



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
URBANA E AMBIENTAL**

**Avaliação das estimativas de chuva do satélite  
TRMM no Estado da Paraíba**

**Alexleide Santana Diniz Soares**

João Pessoa, maio de 2014.

Alexleide Santana Diniz Soares

**Avaliação das estimativas de chuva do satélite  
TRMM no Estado da Paraíba**

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Urbana e Ambiental da Universidade  
Federal da Paraíba como requisito parcial para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental.*

**Orientador:** Dr. Adriano Rolim da Paz

João Pessoa, maio de 2014.

S676a Soares, Alexleide Santana Diniz.

Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no  
estado da Paraíba / Alexleide Santana Diniz Soares.-- João  
Pessoa, 2014.

114f. : il.

Orientador: Adriano Rolim da Paz

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT

1. Engenharia urbana e ambiental. 2. Sensoriamento  
remoto. 3. TRMM. 4. Estimativas de chuva - Paraíba.

UFPB/BC

CDU: 62:711(043)

Alexleide Santana Diniz Soares

**Avaliação das estimativas de chuva do satélite  
TRMM no Estado da Paraíba**

Banca examinadora

---

Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz  
Orientador

---

Prof. Dr. Richarde Marques da Silva (UFPB -PPGECAM)  
Examinador

---

Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Piccilli – (UFSM)  
Examinador

João Pessoa, maio de 2014.

## **Agradecimentos**

Parar para escrever os agradecimentos é algo que me traz emoção, pois representa para mim, a conclusão da pesquisa. Em alguns momentos achei que esse dia não chegaria. Foram muitas as dificuldades, mas que serviram como contribuição para o meu aprendizado. Para conseguir levar o curso e a dissertação em frente, muitas pessoas contribuíram e aqui deixo registrados meus sinceros agradecimentos. Em especial, agradeço:

- ao meu orientador, o Professor Dr. Adriano Rolim da Paz, pela competência demonstrada na condução da pesquisa, pela paciência, pela constante disponibilidade acompanhada de muita calma, educação e pelo comportamento ímpar, ao me permitir uma inquestionável evolução, não apenas no aspecto acadêmico, bem como no aspecto humano.
- à Luís Havelange Soares, pelas sugestões e leituras durante a construção textual, pelo amor dedicado, pelo apoio, paciência e companheirismo em todas as horas.
- ao Prof. Celso Augusto Guimarães Santos sempre muito atencioso e que me indicou um “norte” no momento que me encontrava desmotivada com o programa.
- aos professores Richarde Marques da Silva, pelas contribuições desde a construção inicial do projeto (colóquio) e Daniel Gustavo Allasia Piccilli, por se dispor a participar da banca examinadora e contribuir para pesquisa.
- ao amigo João Paulo França (Secretário de Educação do município de Barra de São Miguel), pela licença concedida para estudo.
- ao amigo Aderson Starley Santos, pelas ideias trocadas e sugestões para o desenvolvimento da pesquisa.
- à Julie Eugênio da Silva Francisco Medeiros, pelas contribuições valiosíssimas relativas aos softwares utilizados na pesquisa.
- ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudo.
- a todos que fazem parte do PPGECAM, em especial ao coordenador Givanildo Alves de Azeredo, pelo atendimento sempre gentil mesmo em meio a muito trabalho.
- a minha mãe e aos meus irmãos, por compreender a ausência durante esse período dedicado quase que exclusivamente ao mestrado.

## Resumo

A variabilidade temporal e espacial, que é um elemento característico da precipitação pluvial se configura como um fator de complexidade para as pesquisas sobre chuvas. Além disso, a baixa densidade de postos pluviométricos e os equívocos nos processos de coleta em campo aumentam as dificuldades na execução de estudos nessa área de pesquisa. No entanto, tais pesquisas são essenciais tendo em vista que é a partir delas que se pode fazer previsão de enchentes e estiagens, compreender o regime hidrológico dos rios, a umidade do solo, as mudanças de temperatura, dentre outras. Assim, as estimativas espaciais de precipitação realizadas por satélites são técnicas importantes, pois, embora contenham incertezas, quando comparadas com valores pontuais medidos em solo podem fornecer bons indicativos da distribuição espacial das chuvas para uma determinada área. Nesta pesquisa, avalia-se o potencial das estimativas de chuva do satélite TRMM, versão 7 e 3B42 (Tropical Rainfall Measuring Mission) para representar a variabilidade espaço-temporal da precipitação no Estado da Paraíba, no Nordeste do Brasil. No estudo considerou-se séries temporais de dados diários para um período de 14 anos (1998-2011) fornecidas pela AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba) referentes a 269 postos pluviométricos e dados estimados pelo satélite TRMM numa malha espacial de 198 pontos que cobrem o Estado da Paraíba e que foram interpolados para os locais de observação de campo pelo método do inverso do quadrado da distância. As comparações foram realizadas considerando a chuva acumulada em diferentes períodos: diário, três dias, sete dias e mensal. Com relação aos fatores espaciais, os comparativos foram desenvolvidos com base em valores pontuais nos locais de observação, médias espaciais considerando sub-bacias, mesorregiões, e perfil topográfico. As análises estatísticas de comparação entre a chuva observada e a estimada foram desenvolvidas a partir das médias de chuva, das correlações lineares, do erro médio absoluto e da raiz do erro médio quadrático considerando cada período acumulado. Nas análises da chuva diária a maioria dos postos (91%) apresentou índices de correlação variando de 0,5 a 0,7. Esta correlação aumenta para os acumulados de 3 dias, com valores que variam de 0,5 a 0,7 em 56% dos postos pluviométricos e de 0,7 a 0,8 em 42% dos postos. Nos acumulados de 7 dias, 58% dos pluviômetros apresentaram correlações que variam de 0,7 a 0,8 e nos acumulados mensais 95% dos postos apresentam correlações superiores a 0,8. Portanto, os resultados indicam que o satélite TRMM apresenta melhores estimativas quando os dados estão acumulados em intervalos maiores de tempo. Na análise mensal verificou-se que março e abril são os meses mais significativos de estimação e que nos primeiros meses do ano os valores estimados e observados apresentam melhores aproximações para todos os tipos de análises. Identificou-se também bom potencial de estimação na análise da variabilidade sazonal de precipitação. Além disso, observou-se que o satélite apresenta os maiores erros para as áreas onde ocorrem os maiores volumes de chuva. Nas sub-bacias e nas mesorregiões do Estado, o regime de chuvas foi estimado com bastante fidelidade em todas as formas analisadas. Conclui-se que o satélite TRMM apresenta bom desempenho para reproduzir as chuvas observadas em pluviômetros no Estado da Paraíba, configurando-se como uma importante fonte de dados para o auxílio no planejamento e na tomada de decisões relativas aos recursos hídricos.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; TRMM; Paraíba.

## Abstract

The spatial and temporal variability is a precipitation feature and constitutes a factor of complexity for developing rainfall studies. Moreover, the low density of rain gauge stations and errors in data collection in the field increase the difficulties in implementing studies in this research area. However, such researches are essential considering that it is from them that we can carry out flood and drought forecasts, understand the hydrological regime of rivers, soil moisture, temperature changes, among others. Thus, the spatial rainfall estimates obtained through satellites data are important because, although present uncertainties, when compared with punctual data measured in the field can provide good indicators of the spatial distribution of rainfall for a given area. In this research, we evaluate the potential of rainfall estimates from TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) sensor to represent the spatio-temporal variability of precipitation in the State of Paraíba, in the Northeast of Brazil. In this study we considered daily time series of 14 years length of rainfall data collected by AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba) in 269 rainfall gauges and rainfall data estimated from TRMM satellite for a spatial mesh of 198 grid points covering the Paraíba State and which have been interpolated to the rain gauge locations using the inverse squared distance method. Comparisons were made considering the accumulated rainfall in different periods of time: daily, three days, seven days and monthly. With respect to spatial factors, the comparisons were developed based on punctual values in rain gauges stations, areal averages over sub-basins and mesoregions, and topographic profile. The statistical analyzes of comparison between the observed and estimated rainfall were developed based on the average rainfall, the linear correlations, the mean absolute error and root mean square error considering each accumulated period. Regarding the daily precipitation, the majority of the rain gauges (91%) showed correlation coefficients ranging from 0.5 to 0.7. This correlation increases for considering 3 days-rainfall, with values ranging from 0.5 to 0.7 in 56% of rain gauges, and of 0.7-0.8 for 42% of rain gauges. For the 7 days-rainfall, 58% of the rain gauges presented correlations ranging from 0.7 to 0.8, while for the monthly rainfall 95% of the rain gauges obtained correlations higher than 0.8. Therefore, the results indicate that the TRMM satellite provides better estimates when data are accumulated in larger time intervals. The monthly analysis showed that March and April are the months with higher correlation between observed and estimated precipitation, and that in the first months of the year the estimated and observed values have better approximations for all types of analyzes. It was also verified a good estimation potential in the analysis of seasonal variability of precipitation. Moreover, it was observed that the satellite presents the largest errors in the areas with the largest amount of rainfall. In the sub-basins and in the mesoregions of the state the rainfall regime was estimated quite closely. We concluded that the TRMM satellite presents very good skill in reproducing the observed rainfall measured in the gauge stations over the Paraíba state, becoming an important data source for helping the water resources planning and decision making.

**Keywords:** Remote sensing; TRMM; Paraíba.

## Sumário

LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE EQUAÇÕES .....	xiii
LISTA DE SIGLAS .....	xiv
Capítulo 1. Introdução .....	15
1.1. Objetivos .....	18
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica .....	19
2.1. O fenômeno precipitação .....	19
2.2. Medição de chuva em campo .....	22
2.3. Estimativa de chuva por sensoriamento remoto orbital (SRO) .....	26
2.3.1. Visão geral do SRO .....	27
2.3.2. Uso de estimativas de chuva por SRO .....	28
2.4. Estimativas de chuva do sensor TRMM .....	30
2.4.1 Caracterização geral .....	30
2.4.2 Avaliações das estimativas .....	32
2.5. Métodos de avaliação de estimativas de chuva por SRO .....	43
2.5.1 Comparação pontual .....	44
2.5.2 Agregação no espaço .....	45
2.5.3 Comparação espacial .....	46
Capítulo 3 Metodologia .....	49
3.1. Área de estudo .....	49
3.2. Visão geral da metodologia .....	51
3.3. Fontes de dados .....	52
3.3.1. Dados de pluviômetros .....	52
3.3.2. Base de dados da chuva estimados por satélite .....	54
3.4. Tratamento preliminar dos dados .....	54
3.4.1. Dados dos pluviômetros .....	54
3.4.2. Dados do TRMM .....	57
3.5. Comparação de dados pluviômetros x TRMM .....	58
3.5.1. Análise pontual .....	58
3.5.2. Análise agregada por bacia hidrográfica .....	59
3.5.3. Análise agregada por mesorregião .....	59
3.5.4. Análise das chuvas a partir da topografia .....	60

3.5.5. Procedimento de interpolação .....	61
3.5.6. Análise de correlação .....	61
3.5.7. Medidas de desempenho.....	62
3.5.8. Análise de sazonalidade .....	62
3.5.9. Espacialização de resultados .....	63
Capítulo 4. Resultados.....	64
4.1. Análise do regime de chuva na Paraíba.....	64
4.1.1. Correlação da chuva estimada pelo satélite TRMM e a chuva observada em pluviômetros.....	64
4.1.2. Medidas de desempenho.....	78
4.2. Análise agregada no espaço.....	81
4.2.1. Análise por sub-bacias.....	81
4.2.2. Análise por mesorregiões .....	87
4.3. Análise das chuvas observadas e estimadas a partir da topografia.....	90
Capítulo 5. Conclusões e recomendações.....	98
ANEXOS .....	108

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: O processo de colisão-coalescência.....	21
Figura 2: Representação esquemática da aquisição de dados pelo sensor de microondas (TMI, varredura verde), radiômetro (VIRS, varredura amarela) e radar meteorológico (PR, varredura vermelha) do satélite TRMM.....	31
Figura 3: Índice de chuva urbana para os conjuntos de dados anuais (à esquerda) e verão (à direita). A grade de pontos foi selecionada aleatoriamente a partir dos cenários contrário ao vento, zona urbana e na direção do vento.....	33
Figura 4: Variação sazonal da precipitação média anual na bacia hidrográfica do rio .....	36
Figura 5: Médias mensais para as principais bacias hidrográficas da América do Sul, (a) Bacia do Rio Amazonas, (b) Bacia do Rio Orinoco, (c) Bacia do Rio Tocantins/Araguaia, (d) Bacia do Rio São Francisco, (e) Bacia do Rio Paraná/Prata e (f) Bacia dos Rios da Patagônia.....	38
Figura 6: Valores médios da precipitação anual (mm) para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010. (a) Valores médios da precipitação anual estimada a partir dos dados INMET/CPTEC; (b) Valores médios da precipitação anual estimada pelo TRMM; e (c) Valores médios da precipitação anual ajustados pelas regressões regionais e aplicados aos dados do TRMM.....	39
Figura 7: Correlação entre os dados de precipitação observados e os dados TRMM. As correlações foram plotadas em relação à latitude dos locais de chuva observada.....	40
Figura 8: Mapa de localização de 230 estações pluviométricas na Austrália. A figura também mostra cinco regiões consideradas para a validação cruzada (L-R-OCV) (números 1-5).....	41
Figura 9: (a) REMQ da L-1-OCV e da junção da L-1-OCV com TRMM em cada local de pluviômetro em média ao longo do período 1998-2007. Os valores REMQ são traçados em relação à longitude dos locais de calibre de chuva; (b) REMQ da LR-OCV e da junção da LR-OCV e TRMM 3B42.....	42
Figura 10: Ciclo anual de precipitação dividido por regiões: (a) litoral, (b) Seridó e (c) Oeste.....	43
Figura 11: Esquema da tabela de contingência com análise comparativa dos acertos e erros nas estimativas da ocorrência (“sim”) e não ocorrência (“não”) de um determinado evento.....	46
Figura 12: Localização da Paraíba.....	49
Figura 13: Pluviometria média anual da Paraíba.....	51
Figura 14: Fluxograma da metodologia.....	52
Figura 15: Postos pluviométricos e pontos do TRMM sobre a Paraíba.....	53
Figura 16: Porcentagem de postos pluviométricos da AESA sem falhas nos dados diários para cada mês do período 1998 – 2012.....	55
Figura 17: Espacialização dos postos com falhas considerando dados diários.....	57
Figura 18: Esquema de conversão dos dados do TRMM.....	58

Figura 19: Procedimentos de interpolação para comparação de dados.....	58
Figura 20: Dados topográficos provenientes do SRTM para o Estado da Paraíba.....	60
Figura 21: Isoetas da precipitação média anual no período 1998 – 2011, a partir de dados pluviométricos da AESA e de dados do satélite TRMM.....	64
Figura 22: Correlação entre as precipitações estimadas pelo satélite TRMM e as precipitações observadas em pluviômetro, onde A representa a chuva diária, B acumulados de 3 dias, C acumulados de 7 dias e D acumulados mensais.....	65
Figura 23: Correlação linear utilizando a interpolação do pluviômetro para pontos da grade do satélite TRMM na Paraíba.....	67
Figura 24: Correlação de chuva diária entre pluviômetro e dados do TRMM separadamente por mês do ano.....	69
Figura 25: Correlação entre chuvas diárias observadas e estimadas por mês.....	70
Figura 26: Correlação entre os dados estimados pelo TRMM e observados em pluviômetros para acumulados de 3 dias separados por mês do ano.....	71
Figura 27: Correlação entre os dados estimados e observados para acumulados de 3 dias separados por mês do ano.....	72
Figura 28: Correlação entre os dados estimados pelo TRMM e observados pela AESA para acumulados de 7 dias separados mês do ano.....	74
Figura 29: Correlação entre dados de satélite e dados de pluviômetros para acumulados de 7 dias separados por mês do ano.....	75
Figura 30: Correlação entre os dados estimados pelo TRMM e observados em pluviômetros para acumulados mensais.....	76
Figura 31: Correlação entre os dados estimados pelo TRMM e observados em pluviômetros para acumulados mensais.....	77
Figura 32: Análise espacial do Erro Médio Absoluto e da Raiz do Médio Quadrático para chuva diária.....	78
Figura 33: Análise do EMA e do REMQ para acumulados de 3 dias.....	79
Figura 34: Análise do EMA e do REMQ para acumulados de 7 dias.....	80
Figura 35: Análise do EMA e do REMQ para a chuva mensal.....	80
Figura 36: Correlação entre chuva observada (PLU) e chuva estimada pelo satélite TRMM (SAT) para cada sub-bacia da Paraíba (chuva diária).....	83
Figura 37: Correlação entre chuva estimada e observada para cada sub-bacia da Paraíba levando em consideração acumulados de 3 dias.....	84
Figura 38: Correlação entre chuva estimada pelo TRMM e observada pelo pluviômetro para cada sub-bacia da Paraíba levando em consideração acumulados de 7 dias.....	84
Figura 39: Correlação entre chuva estimada e observada para acumulados mensais.....	85
Figura 40: Chuva média mensal obtida dos dados de pluviômetros da AESA e das estimativas do TRMM para cada sub-bacia.....	86

Figura 41: Correlação entre valores estimados pelo satélite (SAT) e valores observados (PLU) de chuvas diárias, acumuladas de 3 dias, de 7 dias e mensal, nas mesorregiões da Paraíba; linha de tendência (linha cheia); linha de proporção 1:1 (linha tracejada).....	88
Figura 42: Coeficiente de correlação por mês entre chuva diária estimada e observada nas mesorregiões da Paraíba.....	89
Figura 43: Coeficiente de correlação entre chuva mensal estimada e observada nas mesorregiões da Paraíba.....	90
Figura 44: Perfis de chuva anual observada e estimada de acordo com a topografia do Estado da Paraíba.....	91
Figura 45: Perfil da chuva média mensal estimada e observada para o período de 1998 a 2011.....	93
Figura 46: Correlação entre chuva diária estimada pelo TRMM e observada de postos localizados na latitude próximo de 7° no Estado da Paraíba (1998 – 2011).....	94
Figura 47: Correlação entre chuva estimada e observada para acumulados de 3 dias em postos localizados na latitude próximo de 7° no Estado da Paraíba (1998 – 2011).....	95
Figura 48: Correlação entre chuva estimada e observada para acumulados de 7 dias em postos localizados na latitude próximo de 7° no Estado da Paraíba (1998 – 2011).....	96
Figura 49: Correlação entre chuva estimada e observada para acumulados mensais em postos localizados na latitude próximo de 7° no Estado da Paraíba (1998 – 2011).....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número de dados por período acumulado e tipo de série (completa ou geral; separada por mês do ano).....	56
Tabela 2: Principais Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba.....	59
Tabela 3 Número de postos por mesorregião .....	60
Tabela 4: Medidas de desempenho entre os dados de chuva estimada e observada nas sub-bacias do Estado da Paraíba (EMA e REMQ dados em mm; r é coeficiente de correlação de Pearson) .....	82
Tabela 5: Medidas de desempenho entre os dados de chuva estimada e observada nas mesorregiões do Estado da Paraíba (EMA e REMQ dados em mm; r é coeficiente de Pearson).....	87

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação de Interpolação pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância.....	25
Equação 2: Equação de Interpolação pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância.....	61
Equação 3: Equação para o cálculo do coeficiente de Pearson.....	61
Equação 4: Equação do Erro Médio Absoluto .....	62
Equação 5: Equação da Raiz do Erro Médio Quadrático .....	62

## LISTA DE SIGLAS

- AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba.
- AMSR – The Advanced Microwave Scanning Radiometer.
- AMSU – Advanced Microwave Sounding Unit.
- CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba.
- CERES - Sensor de Energia Radiante da Superfície Terrestre e das Nuvens.
- CMAP - Merged Analysis of Precipitation.
- CMORPH - Center Morphing Method.
- EMA - Erro Médio Absoluto.
- EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural da Paraíba.
- GOES 8 - Geostationary Operational Environmental Satellite – 8.
- CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos.
- GPCP - Global Precipitation Climatology Project.
- IDF – Intensidade – Duração – Frequência.
- INMET/CPTEC – Instituto Nacional de Meteorologia.
- JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency.
- LIS - Sensor para Imageamento de Relâmpagos.
- MG – Minas Gerais
- MGB - Modelo Hidrológico Distribuído
- NASA - National Aeronautics and Space Administration
- NCEP/NCAR - National Center for Atmospheric Research
- PLU - Pluviômetro
- PR - Radar de Precipitação
- REM - Radiação Eletromagnética
- REMQ – Raiz do Erro Médio Quadrático.
- SAT – Satélite.
- SP – São Paulo.
- SRO - Sensoriamento Remoto Orbital.
- SRTM - Shuttle Radar Topography Mission.
- SSM / I – Spatial Sensor Microwave/Imager.
- TIROS - Television and Infra Red Observation Satellite.
- TMI - Imageador de microondas.
- TMI - Sensor de Microondas.

TPMA – TRMM Measurement Precipitation Analysis

TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission

UTC - Coordinated Universal Time ou Hora de Greenwich

VIRS - Radiômetro no Visível e no Infravermelho

## Capítulo 1. Introdução

As pesquisas sobre precipitação pluvial estabeleceram a concepção de que a chuva se configura num elemento de grande variabilidade tanto no aspecto temporal quanto no aspecto espacial. No entanto, o entendimento do regime de chuvas de uma região, que contribui, dentre outras coisas, para a previsão de enchentes e dos períodos de estiagens, favorecendo a compreensão da vazão de rios, da umidade do solo, da temperatura, entre outros, têm se configurado num elemento fundamental para a tomada de decisões que interferem diretamente na vida das pessoas em todas as regiões do mundo.

Esses estudos, em sua grande maioria, têm sido desenvolvidos a partir de metodologias baseadas na observação de dados registrados em pluviômetros. Mas, de acordo com Collischonn (2006), Nóbrega *et al.* (2008), Pereira *et al.* (2013), entre outros, dependendo da região espacial e da distribuição dos pluviômetros, estudos com essas características podem apresentar um baixo grau de confiabilidade. Um exemplo disso é o caso do Brasil onde existem várias bacias de grande porte que são, quase sempre, caracterizadas por escassez de postos pluviométricos e as regiões dessas bacias são, em boa parte, de difícil acesso, impossibilitando a medição de chuva ou mesmo a instalação desses instrumentos.

Em áreas extensas como algumas bacias hidrográficas do Brasil, a distribuição das estações meteorológicas não abrange todo o território. Além disso, precipitações isoladas que podem ocorrer em determinada área da bacia hidrográfica e que não são contabilizadas nas estações meteorológicas mais próximas, podem influenciar significativamente na análise do escoamento superficial, do déficit hídrico e até do balanço de energia (PEREIRA *et al.*, 2013).

Esses aspectos limitantes pertinentes às regiões espaciais fizeram com que os estudos sobre precipitações pluviométricas fossem repensados e que se buscassem novos elementos, técnicas ou aparelhos para dar maior credibilidade às conclusões delineadas com as pesquisas sobre chuvas. Nesse contexto, associadas ao desenvolvimento tecnológico, surgiram as metodologias baseadas em Sensoriamento Remoto (SR) que, na essência, são produtos ambientais derivados de sensores orbitais e que podem auxiliar na extração de informações do volume de chuva de determinada região. Esses elementos são constantemente empregados no entendimento do ciclo hidrológico e de seus efeitos na circulação atmosférica, nas alterações no calor latente e sensível e nas mudanças climáticas globais e regionais (FRANCHITO *et al.*, 2009).

Outra vantagem do uso do sensoriamento remoto consiste no fato de que os sensores a bordo de satélites fornecem informações rápidas e precisas (PERREIRA *et al.*, 2013) Com isso, o uso de satélite em diversas áreas do conhecimento tem se tornado uma prática cada vez mais frequente. No caso do uso do solo e da cobertura vegetal, estas técnicas contribuem de modo expressivo para a rapidez, eficiência e confiabilidade nas análises que envolvem os processos de degradação da vegetação natural, fiscalização dos recursos florestais, desenvolvimento de políticas conservacionistas.

Na agricultura o uso de sensores a bordo de satélites pode fornecer informações como a temperatura do solo e identificação de estresse hídrico de determinadas culturas, além de realizar monitoramentos detalhados do desenvolvimento de algumas culturas. De acordo com Sanches (2005) essas novas tecnologias garantem elevados ganhos ao gerenciar adequadamente a produção agrícola com base em informações de previsão de tempo e clima, açãoamento de defesa civil no caso de desastres, o que permite ações moderadoras de impactos e previsão de safras.

No Brasil, estudos já realizados mostram que o país ainda não possui radares meteorológicos suficientes para obter boas estimativas da distribuição espacial da chuva. No entanto, de acordo com os estudos de Collischonn (2006), embora os valores de intensidade e lâmina precipitada estimada pelos diversos satélites ainda não sejam adequadamente validados pelos valores pontuais medidos em campo, a grande vantagem das técnicas de estimativa de precipitação por imagens de satélite é a excelente cobertura da distribuição espacial da chuva. Em uma área com alguns pluviômetros instalados poderiam ser feitas correções nas estimativas de chuva por satélite baseadas nas medições em terra.

Os estudos sobre as estimativas de chuva utilizando os registros de satélite podem trazer informações significativas para a realização de pesquisas ambientais que tenham como objetivo a compreensão detalhada da variação espaço-temporal de precipitação. Esse processo traz contribuições para o planejamento de ações se configurando em benefícios para a sociedade, em áreas como agricultura, pesca, navegação, abastecimento d'água, análise do regime de vazões de rios, riscos de enchentes, dentre outros.

A importância do uso do SR em estudos sobre precipitação está substanciada na quantidade de pesquisas já desenvolvidas tanto no Brasil (Silva *et al.* 2012, Paz e Collischonn 2011, Conti 2002, Mello *et al.* 2008, Pereira *et al.* 2013, entre outros), como em nível mundial (Liu e Peter 2013, Dubreuil *et al.* 2000, Bellerby *et al.* 2000, Shepherd e Burian 2003, Layberry *et al.* 2006, entre outros). Além disso, no quantitativo das pesquisas, observa-se:

uma variedade de técnicas aplicadas na comparação de dados estimados com dados coletados; uma variedade de extensão das áreas pesquisadas, com estudos sobre pequenas bacias, sobre mesorregiões, sobre países; diversas séries temporais analisadas, demarcadas em estudos mensais, anuais, de uma década, dentre outros; diferentes quantitativos de postos pluviométricos; vários tipos de satélites utilizados.

Tomando como base a importância do SR para as diversas áreas relacionadas às precipitações pluviométricas, esse estudo analisa o desempenho das estimativas de chuvas do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) no Estado da Paraíba. Assim, o principal objetivo foi avaliar a destreza das estimativas de chuva do sensor em representar a variabilidade espaço-temporal da precipitação na Paraíba.

A significância da pesquisa está caracterizada pelo fato de ainda não ter havido investigações semelhantes na área de estudo e pelos benefícios que os resultados podem trazer para o direcionamento de ações relativas às atividades ligadas ao regime de chuvas do Estado. Assim, esse estudo pode ser de grande importância, principalmente se os resultados mostrarem que o satélite tem boa performance para reproduzir as chuvas observadas em pluviômetros. Pois, isso favorecerá a tomada de decisões e a execução de ações relativas a questões sobre a precipitação, uma vez que se terá a certeza da credibilidade, confiabilidade ou similaridade apresentada pelo satélite ao estimar tais chuvas.

Como o estudo é desenvolvido considerando quatro categorias, quais sejam, a análise pontual (centrada em cada pluviômetro), a análise por sub-bacia do Estado, a análise por mesorregião e a análise pelo perfil topográfico, o uso das estimativas do TRMM na Paraíba poderá beneficiar vários setores em diferentes escalas espaciais. Na economia, através do conhecimento da distribuição (quantidade e localização) das chuvas no Estado, será possível desenvolver ações que objetivem reduzir ou eliminar os vícios de desperdícios dos recursos hídricos.

Para a sociedade, o conhecimento da estimativa sobre sub-bacias e mesorregiões pode trazer importantes benefícios para o planejamento hídrico e agrícola na Paraíba. A partir desse contexto será possível planejar ações relativas ao uso adequado da água para abastecimento, para a agricultura extensiva ou de subsistência, entre outros.

O setor agrícola também se beneficiará das informações obtidas na pesquisa, haja vista que uma série de medidas de planejamento pode ser colocada em prática tornando as atividades do setor mais produtivas. Um exemplo disso é a escolha adequada do tipo de cultivo em relação à região do Estado. Ou seja, com os resultados sobre estimativas de chuva

a partir do satélite pode-se decidir que produtos agrícolas com elevada exigência hídrica não devem ser cultivados em algumas partes da região estudada onde se observou uma tendência para baixos índices pluviométricos e que espécies serão melhores utilizadas em localidades onde foram observados maiores índices de chuva.

Além disso, essa pesquisa demarca o início de novos estudos sobre precipitação na área considerada. Como se sabe qualquer estudo científico pode ser melhorado ou ampliado a partir da inserção de novas técnicas, novos procedimentos de análises, novas delimitações territoriais, entre outros.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a destreza das estimativas de chuva do satélite TRMM em caracterizar a variabilidade espaço-temporal de precipitação no Estado da Paraíba.

#### **Objetivos Específicos:**

- Avaliar desempenho das estimativas do TRMM em reproduzir o padrão de chuva em pluviômetros.
- Avaliar performance das estimativas do TRMM em reproduzir variação espacial de precipitação no Estado da Paraíba.
- Avaliar a chuva média estimada pelo TRMM sobre as mesorregiões e todas as bacias hidrográficas da Paraíba.
- Relacionar estimativas de chuva do TRMM e da AESA com a topografia no Estado da Paraíba.

## **Capítulo 2. Fundamentação Teórica**

### **2.1. O fenômeno precipitação**

Nos estudos da área hidrológica há uma unanimidade de entendimentos com relação à precipitação qualificando-a como um dos elementos meteorológicos de grande significância e de maior influência sobre as condições ambientais. Além do efeito direto sobre o balanço hídrico, a precipitação exerce influência indireta em muitas outras variáveis do ambiente. Na temperatura do ar e do solo, na umidade relativa do ar e a radiação solar que, no conjunto, atuam como fatores básicos para crescimento e desenvolvimento das plantas; na hidrologia que influencia no regime de cheias e vazão dos rios; na produção agrícola que tem consequências diretas para o planejamento e desenvolvimento dos cultivos. Essas características indicam que estudar a precipitação de uma dada região se configura como uma tarefa importante, tendo em vista a sua significância para diversos fenômenos.

Em termos quantitativos, a precipitação é considerada no estudo hidrológico como o volume de água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. No entanto, pode-se conceituá-la, de modo mais geral, como todo o processo ambiental que culmina com o acúmulo de água no solo proveniente da atmosfera. Essa definição indica que existem diferentes formas de precipitação: a neblina, a chuva, o granizo, o orvalho, a geada e a neve, dentre outras. De acordo com Bertoni e Tucci (2009, p.177) o que diferencia os tipos de precipitação é o estado em que a água se encontra. Dentre as diferentes formas de precipitação, a chuva, que também é considerada como precipitação pluvial, é o tipo mais importante, pois ela tem maior significância nos processos de produção de escoamento e estes se configuram em elementos importantes nos estudos hidrológicos.

O estudo da precipitação pluvial<sup>1</sup> se constitui como fundamental, pois ele é tomado como ponto de partida que se podem analisar processos como o escoamento superficial direto, a infiltração, a evaporação, a transpiração, a recarga de aquíferos, a vazão de bacias dos rios, entre outros. Assim, o total precipitado em uma dada região é um dado básico e indispensável no estudo do ciclo hidrológico.

As principais características da precipitação são a duração, o volume total precipitado, suas distribuições temporais e espaciais. A precipitação pluvial é o elemento que apresenta a maior variabilidade mensal e anual quando se compara uma região com outra em termos de processos hidrometeorológicos. No semiárido nordestino, por exemplo, essa irregularidade

---

<sup>1</sup> A partir deste ponto, usar-se-á apenas o termo precipitação, mas, se estará considerando a precipitação pluvial.

espacial e temporal (intra e interanual) é ainda maior, basta observar que a estação chuvosa dura cerca de três a quatro meses, enquanto que a estação seca persiste de cinco a oito meses.

Por causa dessa variação no espaço e no tempo, a chuva é uma das variáveis atmosféricas mais difíceis de estimar. De acordo com Collischonn (2006), pluviômetros espalhados pela superfície terrestre coletam informações precisas da precipitação somente para uma pequena área localizada no entorno do dispositivo. Esse fator indica que o monitoramento detalhado sobre extensas áreas exige uma densa rede de pluviômetros, o que, em certos casos, torna-se inviável em virtude das áreas de difícil acesso como é o caso da floresta amazônica e das regiões de grandes montanhas.

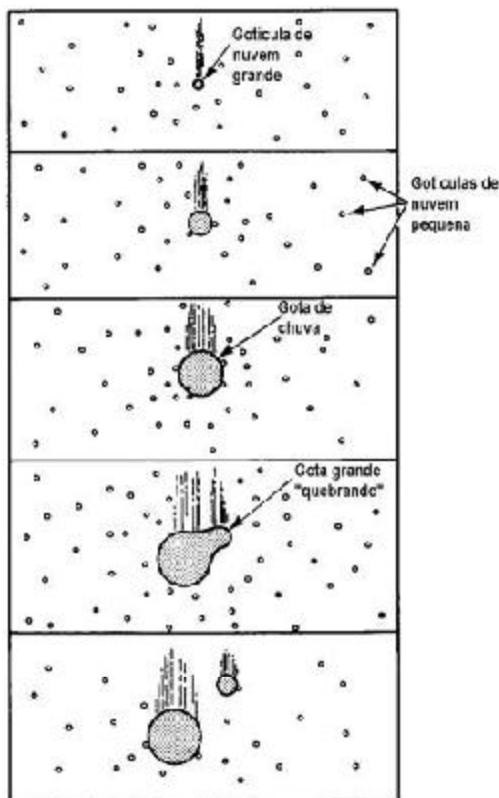
Convém, antes de adentrar-se nas questões relativas às estimativas de precipitações pluviais, buscar um entendimento sobre o processo de formação da precipitação, tendo em vista que há uma classificação dessas chuvas de acordo com especificidades convencionadas pela hidrologia e o seu conhecimento é importante para a correta interpretação de alguns resultados deste trabalho.

A origem de qualquer forma de precipitação está no vapor de água contido na atmosfera que se constitui num reservatório potencial de água. Esse vapor de água ao condensar-se possibilita o crescimento das gotículas e, ocorrendo determinadas condições, dá-se origem ao processo de precipitação. O fato da reunião de condições favoráveis indica que existem nuvens que não produzem chuvas.

De acordo com Bertoni e Tucci (2009), para as gotas de água precipitarem é necessário que tenham um volume tal que seu peso seja inferior às forças que as mantém em suspensão, adquirindo, então, uma velocidade de queda superior aos componentes verticais ascendentes dos movimentos atmosféricos.

As gotas de chuva possuem diâmetros variando de 0,5 a 2,0 mm, com um valor máximo de 5,0 a 5,5 mm. Quando a gota cresce até atingir um diâmetro de 7,0 mm, sua velocidade de queda será de 9m/s. Com essa velocidade, a gota se deforma (Figura 1) e se subdivide em gotas menores devido à resistência do ar (MOL, 2005; BERTONI e TUCCI, 2009). Esse processo de deformação é definido por Collischonn (2006) como colisão-coalescência. Portanto a origem das precipitações está diretamente ligada ao crescimento das gotículas.

**Figura 1: O processo de colisão-coalescência.**



**Fonte:** Luigens e Tarbuck, 1989; apud Collischonn, (2006).

As precipitações são classificadas em convectivas, orográficas e frontais ou ciclônicas. Bertoni e Tucci (2009), Mol (2005) e Collischonn (2006) definem esses tipos de precipitações da seguinte forma:

- As **precipitações convectivas** são provocadas pela ascensão brusca do ar úmido aquecido nas proximidades do solo. Essa ascensão ocorre devido à menor densidade do ar aquecido junto ao solo em relação ao ar mais frio das camadas superiores. O ar úmido em ascensão poderá atingir o seu nível de condensação com a formação de nuvens e muitas vezes precipitações. Esse tipo de precipitação é comum nas regiões equatoriais e, eventualmente, no verão das áreas temperadas.
- As **precipitações orográficas** são originadas quando ventos quentes e úmidos, geralmente procedentes do oceano para o continente, encontram barreiras montanhosas, elevam-se e se resfriam havendo a condensação do vapor. São precipitações de menor intensidade e de grande duração em pequenas áreas.

- As **precipitações frontais ou ciclônicas** provêm do encontro de massas de ar quentes e frias. Nas regiões de convergência da atmosfera, as massas úmidas de ar quente são violentamente impulsionadas para as camadas superiores da atmosfera, resultando no seu resfriamento e na consequente condensação do vapor, de forma a produzir chuva. As precipitações são de grande duração e intensidade médias e atingem grandes áreas. Esse tipo de precipitação ocasiona enchentes em grandes bacias.

## 2.2. Medição de chuva em campo

A precipitação é amplamente reconhecida como a variável climatológica mais importante na região tropical. Para Silva *et al.* (2012), uma melhor compreensão da variabilidade da precipitação auxilia no planejamento da ação de combate à degradação do meio ambiente, fornecendo elementos para a preservação e desenvolvimento sustentável de uma região de modo a lidar com episódios adversos. A compreensão do processo de precipitação, em especial a análise da quantidade de chuva precipitada, depende, dentre outros elementos, da medição realizada em campo.

Tradicionalmente, a chuva é medida na superfície terrestre por sistemas pontuais instalados na área do terreno, como redes de pluviômetros e pluviógrafos. Os dados de precipitação desses postos pluviométricos são colhidos periodicamente para uma posterior verificação quantitativa da chuva. Em pequenas escalas, o uso de medidas de pluviômetros individuais pode ser apropriado. No entanto, em escalas maiores, é necessário chamar a atenção para a representação adequada dos padrões espaciais da precipitação, que geralmente são interpolados a partir de medições pontuais (WAGNER *et al.*, 2012). Esses dados pontuais estão suscetíveis a uma série de fatores naturais inerentes à localidade do posto, além da influência antrópica na mensuração e na manipulação dos dados obtidos.

O estudo do ciclo diário de chuva exige um conjunto de dados de precipitação com alta amostragem espacial e temporal, fato que é completamente impossível, devido, principalmente, às dificuldades de instalação e manutenção de redes densas de pluviômetros em regiões de difícil acesso como florestas e montanhas. Vários estudos apontam que as medições observadas em pluviômetros têm forte influência local e não capturam completamente a variabilidade espacial da chuva Collischonn (2006), Pereira *et al.* (2013), Wagner *et al.* (2012), entre outros.

Com a prática de extração/interpolação admite-se uma estimativa de precipitação para áreas mais distantes dos pontos medidos, sem qualquer indício físico real sobre a quantidade de precipitação verdadeiramente ocorrida (CONTI, 2002). Essa forma de analisar a distribuição do volume precipitado com informações pontuais frequentemente induz a erros, gerados por fatores como a grande distância entre as estações. Esse aspecto de imprecisão ainda fica mais evidenciado no caso de bacias transfronteiriças, quando as informações de precipitação são limitadas, é o caso, por exemplo, de países vizinhos. Já no caso de precipitação sobre mares e oceanos, a informação é praticamente indisponível o que torna os estudos ainda mais complexos e falhos (COLLISCHONN *et al.*, 2007).

Nas regiões do mundo onde as medições de precipitações são escassas a interpolação se configura como uma metodologia importante, porém de difícil execução. Conti (2002) e Wagner *et al.* (2012) afirmam que existe uma variedade de técnicas e métodos de interpolação de dados, variando de técnicas simples, tais como média aritmética, polígonos de Thiessen, esquemas de ponderação de distância inversa até processos mais complexos e abordagens de computação intensiva, como a geoestatística. Essas pesquisas, apesar da distância temporal entre ambas, apontam para uma mesma questão que cada vez mais se torna comum nessa área de estudos: as diversas possibilidades de interpolar dados de chuvas. Nas abordagens mais complexas costumam-se usar informações estáticas adicionais (elevação) ou dinâmicas (radar de chuva) covariáveis que estão disponíveis como conjuntos de dados espacialmente distribuídos.

Dentre os diversos métodos existentes e utilizados, Conti (2002) considera três métodos de interpolação como os mais significativos que, segundo ele, interpolam/extrapola a precipitação, fazendo uso de critérios matemáticos e geográficos, para a obtenção mais próxima possível da precipitação verdadeiramente ocorrida sobre uma área a partir de pluviômetros distribuídos sobre a mesma: o método da média aritmética, o método de Thiessen e o método das isoetas.

O método da média aritmética atribui pesos idênticos a todos os postos pluviométricos disponíveis, sem levar em consideração a área de abrangência de cada um, bem como as diferenças climáticas e topográficas (TUCCI e BERTONNI, 2009). Esse método ignora as variações geográficas da precipitação, portanto é aplicável apenas em regiões onde isso possa ser feito sem incorrer grandes erros, como áreas planas e com cobertura de postos de medição bastante densa.

O método de Thiessen considera a não uniformidade da distribuição espacial dos postos, mas não leva em conta o relevo da bacia. Esse método consiste em ligar os postos por segmentos de retas; traçar retas mediatriizes em cada segmento que liga dois postos; prolongar cada mediatriz até o encontro de outra. O polígono é formado pela região limitada por duas mediatrizes e pela linha delimitadora da bacia.

O método das isoietas, descrito por Bertoni e Tucci (2009) consiste em traçar isoietas (linhas de igual precipitação) no mapa dos postos da região de interesse; calcular para cada par sucessivo de isoietas o valor médio da altura de chuva precipitada; planimetrar as áreas entre isoietas sucessivas; calcular a média ponderada dos valores de chuva precipitada.

Esse método tende a gerar melhores resultados quando existe uma proximidade entre os postos pluviométricos, além da necessidade de haver uma densa rede de postos na área analisada.

Percebe-se assim que a margem de confiança em um estudo sobre quantidade de precipitação depende de muitas variáveis como o relevo, a distância entre os postos de observação, o tamanho da área de abrangência considerada para o posto, a densidade da rede de pluviômetros e também a técnica ou método de interpolação utilizado para o estudo. Medir chuva com precisão tem sido um desafio para a comunidade de pesquisa predominantemente por causa de sua alta variabilidade no tempo e espaço (GOURLEY *et al.*, 2010). Nos países em desenvolvimento, e em especial no Brasil devido a sua extensão territorial, é notória a pequena quantidade e relativa má distribuição espacial dos postos pluviométricos. Hoje se tem como certa a necessidade de metodologias que levem em consideração essas variáveis limitadoras, para que se tenham resultados mais concisos sobre estimativas de precipitação.

Uma possibilidade de superação desse problema é a instalação, em solo, de radares meteorológicos. Nestes, a taxa de precipitação em um determinado ponto é correlacionada à intensidade de um sinal de retorno irradiado pelas gotas de chuva e a distância do ponto ao radar é correlacionada ao tempo de retorno do sinal Collischonn (2006). Esses aparelhos oferecem estimativas espaciais da precipitação sobre grandes áreas e em tempo aproximadamente real. No Brasil o número de radares instalados tem crescido consideravelmente. De acordo com Collischonn (2006), já em 2002 existiam 10 desses radares instalados na Bacia Amazônica. Mas, tal autor ressalta que esse número cobre apenas uma pequena fração da bacia. Segundo o referido autor, o número de radares meteorológicos necessários para cobrir todo o país seria de 140 aparelhos, o que, em curto prazo, requer um investimento financeiro alto para um país em desenvolvimento realizar.

Considerando-se os fatores limitadores nas investigações sobre precipitação, conforme descritos antes, seja qual for a metodologia de campo utilizada para a coleta de dados sobre chuvas, faz-se necessário o uso de algoritmos matemáticos para que se possa dar uma interpretação plausível e uma estimativa mais próxima do real. Muitos estudos têm utilizado técnicas diversas, como o caso da pesquisa descrita por Wagner *et al.* (2012), onde testaram dois métodos estatísticos baseados em regressão e um método geoestatístico, usando duas covariáveis. Para ambos os métodos, a equação de regressão para a covariável foi usada para estimar as quantidades de chuva. Esta equação de regressão entre chuvas e covariáveis foi calculada para cada dia, utilizando o valor de precipitação média de um período de 3 dias antes e depois da interpolação.

Além dos métodos mencionados anteriormente (o método da média aritmética, o método de Thiessen e o método das isoetas), outra abordagem de interpolação de dados de chuva muito utilizada é o método do inverso do quadrado da distância. Com esse método é possível fazer a estimativa de precipitação em pontos distintos daqueles apresentados na coleta de dados. Os valores de precipitação, desconhecidos inicialmente para os pontos não apresentados, são calculados fazendo-se uso de uma média ponderada pelos inversos das distâncias entre o ponto objeto da interpolação e os pontos onde se tem a informação sobre os valores de precipitação. Para esse procedimento, são habitualmente utilizados os sistemas de informação geográfica e geoestatística. Apesar da possibilidade do uso de outras potências, regra geral utiliza-se a potência de expoente 2 (dois) no algoritmo de interpolação, fato que faz o processo ser denominado de “método de interpolação pelo inverso do quadrado da distância”.

Portanto, o processo de interpolação pelo inverso do quadrado da distância baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores. Dessa forma atribui maior peso para as observações mais próximas do que para as mais distantes.

Considerando-se  $P$  um ponto qualquer no espaço, um conjunto de pontos  $P_i$ , com  $i = 1, 2, 3, 4, \dots$ , onde se tem os valores de precipitação e  $d_{iP}$  a distância entre  $P_i$  e  $P$ , o valor da precipitação no ponto  $P$  será dado por:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_{iP}^2} P_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_{iP}^2} \right)} \quad (\text{Eq.1})$$

Esse procedimento de interpolação é bastante utilizado nos estudos sobre precipitação. Como vantagens dessa técnica, de acordo com Mello *et al.* (2003), podem-se destacar os seguintes fatos: de fácil entendimento matemático, disponível em diversos *softwares*, bom para analisar variações de pequena amplitude entre os dados irregularmente distribuídos. Sua significância em pesquisas dessa natureza pode ser comprovada pelo grande número de estudos que fizeram uso desse método.

Collischonn (2007) utilizou o método do inverso do quadrado da distância para interpolar os dados de precipitação. Tanto os dados oriundos de pluviômetros quanto os de satélite foram interpolados para grades regulares, com resolução de 0,1° (aproximadamente 10 km). Jiménez (2011) também fez uso desse método para interpolar chuvas médias diárias, mensais, sazonais e anuais para a bacia Amazônica.

Medeiros (2007) ao analisar o efeito da variabilidade espacial da precipitação na modelagem do escoamento numa bacia experimental situada na região do semiárido Potiguar realizou o cálculo da precipitação na bacia baseando-se nos dados observados em cada um dos três postos de medição. Além disso, na análise do comportamento espaço-temporal da chuva admitiu a hipótese de que a variação da intensidade da chuva entre os postos obedecia a uma função linear. Assim, para determinar o peso de cada posto de medição em relação ao elemento, determinou a posição do centro de gravidade de cada plano em coordenadas geográficas e calculou o peso utilizando o método do inverso do quadrado da distância.

O método do inverso do quadrado da distância também foi utilizado por Santos e Silva *et al.* (2012), ao avaliar as estimativas de precipitação mensal fornecidas por duas fontes (TRMM e dados de pluviômetros) para o Estado do Rio Grande do Norte, no período de 1998 a 2008. Nesse estudo, calculou-se a média da precipitação medida e da precipitação interpolada para as estações de cada região considerada, analisando assim com base em três pares de séries.

### **2.3. Estimativa de chuva por sensoriamento remoto orbital (SRO)**

Para compreensão do processo de estimativa de chuva por SRO, deve-se primeiro buscar uma definição para Sensoriamento Remoto. De acordo com Levin (2000) o SRO pode ser definido como o processo no qual se faz uso dos sensores a bordo de satélites para observar, medir e registrar radiações eletromagnéticas refletidas e emitidas pela Terra e seu ambiente. A partir dos dados coletados, essa observação tem como objetivo a análise e extração de informações sobre diversas variáveis. Essa definição traz consigo um aspecto de

abrangência o que induz a se inferir que o SRO pode ser utilizado para diversos fins, como análises de temperatura, vegetação, precipitação, dentre outros. Os satélites meteorológicos são aparelhos, funcionando como veículos, que são colocados em órbita em torno da Terra, e que levam consigo sensores que detectam radiação eletromagnética a determinados comprimentos de onda permitindo monitorar alvos específicos na atmosfera terrestre.

O uso de SRO para estudos relativos a estimativas de chuvas tem crescido substancialmente nos últimos anos, o que levou a uma melhor compreensão das variações pluviométricas nos países que não possuem rede de observações satisfatória (LIU e PE TER, 2013; DUBREUIL *et al.*, 2000). Esse crescimento tem se dado paralelamente ao desenvolvimento de novos instrumentos tecnológicos que tornam os equipamentos mais complexos, no entanto, mais potentes e precisos, contribuindo sobremaneira para dar maior confiabilidade às análises realizadas.

Após algumas tentativas de monitoramento utilizando imagens visíveis, os estudos das precipitações por satélites passaram a ser realizados, particularmente, de duas formas: com utilização de dados do infravermelho e com dados de micro-ondas. Mais recentemente, métodos combinados, utilizando simultaneamente os dois tipos de dados, são utilizados, conforme destacam Bellerby *et al.* (2000). Outro elemento significativo para a utilização do SRO em estudos sobre chuvas é a possibilidade que se tem de observação em qualquer parte da Terra e em pequenos intervalos de tempo, fatos que não são possíveis a partir de outras técnicas como o uso de medidores em superfície.

Apesar das análises oriundas do SRO ainda apresentarem imprecisões, quando associadas a outras técnicas se configuram em elementos importantes nos estudos hidrológicos. Mello *et al.* (2008) num estudo de continuidade espacial de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais, enfatizam que um dos principais ramos de pesquisa em hidrologia e climatologia consiste da aplicação do geoprocessamento por meio da análise de técnicas para uma melhor interpolação espacial da chuva intensa. A prova da significância do SRO em estudos sobre chuvas está também no grande número de pesquisas já desenvolvidas ou em desenvolvimento em várias regiões do mundo que utilizaram ou utilizam o SRO.

### **2.3.1. Visão geral do SRO**

O sensoriamento remoto tem sido utilizado com mais frequência em estudos ambientais, em virtude da necessidade de monitoramento, compreensão e previsibilidade do clima. Além disso, também sua utilização é devido à preocupação com os impactos

ambientais causados pelas atividades do homem, seja em escala regional ou global. Dentre as várias aplicações do sensoriamento remoto, dar-se-á ênfase aos mecanismos utilizados na medição da hidrometeorologia (chuva) por meio de medições indiretas através dos sensores de satélite. Os satélites meteorológicos podem apresentar dois tipos principais de órbitas, a órbita geoestacionária e a órbita polar.

Satélites geoestacionários, assim denominam-se por serem colocados em uma órbita sobre o equador, posicionados em uma altitude aproximada de 35.800 km, de tal forma que o satélite tenha a mesma velocidade angular de rotação da Terra. Esse tipo de órbita é conhecido como órbita geossíncrona ou geoestacionária, e permite um frequente monitoramento de uma mesma região específica da Terra. Já os satélites de órbita polar situam-se em altitudes menores que os satélites geoestacionários, variando cerca de 800 a 1.200 km. Esses satélites possuem um movimento heliosíncrono, ou seja, o satélite passa numa determinada posição geográfica sempre sob as mesmas condições solares (hora solar) e promove uma órbita completa em torno de 102 minutos. O satélite passa pelo mesmo local uma vez a cada 12 horas (CONWAY, 1997).

Jiménez (2011) descreve que na maioria das vezes, o processo de análise do SRO tem como base a avaliação dos padrões de emissão e reflexão da radiação eletromagnética. Para Araújo (2006), quanto à fonte de radiação eletromagnética, o sensoriamento remoto é classificado como ativo ou passivo. No caso passivo, a energia utilizada provém de uma fonte natural. No caso ativo, um sistema emite energia em direção ao objeto para depois medir a parcela refletida sobre a sua superfície.

O SRO possui quatro elementos fundamentais para o seu desenvolvimento: o sensor, a fonte, o alvo e a radiação eletromagnética (REM) que é o elemento de ligação entre os demais. Para o estudo de recursos naturais a principal fonte radiação é o Sol. A hipótese para o uso com técnicas de sensoriamento remoto é a de que certas características espectrais e o padrão geográfico das imagens de satélites possuem uma relação de interdependência com os processos físicos das nuvens e indiretamente com as quantidades precipitadas sobre a superfície terrestre (CONTI, 2003).

### **2.3.2. Uso de estimativas de chuva por SRO**

Devido à imprecisão dos dados coletados através das redes de pluviômetros, gerada principalmente pelo número diminuto de aparelhos, a utilização de sensores remotos tem sido utilizada cada vez mais nos estudos sobre precipitação. Por esse motivo uma grande variedade

de produtos de estimativa de chuva por satélite está disponível na atualidade. Esses produtos possuem diversas resoluções temporais e espaciais que são disseminados, na grande maioria, com livre acesso pelas instituições desenvolvedoras.

As metodologias e algoritmos utilizados para a concepção de tais produtos estão inseridos no meio científico desde a década de 1960 com o lançamento do primeiro satélite meteorológico, o TIROS I (“Television and InfraRed Observation Satellite”) inicialmente, com estimativas feitas por meio de sensores infravermelhos e, nos dias de hoje, com estimativas feitas a partir de sensores microondas.

Na década de setenta, Barrett (1970) usou a técnica de indexação de nuvens que baseia-se em assumir uma taxa de precipitação para cada tipo de nuvem. Ele utilizou essa metodologia para estimar a precipitação mensal sobre a Austrália e suas vizinhanças. Arkin (1987) desenvolveu um método de estimativa de precipitação usando o canal infravermelho do GOES para quantificar a relação entre cobertura de nuvens e temperatura do topo da nuvem para quantificar o total de precipitação na superfície nos trópicos.

Mesmo levando-se em consideração as possíveis imprecisões dessa metodologia, diversas pesquisas apontam fatores positivos do uso dos sensores na previsão meteorológica e na estimativa de precipitação por SRO. Embora os dados provenientes de sensores remotos sejam estimativas e estejam sujeitos a erros de magnitude variável, conforme o sensor, a região e diversos outros fatores, o uso dessas estimativas tem duas grandes vantagens em relação ao uso de medição via redes de pluviômetros e pluviógrafos (COLLISCHONN e PAZ, 2011): (i) maior velocidade de obtenção e facilidade de disponibilização da informação, principalmente visando o uso em sistemas de alerta e controle de enchentes; (ii) produção da informação na forma de um campo espacial de precipitação que abrange grandes áreas.

De acordo com pesquisas realizadas por Conti e Mendes (2003), Araújo e Guetter (2007), Collischonn *et al.* (2007) e Nóbrega *et al.* (2008), entre outros, percebe-se que nas últimas três décadas foram alcançados avanços consideráveis nas pesquisas relacionadas ao uso do sensoriamento remoto da chuva por meio de satélites ambientais. Esses avanços aumentaram a disponibilidade e a qualidade das estimativas de chuva por satélite que passaram da categoria de tema de pesquisa para a categoria de produto operacional disseminado por entidades de hidrologia e meteorologia. Esses produtos de estimativa de chuva por satélite possuem diversas resoluções temporais e espaciais e são disseminados, na grande maioria, com livre acesso pelas instituições desenvolvedoras. Os sistemas sensores remotos como satélites geoestacionários produzem campos de precipitação observada que

idealmente podem ser utilizados, sozinhos ou em conjunto com dados de pluviômetros, para avaliar estimativas espaciais de chuva geradas por modelos numéricos de circulação da atmosfera.

## 2.4. Estimativas de chuva do sensor TRMM

### 2.4.1 Caracterização geral

Diversas pesquisas já foram realizadas sobre o uso de satélites para estimar chuva. Esses estudos podem ser classificados a partir de vários elementos: tipos de satélites, região, período, dentre outros. Dentre os satélites já estudados, o TRMM tem sido objeto de várias investigações por apresentar resultados satisfatórios em relação às previsões meteorológicas.

De acordo com Collischonn (2006); Jiménez (2011) entre outros, o TRMM é um projeto nascido de uma parceria entre duas agências espaciais a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dos Estados Unidos e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) do Japão, que foi lançado em 27 de novembro de 1997, e tem como o objetivo específico monitorar e estudar a precipitação nos trópicos, além de verificar como a mesma influencia o clima global.

Em uma análise da estrutura do TRMM e de suas especificidades Collischonn (2006) indica que o satélite possui órbita oblíqua não-heliossíncrona bastante baixa (inicialmente 350 km, desde 2001 cerca de 403 km), de forma que o período de translação é bastante curto 91 minutos (dando a volta a Terra 16 vezes por dia), permitindo resoluções espacial e temporal comparativamente altas.

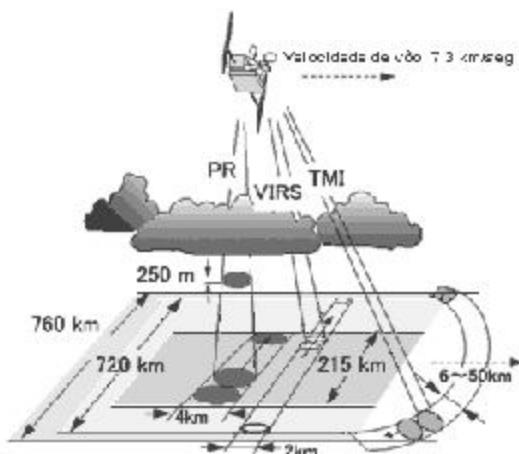
A bordo do satélite TRMM existem diferentes sensores, para diferentes bandas do espectro. A Figura 2 mostra uma representação esquemática do processo de aquisição de dados do TRMM. Os instrumentos a bordo do TRMM são: imageador de microondas (TMI), radar de precipitação (PR), radiômetro no visível e no infravermelho (VIRS), sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens (CERES), e sensor para imageamento de relâmpagos (LIS).

O TMI é o principal instrumento na medição de precipitação, obtida através da lei inversa de Planck e correlação com temperatura de topo de nuvem. O instrumento imageia com um ângulo NADIR de 49°, o que resulta em um ângulo de incidência na superfície terrestre de 52,8°. Para refinar as estimativas, afetadas pelas diferentes formações de nuvens, faz-se uso do PR, que é o primeiro radar meteorológico a ser lançado a bordo de um satélite, permitindo produzir mapas tridimensionais de estruturas precipitantes. Esse radar é capaz de

detectar taxas de precipitação muito baixas, da ordem de menos de  $0,7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  (KAWANISHI *et al.*, 2000 apud COLLISCHONN (2006)).

As grandezas primárias medidas pelos instrumentos TMI, PR e VIRS são, respectivamente, temperatura, potência e radiância. A partir de combinações sucessivas entre essas medidas e seu cruzamento com produtos de outros satélites, são obtidas as estimativas referentes à precipitação, cuja resolução temporal e espacial depende do refinamento da estimativa.

**Figura 2: Representação esquemática da aquisição de dados pelo sensor de microondas (TMI, varredura verde), radiômetro (VIRS, varredura amarela) e radar meteorológico (PR, varredura vermelha) do satélite TRMM.**



**Fonte:** Collischonn, (2006).

Dada à complexidade instrumental e a tecnologia avançada, o projeto TRMM gera diversos produtos (estimativas) de acordo com a combinação de instrumentos usada no algoritmo de cálculo. A grande vantagem do satélite TRMM em especial é sua alta resolução temporal, de 3 horas, e espacial, de  $0,25^\circ$ , na faixa entre  $50^\circ\text{S}$  e  $50^\circ\text{N}$ . Por outro lado, a desvantagem é a complexidade do algoritmo e o número de dados necessários para gerar o produto, de forma que os dados não são distribuídos de forma imediata. Mesmo assim, atualmente, as estimativas de um mês qualquer são disponibilizadas até o dia 15 do mês seguinte, prazo que pode ser considerado relativamente curto.

Dentre os produtos do projeto TRMM destaca-se o 3B42 que usa estimativas de precipitação por micro-ondas do TMI, corrigidas através de informações sobre a estrutura vertical das nuvens, obtidas do PR e gera estimativas de precipitação de 3 em 3 horas com

resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  graus. Esse produto tem sido utilizado em vários estudos, pelo fato de possuir uma resolução temporal e espacial adequada e por usar informações, tanto de sensores de infravermelho, como de microondas. Esses fatores fazem com que o TRMM seja considerado por vários autores (Collischonn, 2006; Layberry *et al.*, 2006; Nóbrega *et al.* 2008) como uma das estimativas mais confiáveis. Huffman *et al.* (2006) consideram que o produto (3B42) do TRMM é uma combinação ideal para estimativas de chuva por microondas em todos os sensores (TMI, SSM / I, AMSR e AMSU).

O projeto TRMM possui ainda um programa de validação em campo, para minimização das diferenças entre estimativas por satélite e medições no solo. Deve-se ressaltar que essa calibração com dados de campo é feita de forma bastante global e generalizada, podendo gerar estimativas locais pouco precisas (GONÇALVES, 2011). As estimativas são então convertidas para acumulados mensais por meio de interpolação para preencher as lacunas na continuidade temporal, decorrentes da baixa frequência de passagem, gerando o produto 3B 31.

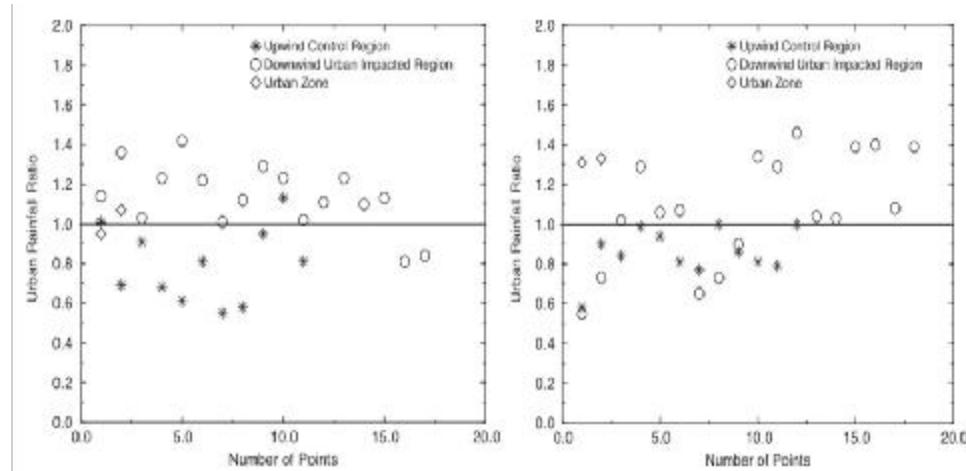
#### **2.4.2 Avaliações das estimativas**

Desde 1998 diversas pesquisas utilizando o satélite TRMM foram realizadas em diversas partes do Brasil e do mundo. Entre tais pesquisas podemos destacar o trabalho de Shepherd e Burian (2003) que utilizaram dados do satélite TRMM e de pluviômetros para fazer uma análise quantitativa e estatística da precipitação e verificar a hipótese de que a urbanização extensiva está provocando anomalias na precipitação na área de Houston (Texas, Estados Unidos). A análise foi realizada utilizando taxas médias mensais de precipitação (mm/h). Para uma análise mais detalhada, o valor da taxa de precipitação média em cada célula da grade do TRMM foi calculado para o período de janeiro de 1998 a maio de 2002. A Figura 3 mostra que para os casos anuais, 82% dos cálculos dos índices de chuva urbana (definido como a razão entre a taxa de precipitação média estimada e a taxa de chuva média observada na região durante o período de estudo), na direção contrária ao vento (barlavento), são inferiores a 1,0. Esta descoberta indica que os valores da precipitação estimada nessa região levando-se em consideração à direção contrária do vento são geralmente menores do que o valor da média de precipitação observada.

Por outro lado, no verão, 88% dos índices de chuva urbana a favor do vento são maiores do que 1,0, o que indica que a taxa de precipitação estimada da região, quando a

favor do vento, é provável que seja maior do que o valor da chuva observada. Os resultados mostram que 50% dos índices de chuvas urbanas anuais e de verão são maiores do que 1,0.

**Figura 3: Índice de chuva urbana para os conjuntos de dados anuais (à esquerda) e verão (à direita). A grade de pontos foi selecionada aleatoriamente a partir dos cenários contrário ao vento, zona urbana e na direção do vento.**



**Fonte: SHEPHERD e BURIAN, 2003.**

A pesquisa revelou a presença de anomalias na precipitação causadas pela interação entre o uso do solo urbano e os processos atmosféricos. O estudo também apresenta evidência de que as anomalias pluviais estão ligadas à região urbanizada e não exclusivamente às circulações da brisa do mar.

Su *et al.* (2008) também utilizaram chuvas mensais para avaliar as estimativas de precipitação do satélite TRMM na bacia do rio da Prata na América do Sul, com dados referentes a um período de nove anos (1998-2006). Eles constataram que essa área oferece um bom exemplo de um caso em que a utilização da precipitação derivada de satélite poderá ser benéfica para analisar áreas onde há pequena disponibilidade de pluviômetros. Foram avaliadas as estimativas de precipitação em comparação com a capacidade de infiltração variável de um modelo hidrológico semidistribuído na superfície da bacia. As estimativas do TRMM concordam bem com os dados calibrados em escalas de tempo mensais para todas as sub-bacias.

Usando médias anuais, Wagner *et al.* (2012) empregaram dados de precipitação estimada pelo TRMM, na cidade de Pune, na Índia, para analisar diferentes esquemas de interpolação/extrapolação de chuvas no que diz respeito à sua adequação para produzir

estimativas de precipitação espaciais em regiões de monção onde as medições de chuvas são escassas. As covariáveis consideradas mais adequadas e utilizadas no estudo para interpolação de chuva foram identificadas como sendo a distância na direção do vento da principal barreira orográfica e o padrão de precipitação médio anual, derivado a partir de dados de satélite adquirido a partir do TRMM. Percebeu-se que a escolha da covariável teve um impacto significativo na quantidade de precipitação e de escoamento, bem como sobre o curso temporal de eventos de escoamento. Os resultados mostraram que a decisão sobre o esquema de interpolação adequado não só deve basear-se na comparação com as medições de ponto, mas deve também ter a representatividade de uma rede de medição, bem como da distribuição espacial das chuvas interpoladas. A aplicação bem sucedida dos métodos de interpolação com base em regressão usando um padrão de alta resolução do TRMM como covariável é muito promissor, pois é transferível para outras regiões com dados escassos.

A estimativa de precipitação diária agrupada com dados de pluviômetros foi utilizada por Pereira Filho *et al.* (2002) apud Nóbrega (2008), que comparou a técnica convectiva estratiforme, derivada do satélite TRMM (sensor TMI), com estimativas de chuva a partir de radar e de uma rede de pluviômetros em São Paulo. Na área de cobertura do radar ( $\sim 300 \text{ km}^2$ ), foram comparadas estimativas de chuva diárias para os anos de 2001 e 2002 distribuídas em grade de  $4 \times 4 \text{ km}$ . Tais autores identificaram que nenhum dos três instrumentos é efetivo na representação da alta variabilidade espacial e temporal da precipitação naquela área de estudo, quando analisado separadamente. Por isso, ele recomenda técnicas estatísticas para integrar os três instrumentos.

Outro estudo onde foram utilizados dados do TRMM foi feito por Oke *et al.* (2009), que usaram métodos de estimativa geoestatística para estimar a precipitação diária na Austrália. Demonstrou-se que a incorporação de dados de TRMM na estimativa de precipitação não aumenta a precisão global, embora perceba-se alguma melhoria em áreas com escassa rede de pluviômetros. Eles argumentaram que a razão para o desempenho moderado da fusão entre dados de satélite e pluviômetros é devido à fraca correlação dos dados TRMM com observações de pluviômetro, bem como a existência de distorções nos dados diários de precipitação TRMM, especialmente nas regiões costeiras e de altitude elevada.

Mori *et al.* (2004), usando dados do TRMM e dados de superfície através de sondagens radiosonda intensiva, também utilizaram chuva diária para analisar a variação terra-mar do ciclo diurno de chuvas sobre a Ilha de Sumatra na Indonésia. No estudo foi

utilizado um conjunto de dados composto por taxas de chuva próximo da superfície, com base apenas no sensor PR por um período de três anos (1998-2000), taxas horárias de chuvas convectivas e chuvas totais para cada elemento da grade. Dentre os resultados alcançados, apresentam-se: cerca de 70% da precipitação sobre a região do interior da ilha de Sumatra durante a noite é convectiva; um pico acentuado de chuvas convectivas na noite é seguido algumas horas mais tarde por um pico fraco de chuvas estratiformes; variabilidade da precipitação regional é causada pela migração do pico de chuva desde a costa em direção à região do interior durante o dia e para a região do mar à noite.

Utilizando chuvas diárias estimadas por satélite e dados coletados em campo, Collischonn (2006), avaliou em que medida as estimativas de precipitação obtidas a partir do produto 3B42 do satélite TRMM podem ser úteis quando usadas como dado de entrada do modelo hidrológico distribuído (MGB-IPH), sozinhas ou associadas com os dados da rede pluviométrica.

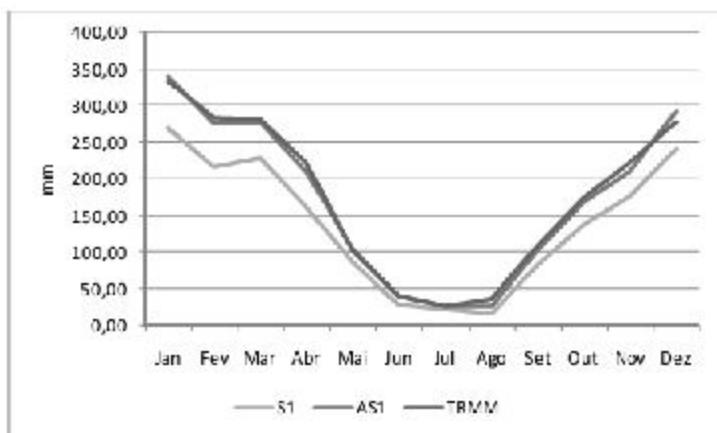
A pesquisa de Collischonn (2006) foi realizada em duas áreas. Uma que abrange parte da bacia do rio São Francisco, desde a cabeceira desse rio até a Usina Hidrelétrica de Três Marias e a outra que abrange toda a bacia do rio Tapajós. A primeira área tem boa rede pluviométrica para aferir as estimativas enquanto que a segunda possui baixa densidade de postos pluviométricos. Os resultados do estudo indicam que o modelo alternativo, usado com estimativas de satélite, teve desempenho pouco inferior ou mesmo similar ao modelo convencional, usado com dados de pluviômetros. Também se constatou que os campos de precipitação obtidos por satélite são potenciais ferramentas para consistência de dados pluviométricos em escala de bacia hidrográfica e estimativa da precipitação em áreas com deficiente rede pluviométrica. Conclusões semelhantes, a partir de uma pesquisa desenvolvida na África, que teve o mesmo produto 3B42 do TRMM e o uso de dados diários, foram observadas por Layberry *et al.* (2006).

Seguindo a ideia de alimentar modelos hidrológicos, Nóbrega *et al.* (2008) também utilizaram estimativas de precipitação geradas pelo satélite TRMM como variável de entrada para um modelo hidrológico semidistribuído, o Slurp. Para a precipitação foram utilizados dados do algoritmo 3B42 do satélite TRMM. Apesar de o propósito do estudo investigar a adequabilidade de um modelo para simular a vazão da bacia do rio Jamari, no estado de Rondônia, a metodologia utilizada indica grande importância do uso do produto do TRMM.

Em outro estudo, Nóbrega *et al.* (2008a) realizaram uma análise comparativa entre dados de precipitação observados e dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM.

Para essa pesquisa foram utilizados dados diários de quatro estações meteorológicas e seis pluviômetros localizados na bacia do rio Jamari, no estado de Rondônia e comparados com os dados do algoritmo 3B42 do TRMM. Os resultados indicaram que o TRMM se correlaciona melhor com uma rede mais densa de pluviômetro até mesmo do que as estações meteorológicas comparadas com os pluviômetros. Quando comparados os dados acumulados ao longo do período estudado, os valores do TRMM foram praticamente idênticos aos da rede de pluviômetros. O satélite também foi hábil ao capturar a variabilidade sazonal da precipitação sobre a bacia, configurando-se num elemento importante em estudos dessa natureza, conforme Figura 4.

**Figura 4: Variação sazonal da precipitação média anual na bacia hidrográfica do rio Jamari para os grupos S1, AS1 e TRMM.**



**Fonte:** NOBREGA *et al.*, 2008.

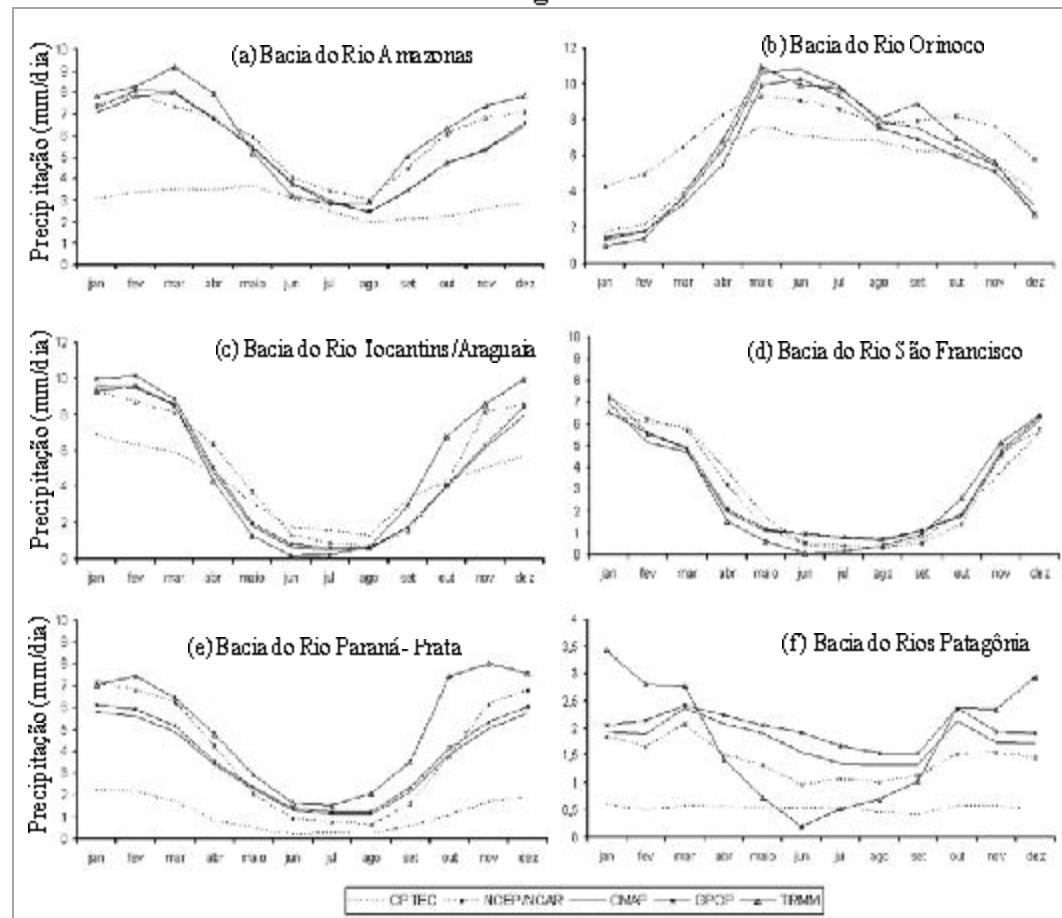
Outra característica que se tem observado em pesquisas sobre precipitação é o uso simultâneo de vários produtos de satélites. Um exemplo disso foi o estudo desenvolvido por Pinto *et al.* (2009) ao comparar cinco bancos de dados de precipitação para a América do Sul, no período de 2000 a 2004, levando em considerando a variação meridional, a variação por diferentes bacias hidrográficas (Amazonas, Tocantins, São Francisco, Orinoco, Paraná/Prata, além das bacias dos rios da Patagônia) e os principais tipos de vegetação (floresta tropical perene, floresta tropical semidecídua, caatinga, cerrado e pampas). Na pesquisa, foram utilizados três produtos provenientes da composição de dados observados com sensoriamento remoto o TRMM, o CMAP (Merged Analysis of Precipitation) e o GPCP (Global Precipitation Climatology Project) e dois de dados de reanálise NCEP/NCAR (National

Center for Atmospheric Research) e CPTEC (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos).

O estudo de Pinto *et al.* (2009) apresenta considerações importantes no que diz respeito ao uso dos produtos de satélites. Os resultados indicaram que os campos de intensidade média da precipitação anual dos diferentes produtos apresentam comportamento diferenciado entre si. Para a bacia do rio Amazonas os produtos que apresentaram uma melhor concordância foram o CMAP e GPCP, já para a bacia do rio Orinoco foram três produtos (CMAP, GPCP e TRMM) que mostraram resultados semelhantes. Para as bacias do rio Tocantins/Araguaia e rio Paraná/Prata as médias mensais dos produtos CMAP e GPCP apresentam resultados bem próximos com maior concordância. Na bacia do rio São Francisco os produtos de sensoriamento remoto CMAP e GPCP e a reanálise do CPTEC mostraram uma forte concordância entre si. Para a bacia dos rios da Patagônia os resultados encontrados não permitem fazer recomendações para futuros usuários destes produtos, sem antes serem realizados mais estudos nesta região (Figura 5).

Os autores ainda destacaram que os usuários de produtos decorrentes do satélite TRMM precisam ter bastante cautela ao utilizarem estes dados para latitudes extratropicais, pois para todas as análises realizadas neste estudo onde as regiões se encontravam fora dos trópicos, os valores apresentados pelo TRMM foram mais altos em relação à maioria dos produtos e, em alguns casos, a sazonalidade estava comprometida.

**Figura 5: Médias mensais para as principais bacias hidrográficas da América do Sul, (a) Bacia do Rio Amazonas, (b) Bacia do Rio Orinoco, (c) Bacia do Rio Tocantins/Araguaia, (d) Bacia do Rio São Francisco, (e) Bacia do Rio Paraná/Prata e (f) Bacia dos Rios da Patagônia.**



**Fonte: Adap tado de PINHO *et al.*, 2009.**

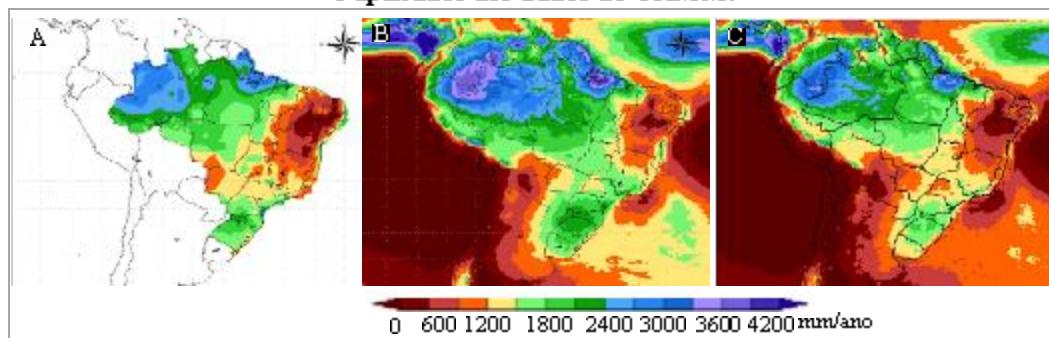
Gonçalves (2011), utilizando dados de janeiro de 1998 a dezembro de 2009, fez uso das estimativas do satélite TRMM associadas aos dados de pluviógrafos para estudar as relações Intensidade-Duração-Frequencia (IDF) para todas as sedes municipais brasileiras com população acima de cem mil habitantes. Para tal, constituiu séries anuais de precipitação máxima do satélite TRMM. Os resultados mostraram que as curvas IDF geradas a partir do TRMM possuem incertezas, porém, são alternativas tão eficientes quanto à utilização de chuvas desagregadas a partir de dados pluviométricos. Um estudo semelhante foi feito por Endreny e Imbeah (2009) que utilizaram dois conjuntos de dados de chuva (pluviométricos e satélite TRMM) com dois métodos de análise de distribuição de frequência para estimar diferentes parâmetros de IDF em Gana. Concluíram que a combinação dos dados

(pluviômetros e satélite) levou a resultados mais consistentes, enquanto que o uso individualizado dos dados do satélite TRMM gera discrepâncias significativas.

Varikoden *et al.* (2012) utilizaram taxas de chuva derivadas do TRMM por um período de 12 anos (1999-2010) na Índia. O estudo teve como objetivo analisar a variação diurna e espacial das monções de verão. Com os resultados percebeu-se que o padrão diurno é mais importante para as chuvas de alta intensidade do que para a baixa intensidade. O produto do TRMM foi aplicado no estudo sem a necessidade de validação, tendo em vista que em pesquisa anterior, realizada em 2010 na península da Malásia, os mesmos autores analisaram as taxas de chuva para validar o produto TRMM.

Em pesquisa desenvolvida com o intuito de avaliar e analisar os dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil, no período compreendido entre 1998 e 2010, Pereira *et al.* (2013), concluíram que a comparação entre os dados de precipitação mensal estimada pelo TRMM e 183 estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil apresentam uma concordância de aproximadamente 97% (significante a  $p<0,05$ ; teste t-student). Entretanto, encontraram-se valores de chuva mensal 9%, 8%, 6%, 13% e 9% maiores que os observados pelas redes de estações meteorológicas para a região Centro-Oeste, Sul, Norte, Sudeste e Nordeste, respectivamente (Figura, 6). Os resultados das correlações mensais para cada região indicaram que os dados estimados pelo TRMM apresentam uma boa concordância (em média 90%) com os dados das redes de estações meteorológicas.

**Figura 6: Valores médios da precipitação anual (mm) para o período de janeiro de 1998 a dezembro de 2010. (a) Valores médios da precipitação anual estimada a partir dos dados INMET/CPTEC; (b) Valores médios da precipitação anual estimada pelo TRMM; e (c) Valores médios da precipitação anual ajustados pelas regressões regionais e aplicados aos dados do TRMM.**



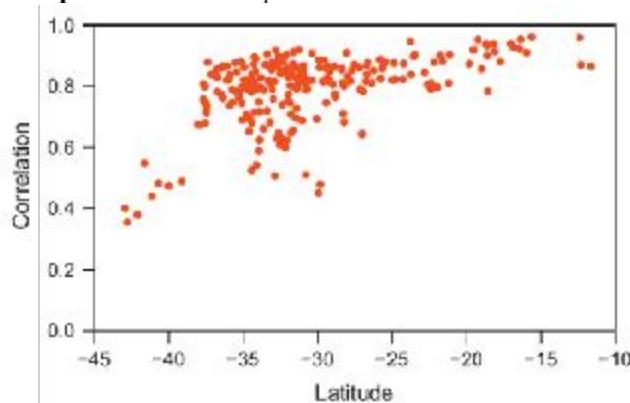
**Fonte: Adaptado de PEREIRA *et al.*, 2013.**

Ainda com relação à pesquisa de Pereira *et al.* (2013), a Figura 6 mostra que, apesar dos dados do TRMM representarem um período de apenas 13 anos de observações, há uma boa concordância entre os padrões espaciais da precipitação anual. Pode-se verificar pelo exposto que as maiores variações de precipitação entre os dados do INMET/CPTEC e os dados estimados pelo TRMM ocorrem em áreas com grande atividade convectiva. Outro fator importante observado na Figura 6c foi a melhora significativa na comparação da precipitação entre os valores originais INMET/CPTEC e os valores estimados pelo TRMM, quando estes foram calibrados.

As análises mensais do estudo de Pereira *et al.* (2013) indicaram ainda que o REMQ (Raiz do erro médio quadrático), frequentemente utilizado para verificar as diferenças entre os dados estimados e observados, possui valores médios entre  $17 \pm 10$  mm. Além disso, os dados do TRMM apresentaram a tendência média de superestimar a precipitação mensal em 15%. Contudo, as estimativas de precipitação apresentaram variação sazonal muito similar à apresentada pelos dados observados nas estações meteorológicas.

Woldemeskel *et al.* (2013) utilizaram dados mensais de chuva medidos em pluviômetros e dados do TRMM, com o intuito de melhorar a estimativa de chuva espacial na Austrália. A Figura 7 mostra a correlação entre os dados de 230 estações pluviométricas e a precipitação estimada pelo TRMM, plotada em relação à latitude correspondente das estações de medição da chuva. Infere-se que os dados do TRMM concordam razoavelmente com as observações pluviométricas, especialmente para estações dentro de 39 graus do equador. No entanto, a correlação é bastante fraca em locais próximos à costa e aos polos (como Tasmânia), refletindo a incerteza das estimativas de precipitação TRMM nas zonas costeiras.

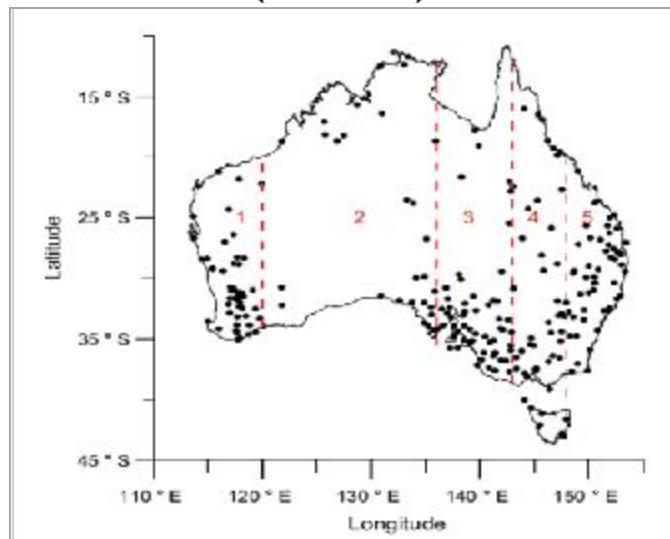
**Figura 7: Correlação entre os dados de precipitação observados e os dados TRMM. As correlações foram plotadas em relação à latitude dos locais de chuva observada.**



**Fonte: WOLDEMESKEL *et al.*, 2013.**

Ainda de acordo com o citado autor, os resultados mostraram que o erro quadrático médio é reduzido na estimativa de chuva nas estações de longitudes entre 122° e 130°, o que ocorre devido à escassez da rede de pluviômetros nesta área, conforme mostra a Figura 8.

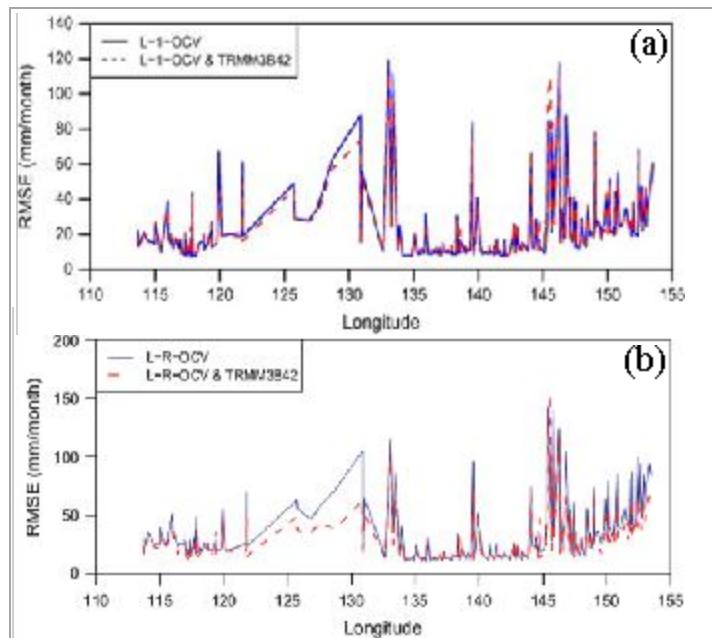
**Figura 8: Mapa de localização de 230 estações pluviométricas na Austrália. A figura também mostra cinco regiões consideradas para a validação cruzada (L-R-OCV) (números 1-5).**



**Fonte:** WOLDEME SKEL *et al.*, 2013.

A redução no REMQ é ainda mais significativa para a fusão TRMM com L-R-OCV (validação cruzada realizada a partir da remoção de uma região em cada período de tempo) do que aquele com L-1-OCV (validação cruzada realizada a partir da remoção de um pluviômetro em cada período de tempo), Figura 9. Os resultados também indicam que pouca ou mesmo nenhuma melhoria no REMQ é obtida para L-1-OCV em estações localizadas na parte oriental ou ocidental da Austrália, provavelmente devido ao uso de rede relativamente densa de pluviômetros para análise nessas áreas. No entanto, para L-R-OCV, percebe-se um melhoramento considerável, obtido pela incorporação do TRMM, como o indicador.

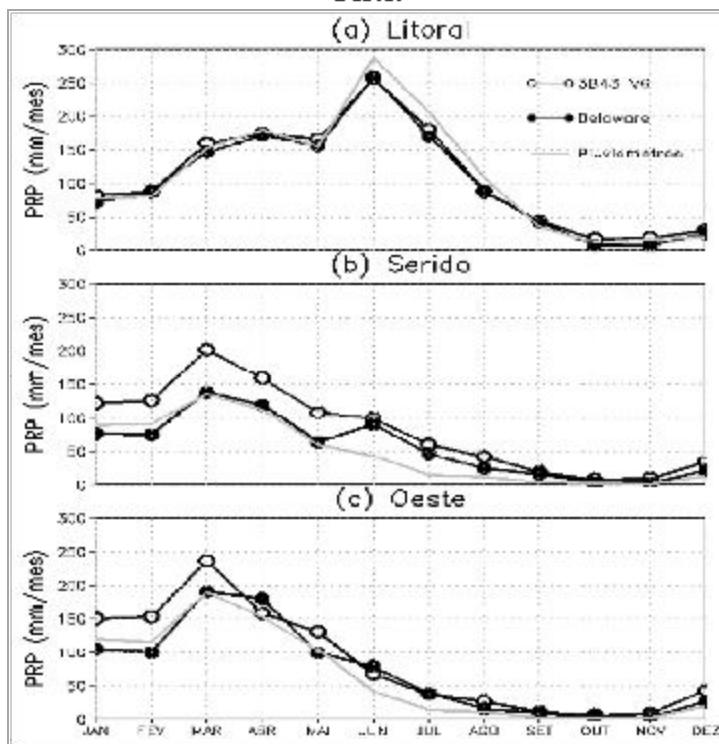
**Figura 9:** (a) REMQ da L-1-OCV e da junção da L-1-OCV com TRMM em cada local de pluviômetro em média ao longo do período 1998-2007. Os valores REMQ são traçados em relação à longitude dos locais de calibre de chuva; (b) REMQ da LR-OCV e da junção da LR-OCV e TRMM 3B42.



**Fonte:** Adaptado de WOLDEMESKEL *et al.*, 2013.

Santos e Silva *et al.* (2012) utilizaram o algoritmo 3B43-V6 do TRMM e os dados de pluviômetro, para avaliar as estimativas de precipitação mensal no Estado do Rio Grande do Norte, no período de 1998 a 2008. Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas técnicas estatísticas baseadas em coeficiente de correlação linear e em índices de desempenho extraídos de uma tabela de contingência 2x2. Foi constatado que o algoritmo 3B43\_V6 subestimou a precipitação para a região litorânea e superestimou a precipitação observada em regiões mais áridas, como o Seridó e o Oeste (Figura 10). A precipitação apresentou médias similares às observações, mas verificaram-se algumas discrepâncias aparentemente associadas ao método de interpolação e ao espaçamento de grade. Os resultados sugerem que ambos os produtos são capazes de representar as variabilidades médias da precipitação mensal no espaço e no tempo, porém, apresentaram deficiências em identificar os eventos mais intensos de precipitação.

**Figura 10: Ciclo anual de precipitação dividido por regiões: (a) litoral, (b) Seridó e (c) Oeste.**



Fonte: SANTOS e SILVA *ET AL.* (2012).

Para Santos e Silva *et al.* (2013) a superestimativa do 3B43-V6 sobre regiões mais áridas, em comparação com regiões mais úmidas encontradas na pesquisa, é consistente com os resultados dos estudos realizados por Adeyewa e Nakamura (2003) na África.

## 2.5. Métodos de avaliação de estimativas de chuva por SRO

Nos últimos anos, tem-se efetuado um grande esforço no desenvolvimento de algoritmos para estimar chuvas por sensoriamento remoto com base na combinação entre imagens de satélite e as comparações com estações de pluviômetros. Estas estimativas de satélite proporcionam séries de dados de chuva sem interrupção com escalas de tempo e espaço detalhadas que oferecem oportunidades de estudos hidrológicos e climatológicos (Su *et al.*, 2008). Essas estimativas de chuva por SRO têm sido avaliadas quanto à destreza em reproduzir os padrões temporais e espaciais da chuva observada em pluviômetros de diferentes formas, que podem ser agrupadas em três categorias: comparação pontual, agregação no espaço e comparação espacial.

### 2.5.1 Comparação pontual

A comparação pontual é a forma mais tradicional usada para avaliar a qualidade das estimativas de chuva por SRO. Ela se caracteriza pela comparação, em pontos específicos da superfície, da chuva estimada pelo SRO com o dado observado em pluviômetro. É considerada como a forma mais simples de avaliação tendo em vista que pode ser realizada sem que se faça o processo de interpolação. Esse fator evita a introdução de incertezas, sendo uma característica significativa, do ponto de vista da objetividade. No entanto, essa metodologia de avaliação traz mais desvantagens que benefícios se os objetivos delineados na pesquisa forem relativos à investigação de uma área extensa, como por exemplo, grandes bacias hidrográficas. Entre os principais fatores negativos da comparação pontual podemos destacar o fato de que o pluviômetro mede o fenômeno da precipitação de forma local, ou seja, a chuva medida por ele tem muitos efeitos das características locais ao redor do ponto considerado; a própria variabilidade espacial da precipitação pode prejudicar a comparação pontual dos dados de pluviômetros.

Outro fator negativo desse modelo de comparação diz respeito ao uso de informações de chuva estimada de um único ponto (centro do pixel da grade TRMM), uma vez que, esse valor significa a média da chuva numa área de aproximadamente de  $0,25^\circ$  por  $0,25^\circ$ . Assim, quando se usa apenas o ponto central, para comparação com dados de chuvas observadas em pluviômetros, perdem-se informações relativas a toda vizinhança desse ponto contida nesse quadrado.

Todavia, considerando-se que a variabilidade espacial da precipitação em determinada região é essencial, uma vez que seu padrão interanual e sazonal é crucial para a agricultura e para diversos setores da economia, torna-se significante uma investigação pontual para compreender a realidade do evento de precipitação a partir de um conjunto de postos pluviométricos espalhados numa propriedade onde se pratica agricultura, por exemplo.

Existem diversos trabalhos que usaram a forma pontual para avaliar estimativas por SRO. Por exemplo, Conti e Mendes (2003) utilizando o satélite Geostationary Operational Environmental Satellite -8 (GOES 8), realizaram um estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul. A estimativa da precipitação que foi realizada para dois períodos diferenciados de acumulação (diário e decendial) durante todas as estações do ano de 1998 possibilitou resultados satisfatórios.

Araújo e Gutter (2007) fizeram uso do produto de satélite CMORPH (Center Morphing Method) para comparar estimativas de satélites de órbita baixa com medições de

solo em pequenas e médias bacias do estado do Paraná e concluíram que há boa aderência das estimativas. Nóbrega *et al.* (2008) realizaram uma análise comparativa entre dados de precipitação observados e dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM. Para tal, foram utilizados dados de quatro estações meteorológicas e seis pluviômetros localizados na bacia do rio Jamari, no estado de Rondônia e comparados com os dados do algoritmo 3B42 do TRMM. Foi realizada análise estatística com base no coeficiente de correlação entre as estações meteorológicas, postos pluviométricos e dados estimados. Os resultados obtidos indicam a existência de uma boa correlação entre os dados diários de precipitação dos 10 pontos observados e do TRMM, variando de 0,79 a 0,89.

Com o intuito de melhorar a estimativa de chuva espacial na Austrália, Woldemeskel *et al.* (2013) utilizaram dados mensais de chuva de 230 estações pluviométricas e dados do TRMM. A pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas, dentre elas destaca-se a comparação pontual entre medições pluviométricas e os dados estimados pelo satélite nos locais dos pluviômetros. Os resultados mostram que os dados do TRMM concordam razoavelmente com as observações pluviométricas. No entanto, a correlação é bastante fraca em locais mais próximos dos polos (como Tasmânia) e outros locais próximos à costa. Isso reflete a incerteza das estimativas de precipitação TRMM nas zonas costeiras.

### **2.5.2 Agregação no espaço**

A agregação no espaço é entendida quando se trabalha com a chuva média sobre uma região do espaço, como uma bacia hidrográfica, um município ou uma região qualquer de interesse. Colhem-se os dados de todos os pluviômetros inseridos nessa grande região, tomam-se todos os pontos de grade do satélite situados na região, obtém-se a chuva média de cada conjunto e comparam-se essas médias de precipitação. Esse procedimento apresenta vantagens no que se refere à execução do estudo e ao fácil entendimento para os interessados. No entanto, como a comparação é feita pela média, há uma grande possibilidade de informações importantes, como a variabilidade espacial dentro da região ou as máximas e mínimas precipitações, passarem despercebidas.

Diversos estudos fizeram uso dessa metodologia de agregação no espaço para avaliar as estimativas de chuva por sensoriamento remoto. Entre eles, podemos destacar a pesquisa de Su *et al.* (2008) que utilizaram médias de chuvas mensais para avaliar as estimativas de precipitação do satélite TRMM na bacia da Prata na América do Sul, com dados referentes a um período de nove anos (1998-2006); Shepherd *et al.* (2003) fizeram uso de dados do

satélite TRMM e de pluviômetros para verificar a hipótese de que a urbanização extensiva está provocando anomalias na precipitação na área de Houston (Texas, Estados Unidos); Varikoden *et al.* (2012) utilizaram taxas de chuva derivadas do TRMM por um período de 12 anos (1999-2010) para analisar a variação diurna e espacial das monções de verão, na Índia.

No Brasil, pode-se destacar a pesquisa de Pereira *et al.* (2013) que compararam médias de precipitação mensal para avaliar e analisar os dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para toda a extensão territorial brasileira, no período compreendido entre 1998 e 2010.

### 2.5.3 Comparação espacial

A comparação espacial leva em consideração a variação espacial sobre a área de interesse, fazendo uma discretização em uma grade regular (SINGH E FREVERT, 2002) da bacia hidrográfica ou área de interesse, permitindo levar em conta a variabilidade espacial da precipitação.

Uma das formas de realização da comparação espacial é o uso da tabela de contingência. Essa tabela trata de forma binária a ocorrência/não ocorrência de um determinado evento, bem como a estimativa de sua ocorrência ou não ocorrência, conforme a ilustração da Figura 11.

**Figura 11: Esquema da tabela de contingência com análise comparativa dos acertos e erros nas estimativas da ocorrência (“sim”) e não ocorrência (“não”) de um determinado evento.**

		observado			
		sim	não		
estimado	sim	a	b	Quantidade de vezes em que não ocorreu o evento mas sua ocorrência foi estimada.	
	não	c	d	Quantidade de vezes em que ocorreu o evento mas sua ocorrência não foi estimada.	
Quantidade de vezes em que ocorreu o evento e sua ocorrência foi estimada.				Quantidade de vezes em que não ocorreu o evento e sua ocorrência não foi estimada.	

De acordo com Paz e Collischonn (2011), a partir dessa tabela, é possível analisar a performance da estimativa sob diferentes aspectos, conforme o tipo de evento estudado, o tipo de estimativa realizada e o propósito do uso dessa informação. Esse modelo pode ser utilizado para avaliar os campos de chuva estimados levando em consideração sua distribuição espacial, principalmente no caso de serem usados como entrada em modelos hidrológicos distribuídos. Estudos realizados, conforme exemplos apresentados abaixo mostraram que estimativas espaciais de chuva realizadas ao longo do tempo podem apresentar erros como localização espacial do evento chuvoso, intensidade da chuva, instante de tempo da ocorrência do evento.

Entre os diversos trabalhos que utilizaram essa forma de avaliar a chuva podemos destacar o trabalho de Collischonn *et al.* (2007), que analisaram os campos de precipitação obtidos do satélite TRMM. Os campos foram comparados com os obtidos a partir de dados de pluviômetros no solo sobre a bacia do Alto Paraguai até a Fazenda Descalvados.

Santos e Silva (2012) desenvolveram um estudo no Estado do Rio Grande do Norte, no período de 1998 a 2008, com o objetivo de avaliar as estimativas de precipitação mensal fornecidas por duas fontes (algoritmo 3B43-V6 e pluviômetro). Eles utilizaram técnicas estatísticas baseadas em coeficiente de correlação linear e em índices de desempenho extraídos de uma tabela de contingência 2x2. Na análise, consideraram-se diferentes regimes pluviométricos, que são função da localização geográfica e do tipo de cobertura do solo. Os resultados sugerem que ambos os produtos são capazes de representar variabilidades médias da precipitação mensal no espaço e no tempo.

Barrera (2005), numa análise comparativa entre os campos de precipitação diária gerada a partir de dados de pluviômetros e os campos de precipitação do Hidroestimador, referentes à tormenta de um dia específico, para a região central da Argentina, mostrou resultados coerentes entre eles. No referido estudo, comparando a ocorrência ou não ocorrência de chuvas de diferentes intensidades pixel a pixel nas duas imagens, o autor obteve uma probabilidade de detecção da ocorrência da chuva superior a 92%, com uma taxa de alarme falso da ordem de 12 a 30%.

Posteriormente, Barrera *et al.* (2007) utilizaram campos de precipitação acumulados ao longo da bacia do rio Feliciano, na Argentina, para avaliar a resposta hidrológica observando as mudanças nos eventos de chuva. Foram obtidos períodos consecutivos para 3 h e 6 h durante três dias em que ocorreu atividade de intensa tempestade. Três diferentes campos de precipitação foram obtidos para cada um dos períodos acima mencionados,

correspondentes a três maneiras de estimar a precipitação de imagens GOES IR: aplicação do autoestimador; aplicação de uma modificação desta técnica que consiste em gerar brilhante sintético de imagens de temperatura a cada 10 minutos; por interpolação, no tempo e no espaço com imagens GOES IR. Os resultados mostram que a modificação introduzida na técnica de autoestimador permite a captura do deslocamento de células de nuvem de chuva, que ao mesmo tempo provoca diferenças significativas nos valores de precipitação estimados em áreas menores do que o tamanho da bacia estudada.

Em pesquisa realizada na Grécia, Feidas (2010) comparou campos de chuva de 76 postos pluviométricos com produtos de satélites do TPMA (3B43, 3B42 e 3A12). Foram usados dados mensais para o período de 1998-2006. Os testes estatísticos obedeciam às escalas espaciais de 0,5°, 1° e 2,5°. O produto 3B43 apresentou os melhores valores em todas as correlações lineares, com resultados maiores que 0,90 e coeficiente de Nash-Sutcliffe da ordem de 0,80 nos períodos secos e ligeiramente menores para períodos úmidos.

Em estudo desenvolvido na área da bacia do Rio Grande (MG-SP), Saldanha *et al.* (2007) utilizaram as estimativas de chuva diárias geradas pelo Hidroestimador, considerando o período contínuo de três anos 2003-2005. Os resultados indicaram uma performance relativamente baixa do Hidroestimador na detecção da ocorrência de chuvas diárias e na estimativa quantitativa do total diário precipitado, para o uso de campos de chuva estimados para modelagem hidrológica distribuída. Na comparação com campos de chuva gerados por interpolação dos dados de pluviômetros, observou-se grande variação espacial da performance das estimativas de chuva, com o pior desempenho nas regiões de cabeceira da bacia, onde o terreno é bastante elevado.

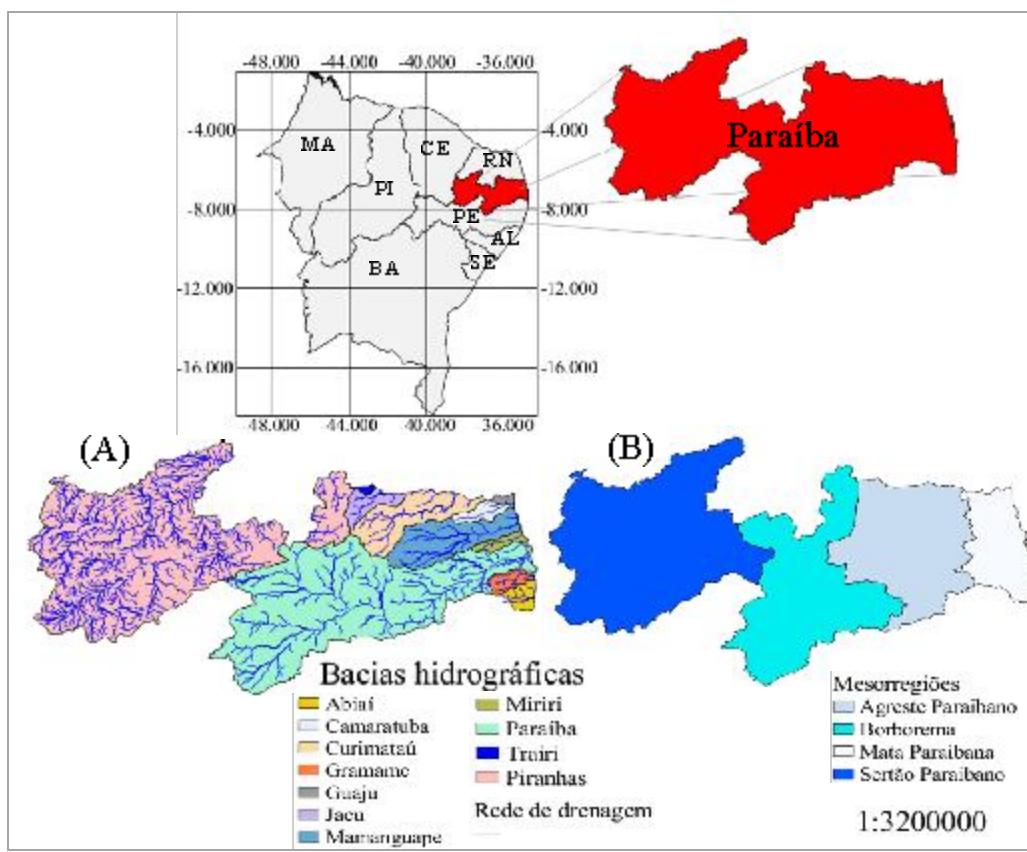
### Capítulo 3 Metodologia

#### 3.1. Área de estudo

A pesquisa teve como área de estudo o Estado da Paraíba, que está localizado na porção oriental da região Nordeste do Brasil, entre as latitudes 07° e 09° Sul e as longitudes 33° e 39° Oeste. O Estado limita-se ao norte com o Rio Grande do Norte, ao sul com Pernambuco, a leste com o Oceano Atlântico e a oeste com o Ceará (Figura 12).

A Paraíba possui onze bacias hidrográficas (Figura 12A) estabelecidas pela AESA para fins de gestão de recursos hídricos e está dividida em quatro mesorregiões geográficas (Figura 12B): Sertão, Borborema, Agreste e Zona da Mata paraibana.

Figura 12: Localização da Paraíba.



Fonte: Autoria própria.

O estudo foi desenvolvido de duas formas distintas. Em um primeiro momento, analisou-se a Paraíba a partir de uma visão micro, ou seja, investigando-se, individualmente cada posto pluviométrico instalado no Estado e comparando-se esses resultados com os

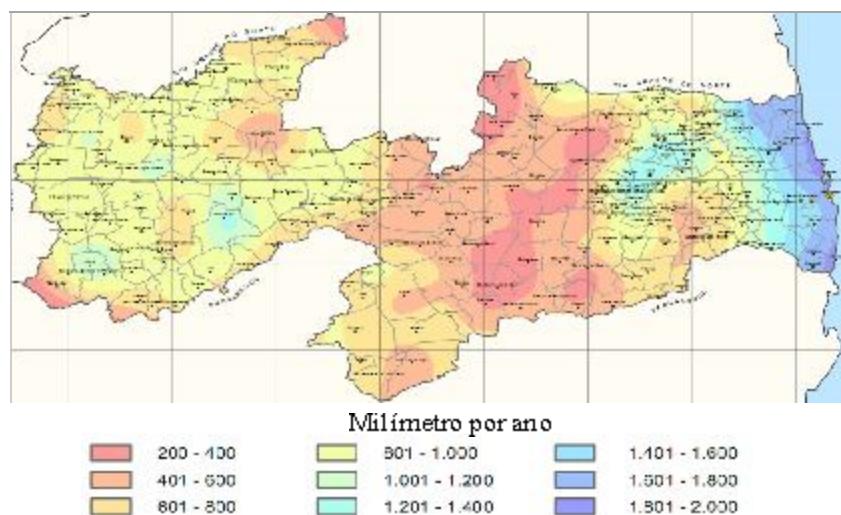
valores de chuva estimados em cada ponto da grade do satélite TRMM. Nessa configuração não se considerou qualquer divisão geográfica interna do Estado. Essa primeira parte visa gerar uma avaliação da performance da estimativa de chuva do TRMM em reproduzir a chuva observada localmente em cada pluviômetro. Na etapa seguinte, procedeu-se por um estudo onde foram agrupados os postos em cada mesorregião do Estado e em cada bacia hidrográfica, respeitando-se a localização de cada posto. A escolha de fazer o estudo também por mesorregiões e por bacias hidrográficas é oportuna, uma vez que se pretende fazer análises de áreas menores como as bacias e as mesorregiões, devido às variações de clima e de relevo. Nessa segunda parte, a ideia é obter a comparação e avaliação da chuva estimada pelo TRMM a nível médio espacial sobre determinadas regiões, no caso as mesorregiões e as bacias hidrográficas estabelecidas pela AESA.

A análise de chuva, seja pontual ou a partir de qualquer divisão geográfica, requer que se estudem, concomitantemente, questões interligadas que têm forte influência nos índices pluviométricos. Sendo assim, faz-se necessário entender alguns fatores como a distribuição do relevo e do clima no Estado.

Nos 223 municípios que compõem o Estado, observam-se climas variados, caracterizados essencialmente pelo tipo de relevo predominante. A distribuição anual e intra-anual das chuvas nas mesorregiões possui uma variabilidade tanto espacial como temporal. No semiárido a média anual de chuva é inferior a 800 mm enquanto que na parte litorânea tais valores podem ultrapassar os 1500 mm. Há uma acentuada diferença de períodos chuvosos entre as mesorregiões. Esse fator é referenciado por Sousa (2011) ao destacar que as estações chuvosas na Paraíba estão definidas da seguinte forma: Sertão (janeiro a março), Borborema e Agreste (março a maio) e na Mata Paraibana (abril a junho).

Quanto aos índices precipitados, os maiores valores estão no litoral e diminuem no sentido oeste, apresentando um mínimo no Cariri e Curimataú, na porção oeste da Borborema, fato caracterizado pela depressão do relevo. No entanto, na faixa correspondente ao Planalto da Borborema os índices anuais de chuva são de aproximadamente 800 mm, conforme Figura 13. Segundo Francisco (2010), na porção central da Paraíba predomina o clima semiárido com totais anuais de precipitação inferiores a 600 mm, embora as temperaturas permaneçam inferiores àquelas do litoral em virtude da altitude. No oeste do Estado, marcado pelo Sertão, encontra-se a depressão do Rio Piranhas e seus afluentes, com clima semiárido quente nas partes mais baixa ou tropical quente e úmido nas partes mais elevadas.

Figura 13: Pluviometria média anual da Paraíba.



Fonte: AESA, 2010.

As variações de clima e de precipitação no Estado ocorrem também em função da variabilidade climática modulada pelas anomalias de temperatura da superfície do mar sobre os oceanos Pacífico e Atlântico (VITORINO *et al.*, 2006). Além disso, as oscilações de escalas de tempo decadal, interdecadal e quase bienal tem modulado a atmosfera tropical (SOUZA, 2011; CHANG *et al.*, 1997; SOUZA *et al.*, 1998).

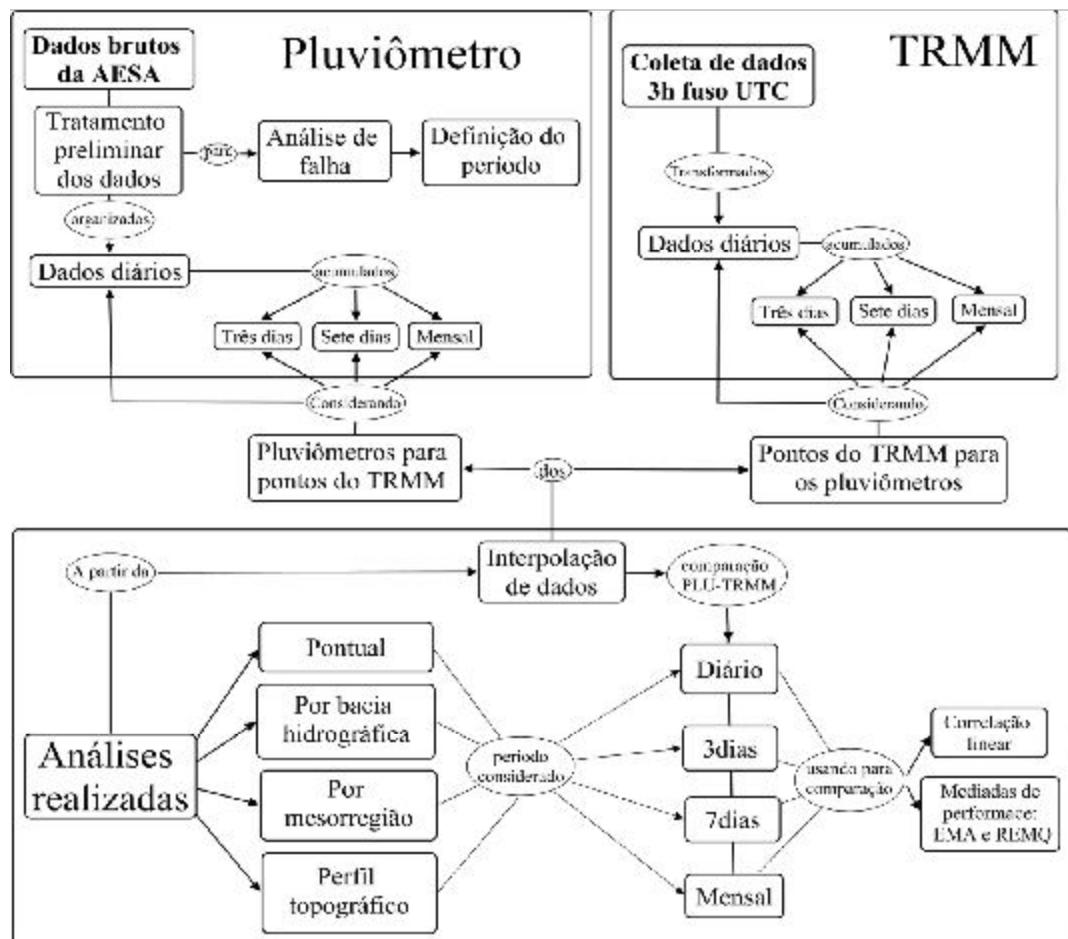
Assim, como nos Estados vizinhos, a Paraíba possui um regime de chuvas influenciado pelos sistemas atuantes no Nordeste brasileiro. De acordo com as pesquisas de Kousky (1979), esses mecanismos podem ser classificados em mecanismos de grande escala, meso e microescalas e são responsáveis pelo total de precipitação observado na região. Dentre os mecanismos de grande escala atuantes no Estado, destacam-se os sistemas frontais, associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul, os Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera e a Zona de Convergência Intertropical. Dos mecanismos de mesoescala fazem parte as perturbações ondulatórias no campo dos alísios, os complexos convectivos e as brisas, tanto marítimas como terrestres. Com relação aos principais fenômenos de microescala destacam-se as circulações orográficas e as pequenas células convectivas.

### 3.2. Visão geral da metodologia

Para o desenvolvimento da pesquisa foram realizadas as seguintes etapas (Figura 14): coleta dos dados de precipitação da AESA do período de 1998 a 2012, que passaram por um tratamento preliminar; coleta dos dados do satélite TRMM de 1998 até 2012; organização dos

dados (AESÁ e TRMM) em acumulados diários, de 3 dias, 7 dias e mensal; interpolação, tanto dos dados de pluviômetros quanto dos dados de satélite; análises de correlação linear e de medidas de desempenho, entre os dados estimados e observados para todo o Estado da Paraíba seguindo quatro parâmetros de comparação (pontual, por sub-bacias, por mesorregiões e a partir da influência do perfil topográfico na sazonalidade das chuvas). Os itens a seguir descrevem cada etapa da metodologia.

**Figura 14: Fluxograma da metodologia**



**Fonte: Autoria própria.**

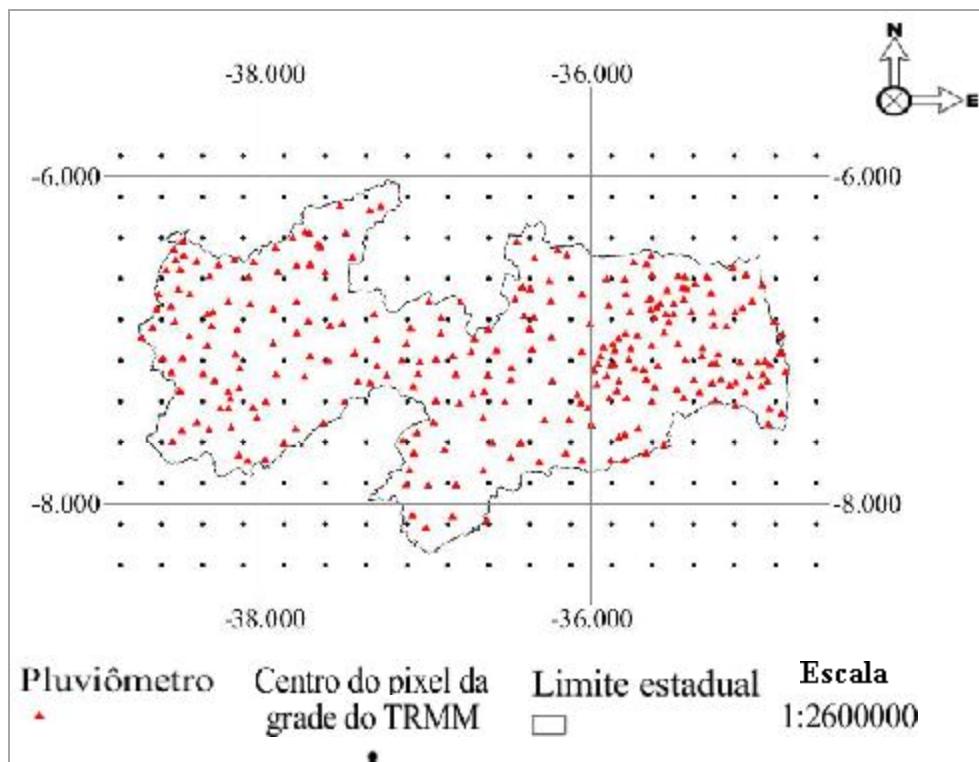
### 3.3. Fontes de dados

#### 3.3.1. Dados de pluviômetros

A Paraíba possui uma rede pluviométrica composta de 269 postos de coleta. Destes, 15 são estações meteorológicas que, além de informações sobre precipitação, registram dados

sobre temperatura, umidade, entre outros. Os dados de chuva são coletados por funcionários da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) ou funcionários da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural da Paraíba (EMATER) todos os dias às sete horas da manhã. Nos postos em localidades que não se tem esses profissionais, a coleta é feita por voluntários da comunidade. Esses dados são enviados à (AESPA) de duas formas: os dados preliminares são informados diariamente por meio de ligação telefônica; os dados oficiais são enviados pelos correios. Na coleta, os dados são anotados em fichas padronizadas, em duas vias, uma que é arquivada no posto e a outra que é encaminhada para a AESPA. De posse dos dados oficiais, faz-se uma conferência através de planilhas confrontando com os registros informados por telefone. Após a confirmação, eles são registrados no banco de dados da agência e passam a fazer parte das estatísticas utilizadas pelos pesquisadores. Neste estudo são utilizados os dados oficiais dos 269 postos (Figura 15) da AESPA, por um período de quatorze anos (1998 a 2012).

**Figura 15: Postos pluviométricos e pontos do TRMM sobre a Paraíba.**



### **3.3.2. Base de dados da chuva estimados por satélite**

A precipitação estimada por satélite foi obtida do algoritmo 3B42 (versão 7) do satélite TRMM, que cobre o Estado da Paraíba com uma grade de 198 pixels, que são quadrados de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (Figura 15) e gera estimativas de três em três horas. A chuva estimada do satélite TRMM é fornecida em intervalos de tempo de três horas, em resolução espacial de  $0,25^\circ$  definidas em horas UTC (Coordinated Universal Time ou Hora de Greenwich). O período coletado de dados foi de janeiro de 1998 a dezembro de 2012. Os dados do satélite TRMM<sup>2</sup> estão disponíveis a partir de janeiro de 1998.

## **3.4. Tratamento preliminar dos dados**

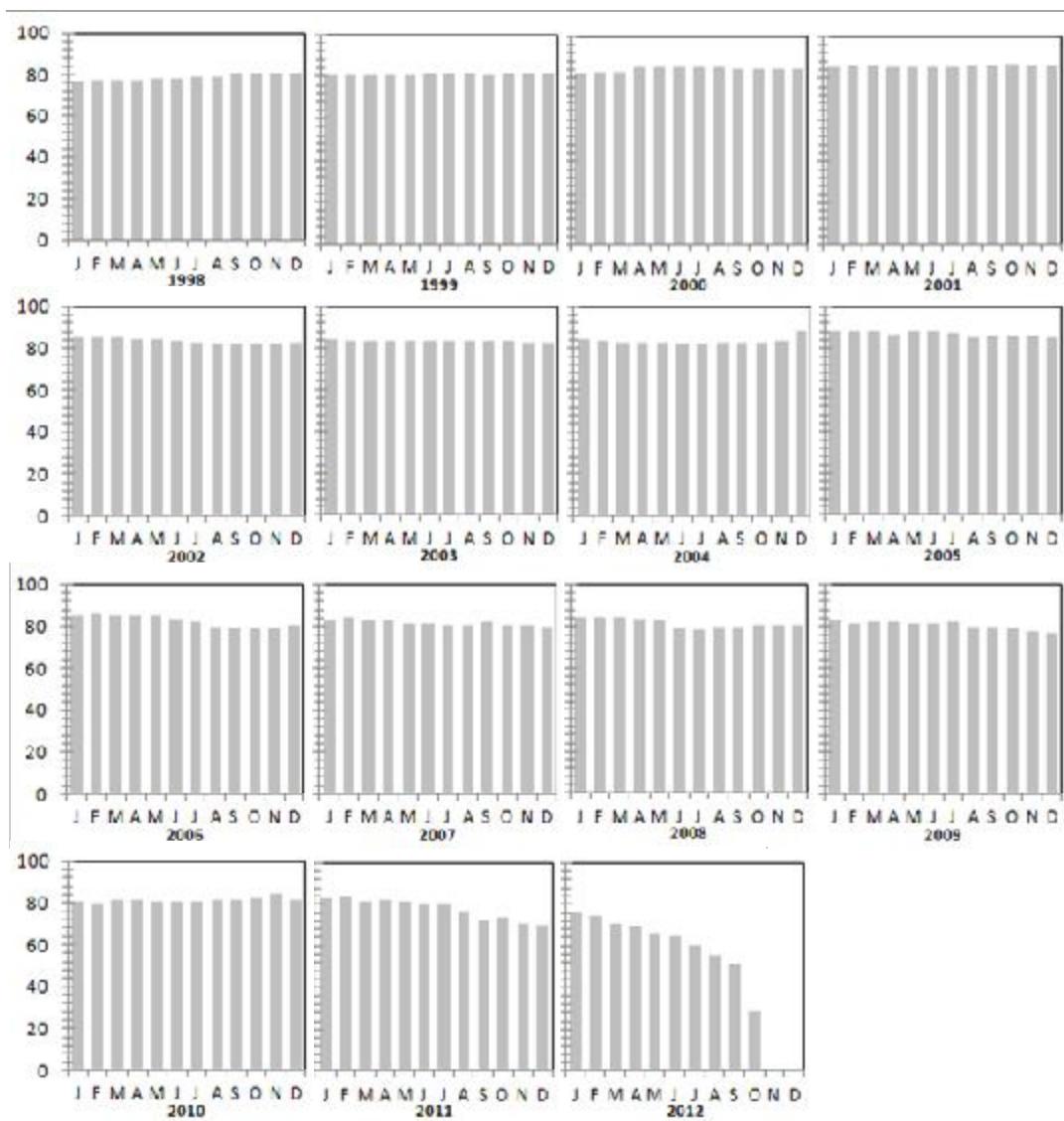
### **3.4.1. Dados dos pluviômetros**

Os dados diários dos pluviômetros foram separados por posto/estação com o intuito de analisar a qualidade e identificar possíveis falhas. Tomaram-se dados referentes ao período de 1998 a 2012 (Figura 16). O ano de 2012 apresentou falhas em todos os postos da AESA nos meses de novembro e dezembro (talvez por tais dados ainda não terem sido processados na época da consulta à AESA), razão pela qual não foi contemplado no estudo. Os demais anos apresentaram baixa quantidade de falhas.

---

<sup>2</sup> Podem ser acessados em [wwwdisc.sci.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM](http://wwwdisc.sci.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM)

**Figura 16: Porcentagem de postos pluviométricos da AESA sem falhas nos dados diários para cada mês do período 1998 – 2012.**



**Fonte: Autoria própria.**

Os dados diários foram acumulados para períodos de 3 dias, 7 dias e acumulados mensais. Com isso, percebeu-se a necessidade de criar outro critério de seleção, tendo em vista que alguns postos apresentaram falhas em todos os dias de alguns meses (Anexo I). Assim, só foram considerados em cada segmento do estudo (análise a nível diário, 3 dias, 7

dias e mensal) os postos que apresentaram mais de 2/3 de dados válidos do total máximo da série para cada período de acumulação.

A Tabela 1 mostra, para cada período de análise, a quantidade máxima de dados que corresponde a um posto sem nenhuma falha e a quantidade mínima de dados adotada na observação de um posto para que ele faça parte do conjunto a ser analisado. Como se observa na tabela, os dados estão divididos em geral e por mês. Isso significa que cada conjunto (diário, 3 dias, 7 dias e mensal) foi analisado de duas formas: levando-se em consideração todos dias (dados gerais) e considerando-se os meses do ano.

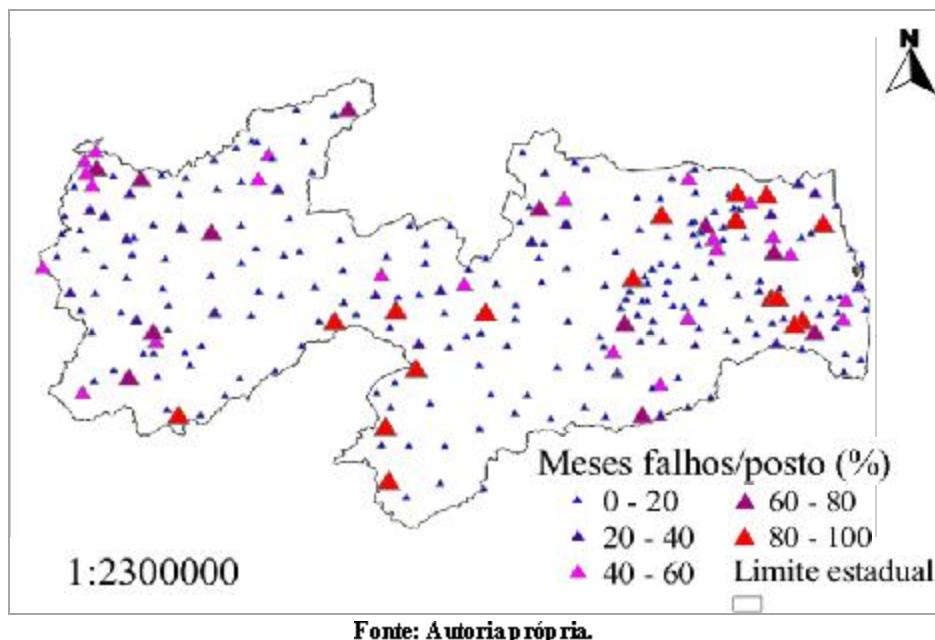
**Tabela 1: Número de dados por período acumulado e tipo de série (completa ou geral; separada por mês do ano).**

Acumulados	Total de dados (máximo)	Número mínimo de dados considerados para escolha dos postos ( $\geq 2/3$ do total)
Diário geral	5113	3409
3 dias geral	1704	1136
7 dias geral	730	487
Mensal geral	168	112
Diário/mês	434	290
3 dias/mês	146	97
7 dias/mês	62	41
Cada mês	14	9

**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 17 representa a distribuição espacial dos postos com falhas considerando dados diários. Foram observados 29 postos com um percentual de falhas acima de 60%. Considerando-se o total de 269 postos, isso representa 10,7% de postos com grande quantidade de falhas, ou seja, tem-se um número baixo de postos com falhas. Para que as análises apresentassem resultados mais confiáveis esses postos não fizeram parte das comparações, de nenhuma das análises (diária, 3 dias, 7 dias e mensais) e nem das séries classificadas como gerais ou por mês na Tabela 1.

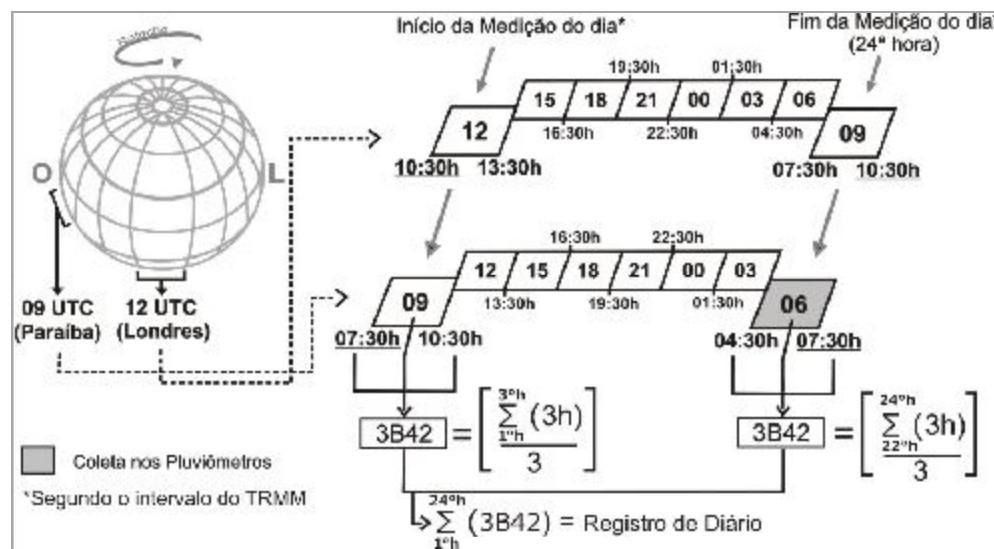
**Figura 17: Espacialização dos postos com falhas considerando dados diários.**



### 3.4.2. Dados do TRMM

Foram obtidos os dados do TRMM disponibilizados em arquivos que correspondem à chuva acumulada num período de três horas. Para obter-se dados diários é necessário somar os valores de 8 arquivos de 3 horas do dia em questão. Com o objetivo de comparar esses dados com os observados em pluviômetros, eles foram acumulados de 12h de um dia até 9h do dia seguinte, horários UTC, o que corresponde a 9h de um dia até 6h do dia seguinte no horário da Paraíba que coincide com leituras de pluviômetros feitas às 7h da manhã (Figura 18). Os dados diários foram depois convertidos para acumulados de 3 dias, 7 dias, mensais e anuais.

Figura 18: Esquema de conversão dos dados do TRMM.



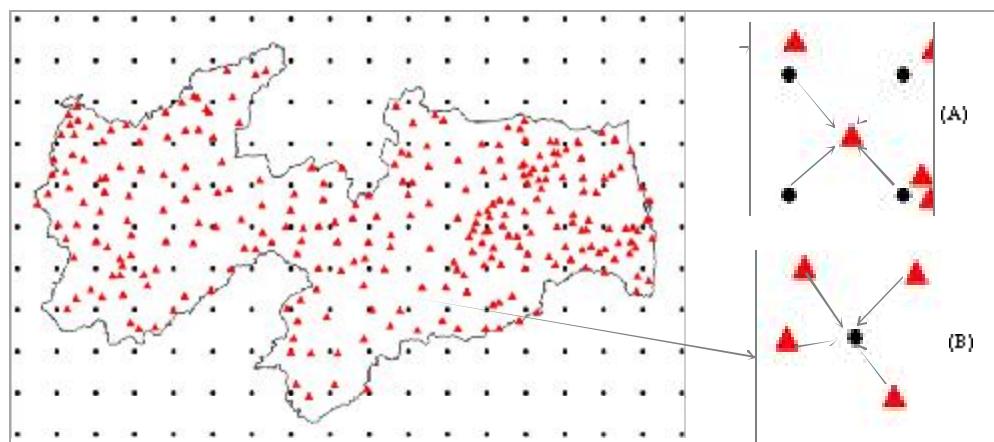
Fonte: Santos, (2014).

### 3.5. Comparação de dados dos pluviômetros x TRMM

#### 3.5.1. Análise pontual

Para a comparação pontual foram desenvolvidas duas formas de análises conforme mostra o esquema apresentado na Figura 19: (A) Interpolação dos dados do TRMM para locais dos pluviômetros; (B) Interpolação dos dados dos pluviômetros para pontos do TRMM. O procedimento de interpolação foi realizado conforme descrito no item 3.5.5.

Figura 19: Procedimentos de interpolação para comparação de dados.



Fonte: Autoria própria.

### 3.5.2. Análise agregada por bacia hidrográfica

Além da análise comparativa pontual dos pluviômetros com os dados do TRMM para todo o Estado da Paraíba, foi desenvolvido um estudo comparativo da chuva estimada e observada nas principais sub-bacias hidrográficas delimitadas pela AESA (Tabela 2). A partir das séries de chuva interpoladas dos pluviômetros e do satélite, foi possível extrair médias diárias da precipitação sobre a bacia inteira. Foram feitas comparações entre as séries de chuvas médias diárias, acumulados de 3 dias, acumulados de 7 dias e mensal, entre chuva média de pluviômetros e a do satélite no período entre 1998 e 2011.

Os totais de postos apresentados na Tabela 2 referem-se aos postos localizados dentro de cada bacia. No entanto, para o cálculo da chuva média em cada bacia, foram utilizados postos que não estão inseridos nas respectivas bacias, uma vez que foi utilizado o processo de interpolação. Isso explica o fato de uma bacia não conter postos, como é o caso da bacia do rio Guaju, e ser possível calcular a média de chuva.

**Tabela 2: Principais Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba.**

Bacia Hidrográfica	Área (km <sup>2</sup> )	Total de postos localizados no interior da bacia	Número de postos válidos no interior da bacia
Rio Piranhas (Sertão)	24.244,36	100	77
Rio Piranhas (Borborema)	1.983,31	7	6
Rio Paraíba	20.071,83	90	76
Rio Jacu	977,31	3	1
Rio Curimataú	3.313,58	17	12
Rio Camaratuba	637,16	5	4
Rio Guaju	152,62	0	0
Rio Mamanguape	3.522,69	33	25
Rio Gramame	589,38	8	4
Rio Miniri	436,19	2	1
Rio Trairi	106,08	1	1
Rio Abiaí	585,51	3	3

**Fonte:** Adaptado de AESA

### 3.5.3. Análise agregada por mesorregião

A partir das séries de chuva interpoladas dos pluviômetros e do satélite, foi possível extrair séries de chuva diária, acumulados de 3 dias, acumulados de 7 dias e mensal sobre as mesorregiões da Paraíba. Foram feitas comparações entre as séries de chuvas médias e entre a

precipitação acumulada diária e mensal, bem como a dispersão entre chuva média de pluviômetros e do satélite em todo o período temporal de estudo. Para as mesorregiões, as médias também foram calculadas levando-se em consideração postos que não estão inseridos em sua área, conforme descrito no item 3.5.2.

**Tabela 3 Número de postos por mesorregião**

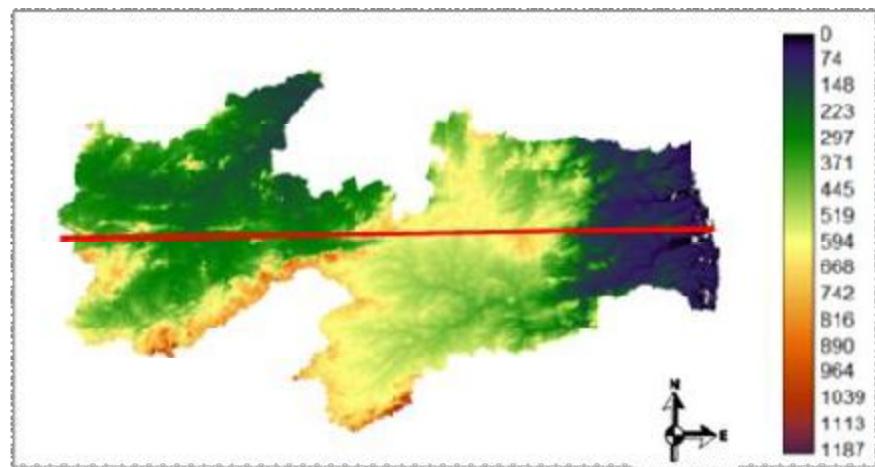
Mesorregiões	Número de postos localizados na área da mesorregião	Número de postos válidos localizados na área da mesorregião
Mata paraibana	41	27
Agreste paraibano	78	64
Borborema	54	45
Sertão	96	73

**Fonte: Autoria própria**

#### **3.5.4. Análise das chuvas a partir da topografia**

A análise a partir da topografia consistiu em uma comparação da precipitação estimada e observada, anual e mensal, levando-se em consideração o aspecto topográfico da Paraíba. O perfil topográfico do Estado foi traçado a partir dos dados altimétricos de superfície oriundos do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), disponibilizados no portal (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/mission/SRTM>) (Figura 20).

**Figura 20: Dados topográficos provenientes do SRTM para o Estado da Paraíba.**



**Fonte: Autoria própria.**

Foram gerados mapas de chuva utilizando dados da AESA e do TRMM. A partir desses mapas foram traçados perfis de chuva para cada ano e mês, tomando como referência à

parte central do Estado, ou seja, próximo da latitude 7°(linha vermelha – Figura 20). Esse perfil foi traçado no sentido oeste-leste, tanto nos mapas de chuva quanto na imagem SR TM (topografia do Estado).

### 3.5.5. Procedimento de interpolação

Para a interpolação dos dados pluviométricos, foi utilizada a rotina computacional INTERPLU, integrante do conjunto de ferramentas computacionais do modelo hidrológico MGB -IPH (Collischonn, 2001). A interpolação foi calculada através do método do Inverso do Quadrado da Distância, dado pela Equação 2.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} P_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Equação 2: Equação de Interpolação pelo Método do Inverso do Quadrado da Distância

Nessa equação,  $P$  é a precipitação interpolada,  $P_i$  a precipitação no posto pluviométrico (Figura 18A) ou no ponto do TRMM (Figura 18B) e  $d_i$  é a distância entre o pluviômetro e cada ponto da grade do satélite ou a distância do ponto para cada pluviômetro considerado (Figura 18).

### 3.5.6. Análise de correlação

A análise de correlação foi feita tomando como base a equação de Pearson (Equação 3), que mede o grau da correlação linear entre as estimativas de chuva por satélite e o pluviômetro. Este coeficiente assume apenas valores entre -1 e 1, com perfeita associação em um.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P - \bar{P})(S - \bar{S})}{(n-1)\sigma_P \sigma_S} \quad (\text{Eq. 3})$$

Equação 3: Equação para o cálculo da correlação de Pearson

Nessa equação  $P$  representa o quantitativo de chuva do pluviômetro na unidade de tempo  $i$ ,  $\bar{P}$  representa a média de chuva no período de tempo considerado,  $S$  é o quantitativo de chuva estimada no satélite na unidade de tempo  $i$ ,  $\bar{S}$  é a média de chuva estimada no satélite no período de tempo considerado,  $n$  é o total de períodos de tempo,  $\sigma_P$  e  $\sigma_S$  são os desvios padrão da chuva no pluviômetro e no satélite, respectivamente.

### 3.5.7. Medidas de desempenho

Além dos coeficientes de correlação linear, que já se constituem em medidas de desempenho, foram calculadas medidas de performance que quantificam o erro associado às estimativas de chuva do TRMM. Foram utilizadas duas medidas de performance.

- i) Erro Médio Absoluto (EMA) – é uma das medidas mais comuns de erro de previsão. Caracteriza-se por não levar em conta se um erro foi superestimado ou subestimado e por ser a média dos erros cometidos pelo modelo de previsão durante uma série de períodos de tempo. Para calcular o EMA, subtrai-se o valor da previsão ao valor real em cada período de tempo. Tendo em conta que o resultado deverá ser positivo, ou seja, sempre em módulo, soma-se e divide-se pelo número de valores que foram usados para obter tal soma, conforme a equação 4, onde  $S_i$  é a chuva estimada por satélite,  $P_i$  é a chuva no pluviômetro e  $n$  é o número de observações realizadas.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - P_i| \quad (\text{Eq. 4})$$

Equação 4: Equação do Erro Médio Absoluto

- ii) Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) – É a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre a chuva obtida por satélite e por pluviômetros. Esse valor é calculado por:

$$REMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - P_i)^2}, \quad (\text{Eq. 5})$$

Equação 5: Equação da Raiz do Erro Médio Quadrático

### 3.5.8. Análise de sazonalidade

Com o conjunto de dados disponíveis também se investigou o fator da sazonalidade das chuvas na Paraíba. Nessa perspectiva buscou-se compreender como se dá a correlação entre chuva diária de pluviômetro e a chuva diária do satélite TRMM ao longo do ano. Pretende-se com isso verificar qual (ou quais) meses do ano os dados oriundos do satélite são mais ou menos significativos em termos de reprodução dos dados observados em pluviômetros para uma dada região. Esse procedimento foi feito a partir de acumulados diários, 3 dias, 7 dias e mensais.

### **3.5.9. Espacialização de resultados**

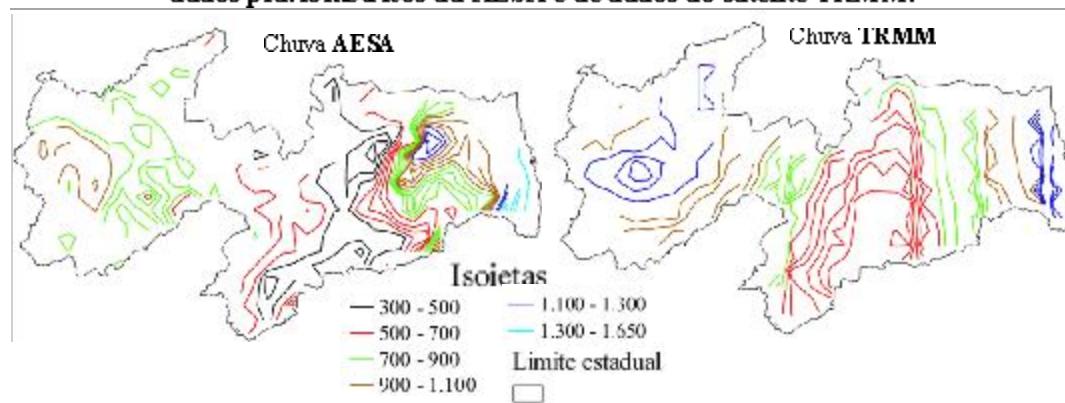
Outra análise que foi desenvolvida sobre as chuvas na Paraíba a partir do conjunto de dados diz respeito à espacialidade da precipitação e das estatísticas (coeficiente de correlação e medidas de performance). Foi verificada qual a correlação existente entre três variáveis: tipo de chuva, região da Paraíba e níveis de precipitação estimados pelo TRMM. Com isso, foi possível identificar, tomando-se áreas do Estado onde predominam os mesmos tipos de chuva, qual o desempenho do satélite na informação (estimativa) sobre estas regiões e o nível de confiabilidade desses dados para cada tipo de chuva estudado.

## Capítulo 4. Resultados

### 4.1. Análise do regime de chuva na Paraíba

A variabilidade, tanto espacial como temporal, é uma das principais características do regime de chuvas no Estado da Paraíba. A Figura 21 evidencia que na maior parte do Estado os totais observados em pluviômetros, em média, são inferiores a 900 mm. Os maiores valores de chuva estão concentrados na mesorregião do Agreste e na parte litorânea do Estado. Numa faixa mais próxima do litoral a média de chuva supera 1300 mm. Com exceção do litoral, o satélite TRMM apresenta uma tendência a superestimar os valores. Na observação da distribuição das chuvas no Estado, há indícios de que o satélite tende a estimar precipitações próximas das encontradas nos pluviômetros.

**Figura 21: Isoetas da precipitação média anual no período 1998 – 2011, a partir de dados pluviométricos da AESA e de dados do satélite TRMM.**



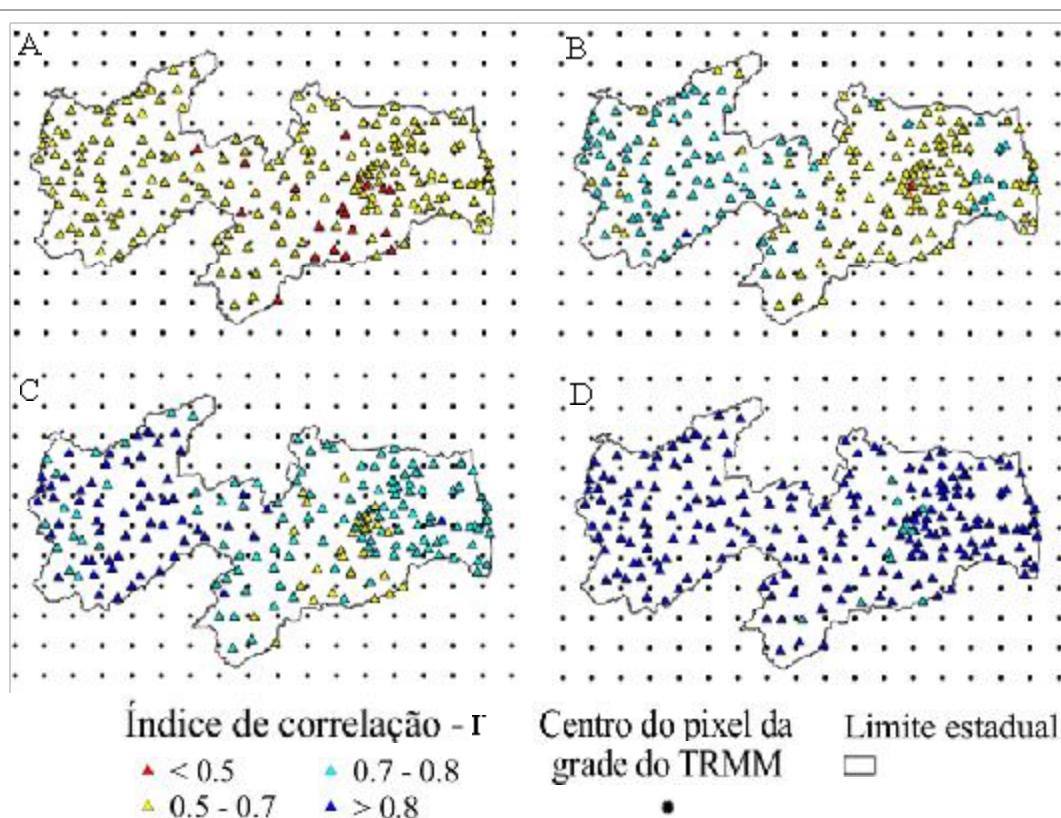
Fonte: Autoria própria.

### 4.2. Análise pontual

#### 4.2.1. Correlação da chuva estimada pelo satélite TRMM e a chuva observada em pluviômetros

A Figura 22 apresenta a correlação linear entre as precipitações estimadas pelo satélite TRMM e as observadas por pluviômetros no período de 1998 a 2011, para quatro séries diferentes de chuvas (diária, acumulada para 3 dias, acumulada para 7 dias e mensal). Para essa análise foi utilizada a interpolação dos dados do TRMM para locais dos pluviômetros (procedimento A apresentado na Figura 19), conforme descrito na metodologia da pesquisa.

**Figura 22: Correlação entre as precipitações estimadas pelo satélite TRMM e as precipitações observadas em pluviômetro, onde A representa a chuva diária, B acumulados de 3 dias, C acumulados de 7 dias e D acumulados mensais.**



Na Figura 22A onde aparece a correlação diária entre os dados do TRMM e os dados de pluviômetro, observa-se que na maior parte do Estado, correspondente a um total de 191 dos 210 postos (ou seja, 91% do total), a correlação varia de 0,5 a 0,7. Esse intervalo de correlação, de acordo com Jiménez (2011) e Collischonn (2006) é considerado como significativo. Nota-se que em um pequeno percentual de postos, equivalente a 19 dos 210 postos (9%), o índice de correlação está abaixo de 0,5, que representa uma fraca correlação.

Diferentemente do que ocorre na análise diária, os acumulados de três dias na Figura 22B, detectou-se uma diferença espacial nos índices de correlação entre algumas áreas geográficas do Estado. Algumas partes do Estado apresentam predominantemente uma boa correlação variando de 0,5 a 0,7, enquanto que o interior do Estado aparece com índices mais altos de correlação variando entre 0,7 e 0,8. Esse fato é analisado com mais detalhes no item que trata das mesorregiões da Paraíba. De um modo geral, houve 118 postos de um total de

209 (ou seja, 56%) com correlação variando de 0,5 a 0,7 e 89 postos (42%) que variam de 0,7 a 0,8.

Nos acumulados de sete dias, apresentados na Figura 22C, nota-se que houve um aumento nos índices de correlação em todo o Estado, mas permanece uma diferença na distribuição espacial. Percebe-se que um número mínimo de postos, 27 de 209 postos (12%) apresentaram as menores correlações, entre 0,5 e 0,7, que na verdade já representa uma boa correlação. Nessa série de dados acumulados a 7 dias, pode-se afirmar que a grande maioria dos postos apresentou correlação alta com a chuva do satélite, dos 209 postos 123 (58%) apresentam correlação variando de 0,7 a 0,8 e 59 (28%) estão acima de 0,8.

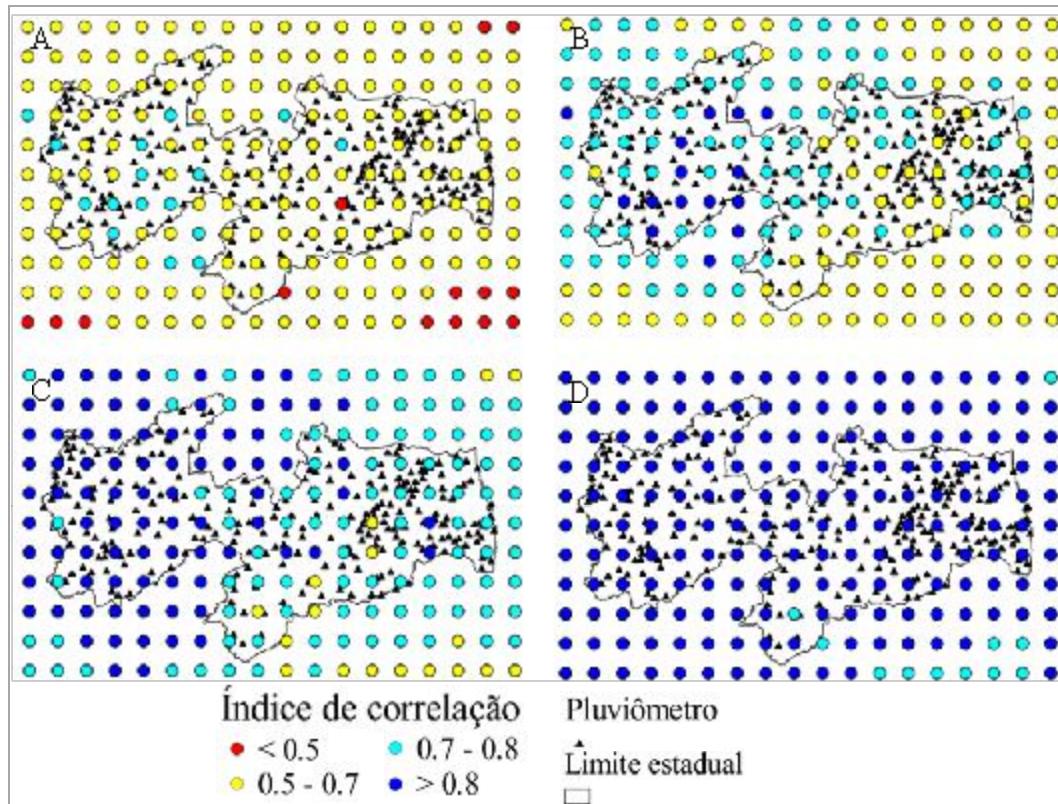
A Figura 22D que representa a correlação dos acumulados mensais de chuvas indica uma correlação alta para todo o Estado, com valores superiores a 0,8 em 199 dos 210 postos (95%). Comparando-se os dados de correlação das quatro séries observa-se que há uma melhor correlação quando os dados estão acumulados em um intervalo de tempo maior, ou seja, o acumulado mensal apresenta uma correlação bem significativa quando comparada aos demais períodos. Isto é esperado, na medida que quanto maior o período de análise do total precipitado, mais fácil para um sensor realizar estimativas que se aproximam da realidade, devido à grande variabilidade temporal da chuva, crescente com a redução do período de tempo de análise.

Outra forma de comparar os dados de precipitação entre satélite e pluviômetros é interpolando a chuva dos pluviômetros para os pontos da grade do satélite TRMM. Esse processo foi explicado com mais detalhes no capítulo de metodologia (procedimento B da Figura 19).

A Figura 23 apresenta a correlação linear entre as precipitações estimadas pelo satélite e as observadas por pluviômetros e interpoladas para pontos da grade, no período de 1998 a 2011, para quatro séries diferentes de chuvas: diária, acumulados de 3 dias, acumulados de 7 dias e mensal.

A Figura 23A representa a correlação linear diária. Nessa figura foi possível identificar, que dos 198 pontos da grade 168 (85%) apresentam valores que estão entre 0,5 e 0,7. Esse resultado tem forte semelhança com os resultados observados na Figura 22, que foram calculados com o outro tipo de interpolação.

**Figura 23: Correlação linear utilizando a interpolação do pluviômetro para pontos da grade do satélite TRMM na Paraíba.**



**Fonte: Autoria própria.**

Para os valores acumulados em 3 dias, 7 dias e mensal, conforme mostram as Figuras 23B, 23C e 23D, identificam-se resultados de correlação ainda mais próximos dos observados nas Figuras 22B, 22C e 22D. Apesar de conjuntos com totais de elementos diferentes, ou seja, no caso da Figura 22, são 210 postos pluviométricos, enquanto, a Figura 23 apresenta 198 centros de pixels. Percebe-se forte tendência em termos de análises percentuais, quais sejam: por exemplo, no acumulado de três dias, pelo método da Figura 22 tem-se aproximadamente 45% dos postos com correlação acima de 0,7. Já pelo método de interpolação que tem os resultados na Figura 23 para o mesmo intervalo de correlação tem-se cerca de 50% dos pixels da grade.

Os resultados apresentados pelas Figura 22 e 23 expõem claramente que há um forte indicio da destreza do satélite TRMM para estimar precipitações com mais fidelidade em intervalos de tempos maiores, como já comentado. Está evidenciado, a partir dos resultados obtidos nos dois processos de interpolação, que o período mensal significa aquele no qual as

estimativas do TRMM melhor expressam a realidade de chuvas no Estado da Paraíba. No entanto, essas considerações só devem ser interpretadas para o período geral em estudo. Ou seja, elas nada dizem sobre precipitações para um determinado mês do ano, nem também para investigações sobre bacias e mesorregiões. Para esses tipos de investigações devem ser observados os valores em cada mês do ano e em cada região que se pretenda estudar.

Nas análises diárias, realizadas para cada mês, foram observados um total de 212 postos, Figura 24. Nesse cenário de estudo observou-se que existe uma sazonalidade nos resultados, com melhores correlações ocorrendo no primeiro semestre de janeiro a junho e no mês de dezembro. No mês de janeiro, dos 212 postos analisados 158 (74%) apresentaram correlação variando de 0,5 a 0,7. Nesse mesmo mês, 12 postos (5%) apresentaram melhores correlações variando de 0,7 a 0,8 e 42 postos (19%) tiveram correlação baixa, ou seja, inferior a 0,5. Essas médias de valores se repetem até o mês de junho, conforme Figura 24.

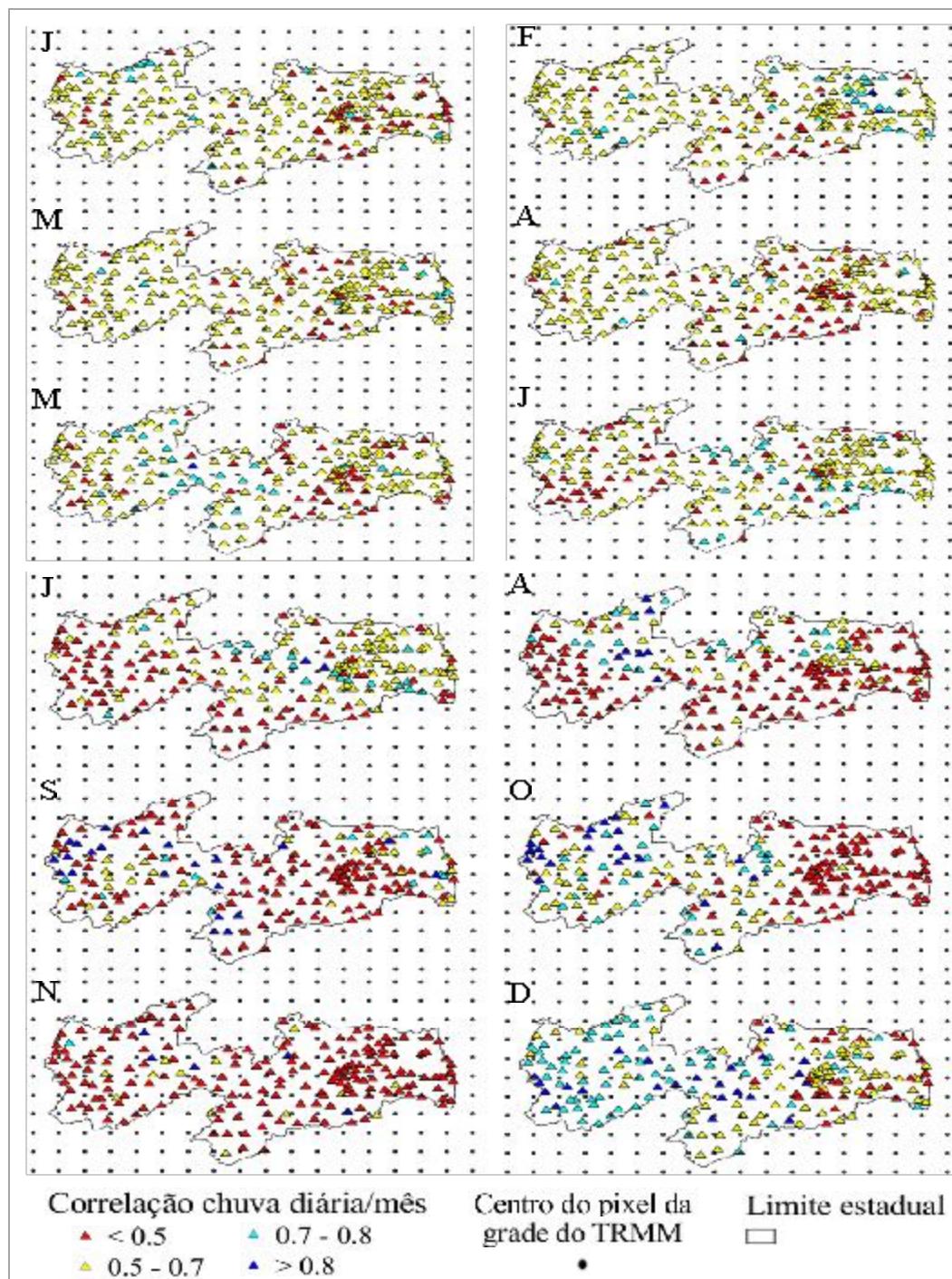
Esses resultados apontam para uma forte relação entre melhores correlações e meses mais chuvosos. Pois, ao analisar o período mais chuvoso ao longo da Paraíba verifica-se que, em todas as regiões, ele ocorre entre janeiro e junho, com variações apenas nos máximos atingidos. Isso indica, pela análise pontual, que há uma tendência de melhores estimativas do TRMM para os meses mais chuvosos. Essa afirmação torna-se ainda mais consistente pelas correlações encontradas nas análises dos acumulados de 3 dias, 7 dias e mensal.

Essa tendência na estimativa do TRMM, também foi encontrada por Pereira *et al.* (2013), em estudo que avaliaram os dados de precipitação do satélite TRMM para o Brasil, mostrando que nos quatro primeiros meses do ano, período do ano que constitui a maior parte da época chuvosa das regiões Centro-Oeste, Norte, Nordeste e Sudeste, a relação entre os dados estimados e observados apresentaram comportamento similar.

O mês de julho apresenta uma variação espacial nos resultados, com 99 dos 212 postos (46%) variando de 0,5 a 0,7 de correlação. A maioria desses valores está concentrada no litoral do Estado. Noventa postos (42%) apresentam correlações baixas, com valores inferiores a 0,5, a maioria desses postos está localizada no interior do Estado.

Os meses de agosto e setembro apresentam respectivamente 135 (63%) e 138 postos (65%) com baixa correlação, ou seja, valores inferiores a 0,5. Como podemos ver na Figura 24 diferentemente do que ocorre no mês de julho, os postos com baixa correlação estão distribuídos por todo o Estado.

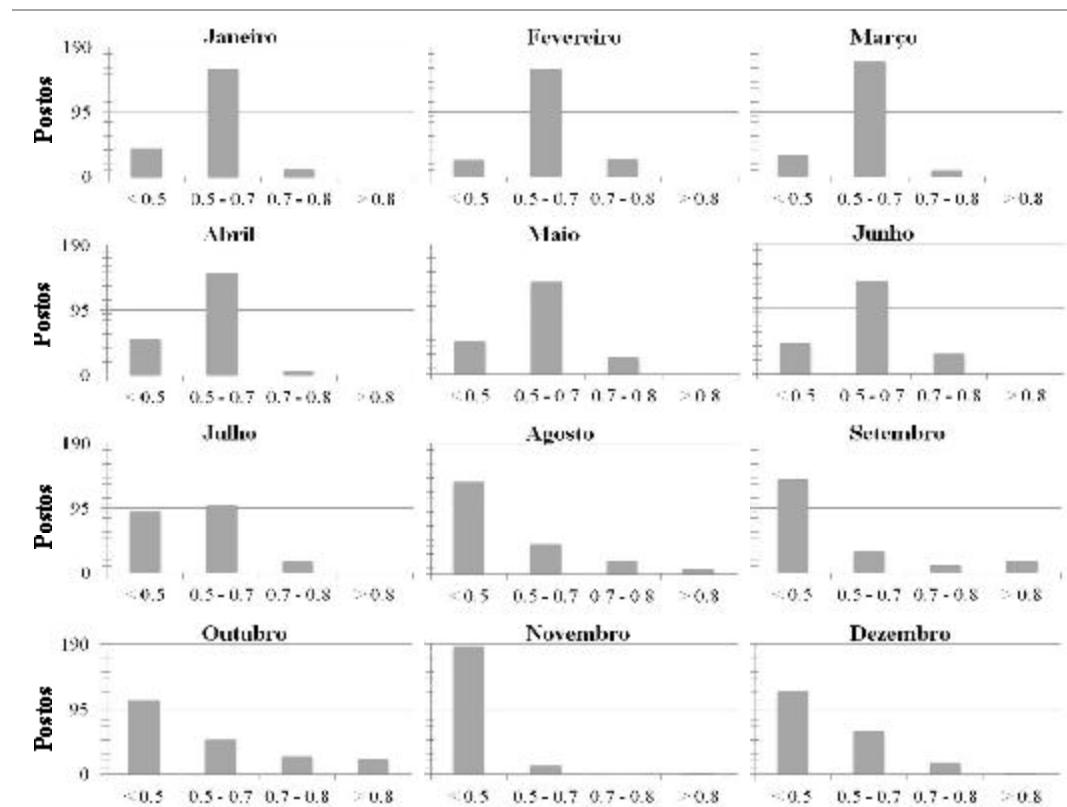
**Figura 24: Correlação de chuva diária entre pluviômetro e dados do TRMM separadamente por mês do ano.**



Fonte: Autoria própria.

No mês de outubro dos 212 postos, 108 (51%) tiveram correlação abaixo de 0,5. Esses postos estão em sua maioria concentrados no litoral do Estado. Os demais postos apresentam correlações significativas, 51 (24%) variam de 0,5 a 0,7, 27 (12%) com correlações de 0,7 a 0,8 e 22 (10%) estão com valores altos, maiores que 0,8. Novembro aparece com os piores resultados, dos 212 postos, 187 que correspondem a 88% dos postos estão abaixo de 0,5, como pode ser observado na Figura 25.

**Figura 25: Correlação entre chuvas diárias observadas e estimadas por mês.**



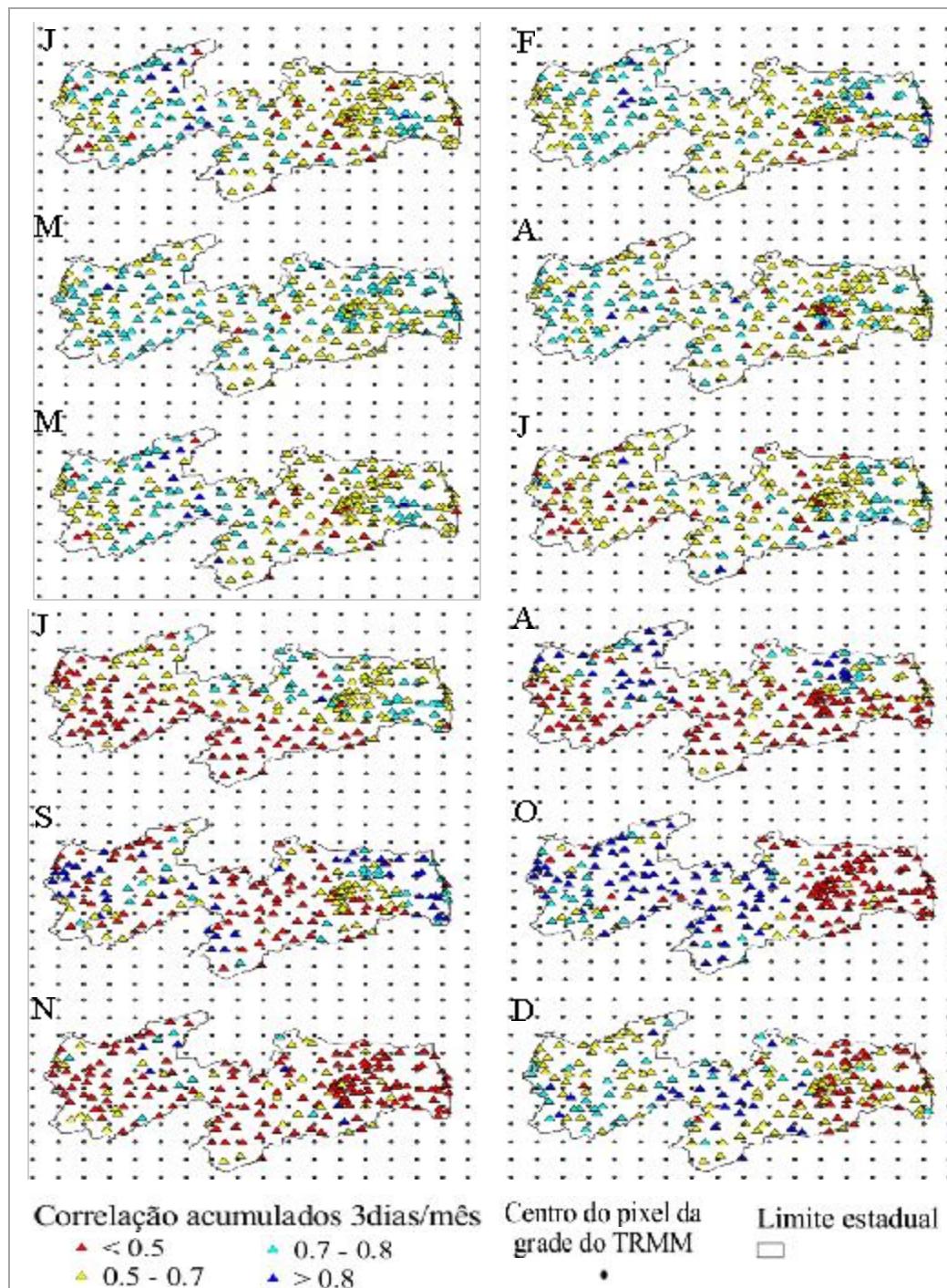
**Fonte: Autoria própria.**

Esses resultados indicam que as estimativas do satélite TRMM podem ser consideradas mais próximas das estimativas dos pluviômetros, sob dois aspectos: um relativo aos meses e outro relativo à região do Estado. Com relação à análise mensal pode-se inferir que os meses mais significativos de estimação são março e abril. Considerando-se o aspecto regional pode-se destacar que o interior apresenta bons resultados em quase todos os meses do ano (Figura 24).

A comparação entre a precipitação estimada e a observada para acumulados de três dias (Figura 26) apresenta boa correlação para os seis primeiros meses do ano. Dos 210 postos

analizados, a grande maioria apresenta valores que variam de 0,5 a 0,7. Coincidentemente, observa-se em algumas partes do Estado que esse também é o período do ano que mais chove.

**Figura 26: Correlação entre os dados estimados pelo TRMM e observados em pluviômetros para acumulados de 3 dias separados por mês do ano.**

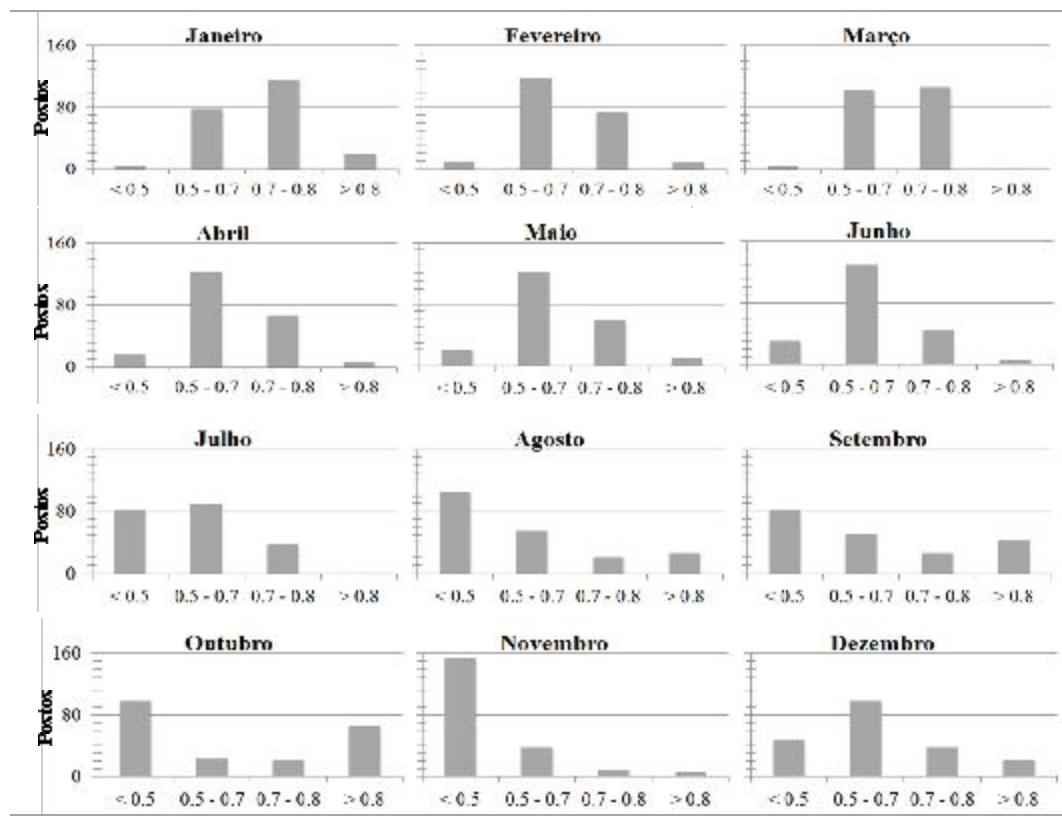


Fonte: Autoria própria.

Assim, como foram observados anteriormente na correlação diária, os meses de julho até novembro apresentaram um maior número de postos com correlações baixas. Os meses de julho, agosto, setembro e outubro apresentaram respectivamente 82 (39% do total), 105 (50%), 82 (39%) e 98 postos (46%) com correlação abaixo de 0,5, como mostram os gráficos da Figura 27.

No mês de outubro a maior parte dos 98 postos com baixa correlação está concentrada no litoral do Estado. No interior aparecem 23 postos com correlações boas, variando de 0,5 a 0,7, 22 com correlações ainda melhores, variando de 0,7 a 0,8 e 65 com correlações altas, acima de 0,8. Julho, assim como foi observado nas análises diárias, segue apresentando melhores resultados no litoral.

**Figura 27: Correlação entre os dados estimados e observados para acumulados de 3 dias separados por mês do ano.**



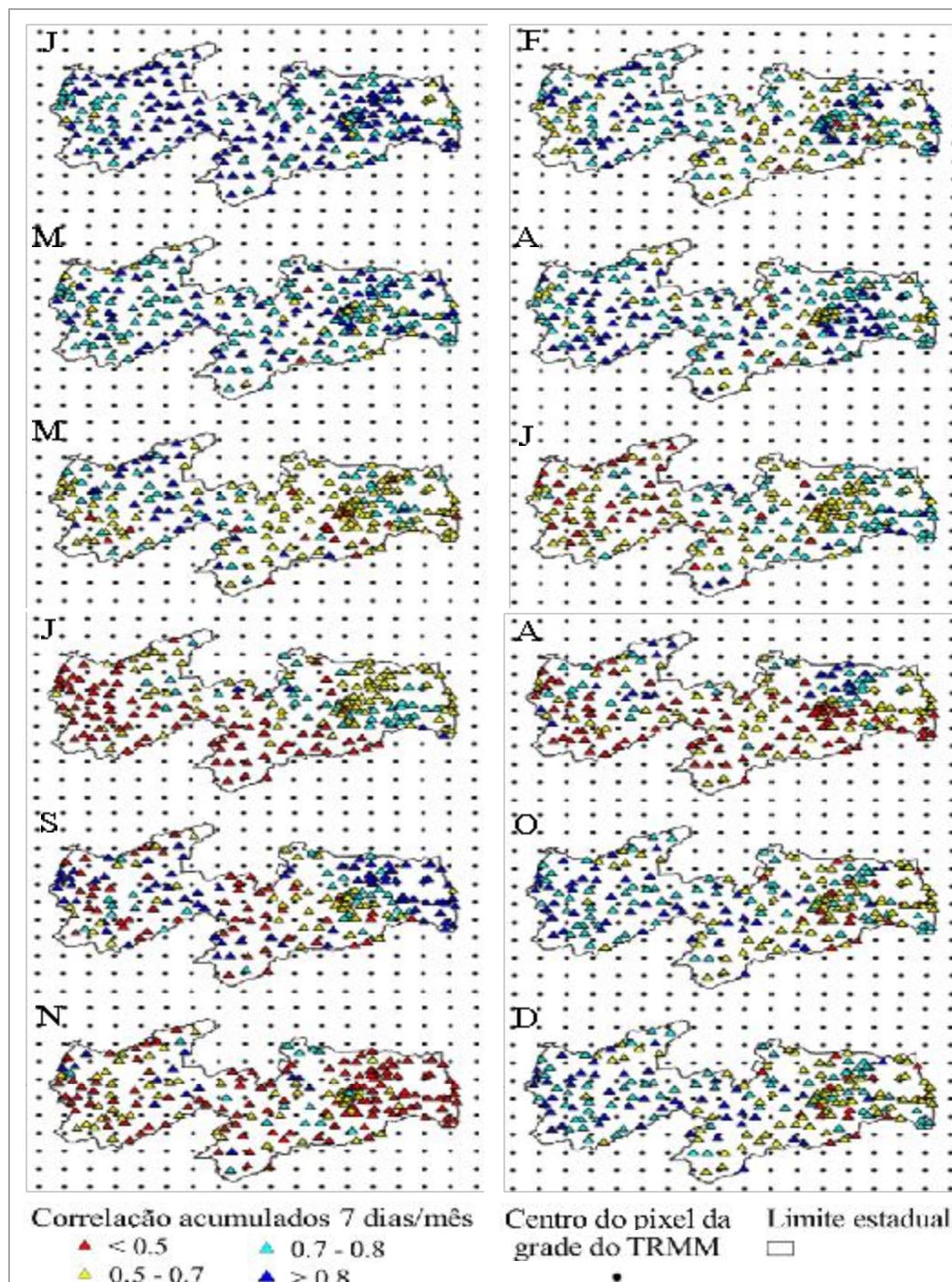
**Fonte: Autoria própria**

Novembro, de modo análogo ao que ocorre na correlação diária, aparece como o pior mês em termos de resultados. Dos 210 postos analisados 154 estão com correlações abaixo de 0,5, o que equivale a 73% do total. O mês de dezembro, no acumulado de 3 dias, também apresenta bons resultados, como pode ser observado na Figura 26.

Em uma análise mais detalhada percebe-se que no período seco (julho a novembro), ou seja, os meses do ano que ocorrem menores quantidades de chuva na Paraíba, a correlação linear decresce em todos os meses. Esses resultados coincidem com a pesquisa efetuada por Pereira *et al.* (2013), cujos resultados mostram que no período de transição da estação seca para a chuvosa (outubro a dezembro), nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, as correlações lineares diminuem.

Quando foi utilizada uma quantidade maior de dados, ou seja, acumulados de sete dias a correlação aumenta significativamente em todos os meses do ano (Figura 28). Percebe-se que nos quatro primeiros meses do ano (janeiro, fevereiro, março e abril), o índice de correlação foi alto em todo o Estado. Janeiro é o mês com os melhores resultados, dos 212 postos analisados 131 (62%) apresentaram índices acima de 0,8.

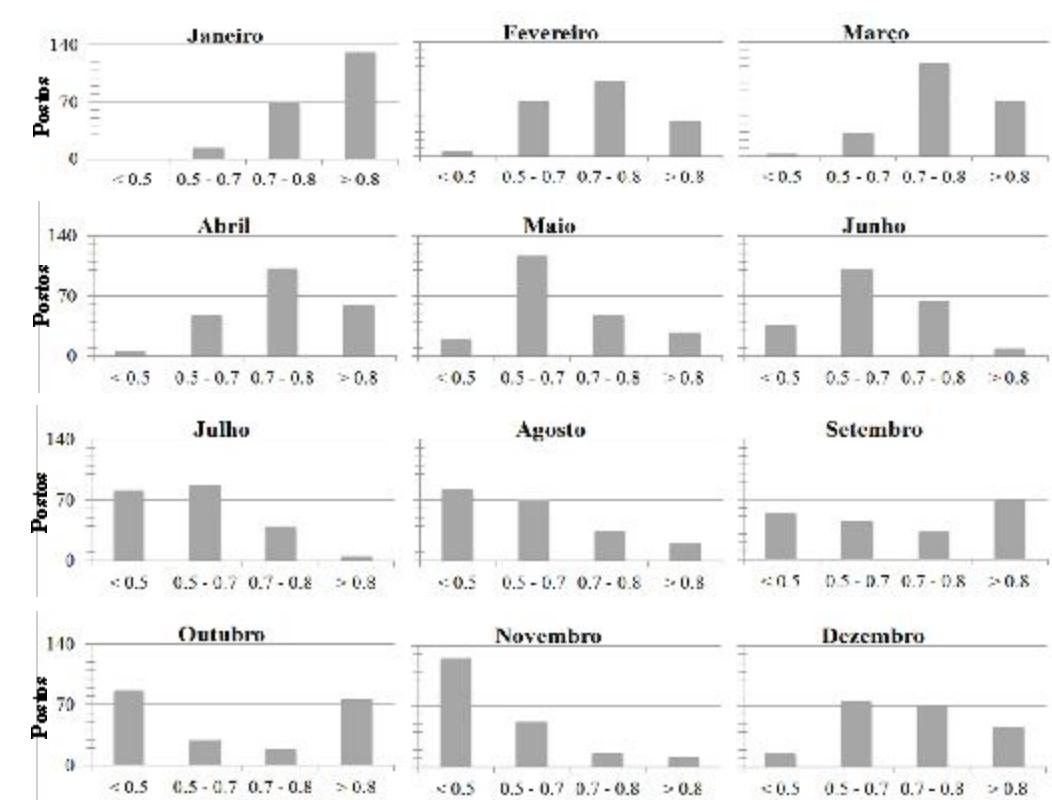
**Figura 28: Correlação entre os dados estimados pelo TRMM e observados pela AESA para acumulados de 7 dias separados mês do ano.**



Fonte: Autoria própria.

Os meses de maio, junho, outubro e dezembro trazem a maioria dos resultados variando de 0,5 a 0,7, e de 0,7 a 0,8 (Figura 29), de acordo com as pesquisas de Nóbrega *et al.* (2008) e Woldemeskel *et al.* (2013) para esse tipo de análise esses valores são considerados bons. O período de julho a setembro apresenta correlações mais baixas, fato observado, também, nos acumulados de três dias. Novembro segue com índices de correlação abaixo dos demais, fato observado nas figuras anteriores.

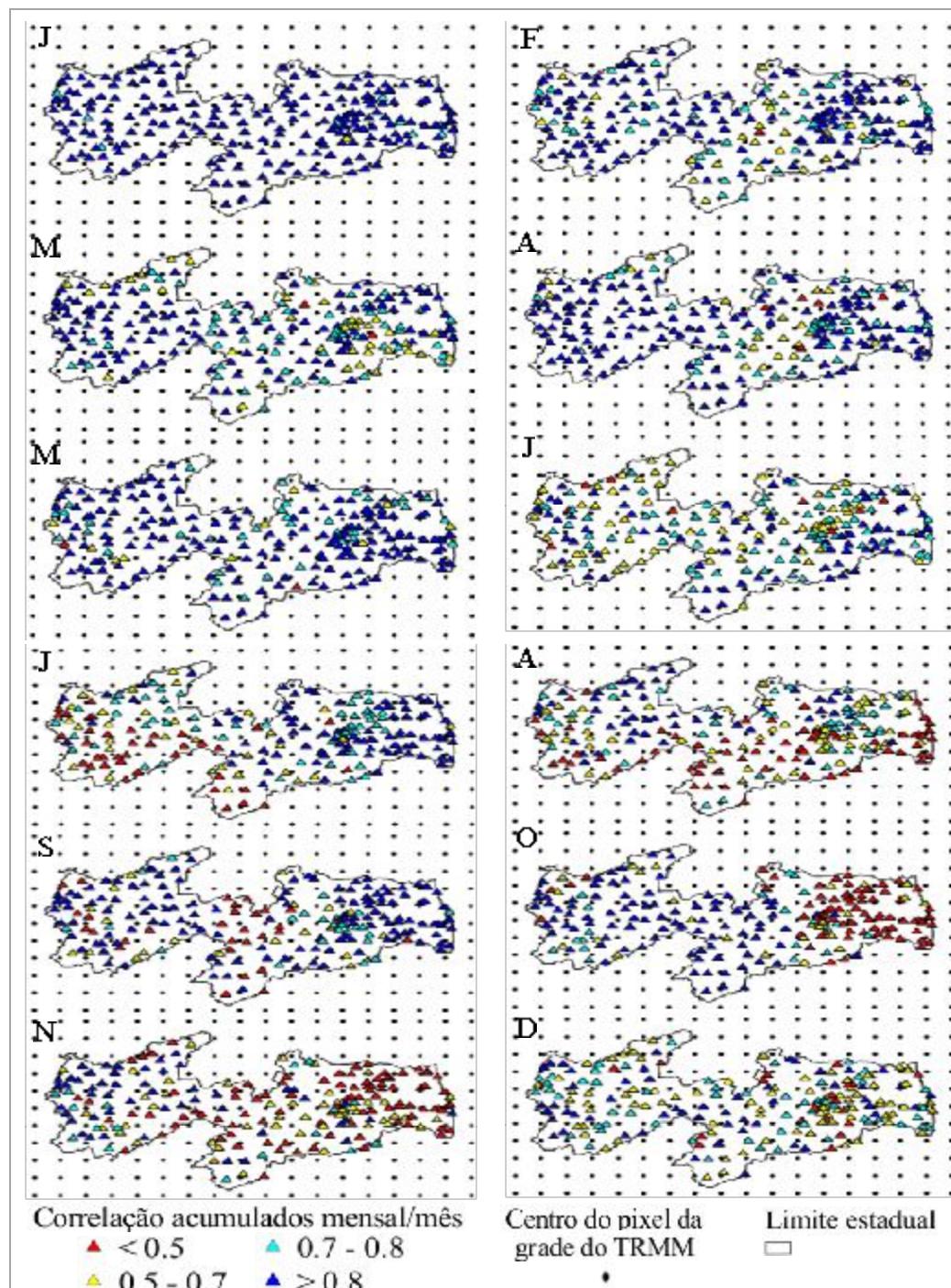
**Figura 29: Correlação entre dados de satélite e dados de pluviômetros para acumulados de 7 dias separados por mês do ano.**



**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 30 onde foram observados os acumulados mensais para cada mês do ano, os índices de correlação seguem apresentando bons resultados. Conforme foi observado anteriormente, os períodos com maior quantidade de dados acumulados representa uma melhor correlação entre os dados do satélite e os dados observados. Percebe-se que os meses de janeiro a junho apresentam alta correlação, com a maioria dos valores acima de 0,8.

Figura 30: Correlação entre os dados estimados pelo TRMM e observados em pluviômetros para acumulados mensais.

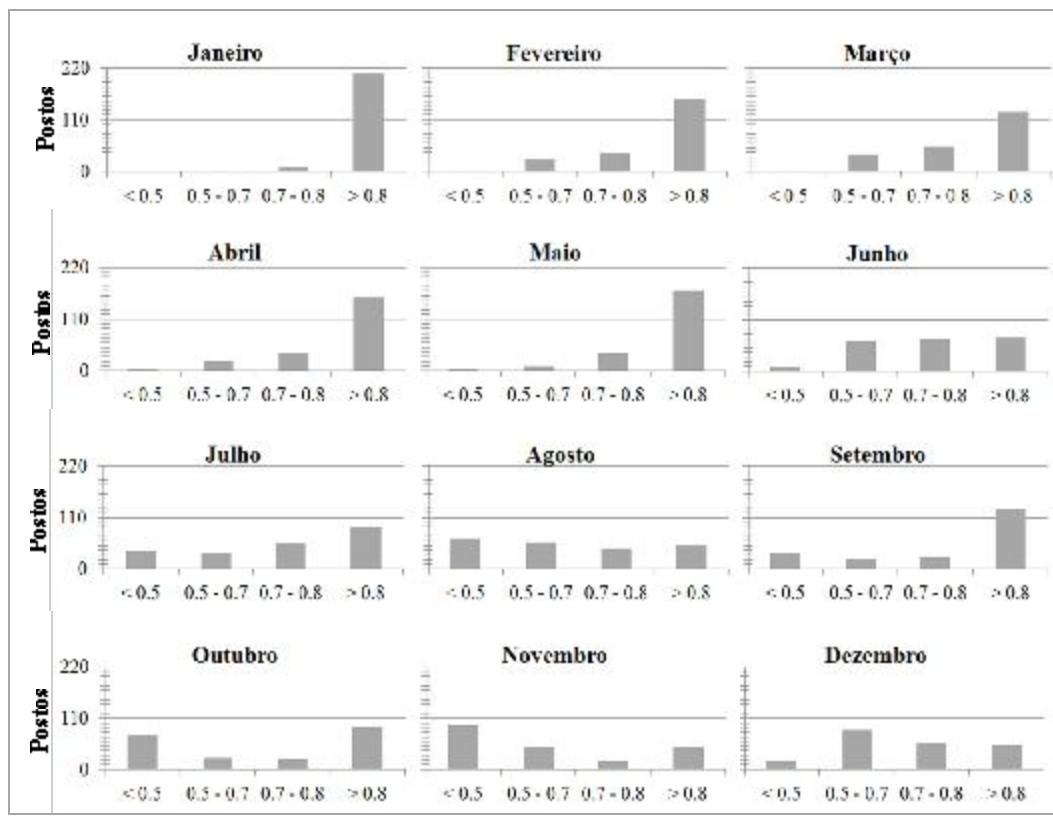


Fonte: Autoria própria.

Isso já havia sido observado nas figuras anteriores, ou seja, os primeiros meses do ano apresentaram correlações maiores para todos os conjuntos de dados (diários, acumulados de três dias, acumulados de sete dias e mensal). Como já foi mencionado, pela análise pontual, há um indicativo que o satélite estima com mais fidelidade no período chuvoso, que no Estado da Paraíba, corresponde aos primeiros meses do ano.

Nos meses de julho a novembro percebe-se uma variação espacial nos valores de correlação. Dos 213 postos analisados, os meses de julho, agosto, setembro, outubro e novembro respectivamente 38 (17%), 64 (30%), 32 (15%), 75 (35%) e 95 (45%) apresentam valores de correlação abaixo de 0,5, conforme mostra a Figura 31. Também pode-se perceber que setembro e outubro possuem, respectivamente, 135 (63%) e 91 (43%) postos com correlação alta, acima de 0,8 e que novembro segue como sendo o mês que apresentou os piores valores, ou seja, o maior o percentual de correlação abaixo de 0,5.

**Figura 31: Correlação entre os dados estimados pelo TRMM e observados em pluviômetros para acumulados mensais.**



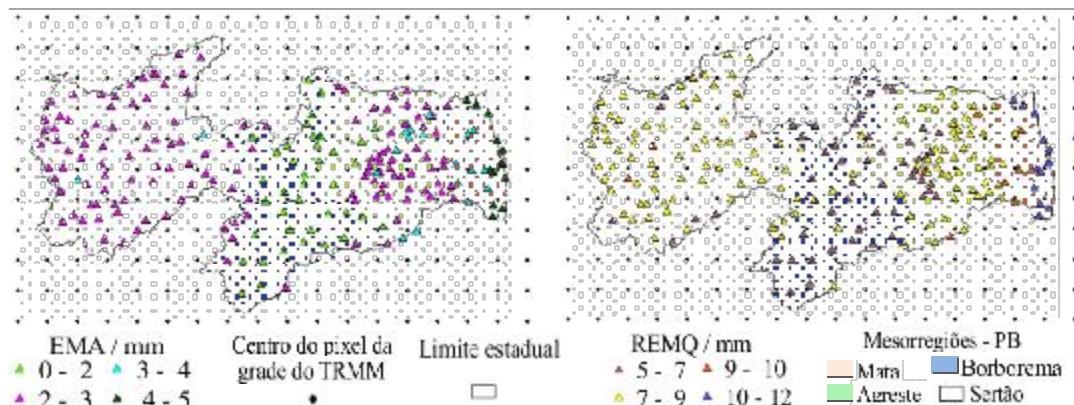
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.2.2. Medidas de desempenho

Na análise pontual dos dados foi feita a correlação linear entre a chuva observada e chuva estimada para todo o Estado da Paraíba. Para a análise das medidas de desempenho foram utilizados os valores do erro médio absoluto (EMA) e da raiz do erro médio quadrático (REMQ). Como serão comparadas chuvas observadas e estimadas diárias e acumuladas (3 dias, 7 dias e mensal), os intervalos de valores de EMA e REMQ sofrerão variações tendo em vista que os totais de chuvas serão maiores quanto maior for o período de tempo acumulado em análise.

Na Figura 32 apresenta-se a análise espacial dos valores de EMA e de REMQ para chuva diária. Percebe-se que, para a esse tipo de observação, o EMA está variando entre 0 e 5 mm e a REMQ varia de 5 a 12 mm. Esses resultados mostram que não houve uma distância considerável entre os dados observados em pluviômetros e os dados estimados pelo satélite.

**Figura 32: Análise espacial do Erro Médio Absoluto e da Raiz do Médio Quadrático para chuva diária.**



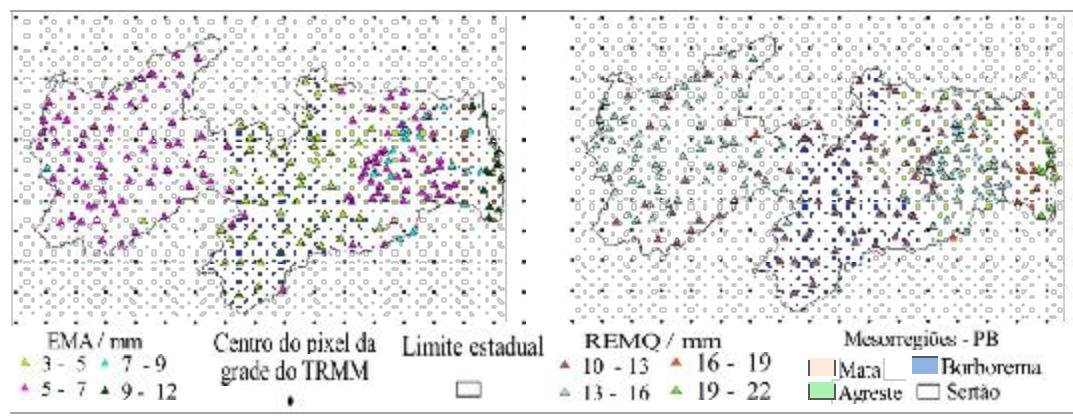
**Fonte: Autoria própria.**

Na parte central do Estado, onde ocorrem os menores volumes de chuva, de acordo com a análise do regime de chuva no tópico 4.2, observam-se os menores valores de EMA e de REMQ, com variações de 0 a 2 mm e de 5 a 7 mm, respectivamente. Ou seja, os dados estimados pelo satélite para essa porção do Estado apresentam a menor diferença com relação aos dados observados pela AESA. No Sertão, onde os volumes de chuva também são baixos, a maioria dos valores apresentados pelo EMA variam de 2 a 3 mm, enquanto que o REMQ varia de 7 a 9 mm. Na parte litorânea da Paraíba foram detectados os maiores valores de EMA

e de REMQ para a chuva diária. No entanto, mesmo nessa região, onde ocorreram as maiores diferenças, os valores não apresentaram uma elevada disparidade entre a chuva estimada e a chuva observada.

Para os acumulados de 3 dias, tem-se o EMA variando de 3 a 12 mm e o REMQ variando de 10 a 22 mm, conforme mostra a Figura 33. A variação sazonal dos acumulados de 3 dias apresentou fortes semelhanças com os resultados observados para a chuva diária. Nas áreas do Estado onde foram observados os menores índices de chuva, Borborema e Sertão, os valores de EMA se concentraram nos menores intervalos, de 3 a 5 mm e de 5 a 7 mm, respectivamente. Os valores de REMQ, na grande maioria, variaram de 10 a 13 mm para as áreas menos chuvosas do Estado e de 13 a 16 mm para a área que compreende o Sertão. Com isso, percebe-se que não houve um grande distanciamento por parte dos dados estimados pelo satélite e os medidos pelo pluviômetro nessas duas áreas.

**Figura 33: Análise do EMA e do REMQ para acumulados de 3 dias.**



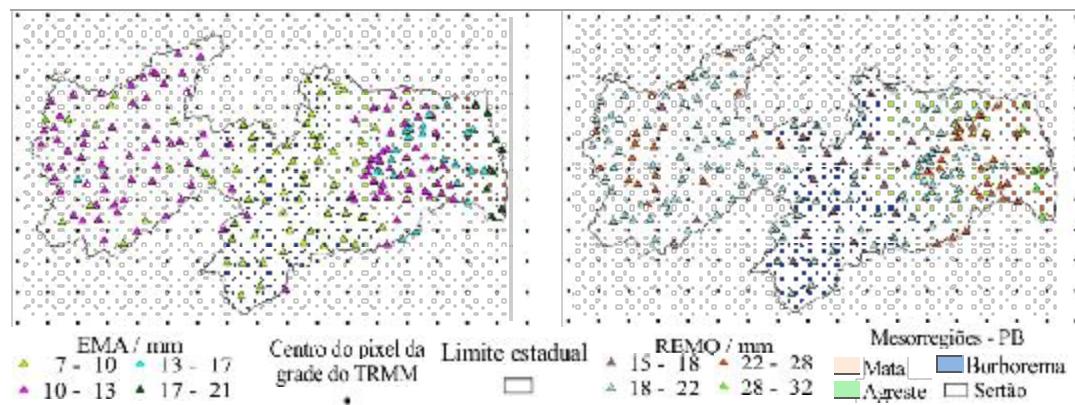
**Fonte: Autoria própria.**

Na faixa litorânea houve uma maior variação entre os dados do satélite e os dados de pluviômetros, fato confirmado pelos índices do EMA, que variou de 9 a 12 mm e o do REMQ, variando de 19 a 22 mm. Assim, ficou caracterizado que na chuva diária e no acumulado de 3 dias o TRMM apresenta maiores erros de estimativa para as regiões do Estado onde ocorrem os maiores volumes de chuva.

Ao analisar os acumulados de 7 dias (Figura 34), percebe-se que houve uma semelhança na distribuição espacial dos resultados quando comparados com a chuva diária e com os acumulados de 3 dias. Na parte central do Estado, onde ocorrem os menores volumes de chuva, os valores do EMA oscilaram entre 7 a 10 mm (Borborema) e 10 a 13 mm para as

partes que correspondem ao Sertão e ao Agreste da Paraíba. O REMQ tem valores que seguem a mesma distribuição espacial dos observados pelo EMA.

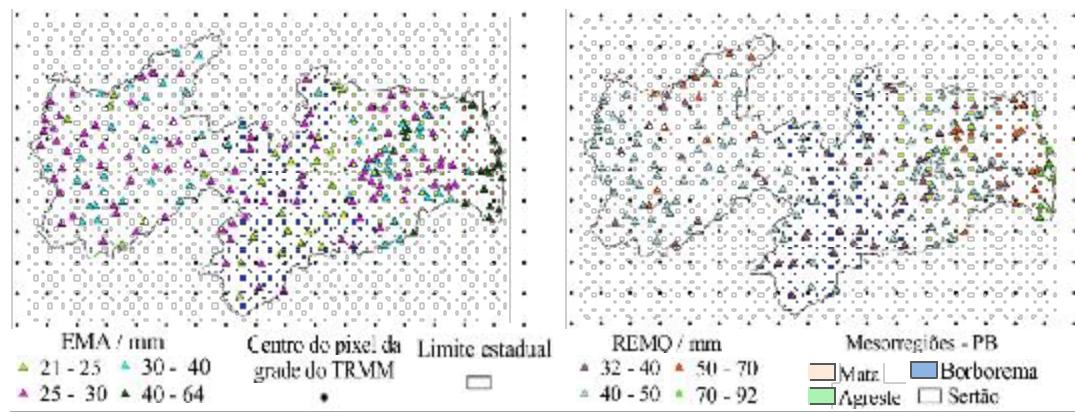
**Figura 34: Análise do EMA e do REMQ para acumulados de 7 dias.**



**Fonte: Autoria própria.**

Em termos de precipitações acumuladas de 7 dias, na faixa litorânea registram-se as maiores diferenças entre os valores estimados e observados, reforçando a tendência já indicada nas outras análises de que o satélite apresenta maiores erros para as áreas onde ocorrem os maiores volumes de chuva, conforme a análise da distribuição da precipitação para a Paraíba no tópico 4.1.

**Figura 35: Análise do EMA e do REMQ para a chuva mensal**



**Fonte: Autoria própria.**

Na análise mensal, o EMA tem uma variação entre 21 e 64 mm e o REMQ varia de 32 a 92 mm (Figura 35). A chuva mensal apresenta uma distribuição espacial bastante

heterogênea, com 27 dos 210 postos apresentando EMA que varia de 21 a 25 mm. Esses postos estão distribuídos nas áreas que correspondem ao Sertão e a Borborema. Com exceção da faixa litorânea, em todas as partes do Estado foram observados postos com valores de EMA entre 25 e 30 mm. Os valores de REMQ variaram de 40 a 50 mm para 119 postos com uma distribuição espacial muito semelhante ao EMA. Na faixa litorânea o valor de REMQ variou de 70 a 92 mm e o de EMA variou de 40 a 64 mm. Com esses resultados de EMA, REMQ e os valores da correlação linear que se concentraram acima de 0,8 (item 4.2.1), pode-se inferir que o satélite TRMM apresentou um bom desempenho para chuva mensal.

#### **4.3. Análise agregada no espaço**

Na análise agregada no espaço foi obtida a correlação linear entre a chuva observada pela AESA e a chuva estimada pelo satélite TRMM em termos médios sobre a área de cada sub-bacia (item 4.3.1) e de cada mesorregião (item 4.3.2). Além disso, também foram calculados os valores do EMA e do REMQ para cada uma dessas áreas de interesse.

##### **4.3.1. Análise por sub-bacias**

Na análise por sub-bacias devem ser considerados alguns fatores, relativos as estimativas do satélite, que interferem nos resultados calculados. Dentre eles, destaca-se a área da região para qual está sendo feita a estimativa. Sabe-se que quanto maior for área considerada, melhores serão as estimativas do satélite. Assim, nos resultados que seguem se faz análises sobre as estimativas do TRMM levando-se em consideração o  $r$ , o EMA e o REMQ, entre dados estimados e observados, para as sub-bacias do Estado da Paraíba, com a devida cautela das diferenças de áreas entre as sub-bacias analisadas. Isso indica que quando se compara estimativas de precipitação para sub-bacias demasiadamente diferentes em termos de área é possível que parte das discrepâncias entre os valores encontrados sejam explicadas por esse fator.

De um modo geral, observou-se uma boa correlação para a maioria das sub-bacias quando comparados os dados estimados e os observados para chuva diária (Tabela 4). De acordo com o erro médio absoluto houve uma diferença entre a chuva estimada e a chuva observada que varia de 1,2 mm, na sub-bacia Piranhas (Sertão) a 4,1 mm na sub-bacia Abiaí. Numa outra análise, usando-se o REMQ, que é utilizado para verificar as diferenças entre os dados estimados e observados e que quanto mais próximo de zero indica uma melhor performance, pode-se verificar que, para chuva diária, os valores variaram de 3,1 mm a 9,6 mm nas sub-bacias já mencionadas. A melhor aproximação entre chuva estimada e observada

ocorreu na sub-bacia de Piranhas (Sertão), como mostram as três medidas estatísticas utilizadas (EMA, REMQ, r) ao apresentarem valores significativos, indicando a melhor estimativa do satélite. Mesmo na sub-bacia onde se observaram os índices menores, que foi a sub-bacia de Abiaí, percebem-se valores ainda significativos na comparação da chuva diária.

**Tabela 4: Medidas de desempenho entre os dados de chuva estimada e observada nas sub-bacias do Estado da Paraíba (EMA e REMQ dados em mm; r é coeficiente de correlação de Pearson).**

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Chuva diária			Acumulado 3 dias			Acumulado 7 dias			Chuva mensal		
		EMA	REMQ	r	EMA	REMQ	r	EMA	REMQ	r	EMA	REMQ	r
Camaratuba	637	2,9	7,6	0,7	6,8	13,6	0,8	13,2	21,4	0,8	32,7	44,2	0,9
Mamanguape	3.522	2,4	5,9	0,7	5,7	11,1	0,8	10,4	17,1	0,8	25,6	36,6	0,9
Jacu	977	1,7	5,3	0,7	4,1	9,5	0,8	7,8	14,5	0,9	20,7	30,6	0,9
Tram	106	2,0	6,0	0,6	4,8	11,2	0,7	9,3	17,0	0,8	23,3	34,8	0,9
Curimataú	3.313	1,8	5,1	0,8	4,3	9,2	0,8	8,1	14,4	0,9	21,6	29,8	0,9
Piranhas (Sertão)	24.244	1,2	3,1	0,9	2,8	5,9	0,9	5,3	9,9	1,0	16,0	23,9	1,0
Paraíba	20.071	1,3	3,5	0,8	3,2	7,0	0,9	6,0	11,0	0,9	15,4	22,5	1,0
Piranhas (Borborema)	1.983	1,4	4,6	0,8	3,4	8,6	0,8	6,9	14,1	0,9	22,7	35,3	0,9
Abiaí	585	4,1	9,6	0,6	9,8	18,4	0,7	18,5	29,2	0,8	52,5	73,1	0,9
Gramame	589	3,3	8,2	0,7	7,9	15,2	0,8	14,8	24,3	0,8	37,2	52,0	0,9
Minri	436	3,1	7,7	0,7	7,2	14,2	0,8	13,6	22,6	0,8	32,3	47,4	0,9
Guaju	152	3,6	9,2	0,6	8,3	16,1	0,7	15,9	26,0	0,8	41,4	56,9	0,9

**Fonte: Autoria própria.**

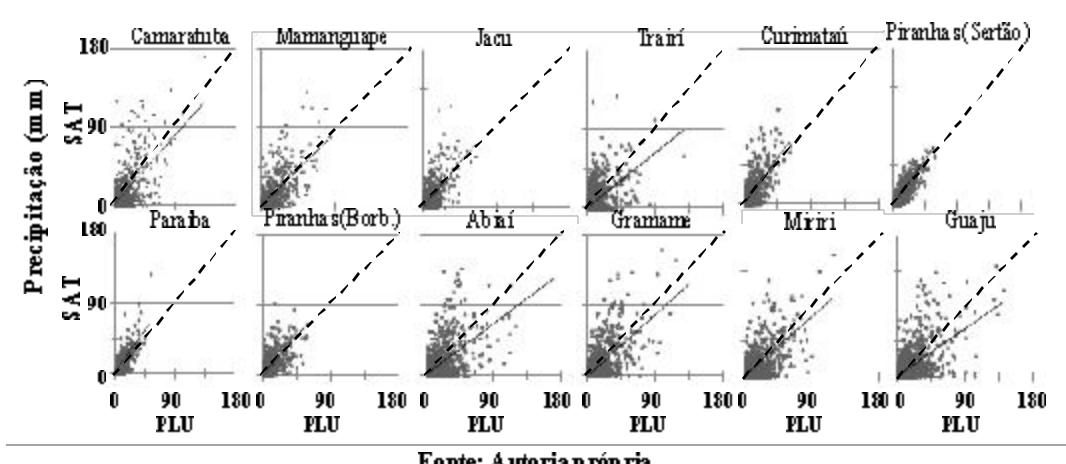
Quando a análise foi feita tomando como base os dados acumulados de chuva para três e sete dias (Tabela 4) percebeu-se uma melhora significativa nos índices de correlação linear para todas as sub-bacias. Ou seja, quando aumenta o período analisado os valores se aproximam ainda mais de 1, que seria a correlação perfeita. Os resultados obedecem à mesma variação sazonal com valores melhores para a sub-bacia Piranhas (Sertão), localizada no Sertão do Estado, e valores um pouco abaixo para a sub-bacia Abiaí localizada no litoral paraibano.

Para a chuva mensal se observa uma correlação alta para todas as sub-bacias (Tabela 4). As medidas de desempenho (EMA e REMQ), apesar de apresentarem valores absolutos distantes de zero, quando são analisados a partir dos valores totais de chuva para o mês, percebe-se que estão num patamar bastante significativo.

Na Figura 36 se observa a correlação linear utilizando-se dados de chuva diária, para cada sub-bacia do Estado. Percebe-se uma alta concordância entre os dados observados e

estimados para as sub-bacias Piranhas (Sertão) e Paraíba, localizadas respectivamente na mesorregião do Sertão e Borborema. As sub-bacias que apresentam os menores valores de correlação são Trairi, (na mesorregião da Borborema) Abiaí e Guaju no litoral do Estado. As demais sub-bacias apresentam bons índices de correlação, cerca de 0,70.

**Figura 36: Correlação entre chuva observada (PLU) e chuva estimada pelo satélite TRMM (SAT) para cada sub-bacia da Paraíba (chuva diária); linha de tendência (linha cheia); linha de proporção 1:1 (linha tracejada).**

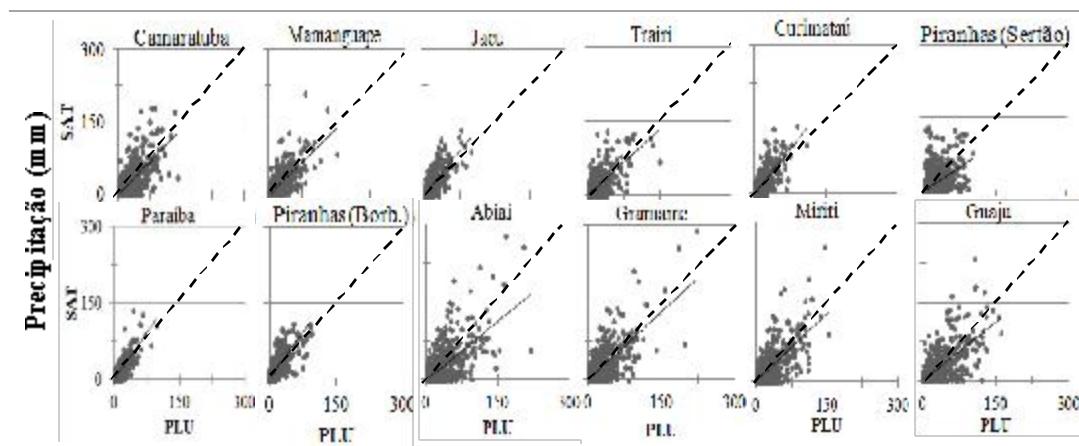


**Fonte: Autoria própria.**

Analisando-se os valores de tendência de chuva verifica-se que em sete das doze sub-bacias (Camaratuba, Mamanguape, Trairi, Abiaí, Gramame, Miriri e Guaju) há uma probabilidade de subestimação por parte do satélite. Com exceção de Trairi, todas essas sub-bacias estão localizadas no litoral do Estado, fato que, possivelmente, indica uma tendência de superestimação do satélite TRMM para essa região da Paraíba.

Para os totais acumulados em 3 dias todas as sub-bacias apresentaram resultados significativos em termos de correlação entre os dados de pluviômetros e dados do TRMM, com todos os valores acima de 0,70 (Figura 37). Os índices máximos de correlação seguiram o padrão observado para a chuva diária localizando-se nas sub-bacias de Piranhas (Sertão) e Paraíba, apesar de, na primeira ter havido uma leve tendência de subestimação da chuva estimada pelo satélite e na segunda ter ocorrido uma leve tendência de superestimação. Do mesmo modo que ocorreu com a chuva diária, houve uma predominância de tendências de subestimação nas bacias localizadas no litoral do Estado.

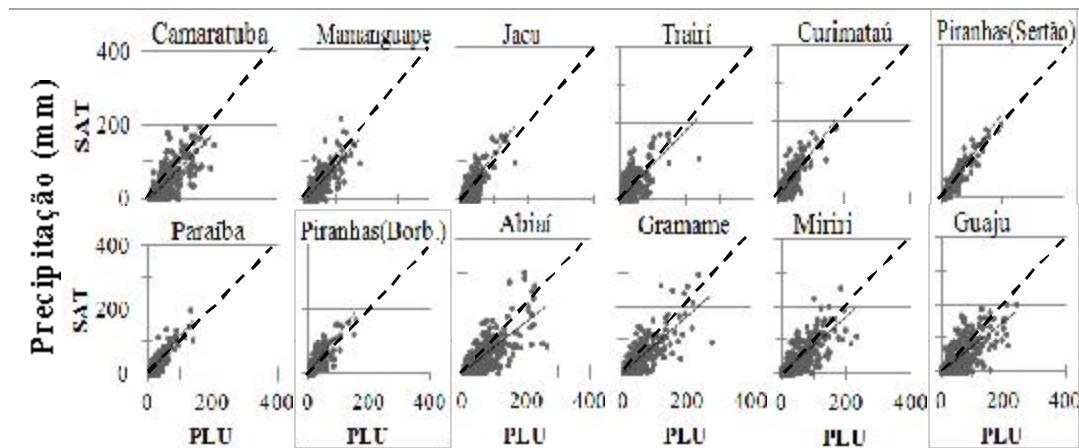
**Figura 37: Correlação entre chuva estimada e observada para cada sub-bacia da Paraíba levando em consideração acumulados de 3 dias; linha de tendência (linha cheia); linha de proporção 1:1 (linha tracejada).**



Fonte: Autoria própria.

Um aspecto que já havia sido observado na análise da comparação entre a chuva da AESA e a chuva do TRMM, quando foi feita a investigação espacial dos índices de chuva, verificou-se novamente no estudo das sub-bacias. Esse aspecto diz respeito a melhores estimativas do satélite quanto maiores os períodos de acumulação de chuva. Verifica-se que os índices de correlação e os valores das medidas de desempenho, EMA e REMQ, são mais significativos na chuva acumulada de 7 dias quando comparados com o acumulado de 3 dias e chuva diária.

**Figura 38: Correlação entre chuva estimada pelo TRMM e observada pelo pluviômetro para cada sub-bacia da Paraíba levando em consideração acumulados de 7 dias; linha de tendência (linha cheia); linha de proporção 1:1 (linha tracejada).**

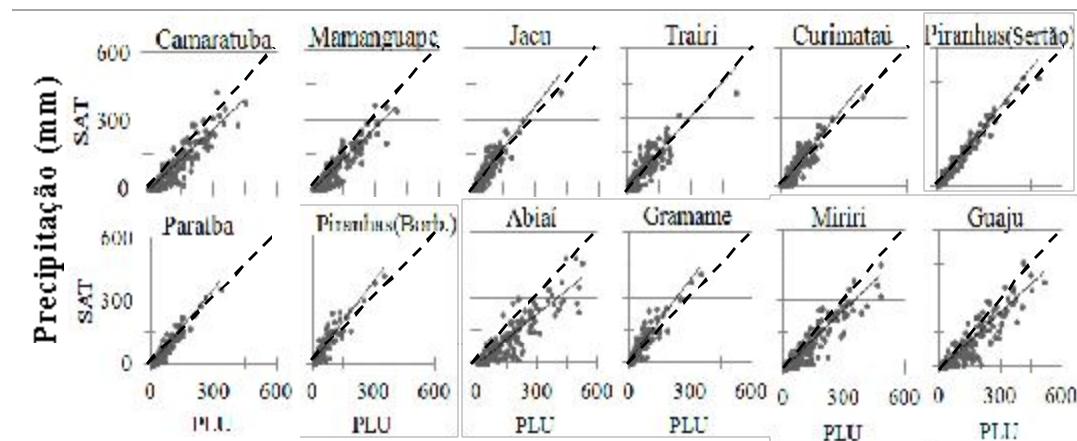


Fonte: Autoria própria

Também se observa no acumulado de 7 dias, que há uma tendência de superestimação nas bacias que estão localizadas fora da região litorânea do Estado, fato identificado nas sub-bacias de Jacu, Curimataú, Piranhas (Sertão), Paraíba e Piranhas (Borborema). Nessas sub-bacias percebeu-se uma tendência de variação, entre os valores observados e estimados, que está no intervalo de 12 a 20%.

Ao analisar a chuva acumulada por mês (Figura 39), observa-se uma aproximação nos valores de chuva observada e estimada, o que é mostrado pelos elevados índices de correlação, superando 0,9 em todas as sub-bacias estudadas. Isso mostra que, para qualquer tomada de decisão relativa aos índices de chuvas estimadas pelo satélite TRMM em sub-bacias da Paraíba, deve-se considerar como mais confiável as estimativas mensais, dado o alto grau de similaridade encontrado nas séries de dados mensais de chuvas do satélite e dos pluviômetros.

**Figura 39: Correlação entre chuva estimada e observada para acumulados mensais; linha de tendência (linha cheia); linha de proporção 1:1 (linha tracejada).**

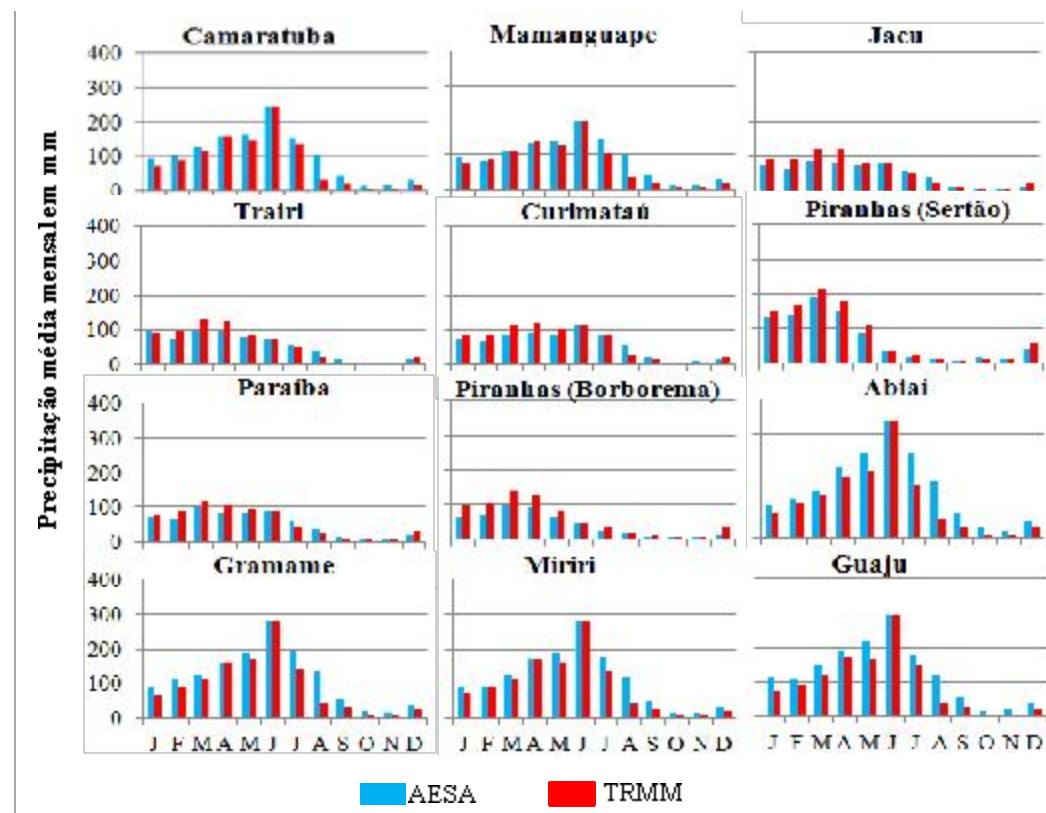


**Fonte: Autoria própria.**

Uma análise mais detalhada a partir da Figura 40 indica elementos importantes sobre o regime de chuva e a relação entre os dados da AESA e do TRMM para cada sub-bacia da Paraíba. Uma comparação dos dados estimados e observados no período chuvoso de cada sub-bacia indica que o satélite apresentou uma boa estimativa, coincidindo, em algumas bacias localizadas na faixa litorânea, com os valores observados. Mesmo nos casos onde houve superestimação ou subestimação nota-se uma pequena variação entre os valores.

Nas sub-bacias onde ocorreram os menores índices pluviométricos: Curimataú, Trainí, Jacu, Paraíba e Piranhas (Borborema) notou-se uma tendência de superestimação, principalmente, no período mais chuvoso da sub-bacia. Há indícios de que quanto maiores os índices pluviométricos, os dados do satélite tendem a se concentrar abaixo dos dados dos pluviômetros. A pesquisa realizada por Collischonn (2006) nas bacias do rio São Francisco e do rio Tapajós apresenta resultados bastante semelhantes.

**Figura 40: Chuva média mensal obtida dos dados de pluviômetros da AESA e das estimativas do TRMM para cada sub-bacia.**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 40 mostra que as estimativas de precipitação fornecidas pelo satélite TRMM representam de forma bastante satisfatória as variações sazonais da chuva em cada sub-bacia. Apesar da alternância entre superestimação e subestimação, verifica-se que houve uma tendência de proximidade com os dados coletados pela AESA, chegando, em alguns casos a igualdade de valores nos meses mais chuvosos de cada sub-bacia. Da mesma forma, nos

meses onde ocorreram os menores índices, o TRMM mostrou boa estimativa. Com isso, pode-se dizer que a variação sazonal das chuvas foi bem representada pelo satélite.

#### 4.3.2. Análise por mesorregiões

A partir das séries de chuva interpolada dos pluviômetros e do satélite, foi possível calcular a precipitação diária, acumulados de 3 dias, acumulados de 7 dias e acumulados mensais também para as mesorregiões do Estado e comparar os valores de estimativa com os valores observados em campo, a partir das estatísticas do EMA, do REMQ e do coeficiente de correlação linear ( $r$ ).

Para a chuva diária encontrou-se uma boa correlação linear (0,8), conforme mostra a Tabela 5. O EMA variou de 1,2 a 2,9 mm e o REMQ de 3,1 a 6,8 mm, nas quatro mesorregiões. Isso reflete uma boa concordância dos dados observados com os dados estimados pelo TRMM. Conforme observa-se na Figura 38 há uma tendência por parte do satélite em subestimar a chuva para a Mata Paraíba. Essa é a região do Estado onde ocorrem os maiores índices de chuva, conforme apresentado no regime de chuva no inicio desse capítulo. Nas mesorregiões, Agreste, Borborema e Sertão o satélite tende a superestimar a chuva. O Sertão é a mesorregião que o satélite apresenta seu melhor desempenho.

Nos acumulados de 3 dias a correlação linear se mantém alta, o EMA varia de 2,8 a 6,8 e o REMQ de 6,0 a 12,9. Para esse tipo de análise o satélite apresenta resultados bastante semelhantes aos encontrados para a chuva diária. O satélite segue subestimando a chuva para a mesorregião da Mata e superestima para as demais mesorregiões.

**Tabela 5: Medidas de desempenho entre os dados de chuva estimada e observada nas mesorregiões do Estado da Paraíba (EMA e REMQ dados em mm;  $r$  é coeficiente de Pearson).**

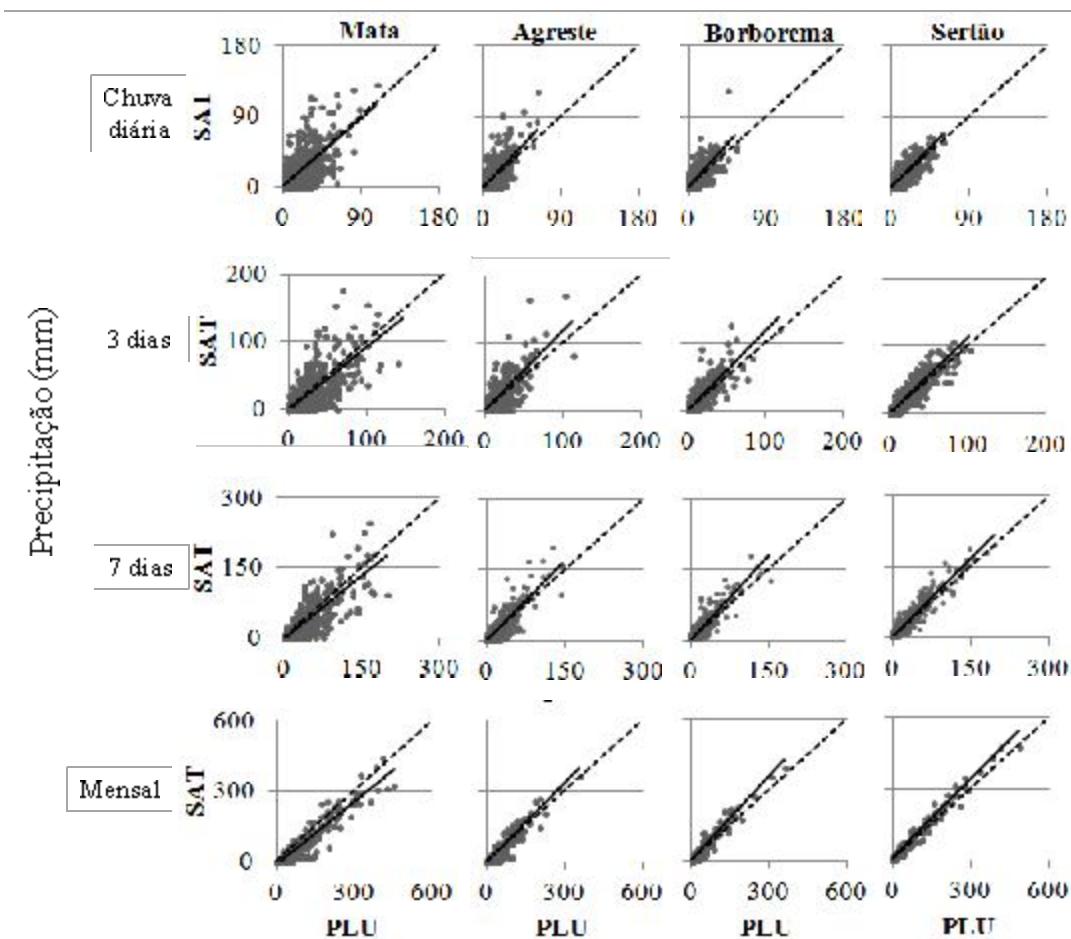
Mesorregião	Chuva diária			Acumulado 3 dias			Acumulado 7 dias			Chuva mensal		
	EMA	REMQ	$r$	EMA	REMQ	$r$	EMA	REMQ	$r$	EMA	REMQ	$r$
Mata	2,9	6,8	0,8	6,8	12,9	0,8	12,8	20,4	0,8	31,3	43,1	0,9
Agreste	1,7	4,5	0,8	4,2	8,8	0,8	7,8	13,4	0,9	18,8	26,6	0,9
Borborema	1,1	3,3	0,8	2,6	6,4	0,9	5,2	10,4	0,9	15,7	24,3	1,0
Sertão	1,2	3,1	0,9	2,8	6,0	0,9	5,3	9,9	1,0	15,7	23,4	1,0

**Fonte: Autoria própria.**

Na análise com base nos acumulados de 7 dias o EMA varia de 5,3 a 12,8 mm, o REMQ de 9,9 a 20,4 mm e a correlação apresenta-se alta, acima de 0,8 para todas as

mesorregiões. Apesar de apresentar maiores valores de EMA e REMQ a análise com acumulados de sete dias apresentam melhores resultados, conforme mostra os gráficos de correlação da Figura 41.

**Figura 41: Correlação entre valores estimados pelo satélite (SAT) e valores observados (PLU) de chuvas diárias, acumuladas de 3 dias, de 7 dias e mensal, nas mesorregiões da Paraíba; linha de tendência (linha cheia); linha de proporção 1:1 (linha tracejada).**



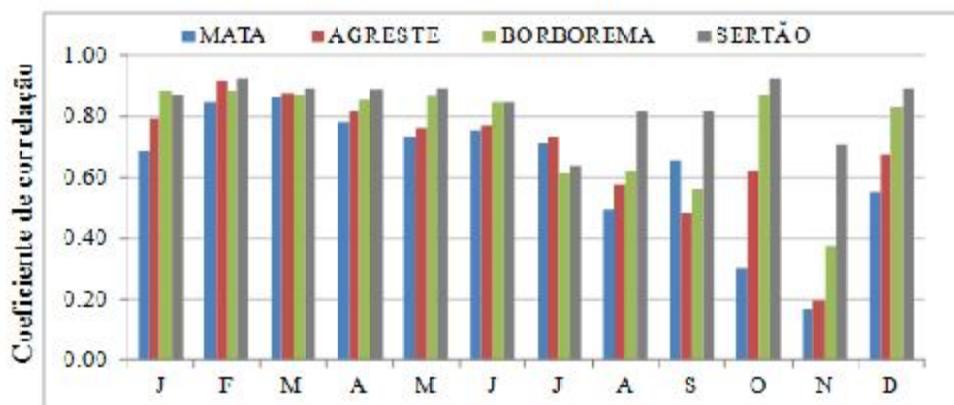
**Fonte: Autoria própria.**

Para a precipitação mensal os valores de correlação linear são muito significativos, acima de 0,9. Esses bons resultados se confirmam nos gráficos que comparam chuva estimada e observada na Figura 41. Os indicadores estatísticos EMA e REMQ apresentam valores que variam de 15,7 mm a 31,3 mm e de 23,4 mm a 43,1 mm respectivamente (Tabela 5). O TRMM tende a subestimar a chuva para a mesorregião da Mata e tende a superestimar para as demais partes do Estado. Os melhores resultados apresentam-se nas mesorregiões da

Borborema e do Sertão onde foram encontrados os menores índices de chuva, conforme apresenta a análise do regime de chuva da Paraíba. Esses resultados confirmam que o TRMM apresenta melhor desempenho para períodos com maiores acumulados de chuva. Também se percebe que o satélite tem uma maior tendência em subestimar a chuva para os locais onde são encontrados maiores quantidades de precipitação e superestimar para as regiões onde foram detectados menores índices.

Outra análise importante sobre o regime de chuvas nas mesorregiões do Estado da Paraíba é realizada a partir da comparação da chuva a cada mês estimada pelo TRMM e a observada em pluviômetros. Identifica-se, conforme mostra a Figura 42, que na análise por mês da chuva diária, a mesorregião do Sertão apresenta a melhor correlação entre chuva estimada e chuva observada, superando o coeficiente de 0,8 em 11 dos 12 meses. Por outro lado, dentre as quatro mesorregiões, a Mata foi a que apresentou a pior correlação, na maioria abaixo dos 0,7 e, em três meses (agosto, outubro e novembro) ficando abaixo de 0,5.

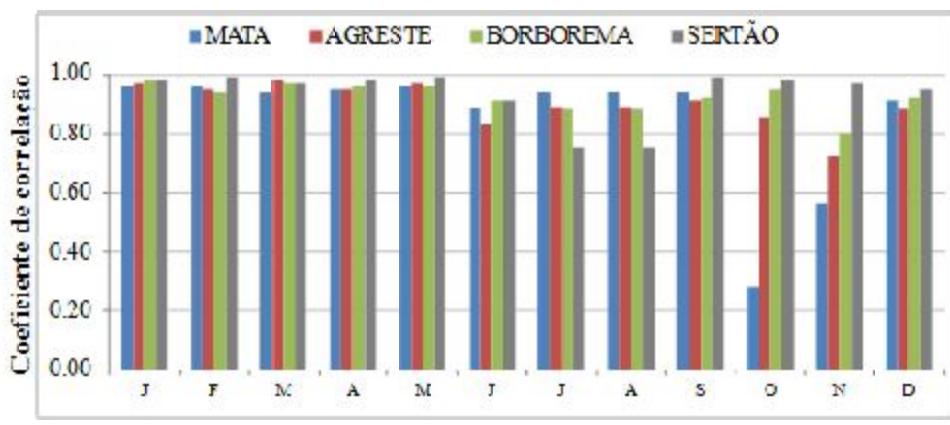
**Figura 42: Coeficiente de correlação por mês entre chuva diária estimada e observada nas mesorregiões da Paraíba.**



**Fonte: Autoria própria.**

Essa análise também indica que há uma tendência de melhor estimativa nos meses de fevereiro e março, nos quais em todas as mesorregiões foram detectados coeficientes de correlação acima de 0,8. Já no mês de novembro, encontraram-se os menores índices de correlação entre chuva estimada e observada, onde três das quatro mesorregiões apresentaram índices abaixo de 0,4.

**Figura 43: Coeficiente de correlação entre chuva mensal estimada e observada nas mesorregiões da Paraíba.**



**Fonte:** Autoria própria

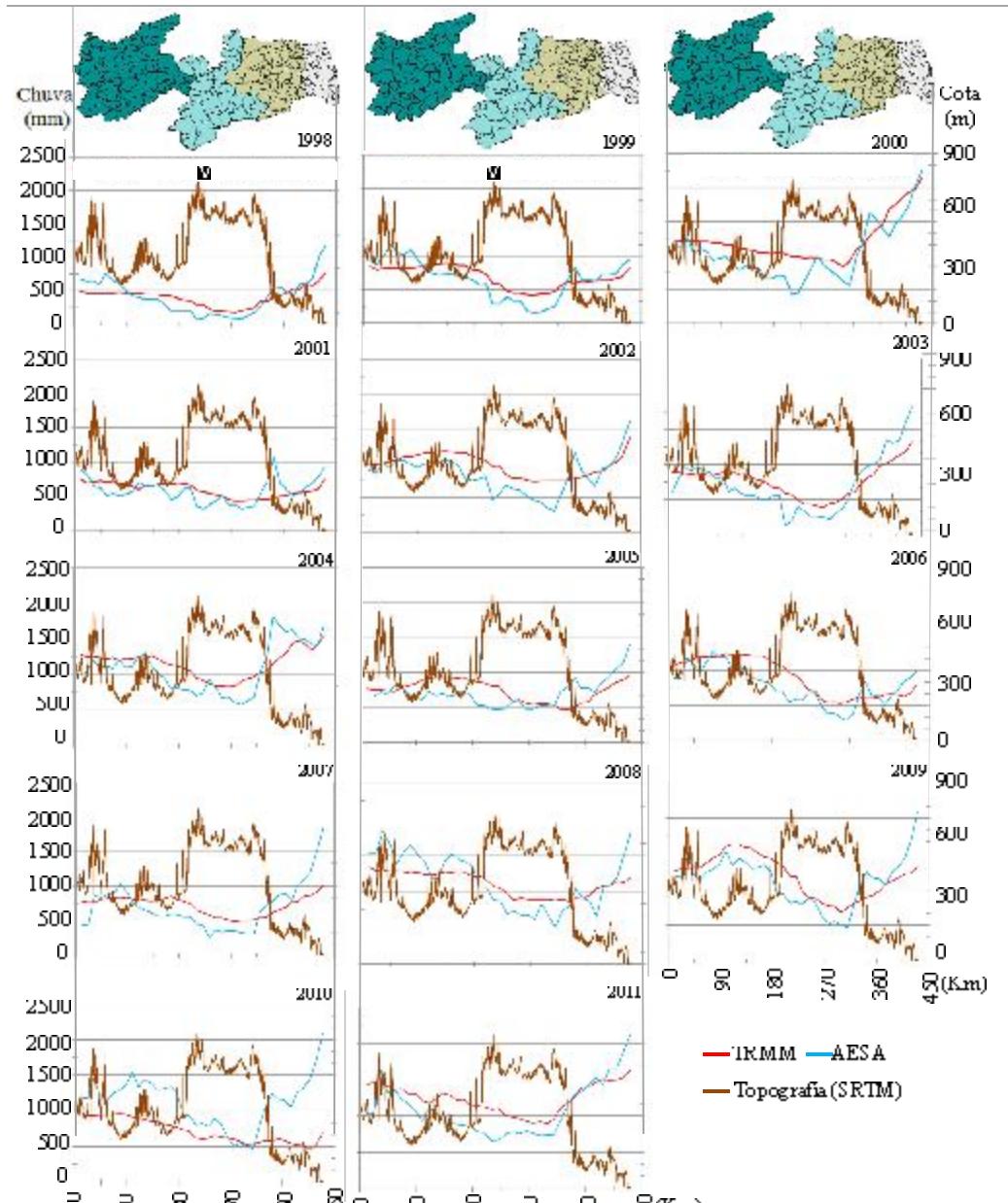
A Figura 43 mostra que, para o acumulado mensal, a correlação entre chuva estimada e observada torna-se mais significativa quando comparada com a chuva diária. Nesse caso, vê-se que na maioria dos meses, em todas as mesorregiões foi detectado um coeficiente de correlação superando 0,9.

#### 4.4. Análise das chuvas observadas e estimadas a partir da topografia

A distribuição anual e intra-anual das chuvas possui uma variabilidade tanto espacial como temporal. Essas características estão diretamente relacionadas ao clima, à topografia e à umidade, que interferem substancialmente nas chuvas em qualquer região considerada. Na Paraíba há uma acentuada diferença de períodos chuvosos entre as mesorregiões, conforme indica a Figura 44. Esse fator é referenciado por Sousa (2011) ao destacar que as estações chuvosas na Paraíba estão definidas da seguinte forma: Sertão (janeiro a março), Borborema e Agreste (março a maio) e na Mata Paraibana (abril a junho). Este item apresenta uma análise do efeito da topografia sobre as chuvas registradas nos pluviômetros e estimadas pelo satélite TRMM ao longo do estado.

Quanto aos índices precipitados anuais, na maioria dos anos do período considerado, os maiores valores estão no Litoral e parte do Agreste do Estado onde a altitude varia de 100 a 600 metros na encosta leste do Planalto da Borborema (Figura 44). Exceção se faz aos anos de 1999 e 2006 onde os índices maiores foram na depressão sertaneja, localizada no Sertão, com altitudes que variam de 200 a 400 metros.

**Figura 44: Perfis de chuva anual observada e estimada de acordo com a topografia do Estado da Paraíba.**



**Fonte: Autoria própria.**

Também na Figura 44 verifica-se que os valores precipitados tendem a diminuir no sentido leste-oeste, apresentando um mínimo na região da Borborema e parte do Agreste, com índices abaixo de 800 mm na maioria dos anos analisados, onde a altitude pode ultrapassar os 700 metros. A partir da encosta oeste da Borborema, continuando em direção ao Sertão, os

índices anuais de chuva apresentam um discreto aumento, fato caracterizado pela depressão do relevo.

Com relação aos índices estimados pelo satélite TRMM percebe-se também uma tendência de crescimento no Litoral e Agreste. Nessas regiões, onde estão concentradas as menores altitudes, em quase todos os anos analisados (com exceção de 2000), o satélite subestimou os índices de chuva. Na faixa que corresponde entre 180 e 360 quilômetros, no sentido oeste-leste, onde estão localizadas as maiores altitudes, verificou-se que o TRMM superestimou a chuva em oito dos quatorze dos anos estudados (1999, 2002, 2003, 2006, 2007, 2008, 2009 e 2011).

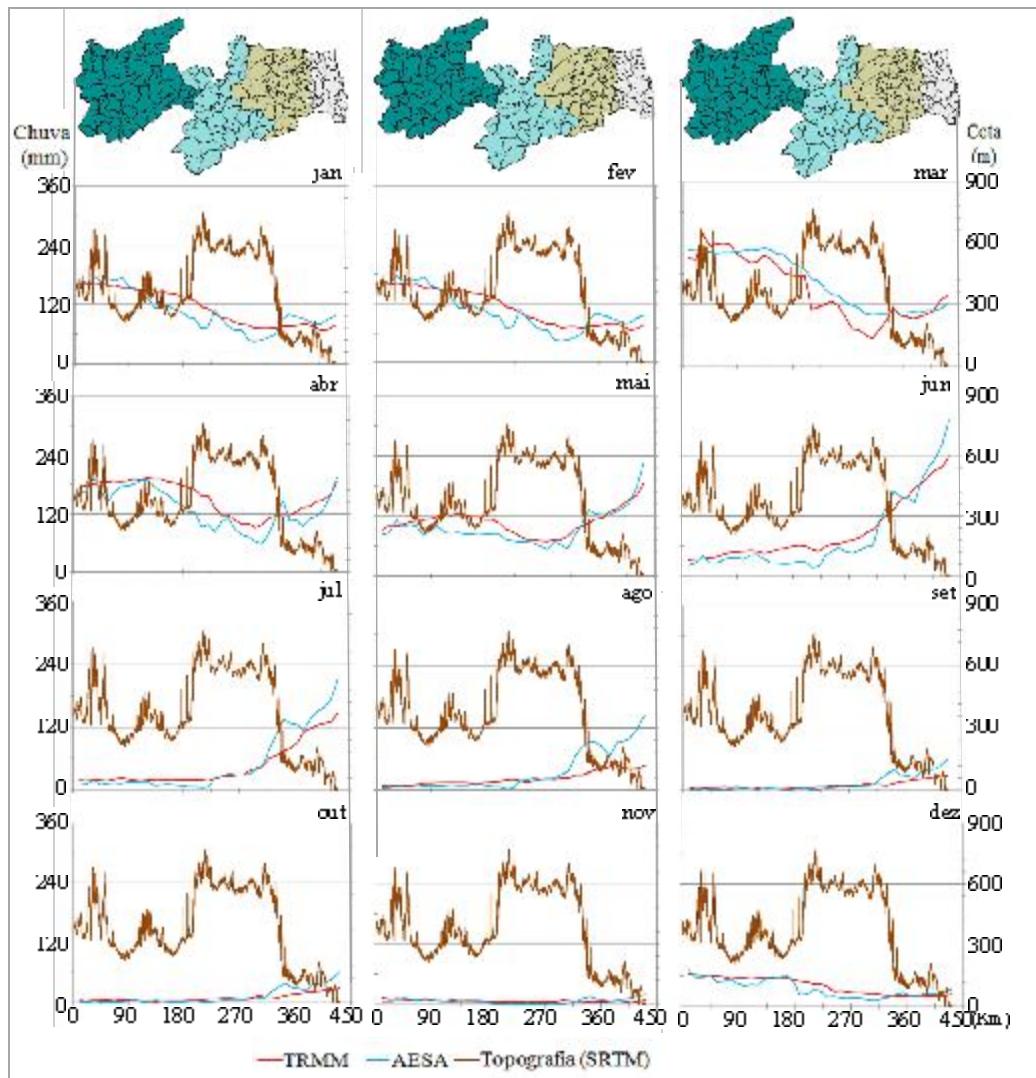
Em uma análise dos perfis de chuva por média mensal é possível observar a sazonalidade das precipitações de acordo com o período chuvoso de cada mesorregião. Percebe-se que nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril (Figura 45), ocorrem os maiores índices/médias de chuva no Sertão do Estado. Nesse período, o TRMM apresenta resultados que oscilam entre subestimação e superestimação. No entanto, os resultados observados e estimados não apresentam grandes discrepâncias entre si.

De acordo com os dados apresentados na Figura 45, o período chuvoso das mesorregiões da Borborema e do Agreste ocorre nos meses de janeiro a maio, com destaque para o mês de março onde foram observados os maiores índices. As médias mensais de chuva dessa região nos quatorze anos analisados estão abaixo de 240 mm. Para essa situação o satélite tende a superestimar os índices de chuva. Esse fato pode ser influenciado pela topografia, pelos mecanismos (massas de ar vindas do norte e do sudeste do Atlântico) que influenciam na formação da chuva ou pela combinação de ambos.

No Litoral do Estado, onde as chuvas são formadas pelas massas atlânticas trazidas pelos ventos alísios de sudeste e a altitude na planície é inferior a 200 m, com exceção da média de chuva do mês de abril, o TRMM subestimou os índices para todos os meses.

Nos meses mais secos do período em análise, que correspondem a setembro, outubro, novembro e dezembro, os dados observados e estimados apresentaram resultados bastante similares.

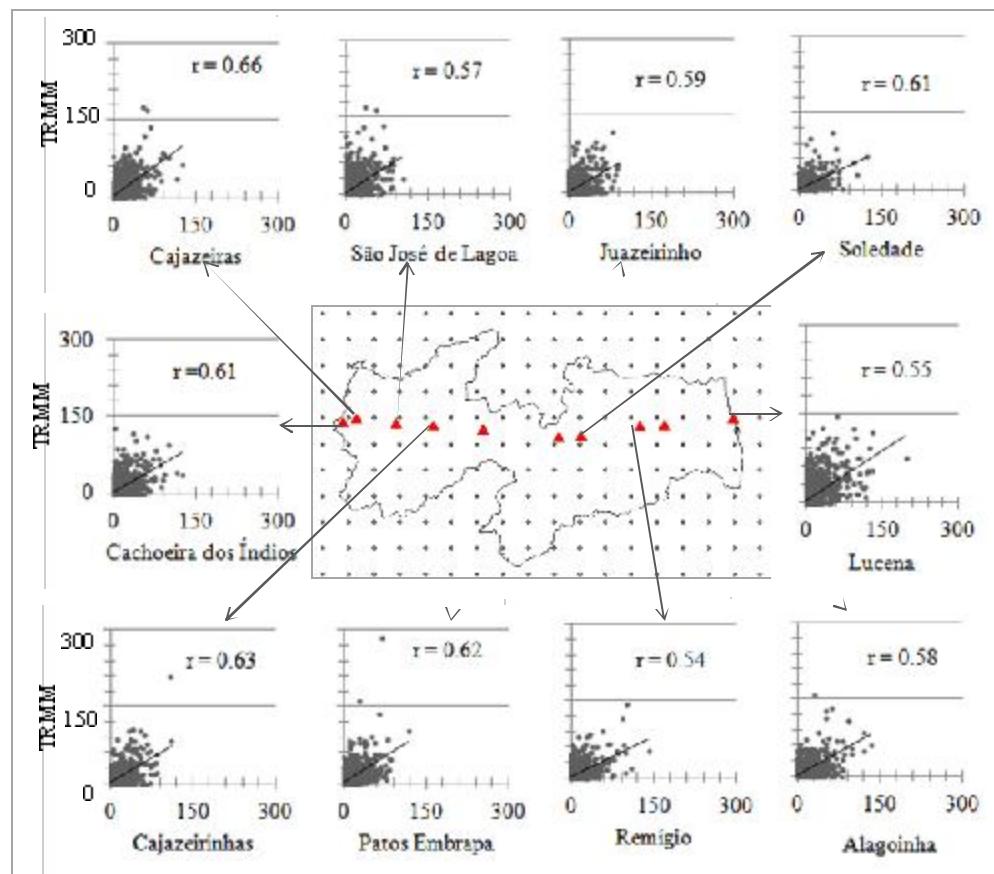
**Figura 45: Perfil da chuva média mensal estimada e observada para o período de 1998 a 2011.**



**Fonte: Autoria própria**

A Figura 46, que indica a comparação entre chuva estimada e observada para alguns postos situados aproximadamente ao longo da latitude de 7°, mostra índices de correlação inseridos no intervalo entre 0,5 e 0,6. Mais uma vez percebe-se que para a chuva diária a comparação é considerada de grande significância. No entanto, dadas as dificuldades de estimativa para períodos curtos de tempo, pode-se considerar que o satélite apresentou um bom desempenho.

**Figura 46: Correlação entre chuva diária estimada pelo TRMM e observada de postos localizados na latitude próximo de 7° no Estado da Paraíba (1998 – 2011).**

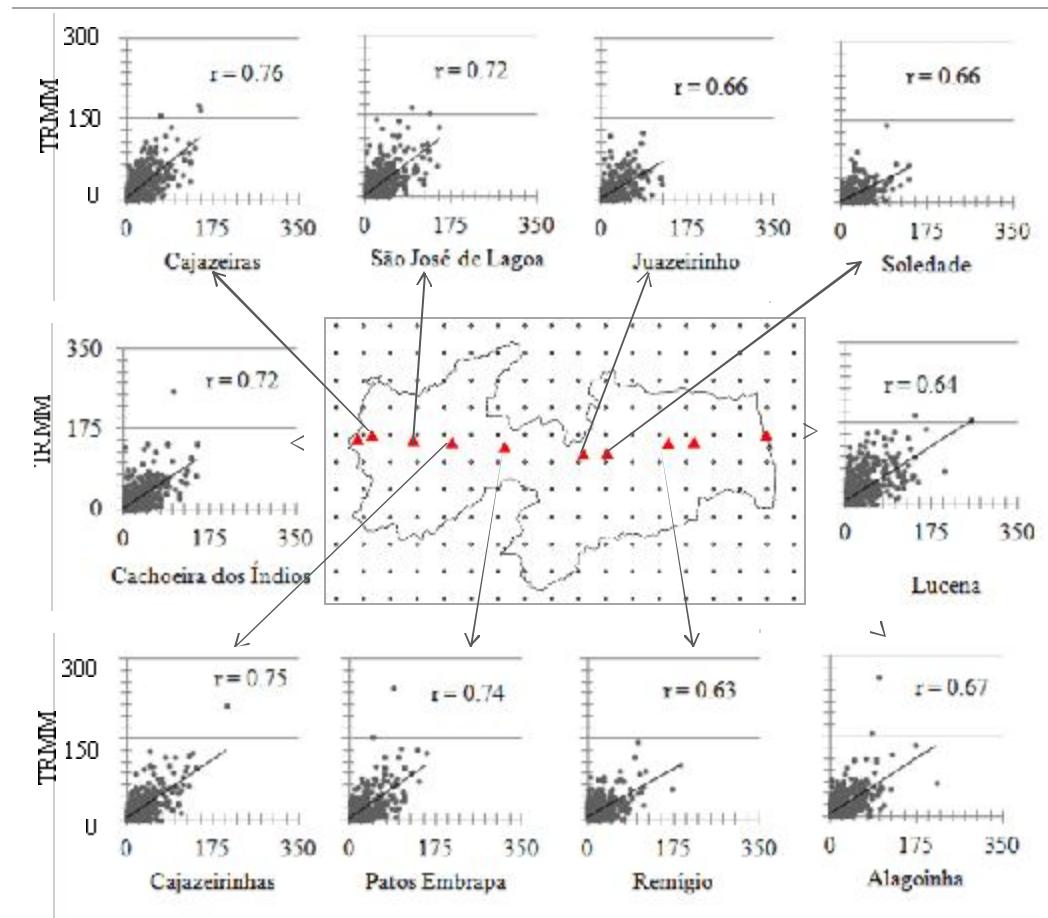


**Fonte: Autoria própria.**

Nos postos localizados no Sertão (Patos, Cajazeirinhas, Cajazeiras, Cachoeira dos Índios, São José de Lagoa Tapada) foi encontrada uma melhor correlação. Enquanto que nos postos situados no Litoral e Agreste, os índices foram os menores observados. Esses resultados reforçam a tendência de melhor estimativa por parte do satélite nos locais de menores volumes de chuva.

A Figura 47 mostra índices de correlação inseridos no intervalo entre 0,63 e 0,76. Percebe-se que estes índices tendem a aumentar para valores acumulados, conforme indicam as Figuras 47 e 48. Novamente, observa-se que na região do Sertão estão concentrados os melhores índices de correlação entre chuva estimada e observada.

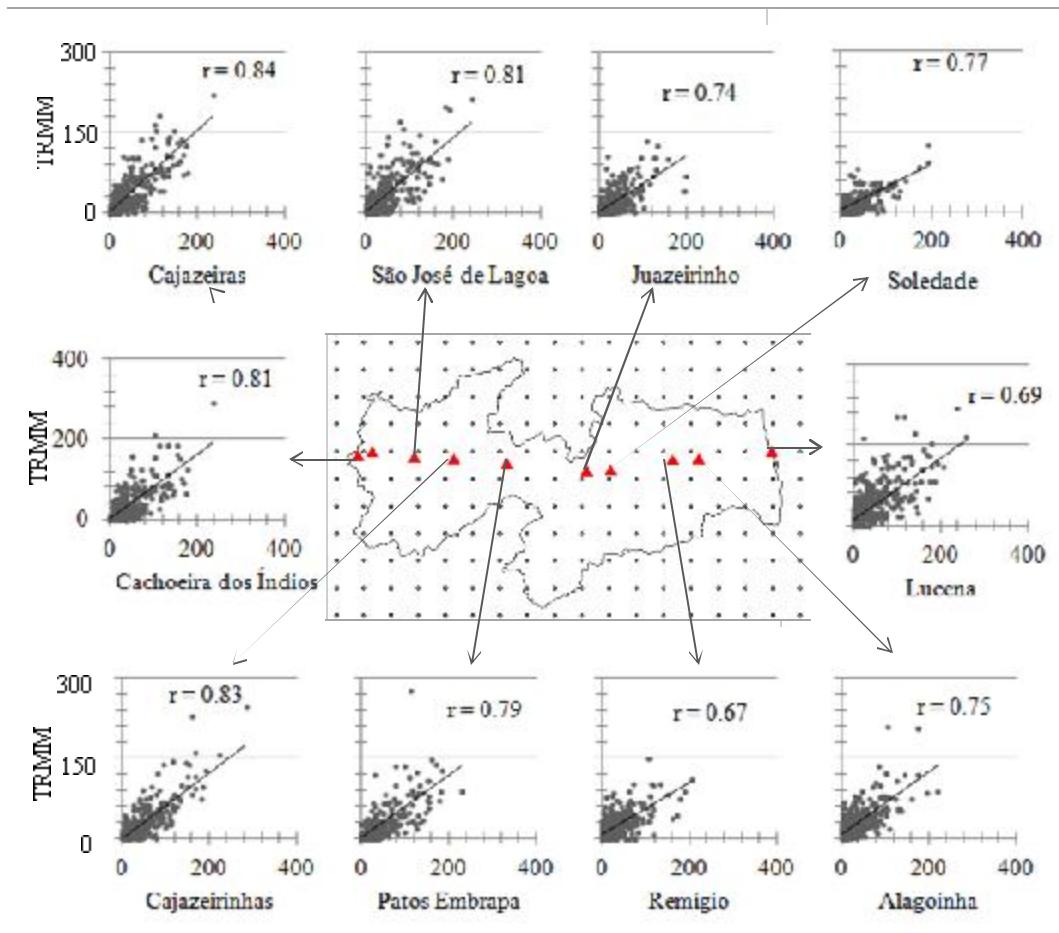
**Figura 47: Correlação entre chuva estimada e observada para acumulados de 3 dias em postos localizados na latitude próximo de 7° no Estado da Paraíba (1998 – 2011).**



**Fonte: Autoria própria.**

A análise da correlação entre chuva estimada e observada nos acumulados de 7 dias nos postos localizados próximo da latitude 7° indica índices bastante significativos. Em sete dos dez postos estudados observou-se um coeficiente de correlação superior a 0,75, com maiores índices no Sertão do Estado. Mesmo nos postos localizados no Litoral e Agreste, onde há uma tendência para menores índices de correlação, os valores observados podem ser considerados positivos.

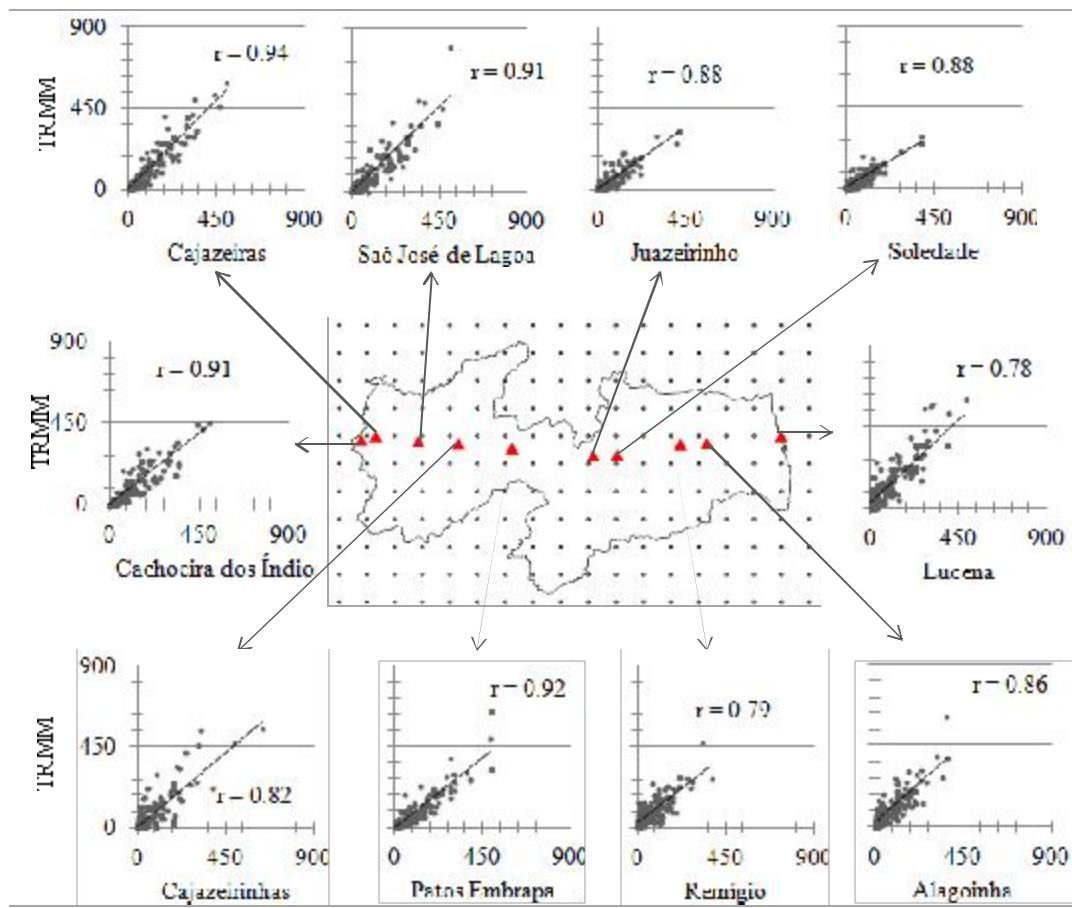
**Figura 48: Correlação entre chuva estimada e observada para acumulados de 7 dias em postos localizados na latitude próximo de 7° no Estado da Paraíba (1998 – 2011).**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 49 confirma o que já se observou nas outras formas de análise. Ou seja, quanto maior o período acumulado de chuva o satélite tem uma performance melhor de estimativa. Assim, dentre as análises realizadas (diária, 3 dias, 7 dias e mensal) os valores mensais são os de melhores índices de correlações entre chuva estimada e observada.

**Figura 49: Correlação entre chuva estimada e observada para acumulados mensais em postos localizados na latitude próximo de 7° no Estado da Paraíba (1998 – 2011).**



**Fonte: Autoria própria.**

Nota-se que nos dez postos estudados, localizados próximo da latitude de 7°, para o acumulado mensal, os índices de correlação superam os 0,77. Essa análise, como levou em consideração postos localizados em todas as altitudes da Paraíba, mostra que, para dados mensais, os valores estimados e observados em todo o Estado se assemelham bastante, com mais significância, por ordem crescente, do Litoral ao Sertão do Estado.

## **Capítulo 5. Conclusões e recomendações**

### **5.1. Conclusões**

Neste trabalho foi realizada a análise do regime de chuva da Paraíba, no qual se observou a distribuição espacial e quantitativa da precipitação medida em campo e estimada pelo satélite TRMM, como também a correlação entre ambas, durante o período de 1998 a 2011. Um fator que já se tinha conhecimento relativo à distribuição das chuvas no Estado é que ela possui uma variabilidade tanto espacial como temporal. No entanto, a pesquisa revelou que essa mesma característica é seguida pelos valores de estimação do satélite TRMM. Ele mostrou-se com potencialidade para estimar a chuva, tanto em termos quantitativos quanto em termos espaciais.

Na análise das chuvas, ficou evidenciado que na maior parte do Estado os totais anuais observados em pluviômetros e estimados pelo TRMM, em média, são inferiores a 900 mm e que os maiores dos índices de chuva estão concentrados no Agreste e na parte litorânea do Estado.

Comparando-se os valores de correlação das quatro séries estudadas (dados diários, acumulados de 3 dias, acumulados de 7 dias e mensais) conclui-se que há uma melhor correlação entre os valores estimados pelo TRMM e os coletados pela AESA quando os dados acumulados são considerados num intervalo de tempo maior, ou seja, o acumulado mensal apresenta uma correlação bem significativa quando comparada aos demais períodos. Isso era esperado em função da especificidade de chuvas estimadas por satélite apresentarem melhores resultados para grandes períodos de tempo e grandes áreas espaciais.

Na análise das séries mensais de chuva identificou-se que as estimativas do satélite TRMM são coerentes em detectar o regime observado de chuvas, sob dois aspectos: um relativo aos meses mais chuvosos e outro relativo à distribuição das chuvas no Estado. Com relação à análise mensal os meses com melhores similaridades entre chuva observada e estimada são março e abril. Considerando-se a distribuição da precipitação, o satélite TRMM apresentou bons resultados de estimação, detectados pelos altos índices de correlação, para o interior do Estado (Borborema e Sertão) em quase todos os meses do ano.

Foi verificado que nos primeiros meses do ano os valores estimados pelo TRMM e observados pela AESA apresentam maiores valores de correlação para todas as séries de dados (diários, acumulados de 3 dias, acumulados de 7 dias e mensal). Coincidemente, nos primeiros meses do ano também ocorre o período chuvoso em todo o Estado da Paraíba. Identificou-se que o satélite tem bom desempenho na análise da variabilidade sazonal de

precipitação sobre a Paraíba, representando de forma satisfatória os períodos mais secos e os mais chuvosos.

Com a análise das medidas de desempenho foi observado que nas áreas onde ocorrem os menores índices de chuva, os valores de EMA e REMQ, entre os dados estimados pelo TRMM e observados em campo, apresentam os melhores resultados para as quatro séries de chuva. Em contrapartida, pelas medidas de desempenho pode-se concluir que o satélite apresenta maiores erros para as áreas onde ocorrem os maiores volumes de chuva. Esse fato deve ser avaliado com cautela, uma vez que para valores baixos de chuva, tanto do satélite como dos pluviômetros, as medidas de desempenho também serão baixas se comparadas com aquelas encontrados para maiores índices de precipitação. Ou seja, nem sempre medidas de desempenho menores indicam melhores estimativas e medidas de desempenho maiores indicam melhores estimativas.

No entanto, mesmo na região litorânea, onde ocorreram as maiores diferenças, os valores não apresentam uma elevada discrepância entre a chuva estimada pelo satélite a chuva observada pela AESA. Pode-se afirmar que as estimativas de precipitação fornecidas pelo satélite TRMM são consistentes também para essa região.

A partir das análises das médias mensais realizadas conclui-se que o satélite consegue reproduzir com bastante fidelidade o regime de chuvas das sub-bacias hidrográficas da Paraíba. Nessa análise as variações sazonais da chuva também foram bem representadas pelo TRMM. Tais análises mostraram que em alguns meses houve igualdade entre dados estimados e observados e em outros as estimativas subestimaram ou superestimaram a precipitação, mas, mesmo nesses casos apresentaram resultados muito similares àqueles obtidos pelos pluviômetros.

Na análise das sub-bacias conclui-se que o satélite apresenta resultados significativos para todas as formas de análise. Esses resultados contribuem de forma positiva para variáveis importantes, como por exemplo, o planejamento hídrico e agrícola na Paraíba.

Nas mesorregiões, foi verificado que os melhores resultados, em todas as séries analisadas, apresentam-se na Borborema e no Sertão. Deve-se destacar que estas são as maiores mesorregiões em termos de área na Paraíba. Esses resultados reafirmam que quanto maior for a área analisada pelo satélite melhores serão os valores de estimativa. Também se verificou que o satélite tem uma maior tendência em subestimar a chuva para os locais onde são encontrados maiores quantidades de precipitação e superestimar para as regiões onde ocorrem os menores índices. A análise mensal é a que apresenta as estimativas melhores do

TRMM, conseguindo reproduzir com bastante fidelidade o regime das chuvas observadas nos pluviômetros nas mesorregiões da Paraíba.

Com relação a comparação entre chuva estimada e observada a partir do perfil topográfico conclui-se que os maiores índices de precipitação, tanto nas chuvas observadas como nas estimadas, ocorrem nas altitudes mais baixas, ou seja, Litoral e parte do Agreste paraibano, com as precipitações tendendo a diminuir no sentido oeste, apresentando um mínimo na região da Borborema e parte do Agreste, onde os índices estiveram abaixo de 800 mm na maioria dos anos analisados e a altitude pode ultrapassar os 700 metros. Nessa forma de análise o satélite TRMM representou com bastante fidelidade a variação sazonal e quantitativa da chuva.

De modo geral, na análise anual, identificou-se uma similaridade entre os valores estimados e os observados, com oscilações entre superestimação do TRMM em locais de altitudes elevadas e subestimação em altitudes baixas.

Os resultados das médias mensais mostraram bom desempenho do satélite para a variação sazonal das chuvas, ou seja, caracterizando com bom grau de fidelidade o período chuvoso de cada mesorregião da Paraíba. Em todos os meses percebeu-se uma proximidade nos dados observados e estimados.

A partir da análise dos resultados, conclui-se que o satélite TRMM apresentou um bom desempenho para reproduzir as chuvas observadas em pluviômetros no Estado da Paraíba. Essa constatação tem uma grande importância nessa pesquisa, tendo em vista que a partir dela será possível o planejamento e a tomada de decisões sobre questões relativas à precipitação no Estado, uma vez que se tem a certeza da credibilidade, confiabilidade ou similaridade apresentada pelo satélite ao estimar tais chuvas.

A partir do estudo desenvolvido com séries de chuva (diária, acumulados de 3 dias, 7 dias e mensal), foi possível detectar que os acumulados mensais apresentaram os melhores resultados. No entanto, os resultados da potencialidade de estimação do satélite para as demais séries também serão úteis para determinadas atividades desenvolvidas pela sociedade, podendo beneficiar vários setores em diferentes escalas espaciais.

Para exemplificar possíveis benefícios gerados a partir da verificação do potencial do satélite em estimar as chuvas na Paraíba, pode-se destacar, dentre outros, o setor da economia, do planejamento hídrico e da agricultura. Na economia, através do conhecimento da distribuição (quantidade e localização) das chuvas no Estado, será possível desenvolver ações que objetivem direcionar determinados processos econômicos da sociedade, de acordo

com suas necessidades hídricas, para as áreas mais propícias a tais atividades, levando-se em conta as informações alcançadas pela estimativa de chuvas do satélite. Como se sabe, a instalação de fábricas, o desenvolvimento industrial e comercial, o setor de serviços, são processos que dependem, em sua maioria, de uma boa e segura oferta de recursos hídricos. Nesse sentido, as informações desse estudo se configuram como essenciais. Numa análise mais abrangente do Estado, no entanto observando-se os fatores pontuais do estudo, pode-se destacar a importância da pesquisa para informações individualizadas sobre regime de chuvas. Ou seja, a partir dos resultados obtidos sobre estimativa de precipitação num pluviômetro localizado numa propriedade rural (ou nas proximidades) de um agricultor numa dada região da Paraíba, será possível estabelecer elementos que favoreçam a maximização dos seus lucros em suas atividades agropecuárias.

Se a análise é pautada levando-se em consideração os resultados obtidos sobre estimativa de precipitação do TRMM numa escala macroespacial, pode-se assegurar que o conhecimento do potencial de estimativa das chuvas do satélite relativo às sub-bacias e às mesorregiões traz importantes benefícios para o planejamento hídrico e também agrícola na Paraíba. A partir dessa perspectiva será possível planejar ações relativas ao uso adequado da água para abastecimento, para a agricultura extensiva ou de subsistência, para modelagem chuva vazão, entre outros. Também poderão ser colocadas em prática ações que minimizem os vícios de desperdício dos recursos hídricos, tomando como base as informações sobre estimativas de precipitação no estudo do balanço hídrico da área.

O setor agrícola também se beneficia das informações obtidas na pesquisa, haja vista que uma série de medidas de planejamento pode ser colocada em prática tornando as atividades do setor mais produtivas e mais lucrativas. Um exemplo disso é a escolha adequada do tipo de cultivo em relação à região do Estado. Ou seja, com os resultados sobre estimativas de chuva a partir do satélite pode-se decidir que culturas agrícolas com elevada exigência hídrica não devem ser cultivadas em algumas partes da região estudada onde se observou uma tendência para baixos índices pluviométricos e que espécies serão melhores utilizadas em localidades onde foram observados maiores índices de chuva.

## **5.2. Recomendações**

Sugere-se que o estudo seja aperfeiçoado para demais bacias do Nordeste brasileiro, e/ou para todo o Brasil, incluindo regiões onde as precipitações frontais, orográficas e de contraste terra-oceano possuem papel importante.

Recomenda-se testar outras formas de interpolação para avaliar os dados do satélite e da AESA.

Recomenda-se o uso de estimativas do TRMM como dado de entrada para simulação hidrológica para as bacias da Paraíba.

## Referências

- ADE YEWA, Z.D. & NAKAMURA, K. *Validation of TRMM radar rainfall data over major climatic regions in Africa* In: *Journal of Applied Meteorology*, v. 42, n.2, 2003, p. 331-347.
- ARAÚJO, A. N. (2006). "Simulação Hidrológica com o uso de chuva estimada por satélite". Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 163p.
- ARAÚJO, A.; GUETTER, A. *Avaliação hidrológica da técnica CMORPH de estimativa de chuva por satélite sobre a bacia do Iguaçu*. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)*, 16, 2007, João Pessoa. Anais, CD-ROM.
- ARKIN, P.A.; MEISNER, B.N. 1987. *The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the Western Hemisphere during 1982-84*. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 51-74.
- BARRERA, D.F. (2005). *Analisis comparativo de los mapas de precipitación obtenidos a partir de datos pluviométricos y de estimaciones satelitales*, In: *Actas do IX Congreso Nacional de Meteorología*, Buenos Aires.
- BARRERA, D.F.; CEIRANO, E. B. & ZUCARELLI, G. V. (2007). *Differences in area-averaged rainfall depth over a mid-size basin from two remote sensing methods of estimating precipitation*. In *Proceedings of Predictions in Ungauged Basins: PUB Kick-off*, IAHS Publication N° 309, c.14, pp. 121-128. Brasília, Brasil.
- BARRETT, E.C. *The estimation of monthly rainfall from satellite data*. *Mon. Wea. Rev.*, 98: 322-327. 1970.
- BELLERBY, T.; TODD, M.; KNIVETON, D. & KIDD, C. *Rainfall estimation from a combination of TRMM precipitation radar and GOES multispectral satellite imagery through the use of an artificial neural network*. In: *Journal of applied Meteorology*, v. 39, p. 2115-2128, 2000.
- BERTONI J. C & TUCCI C. E. M. *Precipitação* In: *Hidrologia ciência e aplicação*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 4 ed. Porto Alegre, p.943, 2009.
- CHANG, P.; JI, L. & Li, H. *A Decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interaction*. *Nature*, 385: 516-518, 1997.
- COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. Tese de doutorado, IPH-UFRGS, 194 páginas, anexos, (2001).
- COLLISCHONN, B. *Uso da precipitação estimada por satélite em um modelo hidrológico distribuído*. 196 f. Dissertação de Mestrado. IPH-UFRGS, Porto Alegre (RS), 2006.
- COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W. & TUCCI, C. E. M. *Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior*. In: *Revista Brasileira de Cartografia* N° 59/01, Abril 2007.

CONTI, G. N. *Estimativa da precipitação através de técnicas de sensoriamento remoto: Estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul*. 2002. 205 f. Dissertação de mestrado, IPh-UFRGS, 2002.

CONTI G. N. & MENDES, C. A. B. *Sensoriamento remoto para estimativa da precipitação no Estado do Rio Grande do Sul*. In: Anais XI SB SR, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril 2003, INPE, p. 1153-1160.

DUBREUIL, V.; LECAMUS, A.; DAGORNE, D. & MAITELLI, G.T. *Apport des satellites géostationnaires GOES pour l'étude du climat du Mato Grosso, Brésil*. In: l'Association Internationale de Climatologie, v.13, p.401- 409, 2000.

ENDRENY, T. A. & IMBEAH, N. *Generating robust rainfall intensity-duration-frequency estimates with short-record satellite data* In: Journal of Hydrology 371, 2009 (182-191).

FRANCISCO, P. R. M. *Classificação e Mapeamento de mecanização das terras do Estado da Paraíba utilizando sistema de informações geográficas*. 107 f. Dissertação de Mestrado - Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2010.

FEIDAS, H. *Validation of satellite rainfall products over Greece*. Theoretical and Applied Climatology, New York, v. 99, n. ½, p. 193 – 216, 2010.

GORLEY, J. J.; HONG, Y.; FLAMIG, Z. L.; WANG, L. L. A. *Intercomparison of Rainfall Estimates from Radar, Satellite, Gauge, and Combinations for a Season of Record Rainfall*. In: International Precipitation Working Group, Collection Special, 2010.

GONÇALVES, Lidiane Souza. *Relações Intensidade-Duração-Frequência com base em estimativa de precipitação de satélite*. 2011. 135 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

HERMAN, A.; KUMAR, V.B.; ARKIN, P.A.; KOUSKY, M. *Objectively determined 10-days African rainfall estimates created for famines early warning systems*. In: Journal of Remote Sensing, v.18, p.2047-2060, 1997.

HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; GU G.; NELKIN, E.; BOWMAN, K. P.; HONG, Y.; STOCKER, E. & WOLFF, A. D. B. *The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales*. In: Journal of Hydrometeorology, volume 8, February 2007 p.38 – 54.

JIMÉNEZ, Karena Quiroz. *Modelagem hidrológica com uso de estimativa de chuva por sensoriamento remoto*. 2011. 144 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

KOUSKY, V. E. *Frontal influences on Northeast Brazil*. Monthly Weather Review, v. 107, p. 1140-1153, 1979.

LA YBERRY, R.; TODD, M. C.; KIDD, C.; & BELLERBY, T. J. Daily Precipitation over Southern Africa: A new resource for climate studies. Journal of Hydrometeorology. v. 7. p.149-159, 2006.

LEVIN, S. *Multiple scales and the maintenance of biodiversity*. Ecosystems. v.3, n.6, p. 498-506, 2000.

LIU, Jin-King & PETER T.Y. *Topographic Correction of Wind-driven Rainfall for Landslide Analysis in Central Taiwan with Validation from Aerial and Satellite Optical Images*. In: Remote Sensing, 2013, 5, 2571-2589.

MEDEIROS, V. M. de A.; MOREIRA, L. F. & RIGHETTO, F. A. M. *Análise do Efeito da Variabilidade Espacial da Precipitação na Modelagem do Escoamento numa Bacia Experimental no Semiárido Nordestino*. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 12 n.3 Jul/Set 2007, 129-139.

MELLO, C. R. de.; LIMA J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M. & OLIVEIRA, M. S. *Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas*. R. Bras. Ci. Solo, 27:925-933, 2003.

MELLO, C. R. de.; VIOLA, M. R.; MELLO, J. M. de & SILVA, A. M. da. *Continuidade espacial de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais*. In: Ciência Agrotec., Lavras, v. 32, n. 2, p. 532-539, mar./abr., 2008.

MOL, Juliana Maria Duarte. *Estimativa de precipitação por meio de sensoriamento remoto*. 88 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Brasília, 2005.

MORI, S.; JUN-ICHI, H.; TAUHID Y. I. & YAMANAKA, M. D. *Diurnal Land-Sea Rainfall Peak Migration over Sumatera Island, Indonesian Maritime Continent, Observed by TRMM Satellite and Intensive Rawinsonde Soundings*. In: American Meteorological Society v. 132 February 2004 (2021 – 2039).

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P. de; GALVÍNCIO, J. D. *Análise da estimativa de precipitação do TRMM em uma sub-bacia da Amazônia Ocidental*. In: Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 25, n°1, janeiro/abril, 2008a.

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P. de. & SOUSA, F. de A. S. de. *Análise da utilização de dados do satélite TRMM em um modelo hidrológico semidistribuído na bacia do rio Jamari (RO)*. In: Revista Brasileira de Geografia Física Recife/PE. V. 01, n. 01, Maio/Agosto, 2008, 47-61.

OKE, A.M.C.; FROST, A. J & BEESLEY, C. A. *The use of TRMM satellite data as a predictor in the interpolation of daily precipitation over Australia*. In: 18 World IMACSMOD SIM Congress, Cairns, Australia, 2009.

PAZ, A. R. da & COLLISCHONN, W. *Avaliação de estimativas de campos de precipitação para modelagem hidrológica distribuída*. In: Revista Brasileira de Meteorologia, v.26, Nº1, 109 – 120, 2011.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C. & CARDozo, F. da S. *Avaliação dos Dados de Precipitação Estimados pelo Satélite TRMM para o Brasil*. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 18 n.3, Jul/Set 2013,139-148.

PEREIRA FILHO, A. J. *Integrating of gauge, radar and satellite rainfall*. 1st International Precipitation Working Group Workshop, CGMS: WMO, Proceedings, 275: 284, Madrid, Spain, 2002.

PINTO, L. I. C.; COSTA, M. H.; LIMA, F. Z. de; DINIZ, L. M. F.; SEDIYAMA, G. C. & PRUSKI, F. F. *Comparação de produtos de precipitação para a América do Sul*. In: Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.4, 461 - 472, 2009.

SALDANHA, C. B.; PAZ, A. R.; ALLASIA, D.; Collischonn, W.; BARRERA, D. *Avaliação da chuva do Hidroestimador para modelagem hidrológica na Região da Bacia do Rio Grande*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

SANCHES, Ieda Del'Arco. *Culturas Agrícolas em imagens multitemporais do satélite LANDSAT*. In: Agricultura, São Paulo, v. 52, n. 1, p. 83-96, jan./jun. 2005.

SANTOS, Aderson Starnley. *Análise de desempenho dos campos de chuva estimados pelo satélite TRMM na Paraíba, para fins de modelagem hidrológica distribuída*. Dissertação de Mestrado. UFPB João Pessoa (PB), 2014 (Em fase de elaboração).

SANTOS e SILVA, C. M.; FREITAS, S. R. de.; GIELOW, R.; & Barros, S. S. de. *Distribuição espacial da precipitação sobre o Rio Grande do Norte: estimativas via satélites e medidas por pluviômetros*. In: Revista Brasileira de Meteorologia, v.27, n.3, 337 – 346, 2012.

SHEPHERD, J. M. & BURIAN, S. J. *Detection of Urban-Induce Rainfall Anomalies in a Major Coastal City*. In: Earth Interactions Volume 7 (2003), 1 -19.

SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. *Mathematical models of large watershed hydrology*. Chelsea: Water Resources Publications, 2002. 891 p.

SOUZA, Edicarlos Pereira de. *Delimitação dos recursos hídricos no Estado da Paraíba com base na teoria da entropia*. 78 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2011.

SOUZA, E. B.; ALVES, J. M. B.; & REPELLI, C. A. *Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico na Estação Chuvosa do Semiárido Nordestino*. In: Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 277-283, 1998.

SU, F.; HONG, Y. & LETTENMAIER, D. P. *Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin*. In: Journal of Hydrometeorology, v. 9. August, 2008, (622-640).

VARIKODEN, H.; SAMAH, A. A. & BABU, C.A. *Spatial and temporal characteristics of rain intensity in the peninsular Malaysia using TRMM rain rate*. In: Journal of Hydrology v. 387, 2010 (312-319).

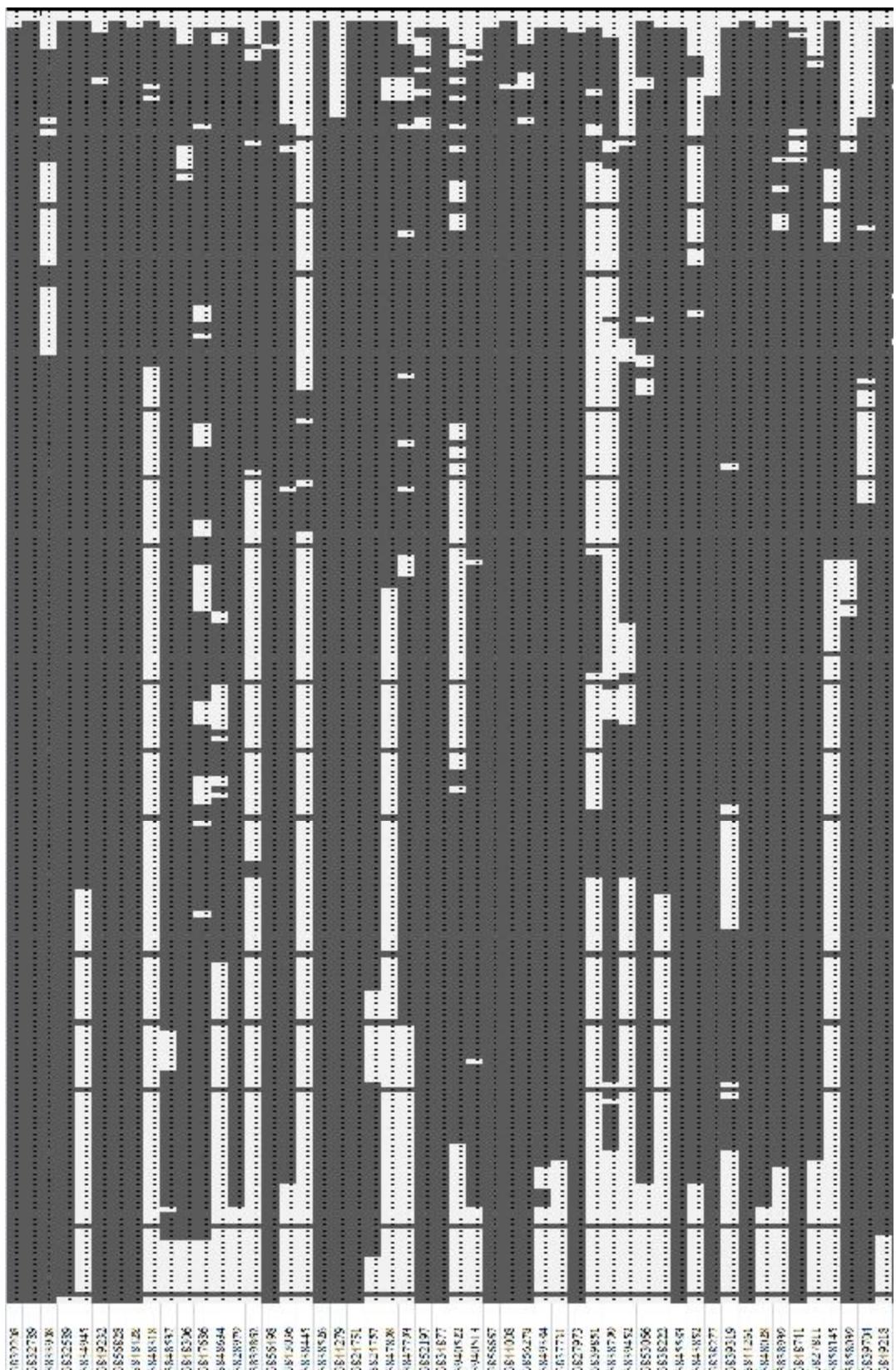
VARIKODEN, H.; PREETHI, B. & REVADEKAR, J. V. *Diurnal and spatial variation of Indian summer monsoon rainfall using tropical rainfall measuring mission rain rate*. In: Journal of Hydrology v. 475 2012 (248-258).

VITORINO, M. I.; BRAGA, C. C. & BRITO, J. I. B. Análise da variabilidade de baixa frequência da precipitação sobre o Estado da Paraíba. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis: SBMET, 2006.

WAGNER, P. D.; FIENER, P.; WILKEN, F.; KUMAR, S. & SCHNEIDER, K. (2012). *Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions*. In: *Journal of Hydrology* 464–465 (2012) 388–400.

WOLDEMESKEL F. M.; SIVAKUMAR, B. & SHARMA, A. *Merging gauge and satellite rainfall with specification of associated uncertainty across Australia*. In: *Journal of Hydrology* 499 (2013) 167–176.

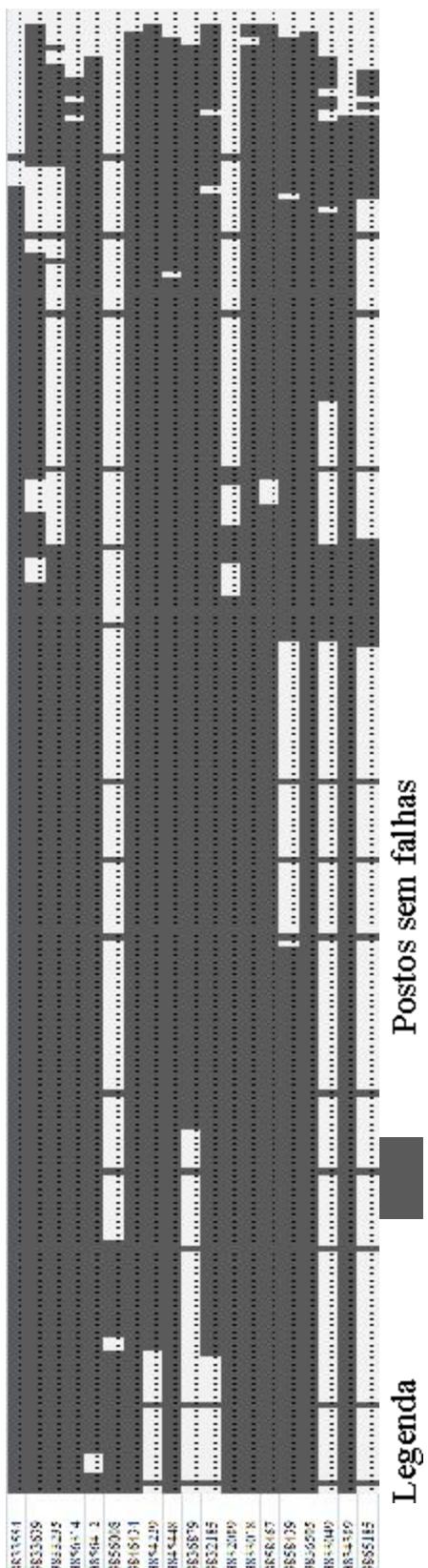
## ANEXOS



A 2D histogram showing the distribution of two variables. The x-axis ranges from 0.0 to 1.0 with 10 major ticks. The y-axis ranges from 0.0 to 1.0 with 10 major ticks. The histogram consists of 100 bins, each representing a 0.1x0.1 area. The color of each bin indicates the frequency of data points within that bin, with a color scale from black (0) to white (100). The distribution is highly concentrated in the central region, with a prominent peak at (0.5, 0.5) and smaller peaks at (0.2, 0.2) and (0.8, 0.8).



A 2D bar chart showing the distribution of 1000 samples across 100 bins. The x-axis represents the bin index (0 to 99), and the y-axis represents the sample index (0 to 999). The bars are black with white outlines. The distribution is highly skewed, with the highest frequency (approximately 100 samples) occurring in bin 0, and the frequency decreasing rapidly as the bin index increases. There are several smaller peaks in the distribution, notably around bins 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, and 90.



Legenda

Postos sem falhas



Postos com falhas

