específica, eles são consideravelmente diferentes em outras. Nas regiões de cada grupo, diversos sistemas atmosféricos proporcionam a ocorrência das precipitações, sendo os fatores geográficos os principais responsáveis pela modulação das características dos eventos chuvosos de cada região.

O MIT tem forte influência sobre as propriedades da precipitação. Algumas propriedades podem variar em até 4.812%, como é o caso do tempo seco. O número de eventos também sofre consideráveis variações com o aumento do MIT, chegando a variar 45%. A precipitação anual é a propriedade que praticamente não sofre influência pela variação do MIT, sendo o Norte e costa do sudeste o grupo mais úmido (2.000 mm) e o Semiárido o mais seco (600 mm).

A costa do Nordeste é a região onde mais ocorrem eventos de precipitação, considerando MIT's inferiores a 720 minutos. Dependendo do MIT, a região pode superar uma média de 200 eventos por ano ($MIT < 60$ min). Em oposição, o grupo do Semiárido apresentou o menor número de eventos do Brasil, chegando a 38 eventos com MIT de 1440 minutos. Em termos de intensidade, a região Central supera todas as outras analisadas. Os eventos dessa região possuem lâmina elevada, baixa duração e são concentrados em um curto período do ano.

Do ponto de vista de alerta, monitoramento e gestão de desastres provocados por fenômenos naturais, todos os grupos requerem atenção, entretanto, cada região tem sua particularidade. Os grupos Central, Semiárido e Norte e costa sudeste possuem chuvas muito intensas, ou seja, os problemas relacionados às chuvas são mais imediatistas à ocorrência do evento, podendo gerar inundações, alagamentos e enchentes. Os grupos costa do Nordeste, Sul e Sudeste possuem a acumulação da chuva como principal fator de alerta. Ao contrário da intensidade, o efeito acumulativo não ocorre de forma rápida e se intensifica ao longo do tempo, com o acúmulo de água nas diversas camadas do solo e facilitando os processos de movimento de massas, por exemplo.

Em termos da correlação espacial das estações, foi possível concluir que independente das escalas temporais e regiões, à medida que aumentamos as distâncias as correlações diminuem, fundamentalmente em resoluções de monitoramento subdiárias. Quanto menor o intervalo de medição, menor é a correlação para uma mesma distância. A região Sul apresentou

os melhores coeficientes de correlação entre os equipamentos, requerendo um raio de 5 km na resolução de 10 minutos. Entretanto, em média, 2,5 km é a distância necessária para garantir uma correlação de 0,7 entre as estações pluviométricas do Brasil.

É fundamental ressaltar a relevância de estudos que visem otimizar a eficiência do monitoramento da chuva. Isso pode acarretar em uma melhor compreensão da distribuição espacial da precipitação, bem como redução de custos de instalação e operação dos equipamentos. Diversas regiões da área de estudo são passíveis de redistribuição das estações pluviométricas, possibilitando monitoramento mais abrangente de uma região de interesse ou mesmo de áreas que ainda não possuem cobertura espacial de postos pluviométricos, como partes do norte e do Semiárido.

O conhecimento da distribuição espaço temporal e variação das características da precipitação é base inicial para estudos ligados a processos climáticos, ambientais e socioeconômicos. Logo, avanços nesta temática são fundamentalmente necessários, pois possibilitam o aprimoramento da gestão dos recursos hídricos e melhoria de projetos relacionados à prevenção de desastres, análises dos riscos e vulnerabilidades associados às características das chuvas.

5. REFERÊNCIAS

- Abreu, M. L. de. (1998). Climatologia Da Estação Chuvosa De Minas Gerais: De Nimer (1977) À Zona De Convergência Do Atlântico Sul. *Geonomos*, 6(2), 17–22. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v6i2.166>
- Alang Othman, M., Ghani, A. A., & Alang Othman, M. S. (2020). Distribution of rainfall events in northern region of Peninsular Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 476(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012116>
- Alcântara, C. R. (2011). Linha de instabilidade da Amazônia: estudo de caso e importância das características do perfil do vento na sua formação e desenvolvimento. *Ciência e Natura*, 33(2), 197–225. <https://doi.org/10.5902/2179460X9370>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Almeida, C. das N., Barbosa, L. R., Freitas, E. da S., Coelho, V. H. R., & Araújo, J. C. (2017, April). Comparing rainfall features in two experimental basins in Brazil. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 16886).
- Amanajás, J. C., & Braga, C. C. (2012). Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(4), 423–434. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862012000400006>

- Monteiro, M. A. (2001). Caracterização climática do Estado de Santa Catarina: Uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. *Geosul*, 16(31), 69–78.
- Andrade, K. M., Müller, G. V., Cavalcanti, I. F., Fernández-Long, M. E., Bidegain, M., & Berri, G. J. (2012). Avaliação de mudanças na frequência de sistemas frontais sobre o sul da América do Sul em projeções do clima futuro. *Meteorológica*, 37(1), 15-26.
- Balme, M., Vischel, T., Lebel, T., Peugeot, C., & Galle, S. (2006). Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff: Part 1: Rainfall variability analysis. *Journal of Hydrology - J HYDROL*, 331, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.020>
- Barbosa, L. R., Almeida, C. das N., Coelho, V. H. R., Freitas, E. da S., Galvão, C. de O., & Araújo, J. C. de. (2018). Sub-hourly rainfall patterns by hyetograph type under distinct climate conditions in Northeast of Brazil: a comparative inference of their key properties. *Rbrh*, 23(0), 1–14. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820180076>
- Barbosa, R. L. Interação das perturbações convectivas iniciadas na costa norte do Brasil com Distúrbios Ondulatórios de Leste. São José dos Campos. 2005. 81 p. (Masters dissertation) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
- Bega, R. M., Vieira, S. R., Maria, I. C. D., Dechen, S. C. F., & Castro, O. M. D. (2005). Variabilidade espacial das precipitações pluviiais diárias em uma estação experimental, em Pindorama, SP. *Bragantia*, 64, 149-156. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000100016>
- Blenkinsop, S., Fowler, H. J., Barbero, R., Chan, S. C., Guerreiro, S. B., Kendon, E., Lenderink, G., Lewis, E., Li, X.-F., Westra, S., Alexander, L., Allan, R. P., Berg, P., Dunn, R. J. H., Ekström, M., Evans, J. P., Holland, G., Jones, R., Kjellström, E., ... Tye, M. R. (2018). The INTENSE project: using observations and models to understand the past, present and future of sub-daily rainfall extremes. *Advances in Science and Research*, 15, 117–126. <https://doi.org/10.5194/asr-15-117-2018>
- Borsato, V. D. A., Hiera, M. D., & Marcon, L. D. S. (2012). A Zona de Convergência do Atlântico Sul e a dinâmica atmosférica para o noroeste do Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, 11, 104-118. <http://doi.org/10.5380/abclima.v11i0.28019>
- Borsato, V. da A., & Massoquim, N. G. (2020). Os movimentos, as áreas de atuação e as propriedades das massas de ar no Brasil. *Revista de Geografia, Meio Ambiente e Ensino*, 11(1), 27–56. <http://www.fecilcam.br/revista/index.php/geomae/article/view/2201>
- Brasil, J. B., Andrade, E. M. de, Palácio, H. A. de Q., Medeiros, P. H. A., & Santos, J. C. N. dos. (2018). Characteristics of precipitation and the process of interception in a seasonally dry tropical forest. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 19(October), 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.10.006>

- Brasil, J. B., de Andrade, E. M., de Queiroz Palácio, H. A., Santos, J. C. N. dos, & Medeiros, P. H. A. (2020). Temporal variability of throughfall as a function of the canopy development stage: from seasonal to intra-event scale. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1640–1651. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1769105>
- Brasil, J. B., Guerreiro, M. S., Andrade, E. M. D., de Queiroz Palácio, H. A., Medeiros, P. H. A., & Ribeiro Filho, J. C. (2022). Minimum Rainfall Inter-Event Time to Separate Rainfall Events in a Low Latitude Semi-Arid Environment. *Sustainability*, 14(3), 1721. <https://doi.org/10.3390/su14031721>
- Breiland, J. G. (1958). Meteorological conditions associated with the development of instability lines. *Journal of Atmospheric Sciences*, 15(3), 297-302. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1958\)015%3C0297:MCAWTD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1958)015%3C0297:MCAWTD%3E2.0.CO;2)
- Britto, F. P., Barletta, R., & Mendonça, M. (2008). Variabilidade Espacial E Temporal Da Precipitação Pluvial No Rio Grande Do Sul: Influência Do Fenômeno El Niño Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*, 3. <https://doi.org/10.5380/abclima.v3i0.25408>
- Blanco, C. M. R. (1999). *Processos de Intensificação Orográfica da Precipitação na Serra do Mar em São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.14.1999.tde-10042007-102412
- Cavalcanti, I. F. D. A., & Kousky, V. E. (2009). Frentes frias sobre o Brasil. *Tempo e clima no Brasil*, 135-145.
- Chaves, R. R., & Cavalcanti, I. F. A. (2001). Atmospheric circulation features associated with rainfall variability over southern Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, 129(10), 2614-2626. [http://doi.org/10.1175/15200493\(2001\)129%3C2614:ACFAWR%3E2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/15200493(2001)129%3C2614:ACFAWR%3E2.0.CO;2)
- Chen, F., Li, X., Senay, G., Gloaguen, R., & Thenkabail, P. S. (2016). *remote sensing Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 Monthly Precipitation Products over Mainland China*. <https://doi.org/10.3390/rs8060472>
- Chin, R. J., Lai, S. H., Chang, K. B., Othman, F., & Jaafar, W. Z. W. (2016). Analysis of rainfall events over Peninsular Malaysia. *Weather*, 71(5), 118–123. <https://doi.org/10.1002/wea.2723>
- Chou, S. C., Vadlamudi, B. R., de Jesus Ferreira, N., Prakki, S., Kayano, M. T., & Neto, E. D. S. C. (1990). Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o oceano Atlântico Equatorial Sul.
- Coutinho, M. D. L., Gan, M. A., & Rao, V. B. (2010). Método objetivo de identificação dos vórtices ciclônicos de altos níveis na região Tropical Sul: validação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, 311-323. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000300003>
- Coutinho, J., Almeida, C., Leal, A., & Barbosa, L. (2014). Characterization of sub-daily rainfall properties in three raingauges located in northeast Brazil. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 364, 345–350. <https://doi.org/10.5194/piahs-364-345-2014>

- Costa, M. D. S., Lima, K. C., Gonçalves, W. A., & Mattos, E. V. (2019). Sistemas convectivos de Mesosescala associados a eventos extremos de precipitação sobre o semiárido do Nordeste do Brasil. *Anuário Do Instituto De Geociências*, 42(1), 317-328. http://doi.org/10.11137/2019_1_317_328
- Diniz, M. T. M., & Oliveira, G. P. de. (2016). Proposta de compartimentação em Mesoescala para o litoral do Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17(3). <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i3.844>
- Diniz, M. T. M., & Pereira, V. H. C. (2015). Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. *Boletim Goiano de Geografia*, 35(3), 488-506. <https://doi.org/10.5216/bgg.v35i3.38839>
- Dos Santos, J. G. M., De Campos, C. R. J., & Carla Lima, E. K. (2008). Análise de jatos de baixos níveis associados a um sistema convectivo de mesoescala na América do Sul: um estudo de caso. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(4), 451–468. <https://doi.org/10.1590/s0102-261x2008000400006>
- Dunkerley, D. (2008a). Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes*, 22(26), 5024–5036. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.7122>
- Dunkerley, D. (2008b). Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. *Hydrological Processes*, 22(22), 4415–4435. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.7045>
- Dunkerley, D. L. (2010). How do the rain rates of sub-event intervals such as the maximum 5-and 15-min rates (I5 or I30) relate to the properties of the enclosing rainfall event? *Hydrological Processes*, 24(17), 2425–2439. <https://doi.org/10.1002/hyp.7650>
- Dunkerley, D. (2012). Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff: rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia. *Hydrological Processes*, 26(15), 2211-2224. <https://doi.org/10.1002/hyp.7650>
- Dunkerley, D. (2015). Intra-event intermittency of rainfall: An analysis of the metrics of rain and no-rain periods. *Hydrological Processes*, 29(15), 3294-3305. <https://doi.org/10.1002/hyp.10454>
- Dunkerley, D. (2017). An approach to analysing plot scale infiltration and runoff responses to rainfall of fluctuating intensity. *Hydrological Processes*, 31(1), 191-206. <https://doi.org/10.1002/hyp.10990>
- Dunkerley, D. (2019). Sub-daily rainfall intensity extremes: Evaluating suitable indices at Australian arid and wet tropical observing sites. *Water (Switzerland)*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/w11122616>
- Dunkerley, D. (2020). How is the intensity of rainfall events best characterised? A brief critical review and proposed new rainfall intensity index for application in the study of landsurface processes. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12040929>

- Dunkerley, D. (2021). The case for increased validation of rainfall simulation as a tool for researching runoff, soil erosion, and related processes. *Catena*, 202, 105283. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105283>
- Ferreira, A. G., & Mello, N. G. da S. (2005). 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*, 1(1), 15–28. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>
- Fisch, G., Marengo, J. A., & Nobre, C. A. (1996). Clima da Amazônia. *Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática-Edição Comemorativa*, 10.
- Fisch, G., Marengo, J. A., & Nobre, C. A. (1998). The climate of Amazonia - a review. *Acta Amazônica*, 28(2), 101–126.
- Futrell, J. H., Gephart, R. E., Kabat-Lensch, E., McKnight, D. M., Pyrtle, A., Schimel, J. P., ... & Gephart, J. M. (2005). *Water: Challenges at the intersection of human and natural systems* (No. PNWD-3597). PNNL (Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States)). <https://doi.org/10.2172/1046481>
- Freitas, S. (2019). Avaliação do uso do IMERG (intrgrated multi- satellite retrievals for GPM) para determinação de eventos chuvosos e suas propriedades no brasil: uma análise na escala subdiária. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba. <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18947>
- Fritzsos, E., Mantovani, L. E., Wrege, M. S., & Neto, A. C. (2011). Rainfall analysis to define homogeneous pluviometric areas in the state of Paraná. 23, 555–572.
- Gan, M. A. (1982). Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlantico sul e leste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.21.17.31>
- Gomes, H. B. (2012). Distúrbios ondulatórios de leste no nordeste brasileiro: climatologia e modelagem numérica. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.14.2012.tde-21062013-100722>
- Gonçalves, F. N., & Back, Á. J. (2018). Análise da variação espacial e sazonal e de tendências na precipitação da região Sul do Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, 41(3), 592–602. <https://doi.org/10.19084/rca17204>
- Gonçalves, Euler Noiman. Análise estatística e comparativa de eventos chuvosos em escala subdiária em bacias hidrográficas do Brasil. 2018b. 177 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- Gusmão, A. M. (1996). Alta da Bolívia. *Revista climanálise. Cachoeira paulista, ed. Especial*, 143-146.
- Haile, A. T., Rientjes, T. H. M., Habib, E., Jetten, V., & Gebremichael, M. (2011). Rain event properties at the source of the Blue Nile River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 1023–1034. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1023-2011>

- Hamada, A., Arakawa, O., & Yatagai, A. (2011). An automated quality control method for daily rain-gauge data. *Global Environmental Research*, 15(December 2011), 183–192. http://www.airies.or.jp/journal_15-2eng.html
- Haylock, M., & Nicholls, N. (2000). Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910-1998. *International Journal of Climatology*, 20(13), 1533–1541. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20001115\)20:13<1533::AID-JOC586>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20001115)20:13<1533::AID-JOC586>3.0.CO;2-J)
- HOUZE, R.A.; SMULL, B.F.; DODGE, P. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma, *Monthly Weather Review*, v. 118, p. 613-654, 1990. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1990\)118%3C0613:MOOSRI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118%3C0613:MOOSRI%3E2.0.CO;2)
- Kousky, V. E. (1979). Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, 107(9), 1140-1153. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107%3C1140:FIONB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107%3C1140:FIONB%3E2.0.CO;2)
- Lemos, C. F., & Calbete, N. O. (1996). Sistemas Frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995. *Climanálise especial, edição comemorativa de, 10*.
- Lewis, E., Quinn, N., Blenkinsop, S., Fowler, H. J., Freer, J., Tanguy, M., Hitt, O., Coxon, G., Bates, P., & Woods, R. (2018). A rule based quality control method for hourly rainfall data and a 1 km resolution gridded hourly rainfall dataset for Great Britain: CEH-GEAR1hr. *Journal of Hydrology*, 564, 930–943. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.07.034>
- Li, N., Tang, G., Zhao, P., Hong, Y., Gou, Y., & Yang, K. (2017). Statistical assessment and hydrological utility of the latest multi-satellite precipitation analysis IMERG in Ganjiang River basin. *Atmospheric Research*, 183, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.020>
- Lourenço, M. C. M., Ferreira, N. J., & Gan, M. A. (1996). Vórtices ciclônicos em altos níveis de origem subtropical. *Climanálise Especial*, 10, 163-167.
- Lucas, T. D. P. B. (2007). Chuvas persistentes e ação da Zona de Convergência do Atlântico Sul na região metropolitana de Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-78BEL6>
- Lyra, M. J. A., Fedorova, N., Levit, V., & Freitas, I. G. F. de. (2020). Características dos Complexos Convectivos de Mesoescala no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(spe), 727–734. <https://doi.org/10.1590/0102-7786355000001>
- Marinho, S. K. F., De Melo Barbosa Andrade, L., Spyrides, M. H. C., Santos E Silva, C. M., De Oliveira, C. P., Bezerra, B. G., & Mutti, P. R. (2020). Climate profiles in Brazilian microregions. *Atmosphere*, 11(11), 1–14. <https://doi.org/10.3390/atmos11111217>
- Maia, L. F. P. G. (1986). Alguns aspectos dinâmico-climatológicos em Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/5268>

- Mandal, K. G., Padhi, J., Kumar, A., Sahoo, D. K., Majhi, P., Ghosh, S., ... & Raychaudhuri, M. (2013). Analyzing rainfall events and soil characteristics for water resources management in a canal irrigated area
- Marengo J. A. & Soares W. R. 2002. Episodios de Jatos de Baixos Níveis ao Leste dos Andes durante 13-19 de abril de 1999. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17(1): 35–52.
- Marengo, J. A. (2004). Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1–3), 79–96. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0045-8>
- Melo Júnior, J. C. F. de, Sedyama, G. C., Ferreira, P. A., Leal, B. G., & Minusi, R. B. (2006). Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(2), 417–425. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662006000200024>
- Mendonça, F., & Danni-Oliveira, I. M. (2017). Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p.
- Menezes, R. H. N., Dantas, R. T., & Assis, de F. (2007). Regiões pluviométricas homogêneas no Estado do Maranhão, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 15(2), 152–160.
- Messakh, J. J., Arwin, S., Hadihardaja, I. K., & Dupe, Z. (2015). Management strategy of water resources base on rainfall characteristics in the semi-arid region in Indonesia. *International Journal of Scientific and Engineering Research (IJSER)*, 8(6), 331–338.
- Meira, A., Marcela (2019). Quality Control Procedures for Sub-Hourly Rainfall Data: An Investigation in Different Spatio-Temporal Scale. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.
- Mishra, A. K. (2013). Effect of rain gauge density over the accuracy of rainfall: a case study over Bangalore, India. *SpringerPlus*, 2(1), 1–7.
- Molina-Sanchis, I., Lazaro, R., Arnau, E., & Calvo-Cases, A. (2016). Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event separation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64. <https://doi.org/10.1515/johh-2016-0024>
- Moura, M. do N., & Vitorino, M. I. (2012). Variabilidade da precipitação em tempo e espaço associada à Zona de Convergência Intertropical. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(4), 475–483. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862012000400010>
- McLachlan, G. J., Lee, S. X., & Rathnayake, S. I. (2019). Finite Mixture Models. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 6(1), 355–378. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-031017-100325>

- Nascimento, F. D. C. A., Araújo, F. R. D. C. D., & Campos, C. (2015). Análise dos Padrões Espaciais e Temporais da Precipitação no Estado do Maranhão-Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(02), 422-430. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.2.p422-430>
- Nobre, C. A., Obregón, G. O., & Marengo, J. A. (2009). Características do Clima Amazônico : Aspectos Principais. *Amazonia and Global Change*, 149–162. <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/fish.html>
- Oliveira, D. M., Reboita, M. S., & da Rocha, R. P. (2018). A influência da topografia da região sul de Minas Gerais nas variáveis atmosféricas simuladas com o RegCM4. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(3), 758-772. <http://doi.org/10.26848/rbgf.v11.3.p758-772>
- Oliveira, P. T., e Silva, S., & Lima, K. C. (2017). Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1), 77-90.
- Paz, A. R. (2004). *Hidrologia Aplicada*. 138.
- Pellegatti, C. H. G., & Galvani, E. (2010). Avaliação da precipitação na Serra do Mar – SP em eventos de diferentes intensidade e duração. *GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)*, 27, 147. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2010.74160>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825-2830.
- Peng, T., Wang, J., & Huang, Z. (2019). Analysis of rainfall features and calculation of rainfall pattern of short duration rainstorm in Wuhan, China. *Tecnologia y Ciencias Del Agua*, 10(4), 1–17. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-04-01>
- Pessoa, F. E. P., & Campos, J. N. B. (2015). Ciclo diário de precipitações pluviais em intervalos de cinco minutos no município de Fortaleza. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(2), 195–204. <https://doi.org/10.1590/0102-778620140116>
- Portela, N. M. (2015). Modelo de Mistura de Gaussianas Fuzzy Contextual.
- Quadro, M. F. L. D. (1999). Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul. *Revista Brasileira de Geofísica*, 17(2-3), 210-210. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200009>
- Reboita, M. S., Marietto, D. M. G., Souza, A., & Barbosa, M. (2017). Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, 21. <http://doi.org/10.5380/abclima.v21i0.47577>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. da, & Ambrizzi, T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2), 185–204. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862010000200004>

- Reynolds, D. (2015). Gaussian Mixture Models. *Encyclopedia of Biometrics*, (2), 827–832. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7488-4_196
- Rodrigues, L. P., Senna, M. C. A., & Cataldi, M. (2016). Representação Dos Padrões Atmosféricos Relacionados À Zona De Convergência Do Atlântico Sul Através De Um Modelo Acoplado Atmosfera-Biosfera. *Ciência e Natura*, 38(1). <https://doi.org/10.5902/2179460x17179>
- Rosa, D. B., Sousa, R. R., Toledo, L. G., Topanotti, D. Q., & Nascimento, J. A. (2007). A distribuição espacial das chuvas na porção Centro-Oeste do estado de Mato Grosso - Brasil. *Revista Eletrônica Da Associação Dos Geógrafos Brasileiros*, 1(5), 127–152. <https://periodicos.ufms.br/index.php/revagb/article/view/1368>
- Rozante, J. R., Vila, D. A., Chiquetto, J. B., Fernandes, A. de A., & Alvim, D. S. (2018). Evaluation of TRMM/GPM blended daily products over Brazil. *Remote Sensing*, 10(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs10060882>
- Satyamurty, P., Nobre, C. A., & Dias, P. L. S. (1998). South America. In *Meteorology of the southern hemisphere* (pp. 119-139). American Meteorological Society, Boston, MA.
- Santana, D. F. Y., Lira, M. de A., dos Santos, M. V. F., Ferreira, M. de A., Silva, M. J. de A., Marques, K. A., de Mello, A. C. L., & dos Santos, D. C. (2011). Caracterização da caatinga e da dieta de novilhos fistulados, na época chuvosa, no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40(1), 69–78. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000100010>
- Santos, J. G. M. D., Campos, C. R. J. D., & Lima, K. C. (2008). Análise de jatos de baixos níveis associados aum sistema convectivo de mesoescala na américa do sul: um estudo de caso. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(4), 451-468.
- Santos, E. B., Lucio, P. S., & Santos e Silva, C. M. (2015). Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. *Atmospheric Science Letters*, 16(3), 185–192. <https://doi.org/10.1002/asl2.535>
- Schröder, R. (1956). *Distribuição e curso anual das precipitações no Estado de São Paulo*. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051956000100018>
- Silva, L. A. (2005). A influência do vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN) sobre a precipitação do Nordeste do Brasil (NEB) e as características associadas. Masters Dissertation, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Silva, L. L., da Costa, R. F., Campos, J. H. B. d. C., & Dantas, R. T. (2009). Influence of precipitations on agricultural productivity in Paraíba State. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(4), 454–461. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400013>
- Silva, V. P. D. (2010). Distúrbios ondulatórios de leste: estudo de casos que afetaram a costa leste do NEB. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3655>
- Silva, B. F. P. da, Fedorova, N., Levit, V., Peresetsky, A., & Brito, B. M. de. (2011). Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. *Revista*

- Brasileira de Meteorologia*, 26(3), 323–338. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862011000300001>
- Silva, V. D. P. R. D., Pereira, E. R. R., & Almeida, R. S. R. (2012). Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, 163-172. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200005>
- Silva, E. D. Da, & Reboita, M. S. (2013). Estudo da precipitação no Estado de Minas Gerais-MG. *Revista Brasileira de Climatologia*, 13(2013), 120–136.
- Silva, J. P. R., Reboita, M. S., & Escobar, G. C. J. (2019). Caracterização da Zona De Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. *Revista Brasileira de Climatologia*, 25, 355–377. <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.64101>
- Souza, E. D., Alves, J. M. B., & Repelli, C. A. (1998). Um complexo convectivo de mesoescala associado à precipitação intensa sobre Fortaleza-CE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 13(2), 1-14.
- Souza, W. M., Azevedo, P. V. de, & Araújo, L. E. de. (2012). Classificação da precipitação diária e impactos decorrentes dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5(2), 250. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i2.232788>
- Strong, C., Fuentes, J. D., Garstang, M., & Betts, A. K. (2005). Daytime cycle of low-level clouds and the tropical convective boundary layer in southwestern Amazonia. *Journal of Applied Meteorology*, 44(10), 1607–1619. <https://doi.org/10.1175/JAM2266.1>
- Teixeira, R. F. B. (2008). O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23(3), 282–291. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862008000300003>
- Túlio Mendonça Diniz, M., & Hugo Campelo Pereira, V. (2015). Climatologia Do Estado Do Rio Grande Do Norte, Brasil: Sistemas Atmosféricos Atuantes E Mapeamento De Tipos De Clima. *Boletim Goiano de Geografia*, 35(3). <https://doi.org/10.5216/bgg.v35i3.38839>
- Uvo, C. R. B., & Uvo, C. R. B. (1989). *A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro*. INPE.
- Wang, X., Zhang, Y., Hu, R., Pan, Y., Xu, H., Shi, W., ... & Yasuda, H. (2016). Revisit of event-based rainfall characteristics at Shapotou area in northern China.
- Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V, Berg, P., Johnson, F., Kendon, E. J., Lenderink, G., & Roberts, N. M. (n.d.). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
- Zanella, M. E. (2014). Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino. *Caderno Prudentino de Geografia*, 36, 126–142.

6. APPENDICES

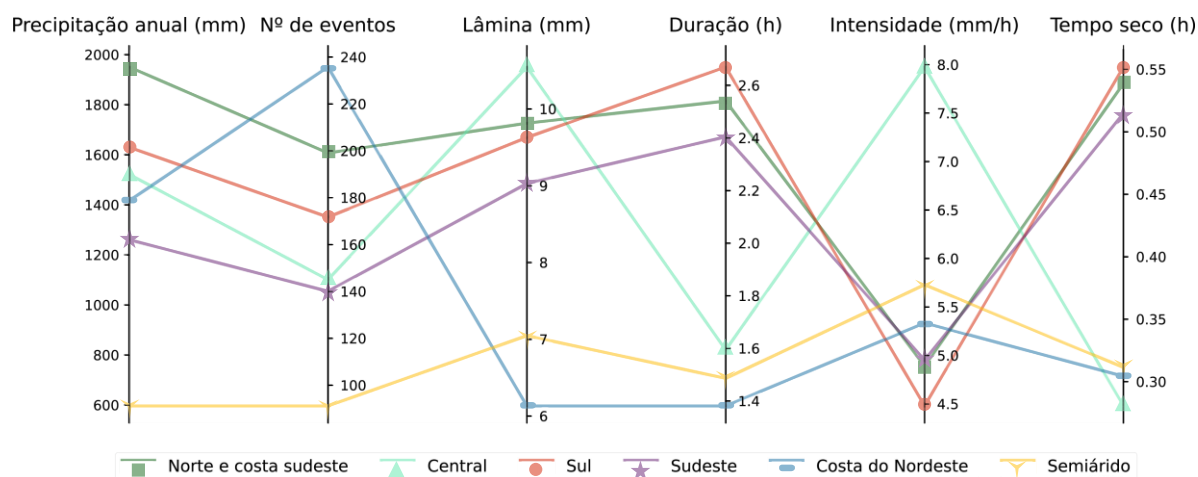


Figura 18: Variação das propriedades médias com MIT de 30 minutos.

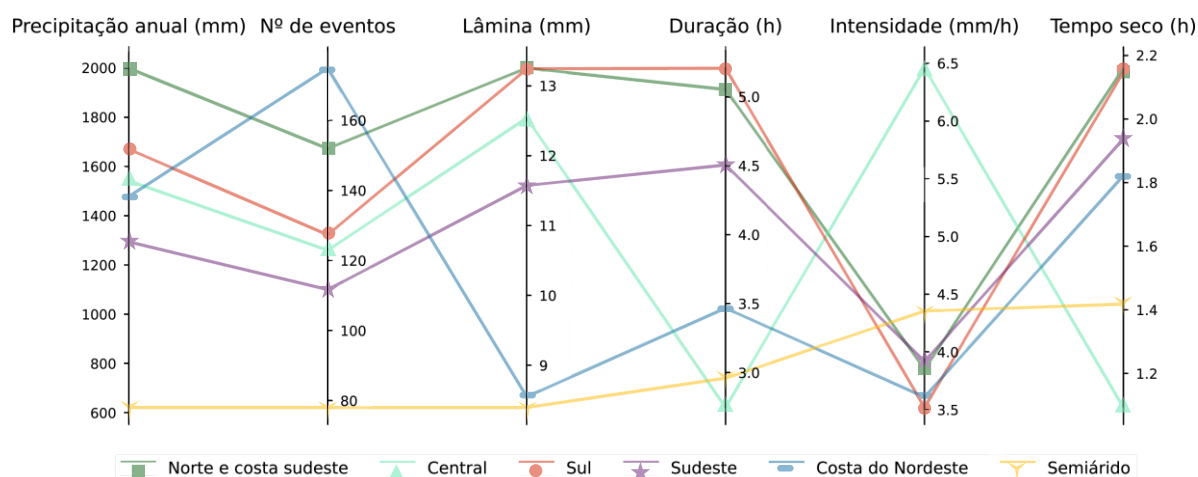


Figura 19: Variação das propriedades médias com MIT de 120 minutos (2h).

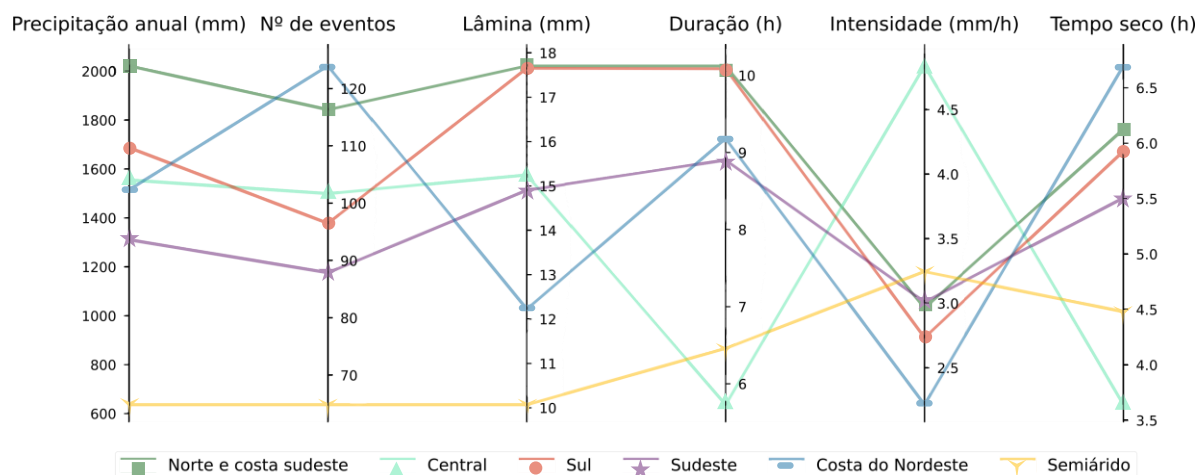


Figura 20: Variação das propriedades médias com MIT de 360 minutos (6h).

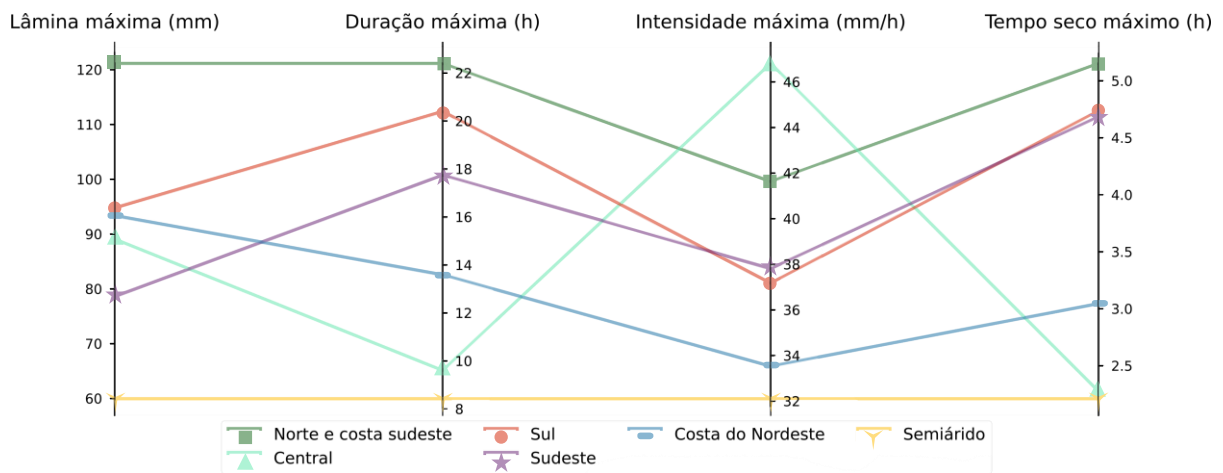


Figura 21: Propriedades máximas com MIT de 30 minutos.

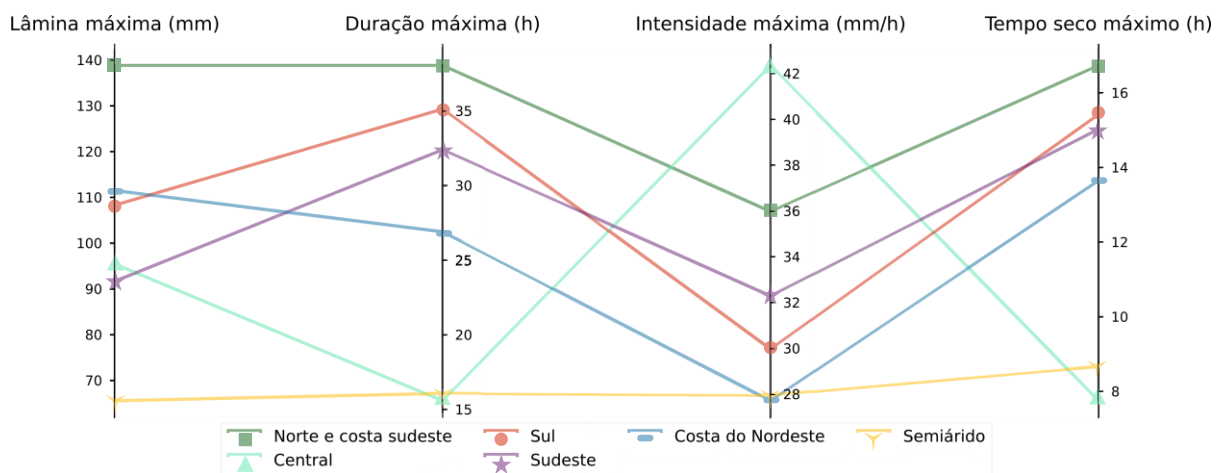


Figura 22: Propriedades máximas com MIT de 120 minutos (2h).

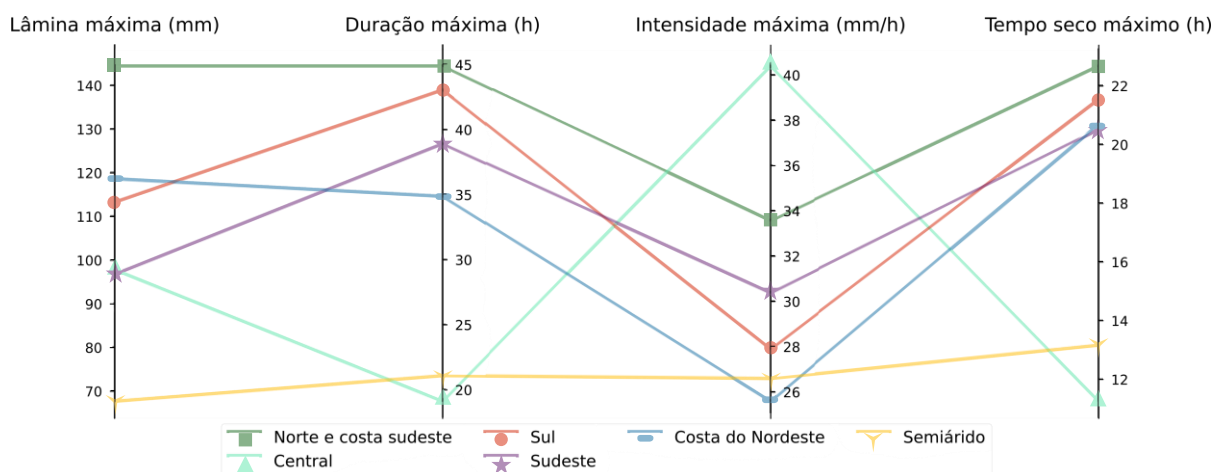


Figura 23: Propriedades máximas com MIT de 180 minutos (3h).

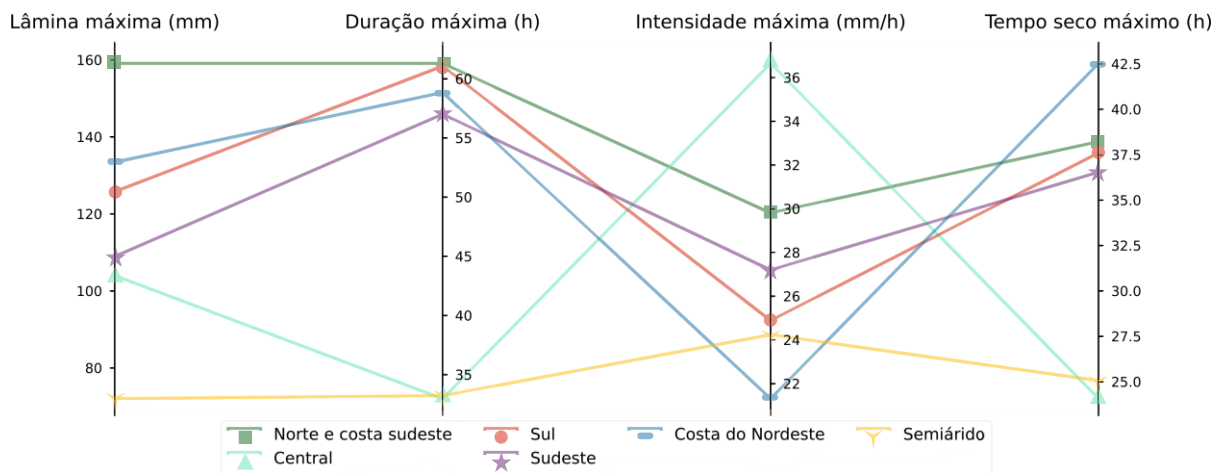


Figura 24: Propriedades máximas com MIT de 360 minutos (6h).

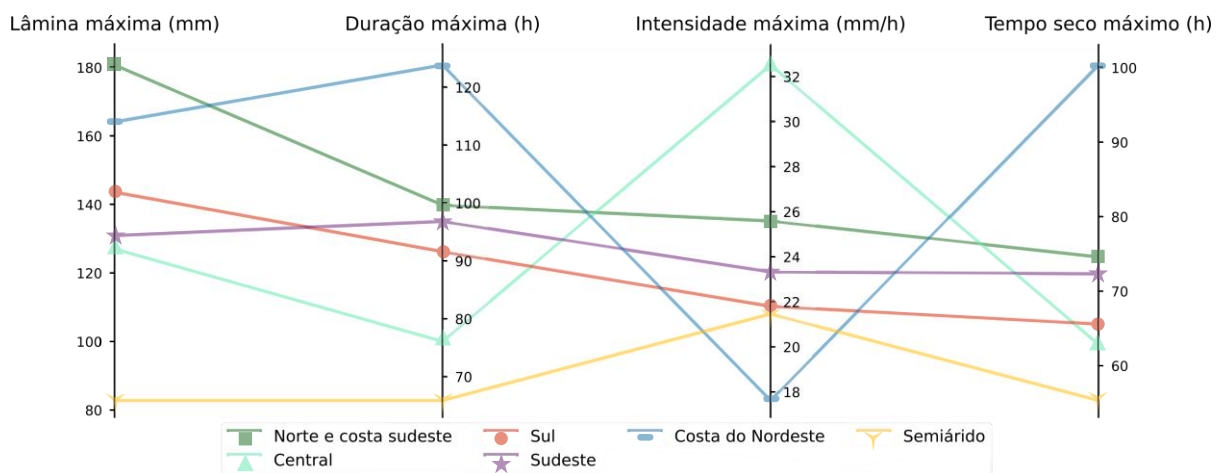


Figura 25: Propriedades máximas com MIT de 720 minutos (12h).

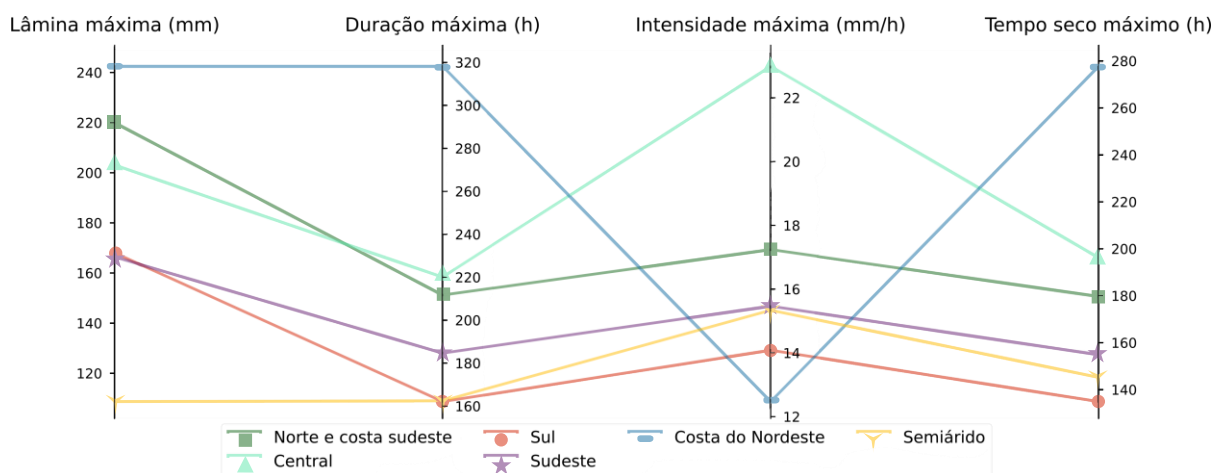


Figura 26: Propriedades máximas com MIT de 1440 minutos (24h).

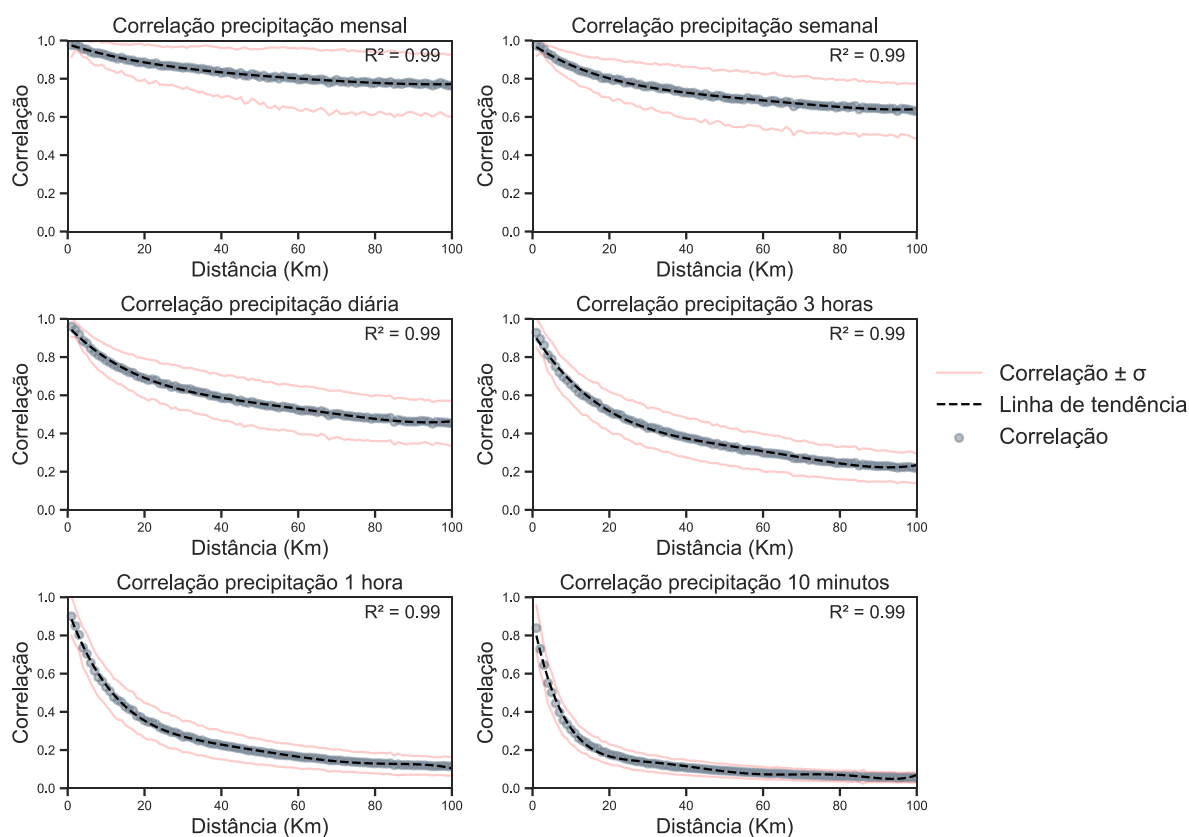


Figura 27: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Sudeste.

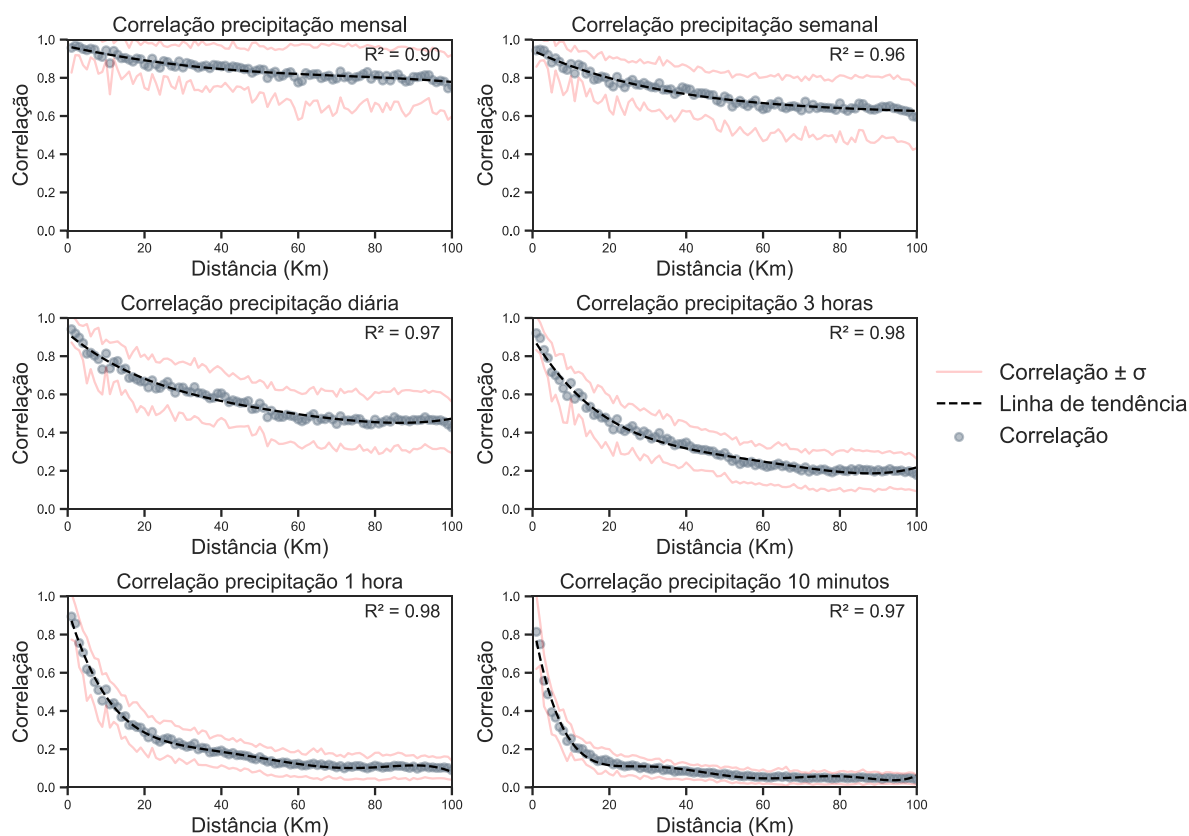


Figura 28: Correlação pela distância para diferentes resoluções temporais no Semiárido.

Tabela 3: Quantidade de estações pluviométricas por ano e quantidade de estações de alta qualidade resultantes do controle de qualidade manual.

Ano	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Total de estações	1896	2774	3313	3485	3821	3494	3529
Estações de alta qualidade	368	723	1180	1095	1431	1217	1331
Porcentagem	19,4%	26,1%	35,6%	31,4%	37,3%	34,8%	37,7%

Tabela 4: Quantidade de anos que as estações funcionaram sem problema nos dados (2014-2020).

Quantidade de anos	1	2	3	4	5	6	7
Estações	917	748	510	389	250	97	2
Total	2.913						

Tabela 5: Propriedades médias e principais sistemas atmosféricos atuantes em cada grupo.

Grupo	MIT	Propriedades Médias						Principais sistemas atmosféricos
		Prec. Anual (mm)	Nº de eventos	Lâmina (mm)	Duração (h)	Intensidade (mm/h)	Temp. Seco (h)	
Norte e costa sudeste	30	1964,10	202,05	9,70	2,54	4,90	0,54	Norte da Amazônia: ZCIT, LI e CCM. Costa do Sudeste: ZCAS, frentes frias e brisa marítima.
	60	1991,70	179,90	11,05	3,46	4,36	1,09	
	120	2013,55	154,32	13,07	5,07	3,82	2,17	
	180	2023,67	140,08	14,54	6,49	3,47	3,23	
	360	2036,64	118,05	17,49	10,18	2,96	6,18	
	720	2046,08	92,56	22,56	18,36	2,40	13,14	
	1440	2052,95	58,35	35,42	43,98	1,54	35,89	
Central	30	1518,02	144,95	10,53	1,60	7,96	0,28	Sul da Amazônia, Centro-oeste e Sul do Maranhão: ZCAS e Alta da Bolívia. Região Norte (faixa que chega ao Oceano Atlântico): ZCIT, VCAN e LI e DOL.
	60	1528,73	134,69	11,38	2,02	7,30	0,55	
	120	1538,10	122,85	12,52	2,75	6,44	1,09	
	180	1543,08	115,31	13,36	3,46	5,87	1,67	
	360	1551,17	101,57	15,22	5,73	4,82	3,64	
	720	1558,17	81,01	19,24	12,09	3,87	9,40	
	1440	1563,66	49,71	31,75	37,05	2,45	32,56	
Sul	30	1628,26	169,80	9,76	2,66	4,52	0,55	Frentes frias, VCAN, CCM, ZCAS e cavados.
	60	1650,27	148,25	11,32	3,62	4,06	1,09	
	120	1667,02	125,90	13,42	5,18	3,55	2,13	
	180	1674,43	114,16	14,85	6,50	3,26	3,09	
	360	1684,24	95,46	17,85	10,02	2,77	5,88	
	720	1691,42	77,68	21,96	16,90	2,28	11,76	
	1440	1696,90	57,90	29,37	33,82	1,54	26,88	
Sudeste	30	1260,53	140,06	9,03	2,40	4,95	0,51	ZCAS, frentes frias, JBN e VCAN
	60	1278,89	126,57	10,11	3,19	4,46	1,01	
	120	1293,86	111,70	11,57	4,50	3,92	1,93	
	180	1300,92	102,77	12,64	5,67	3,58	2,83	
	360	1310,59	87,86	14,90	8,90	3,00	5,50	
	720	1318,08	70,31	18,77	16,32	2,40	12,00	
	1440	1323,75	48,86	27,23	36,98	1,52	30,65	

Grupo	MIT	Propriedades Médias						Principais sistemas atmosféricos
		Prec. Anual (mm)	Nº de eventos	Lâmina (mm)	Duração (h)	Intensidade (mm/h)	Temp. Seco (h)	
Costa do Nordeste	30	1424,69	237,52	6,11	1,38	5,31	0,31	Litoral Leste: DOL, ZCIT, brisa marítima, VCAN e CCM. Região sul da Bahia: frentes frias e ZCAS. Entorno de Fortaleza: ZCIT, brisa terrestre, VCAN e CCM.
	60	1456,51	211,18	7,01	2,04	4,51	0,74	
	120	1487,32	176,09	8,54	3,50	3,58	1,83	
	180	1503,52	155,53	9,74	4,98	3,02	3,06	
	360	1524,35	124,63	12,24	9,23	2,19	6,74	
	30	1424,69	237,52	6,11	1,38	5,31	0,31	
	60	1456,51	211,18	7,01	2,04	4,51	0,74	
Semiárido	30	595,90	91,05	7,04	1,48	5,74	0,31	Norte e Noroeste do Semiárido: ZCIT e VCAN. Parte Sul: ZCAS e frentes frias. Faixa Leste: DOL e VCAN
	60	607,93	85,52	761	1,98	5,12	0,66	
	120	620,11	77,91	8,40	2,95	4,36	1,41	
	180	626,34	72,91	8,96	3,89	3,93	2,20	
	360	635,13	64,78	10,06	6,44	3,25	4,47	
	720	641,22	54,34	11,99	12,12	2,64	9,69	
	1440	647,09	38,13	17,24	31,88	1,74	28,29	

Tabela 6: Equações das curvas ajustadas para os grupos de precipitação, onde Y é a propriedade analisada e x o valor do MIT.

Grupo / Propriedade	Norte e costa sudeste		Central		Sul	
	Equação	R ²	Equação	R ²	Equação	R ²
Nº Eventos	$y = -36,36\ln(x) + 328,35$	0,99	$y = 137,25e^{-7E-04x}$	0,99	$y = -28,67\ln(x) + 265,15$	0,99
Lâmina média (mm)	$y = 0,0174x + 10,451$	0,99	$y = 3E-06x^2 + 0,0101x + 10,892$	0,99	$y = -6E-06x^2 + 0,0217x + 10,261$	0,99
Duração (h)	$y = 8E-06x^2 + 0,0167x + 2,6511$	0,99	$y = 1E-05x^2 + 0,0053x + 1,7752$	0,99	$y = 2E-06x^2 + 0,0193x + 2,5781$	0,99
Intensidade (mm/h)	$y = -0,836\ln(x) + 7,788$	0,99	$y = -1,417\ln(x) + 13,062$	0,99	$y = -0,753\ln(x) + 7,1433$	0,99
Tempo seco (h)	$y = 9E-06x^2 + 0,0116x + 0,5172$	0,99	$y = 1E-05x^2 + 0,0035x + 0,3988$	0,99	$y = 3E-06x^2 + 0,0139x + 0,321$	0,99

Tabela 7: Equações das curvas ajustadas para os grupos 3, 4 e 5. Onde Y é a propriedade analisada e x o valor do MIT.

Grupo / Propriedade	Sudeste		Costa do Nordeste		Semiárido	
	Equação	R ²	Equação	R ²	Equação	R ²
Nº Eventos	$y = -23,22\ln(x) + 221,77$	0,99	$y = -46,97\ln(x) + 400,36$	0,99	$y = -13,29\ln(x) + 139,91$	0,97
Lâmina média (mm)	$y = -2E-06x^2 + 0,0154x + 9,3329$	0,99	$y = -5E-08x^2 + 0,0149x + 6,3892$	0,99	$y = -2E-07x^2 + 0,0072x + 7,2869$	0,99
Duração (h)	$y = 6E-06x^2 + 0,0157x + 2,3236$	0,99	$y = 1E-05x^2 + 0,0149x + 1,3817$	0,99	$y = 8E-06x^2 + 0,0096x + 1,5502$	0,99
Intensidade (mm/h)	$y = -0,869\ln(x) + 8,0242$	0,99	$y = -1,106\ln(x) + 8,9422$	0,99	$y = -1,022\ln(x) + 9,258$	0,99
Tempo seco (h)	$y = 6E-06x^2 + 0,0118x + 0,3362$	0,99	$y = 1E-05x^2 + 0,0114x + 0,2355$	0,99	$y = 8E-06x^2 + 0,0076x + 0,3116$	0,99