

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**QUALIDADE DAS ESTIMATIVAS DE  
PRECIPITAÇÃO DO SATÉLITE TRMM NO ESTADO  
DO RIO GRANDE DO SUL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2016**



# **QUALIDADE DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO DO SATÉLITE TRMM NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

**Orientador: Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Picilli**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2016**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bernardi, Ewerthon Cezar Schiavo  
Qualidade das estimativas de precipitação do satélite  
trmm no estado do Rio Grande do Sul / Ewerthon Cezar  
Schiavo Bernardi.-2016.  
166 p.; 30cm

Orientador: Daniel Gustavo Allasia Piccilli  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental, RS, 2016

1. TRMM 2. 3B42 3. Rio Grande do Sul I. Piccilli,  
Daniel Gustavo Allasia II. Título.

---

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: bernardi.ecs@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria**  
**Centro de Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação de Mestrado

**QUALIDADE DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO DO SATÉLITE  
TRMM NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

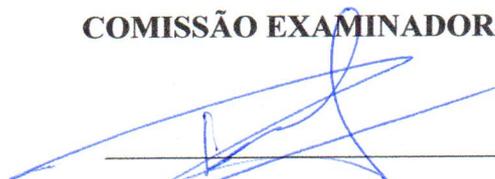
Elaborada por

**Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi**

Como requisito parcial para obtenção do grau de

**Mestre em Engenharia Ambiental**

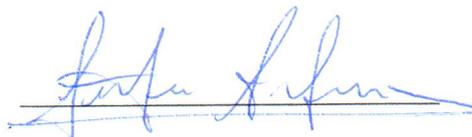
**COMISSÃO EXAMINADORA:**



**Daniel Gustavo Allasia Picilli, Dr. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**



**Adriano Rolim da Paz, Dr. (UFPB)**



**Jônatan Dupont Tatsch, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 27 de abril de 2016



# **RESUMO**

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

Universidade Federal de Santa Maria

## **QUALIDADE DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO DO SATÉLITE TRMM NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

AUTOR: EWERTHON CEZAR SCHIAVO BERNARDI

ORIENTADOR: DANIEL GUSTAVO ALLASIA PICILLI

A compreensão da ocorrência espacial e temporal da precipitação pluviométrica permite melhorar a gestão dos recursos hídricos, tanto no sentido de prevenir prejuízos relacionados à ocorrência de eventos de enchentes e estiagens, quanto em relação ao suprimento dos diversos setores. Assim, estimativas de precipitação de satélites são uma alternativa para obtenção de dados representativos de extensas áreas, tendo em vista que os dados observados em estações meteorológicas são escassos muitas vezes. Todavia, estes produtos de satélite contêm incertezas quando comparados aos dados medidos. O estudo procura avaliar a representatividade das estimativas de chuva oriundas de satélites no estado do Rio Grande do Sul. Para tal utilizaram-se produtos do satélite TRMM (3B42 V7), que foram comparados com observados no Estado, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e pelo Instituto Nacional de Meteorologia, no período de 1998 a 2013. O trabalho consistiu em comparar dados de precipitações estimadas e observadas por meio de um conjunto de índices de desempenho, tais como o percentual de detecção de eventos (PC), percentual de acertos (H), percentual de falsos alertas (FAR e F), índice de sucesso crítico (CSI), a razão entre eventos previstos e observados (B), bem como os índices de Heidke (HSS), e Peirce (PSS). Além de outras equações como: coeficiente de correlação (r) erro médio absoluto (EMA), erro médio quadrático (EQM), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) e viés. Os dados foram comparados em séries diárias e acumulados de 15 e 30 dias, por meio dos seguintes métodos: Pixel a Ponto, Ponto a Ponto, Pixel a Pixel, a partir de Sub-pixels e Análise agregada. Os produtos 3B42 também foram avaliados em relação a capacidade de determinar chuvas intensas, usando como referência equações de intensidade-duração-frequência derivadas de dados observados. Os resultados obtidos pelas metodologias, com exceção da análise de precipitações intensas, não diferenciaram muito entre si. As análises espaciais mostraram a intimidade das avaliações das estimativas tem com a densidade de postos e com as regiões do Rio Grande do Sul, enquanto as análises pontuais indicaram a boa performance do TRMM mesmo na comparação Pixel a Ponto. A medida que as séries diárias foram acumuladas em 15 e 30 dias, os resultados melhoraram. Ficou evidente o decréscimo da qualidade das estimativas na região Leste do RS, onde os efeitos da maritimidade acabam gerando superestimativas.

Palavras-chave: TRMM; 3B42; Rio Grande do Sul.



# **ABSTRACT**

Master Thesis

Post-Graduation Program in Environmental Engineering

Universidade Federal de Santa Maria

## **QUALITY RAINFALL ESTIMATIVES FROM TRMM SATELLITE IN RIO GRANDE DO SUL STATE**

**AUTHOR: EWERTHON CEZAR SCHIAVO BERNARDI**

**ADVISOR: DANIEL GUSTAVO ALLASIA PICILLI**

Understanding the spatial and temporal rainfall occurrence, improves the water resources management, both in order to prevent losses related to the occurrence of floods and droughts events, as in relation to the supply of the various sectors. Thus, satellite rainfall estimates are an alternative to obtain representative data of large areas, since the gauge data from meteorological stations are scarce, frequently due the low density of stations per area. However, these satellite products contain uncertainties when compared to gauge data. In this way, this study aims to evaluate the representativeness of rainfall estimates derived from satellites in the Rio Grande do Sul state. To this, were used satellite TRMM (3B42 V7) products, which were compared with gauge data in the State provided by the Agência Nacional de Águas and by the Instituto Nacional de Meteorologia, considering the period from 1998 to 2013. This paper compared rainfall estimates and gauge data was accomplished through a set statistics like skill scores, such as event detection percentage (PC), hit rate (H), false alerts ratios (FAR and F), critical success index (CSI), the ratio of planned events and observed (B), and the indexes of Heidke (HSS) and Pierce (PSS). Some equations were applied too: correlation coefficient ( $r$ ) mean absolute error (MPE), root mean square error (RMSE), the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS) and bias. The data were compared in daily and accumulated series of 15 and 30 days, through the following methods: Pixel to Point, Point to Point, Pixel to Pixel, from Sub-pixels and aggregate analysis. The 3B42 products were also evaluated for their skill to determine heavy rainfall, using as reference intensity-duration-frequency equations (IDF) derived from gauge data. The results obtained by the methods, except for the analysis of heavy rainfall, not differ much from each other. Spatial analysis showed the relationship of assessments estimates has to the density of stations and the regions of Rio Grande do Sul, while specific analyzes indicated the good performance of TRMM even in Pixel to Point comparison. The results improved in steps that the daily series were accumulated in 15 and 30 days. It was evident the decrease of the quality of the estimates in the eastern RS region, where the ocean effects generates overestimates.

Keywords: TRMM; 3B42; Rio Grande do Sul State.



## LISTA DE ABREVIACÕES

AMSR-E	Radiômetro de Micro-ondas Avançado para o Sistema de Observação da Terra (em inglês, <i>Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System</i> )
AMSU	Unidade Avançada de Micro-ondas Sonoras (em inglês, <i>Advanced Microwave Sounding Unit</i> )
ANA	Agência Nacional de Águas
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CAMS	Sistema de Avaliação e Monitoramento Climático (em inglês, <i>Climate Assessment and Monitoring System</i> )
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CERES	Sistema de Energia Radiante de Nuvens e da Terra (em inglês, <i>Clouds and Earth's Radiant Energy System</i> )
CNES	Centro Nacional de Estudos Espaciais (em francês, <i>Centre National d'Études Spatiales</i> )
DMSP	Programa de Defesa de Satélites Meteorológicos (em inglês, <i>Defense Meteorological Satellite Program</i> )
EUMETSAT	Organização Europeia para Exploração de Satélites Meteorológicos (em inglês, <i>European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites</i> )
GPCP	Projeto Climatológico de Precipitação Global (em inglês, <i>Global Precipitation Climatology Project</i> )
GPM	Medição de Precipitação Global (em inglês, <i>Global Precipitation Measurement</i> )
IPWG	Grupo de Trabalho de Precipitação Internacional (em inglês, <i>International Precipitation Working Group</i> )
ISRO	Organização Indiana de Pesquisa Espacial (em inglês, <i>Indian Space Research Organization</i> )
JAXA	Agência Aeroespacial Japonesa de Exploração (em inglês, <i>Japan Aerospace and Exploration Agency</i> )
LIS	Sensor de Relâmpagos (em inglês, <i>Lightning Imaging Sensor</i> )
MetOp	Programa de Satélites Meteorológicos Operacionais (em inglês, <i>Meteorological Operational Satellite Programme</i> )

NASA Administração Nacional Espacial Aeronautica (em inglês, *National Aeronautic and Space Administration*)

NASDA Agência Nacional Japonesa de desenvolvimento Espacial (em inglês, *National Space Development Agency of Japan*)

NESDIS Serviço Nacional Ambiental de Dados e Informações de Satélite (em inglês, *National Environmental Satellite Data and Information Service*)

NICT Instituto Nacional Japonês de Informação e Comunicação Tecnológica (em inglês, *Japanese National Institute of Information and Communication Technology*)

NOAA Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (em inglês, *National Oceanic and Atmospheric Administration*)

OMM Organização Meteorológica Mundial (em inglês, *World Meteorological Organization*)

RT Tempo real (em inglês, *Real-time*)

SR Sensoriamento Remoto

SSM/I Sensor Micro-ondas Especial por imagem (em inglês, *Special Sensor Microwave/Imager*)

SSMIS Sensor Micro-ondas Especial por som (em inglês, *Special Sensor Microwave Imager/Sounder*)

Satélite de Observação por Infravermelho e Visível (em inglês, *Television and InfraRed Observation Satellite*)

TMI Radar Microondas do TRMM (em inglês, *TRMM Microwave Imager*)

TMPA Análise de Precipitação por Múltiplos Satélites (em inglês, *TRMM's Multi-satellite Precipitation Analysis*)

TOVAS Sistema de Visualização e Análise Online do TRMM (em inglês, *TRMM Online Visualization and Analysis System*)

TRMM Missão de Medição de Chuvas Tropicais (em inglês, *Tropical Rainfall Measuring Mission*)

VIRS Sistema Radiômetro Visível e Infravermelho (em inglês, *Visible and Infrared Radiometer System*)

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 JUSTIFICATIVA .....	22
1.2 OBJETIVOS .....	23
1.2.1 Objetivo geral.....	23
1.2.2 Objetivos específicos.....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 Precipitação pluviométrica e pluviometria .....	24
2.2 Rede pluviométrica mínima.....	28
2.3 Densidade de estações para rede mínima .....	28
2.4 Sensoriamento remoto por satélite.....	30
2.5 Estimativas de precipitação pluviométrica por satélite.....	33
2.6 Principais produtos de precipitação por satélite .....	35
2.7 Satélite TRMM .....	36
2.8 Produtos TMPA .....	40
2.9 Utilização e avaliação dos produtos TMPA .....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.1 Área de estudo .....	52
3.2 Visão Geral da Metodologia .....	57
3.2.1 Precipitação Observada .....	58
3.2.2 Produtos 3B42 V7 .....	59
3.3 Métodos de comparação .....	60
3.4 Testes Estatísticos .....	62
3.4.1 Índices de desempenho.....	63
3.4.2 Outros testes .....	65
3.5 Verificação da estimativa de precipitação com diferentes probabilidades .....	67
3.6 Uso dos produtos TRMM para determinação de precipitações intensas .....	68
4. RESULTADOS .....	69
4.1 Comparação Pixel a Ponto.....	69
4.1.1 Avaliação por índices de desempenho .....	71

4.1.2 Avaliação por outras estatísticas.....	74
4.2 Comparação ponto a ponto.....	78
4.2.1 Avaliação por índices de desempenho.....	81
5.2.2 Avaliação por outras estatísticas.....	84
4.3 Comparação espacial (pixel a pixel) .....	87
4.3.1 Avaliação por índices de desempenho.....	87
4.3.2 Avaliação por outras estatísticas.....	94
4.5 Comparação por Sub-pixels .....	106
4.5.1 Avaliação por índices de desempenho.....	106
4.5.2 Avaliação por outras estatísticas.....	112
4.6 Análise agregada .....	121
4.7 Precipitação com diferentes probabilidades .....	127
4.8 TRMM na determinação de precipitações intensas.....	130
5.9 Comparação entre os métodos aplicados .....	134
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	138
6 REFERÊNCIAS.....	140
APÊNDICE A .....	149
APÊNDICE B .....	155

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de formação de gotas por colisão-coalescência. ....	26
Figura 2 – Tipos de órbitas artificiais .....	32
Figura 3 – Instrumentos sensores a bordo do TRMM. ....	38
Figura 4 – Diagrama de fluxo de etapas para gerar produtos TMPA. ....	42
Figura 5 – Médias mensais de precipitação das regiões do RS, localização das bacias hidrográficas, centros de pixels TRMM e estações pluviométricas da ANA e do BDMEP. ...	54
Figura 6 – Isoietas anuais médias de 1977 a 2006. ....	55
Figura 7 – Mapa hipsométrico do Rio Grande do Sul .....	56
Figura 8 – Estações pluviométricas da ANA com 50%, 75% e 90% dos dados anuais preenchidos, considerando o período de 1998 a 2013. ....	59
Figura 9 – Diagrama de fluxo das etapas metodológicas. ....	62
Figura 10 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Uruguaiana (a) e Caixas do Sul (b)..	70
Figura 11 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Cruz Alta. ....	71
Figura 12 – Índices de desempenho PC (a), FAR (b), H (c) e F (d) para análise pixel a ponto. ....	73
Figura 13 – Índices de desempenho CSI (a), Bias (b), HSS (c) e PSS (d) para análise pixel a ponto. ....	74
Figura 14 – Localidades (a) e viés relativo (b) para análise pixel a ponto. ....	75
Figura 15 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries diárias da análise pixel a ponto. ....	76
Figura 16 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries quinzenais da análise pixel a ponto. ....	77
Figura 17 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries mensais da análise pixel a ponto. ....	78
Figura 18 – Séries acumuladas (estimada interpolada e observada) em Uruguaiana (a) e Caixas do Sul (b). ....	80
Figura 19 – Série observada e estimada (interpolada) referentes a estação pluviométrica de Cruz Alta. ....	81
Figura 20 – Índices de desempenho PC (a), FAR (b), H (c) e F (d) para análise ponto a ponto. ....	82

Figura 21 – Índices de desempenho CSI (a), Bias (b), HSS (c) e PSS (d) para análise ponto a ponto.....	83
Figura 22 – Localidades (a) e viés relativo (b) para análise ponto a ponto. ....	84
Figura 23 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries diárias da análise ponto a ponto.....	85
Figura 24 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries quinzenais da análise ponto a ponto. ....	86
Figura 25 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries mensais da análise ponto a ponto. ....	87
Figura 26 – Percentual de detecção (PC) para análise pixel a pixel .....	88
Figura 27 – Percentual de acertos (H) para análise pixel a pixel .....	89
Figura 28 – Falsos alertas (FAR) para análise pixel a pixel. ....	90
Figura 29 - Falsos alertas (F) para análise pixel a pixel.....	91
Figura 30 – Índice de sucesso crítico (CSI) para análise pixel a pixel. ....	92
Figura 31 – Desempenho de Heidke (HSS) para análise pixel a pixel. ....	93
Figura 32 – Desempenho de Peirce (PSS) para análise pixel a pixel. ....	93
Figura 33 – Bias para análise pixel a pixel. ....	94
Figura 34 – Coeficiente de correlação linear com séries diárias para análise pixel a pixel.....	95
Figura 35 – Coeficiente de correlação linear com séries de somatórios de 15 dias para análise pixel a pixel.....	96
Figura 36 – Coeficiente de correlação linear com séries de somatórios de 30 dias para análise pixel a pixel.....	97
Figura 37 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries diárias para análise pixel a pixel. ....	98
Figura 38 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries de somatórios de 15 dias para análise pixel a pixel.....	99
Figura 39 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries de somatórios de 30 dias para análise pixel a pixel.....	100
Figura 40 – Erro médio absoluto com séries diárias para análise pixel a pixel. ....	101
Figura 41 – Erro médio absoluto com séries de somatórios de 15 dias para análise pixel a pixel.....	101
Figura 42 – Erro médio absoluto com séries de somatórios de 30 dias para análise pixel a pixel.....	102
Figura 43 – Erro médio quadrático com séries diárias para análise pixel a pixel.....	103

Figura 44 – Erro médio quadrático com séries de somatórios de 15 dias para análise pixel a pixel. ....	103
Figura 45 – Erro médio quadrático com séries de somatórios de 30 dias para análise pixel a pixel. ....	104
Figura 46 – Viés relativo para análise pixel a pixel. ....	105
Figura 47 – Percentual de detecção (PC) para comparação por Sub-pixels. ....	107
Figura 48 – Percentual de acertos (H) para comparação por Sub-pixels. ....	107
Figura 49 – Falsos alertas (FAR) para comparação por Sub-pixels. ....	108
Figura 50 – Falsos alertas (F) para comparação por Sub-pixels. ....	109
Figura 51 – Índice de sucesso crítico (CSI) para comparação por Sub-pixels. ....	110
Figura 52 – Desempenho de Heidke (HSS) para comparação por Sub-pixels. ....	110
Figura 53 – Desempenho de Peirce (PSS) para comparação por Sub-pixels. ....	111
Figura 54 – Bias para comparação por Sub-pixels. ....	111
Figura 55 – Coeficiente de correlação linear com séries diárias para comparação por Sub-pixels. ....	112
Figura 56 – Coeficiente de correlação linear com séries de somatórios de 15 dias para comparação por Sub-pixels. ....	113
Figura 57 – Coeficiente de correlação linear com séries de somatórios de 30 dias para comparação por Sub-pixels. ....	114
Figura 58 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries diárias para comparação por Sub-pixels. ....	115
Figura 59 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries de somatórios de 15 dias para comparação por Sub-pixels ....	116
Figura 60 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries de somatórios de 30 dias para comparação por Sub-pixels ....	116
Figura 61 – Erro médio absoluto com séries diárias para comparação por Sub-pixels. ....	117
Figura 62 – Erro médio absoluto com séries de somatórios de 15 dias para comparação por Sub-pixels. ....	118
Figura 63 – Erro médio absoluto com séries de somatórios de 30 dias para comparação por Sub-pixels. ....	118
Figura 64 – Erro médio quadrático com séries diárias para comparação por Sub-pixels. ....	119
Figura 65 – Erro médio quadrático com séries de somatórios de 15 dias para comparação por Sub-pixels. ....	120

Figura 66 – Erro médio quadrático com séries de somatórios de 30 dias para comparação por Sub-pixels.....	120
Figura 67 – Viés relativo para comparação por Sub-pixels.....	121
Figura 68 – Bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul e estações pluviométricas da ANA. .....	122
Figura 69 - Variações locais de precipitações diárias de estimativas TRMM e dados monitorados com tempo de retorno de 2, 10 e 25 anos.....	128
Figura 70 – Regiões de máximas precipitações e coeficientes de ajuste TRMM.....	129
Figura 71 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM <sub>ajustado</sub> na Região Norte (localidade Cruz Alta).....	131
Figura 72 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM <sub>ajustado</sub> na Região Leste (localidade Porto Alegre). ....	131
Figura 73 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM <sub>ajustado</sub> na Região Central/Noroeste (localidade Encruzilhada do Sul).....	132
Figura 74 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM <sub>ajustado</sub> na Região Oeste (localidade Uruguaiana). ....	132
Figura 75 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM <sub>ajustado</sub> na Região Sul (localidade Rio Grande). ....	133
Figura 76 – Erros entre IDF e TRMM <sub>ajustado</sub> em cada localidade.....	134
Figura 77 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Bagé.....	149
Figura 78 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Bento Gonçalves.....	149
Figura 79 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Bom Jesus.....	149
Figura 80 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Cruz Alta. ....	150
Figura 81 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Encruzilhada do Sul.....	150
Figura 82 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Iraí. ....	150
Figura 83 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Lagoa Vermelha. ....	151
Figura 84 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Passo Fundo.....	151
Figura 85 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Pelotas. ....	151
Figura 86 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Porto Alegre. ....	152
Figura 87 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Rio Grande. ....	152
Figura 88 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Santa Maria.....	152
Figura 89 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Santana do Livramento.....	153
Figura 90 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Santa Vitória do Palmar. ....	153
Figura 91 – Séries acumuladas (pixel e observada) em São Luiz Gonzaga. ....	153

Figura 92 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Torres. ....	154
Figura 93 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Bagé	155
Figura 94 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Bagé. .....	155
Figura 95 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Bento Gonçalves. ....	155
Figura 96 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Bento Gonçalves .....	156
Figura 97 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Bom Jesus.....	156
Figura 98 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Bom Jesus.....	156
Figura 99 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Caxias do Sul.....	157
Figura 100 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Caxias do Sul.....	157
Figura 101 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Encruzilhada do Sul.....	157
Figura 102 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Encruzilhada do Sul.....	158
Figura 103 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Iraí.	158
Figura 104 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Iraí. .....	158
Figura 105 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Lagoa Vermelha. ....	159
Figura 106 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Lagoa Vermelha. ....	159
Figura 107 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Passo Fundo.....	159
Figura 108 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Passo Fundo.....	160
Figura 109 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Pelotas. .....	160

Figura 110 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Pelotas.....	160
Figura 111 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Porto Alegre.....	161
Figura 112 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Porto Alegre.....	161
Figura 113 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Rio Grande.....	161
Figura 114 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Rio Grande.....	162
Figura 115 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Santa Maria.....	162
Figura 116 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Santa Maria.....	162
Figura 117 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Santana do Livramento.....	163
Figura 118 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Santana do Livramento.....	163
Figura 119 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Santa Vitória do Palmar.....	163
Figura 120 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Santa Vitória do Palmar.....	164
Figura 121 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de São Luiz Gonzaga.....	164
Figura 122 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de São Luiz Gonzaga.....	164
Figura 123 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Torres.....	165
Figura 124 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Torres.....	165
Figura 125 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Uruguaiana.....	165
Figura 126 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Uruguaiana.....	166

## 1 INTRODUÇÃO

A compreensão do regime pluviométrico de determinada região é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico sustentável. A quantificação convencional da chuva consiste na observação pontual da variável por meio da utilização de pluviômetros e pluviógrafos que cobrem pequenas áreas, sendo necessária a existência de uma densa rede pluviométrica para que haja monitoramento detalhado em grandes áreas (COLLISCHONN, 2006; NÓBREGA 2008a, PEREIRA et al., 2013, FENSTERSEIFER, 2013). Entretanto, muitas vezes, esta rede é inexistente, em função dos altos custos de instalação e manutenção.

Em conformidade com as informações da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o Rio Grande do Sul (RS) conta com 1 estação pluviométrica para cada 548,11 km<sup>2</sup>, uma vez que são 514 estações com dados de chuva cadastradas no banco de dados de ambas instituições distribuídas em 281.730,22 km<sup>2</sup> do Estado.

Somente 290 postos localizados dentro dos limites políticos do RS possuem dados monitorados desde 1998, restringindo radicalmente a densidade de estações pluviométricas para 971,48 km<sup>2</sup> por posto, sendo que muitos não possuem nem 75% das séries, considerando o período de 1998 a 2013. Por exemplo, no ano de 2007, apenas 50 estações pluviométricas da ANA dispõem da série anual com 10% ou menos de falhas.

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM) é recomendada uma estação a cada 900 km<sup>2</sup> em regiões costeiras, a cada 575 km<sup>2</sup> em áreas planícies interiores ou morros e um posto a cada 250 km<sup>2</sup> em regiões montanhosas, o que indica que o Estado encontra-se em situação precária em termos de monitoramento de chuvas (OMM, 2008).

Frente a essa carência de dados pluviométricos, é imprescindível a adoção de novas fontes de informações que permitam obter dados confiáveis e com suficiente densidade espacial dentro das possibilidades financeiras do Estado e Governo Federal. Dentre as opções encontra-se a utilização de estimativas de precipitação a partir de informações obtidas de dados coletados por sensoriamento remoto (SR). Estes produtos são baseados no emprego de radares e sensores para estimar valores de precipitação a partir de radiância e/ou refletância de nuvens. Contudo, há necessidade de validação destas estimativas por se tratarem de medidas indiretas passíveis de conter erros.

Por conseguinte, este trabalho pretende avaliar a qualidade das estimativas geradas a partir do TMPA (inglês *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multisatellite Precipitation Analysis*) na área compreendida pelo estado do Rio Grande do Sul empregado

diferentes métodos de comparação entre as estimativas de precipitação pluviométrica e os dados oriundos de monitoramento, haja vista a vasta quantidade de metodologias empregadas em outras pesquisas sobre a mesma temática.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O Rio Grande do Sul tem um histórico de ocorrência de estiagens e inundações severas, que, muitas vezes, causam perdas significativas na economia estadual, bem como problemas sociais. Os anos de 2005 e 2012 foram marcados por fortes estiagens no Estado. A respeito da produção de grãos, a safra 2005 teve redução de 5,9 milhões de toneladas em relação a de 2004, enquanto a safra de 2012 diminuiu em quase 10 milhões de toneladas comparada ao produzido em 2011 (as reduções foram de 33% e 34%, respectivamente em relação aos anos antecessores) (FARSUL, 2012).

Berlato et al. (2005) indicam que há ganhos na produtividade agrícola de milho no RS em anos de *El Niño*, em função do aumento de chuvas. Por outro lado, os anos de *La Niña* têm efeito oposto na produtividade do Estado. Assim, fica clara a necessidade de estudar a distribuição espacial e temporal da chuva na área do RS, tendo em vista a relação íntima que o desenvolvimento do Estado tem com essa variável.

Além disso, em concordância com as informações disponibilizadas pela Defesa Civil do RS, em sua página eletrônica, cerca de 31,6% dos decretos de situação de emergência contabilizados a partir de 2011 correspondem a eventos de estiagem, enquanto 41,3 % são reportados em função de alagamentos, chuvas intensas, enchentes, enxurradas e inundações (classes da defesa civil). Os 27,1% restantes são decorrentes de eventos de granizo, vendavais, incêndios, deslizamento e colapso de edificações, por exemplo.

Logo, é necessário que sejam aplicados mecanismos de gestão, sendo que para isso primeiramente é preciso mensurar ou estimar as chuvas com boa resolução temporal e espacial. Nesse sentido, as estimativas de precipitação pluviométrica a partir de satélites se mostram como boas alternativas às deficiências do monitoramento pluvial em solo, como demonstram os trabalhos de Collischonn et al. (2007), Nóbrega et al. (2008a) e As-Syakur et al. (2011), Fensterseifer (2013), Camparotto et al. (2013), Soares (2014) e Liu et al. (2015), Ringard et al. (2015), Satgé et al. (2016).

Ao passarem pelos processos de avaliação quantitativa e posteriormente por correções, as estimativas de precipitações oriundas de sensores remotos orbitais podem se tornar informações complementares às coletadas em solo e até mesmo suprir a carência de dados de precipitação em determinadas regiões onde o monitoramento é precário ou inexistente.

Desta forma torna-se necessária a avaliação das estimativas do satélite TRMM em todo o estado do RS, o que pode refletir em benefícios para os setores econômicos e sociais, ao auxiliar na compreensão das distribuições temporais e espaciais das precipitações, principalmente se as estimativas de satélite conseguirem reproduzir as precipitações observadas em solo com bom desempenho. Mesmo que esta reprodução não ocorra com alta performance, as estimativas de satélite poderão ser ajustadas, reduzindo os erros agregados e assegurando seus usos de maneira confiável.

## **1.2 OBJETIVOS**

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a qualidade das estimativas de precipitação obtidas do produto 3B42 do TMPA (inglês *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multisatellite Precipitation Analysis*), para o Estado do Rio Grande do Sul como fonte alternativa de dados de precipitação.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a qualidade dos produtos 3B42 do TRMM em relação aos dados pluviométricos no Rio Grande do Sul.
- b) Avaliar o comportamento dos produtos 3B42 de forma pontual, empregando as metodologias de comparação Pixel a Ponto e Ponto a Ponto.
- c) Avaliar o comportamento dos produtos 3B42 de forma regional ao longo do Estado pela aplicação dos métodos Pixel a Pixel, com Sub-pixels e Análise agregada.
- d) Comparar entre os métodos de avaliação das estimativas TRMM.
- e) Verificar a aplicabilidade dos produtos 3B42 para determinação de chuvas intensas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Precipitação pluviométrica e pluviometria

Precipitações pluviométricas são oriundas do aumento do tamanho das gotículas das nuvens a partir dos núcleos de condensação presentes no ar atmosférico, sendo que tais núcleos podem ser de gelo, poeira ou outras partículas. Para que realmente haja precipitação as gotas de água devem formar um aglomerado de modo que o seu peso seja superior às forças que o mantem suspenso. Assim, pode-se afirmar que somente o processo de condensação não é suficiente para que ocorra precipitação, haja vista que nesse processo são formadas gotículas muito pequenas com massa insuficiente para superar a força de flutuação térmica e, por conta disso, permanecem suspensas na atmosfera.

O processo de crescimento por condensação gera gotículas de até aproximadamente 20 mm e consiste na formação de gotas de nuvens pelo resfriamento adiabático (sem troca de calor entre o sistema e o meio) de uma parcela de ar ascendente, que atingem a saturação e a condensação do vapor d'água em torno dos núcleos de condensação, primeiramente, e, posteriormente, ao redor da própria gotícula.

Lutgens e Tarbuck (2012) descrevem que os diâmetros das gotas de chuva podem variar de 0,01 mm até 5,0 mm, atingindo velocidades de queda de 0,01 km/h e 33 km/h, respectivamente. Segundo os mesmos autores, essas partículas de tamanho superior caem com velocidades maiores (ou menores em casos de fluxos ascendentes), de modo que começam a colidir com outras gotículas, aumentando seu tamanho e sua taxa de crescimento.

Em uma nuvem com desenvolvimento vertical há maiores chances das gotas atingirem o tamanho para precipitar, pois os fluxos ascendentes podem auxiliar na sua formação por fazerem com que as mesmas cruzem repetidamente pela nuvem onde o atrito com o ar pode auxiliar no rompimento da tensão superficial da água, gerando gotas menores que repetem esse processo conhecido como colisão-coalescência, representado na Figura 1 (Lutgens e Tarbuck 2012). É comum a ocorrência desse processo em nuvens quentes, ou seja, com temperaturas maiores de 0°C, comuns em regiões tropicais.

Outro processo gerador de precipitação pluviométrica ocorre em nuvens frias e mistas. O processo de Bergeron, assim denominado, em função do meteorologista Tor Bergeron que o

descreveu primeiramente, ocorre em nuvens frias que são formadas por cristais de gelo e/ou gotas líquidas muito resfriadas, sendo que em alguns casos apenas a parcela superior da nuvem pode atingir temperaturas menores que 0°C, como é o caso das nuvens mistas, que apresentam gotas líquidas na parte inferior, gotas super-resfriadas e cristais de gelo na sua porção média e apenas cristais de gelo na parcela de cima (GRIMM, 1999).

Para uma temperatura constante, a pressão de vapor de saturação sobre o gelo é menor do que sobre a água, logo, num ambiente com cristal de gelo e água muito resfriada, se houver vapor suficiente para que uma gota de água não evapore, haverá vapor para se depositar sobre o cristal. Com isso o cristal de gelo aumentará seu volume e sua massa, permitindo que atinja velocidades de queda maiores, colida com outros cristais de gelo e gotas d'água e acabe por precipitar.

Em termos de mecanismo que produz a ascensão do ar úmido, as precipitações classificam-se em convectivas, orográficas e frontais ou ciclônicas. (PINTO et al., 1967; TUCCI, 1993; WARD & TRIMBLE, 2004)

**Convectivas:** Ocorrem devido à perturbação das camadas aquecidas de ar úmido num tempo relativamente calmo, que provoca a ascensão do ar menos denso fazendo-o atingir o ponto de condensação. Muitas vezes podem dar origem a eventos de inundação em bacias de menor porte por configurarem chuvas de intensidade elevada, pequena duração e grandes volumes que tem ocorrência em pequenas áreas.

**Orográficas:** Caracterizadas pela baixa intensidade e longa duração, cobrindo pequenas regiões, são decorrentes da ascensão de ventos quentes e úmidos, muitas vezes proveniente dos oceanos, devido à presença de uma barreira montanhosa. O resfriamento do ar ocorre em condições adiabáticas, ou seja, sem trocas de calor com o ambiente, formando nuvens e precipitação devido à condensação do ar.

**Frontais ou ciclônicas:** Provenientes do encontro de massas frias e quentes que ocorrem nas chamadas zonas de convergência, onde o ar mais quente e úmido é empurrado de forma drástica para cima ocasionando na produção de chuvas por conta de seu resfriamento. Diferentemente dos tipos de chuvas anteriores, as frontais abrangem áreas extensas com chuvas de média intensidade e longa duração, capazes de gerar cheias em grandes bacias hidrográficas (TUCCI, 1993). Geralmente, em regiões de médias latitudes ao longo do globo, as chuvas frontais são predominantes e tem relações com centros de baixa pressão (ciclones) que se movimentam do oeste para leste (Ward & Trimble, 2004).

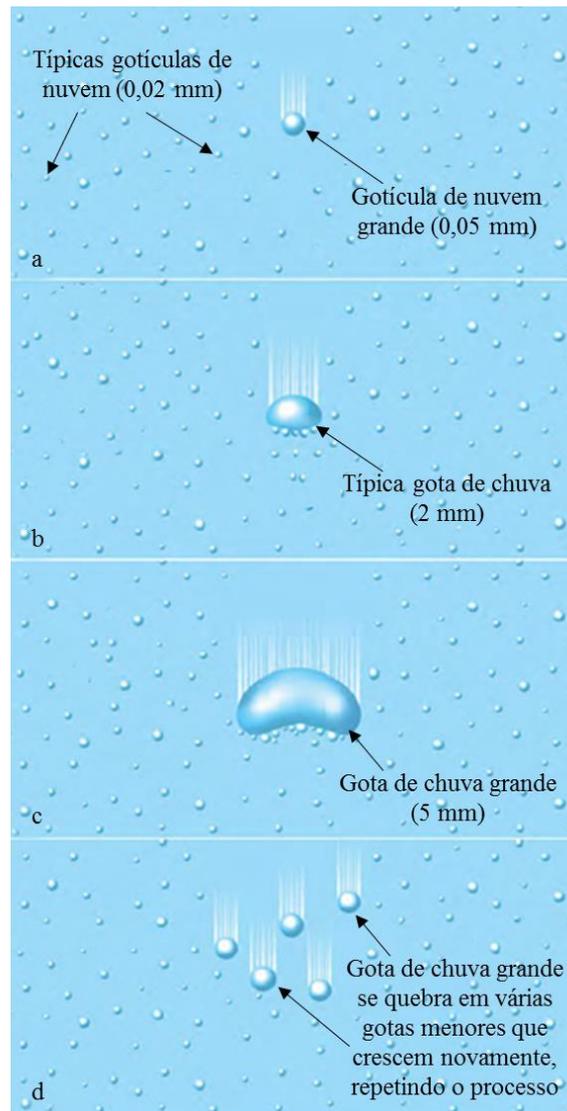


Figura 1 – Processo de formação de gotas por colisão-coalescência.

Fonte: Adaptado de Lutgens e Tarbuck (2012).

A quantidade de chuva precipitada é expressa em termos de altura de lâmina da água acumulada (mm) sobre uma superfície plana admitindo que não infiltre, evapore e nem escoe para fora dos limites da área. Basicamente, há duas maneiras de medir chuva, sendo de forma pontual com pluviômetros e pluviógrafos, ou espacialmente empregando o uso de radares. (TUCCI, 1993; PINTO et al., 1967)

Pluviômetros e pluviógrafos colhem pequenas amostras, tendo em vista que sua superfície de exposição varia de 500 cm<sup>2</sup> a 200 cm<sup>2</sup> colocados a uma altura que varia de 1,0 m a 1,5 m acima do nível solo, sendo que deve-se ter o cuidado de instalar o equipamento longe de qualquer obstáculo natural ou artificial. De forma geral, pluviômetros carecem de um

observador para fazer leituras manuais em intervalos de tempo fixos, normalmente de 24 horas. Já, os pluviógrafos permitem o registro de chuva de maneira automatizada em menores intervalos de tempo (TUCCI, 1993; PINTO et al., 1967).

As técnicas tradicionais de medidas de chuva são suscetíveis à falhas na descrição de eventos, tendo em vista que a precipitação pluviométrica pode apresentar grande variação espacial e temporal e os postos pluviométricos referem-se a medidas pontuais. Além disso, existem erros e incertezas associados ao monitoramento pluviométrico, haja vista que variáveis como obstáculos e o próprio vento podem influenciar nas mediadas dos equipamentos. O vento é um fator que produz erros na volume de chuva coletado, sendo que quanto maior a velocidade do vento, menor é a área efetiva de coleta da chuva no equipamento. Outros fatores que podem induzir a erros de medidas: perdas por evaporação da água antes de ser coletada, erros associados a pessoa que faz a leitura (água derramada, erro na contagem de provetas cheias, anotação incorreta) ou erros associados aos instrumentos de medição como defeito ou falta de precisão na escala da proveta (WAGNER, 2009). Pollock et al. (2014), diversas variáveis tem relação com o monitoramento pluviométrico como formato do coletor, tipo de precipitação, condições de ventos (aerodinâmica) e de posição do pluviômetro. Contudo, mesmo havendo erros associados ao monitoramento convencional da chuvas, os dados de pluviômetros e pluviógrafos compõem a maior fonte de informações relacionadas a essa variável meteorológica.

A utilização de radares é uma alternativa que vem possibilitando a medição de volume de água com alto nível de detalhe em termos de distribuição espacial. Todavia, esta técnica apresenta suas incertezas por se tratar de medidas indiretas (TUCCI, 1993). Conforme Wanielista et al. (1997), medidas de radares estão sujeitas a erros devido à presença de obstáculos como construções e árvores, presença de ventos, classificação de precipitações (neve, granizo ou chuva), bem como a distância entre o radar e o local de ocorrência da precipitação. Entretanto, Silva et al. (2012), avaliaram as estimativas de precipitação feitas por um radar polarimétrico banda S, que operam com frequência de 3 GHz comprimento de onda de 10,7 cm com área circular de varredura de 100 km de raio e concluíram que as estimativas de radar e medidas de pluviômetros apresentaram boa correlação. Assim, os autores declaram que pode-se atingir valores mais precisos de precipitação empregando radares e medidores pontuais de forma conjunta.

Uma rede de monitoramento de precipitação pluviométrica de qualidade pode servir como base para validar informações provenientes de radares e outros sensores, o que asseguraria a qualidade das estimativas, mesmo em locais de difícil acesso onde não se pode

realizar monitoramento. Nesse contexto se encontra a avaliação da ocorrência e distribuição de chuvas por meio de métodos envolvendo monitoramento em solo e estimativas por radares e outros sensores.

## **2.2 Rede pluviométrica mínima**

A rede básica deve gerar informações hidrológicas suficientes, dentro da sua região de abrangência, a fim de evitar qualquer erro na tomada de decisão em relação aos recursos hídricos. A rede mínima consiste na primeira etapa para criação de uma rede hidrológica, a qual deve ser composta por um número mínimo de estações. Este número, por sua vez, é indicado em função de experiências de serviços hidrológicos de diversos países, de modo que propicie o início do planejamento do desenvolvimento econômico dos recursos hídricos (OMM, 2008).

Ainda segundo a OMM (2008), a rede mínima proporciona uma estrutura básica para evitar deficiências na exploração e desenvolvimento dos recursos hídricos, levando em conta o grau de desenvolvimento econômico e as necessidades ambientais de cada país. Ou seja, possibilita atender as demandas de informações para usos específicos da água.

Contudo, a rede mínima pode não ser o suficiente para elaboração de planos de desenvolvimento detalhados, nem sequer atender às variadas necessidades de determinada região desenvolvida para exploração e gestão recursos hídricos. Assim, a rede deve ser ampliada sempre que possível.

Quando há informações hidrológicas disponíveis pode-se aplicar técnicas informatizadas de análises matemáticas com a finalidade de otimizar a densidade de rede, de modo que satisfaça as necessidades específicas. Dentre estas técnicas de análises está a dos mínimos quadrados generalizados (NAUGLS, em sua sigla em inglês), apresentado pelo *Geological Survey* dos Estados Unidos, utilizada para verificar se as isoietas são suficientemente representadas pela rede proposta. Todavia, não é aconselhado aplicar tais metodologias de análises caso não haja disponibilidade de informações prévias (OMM, 2008).

## **2.3 Densidade de estações para rede mínima**

O conceito de densidade de rede tem como objetivo orientar, de forma geral, a respeito da densidade de estações recomendada para uma rede mínima, ponderando as condições socioeconômicas, físicas e climáticas da região. Conforme a Tabela 1, sugerida pela OMM (1994), a densidade mínima de postos depende do tipo de estação e do tipo de região fisiográfica.

Tabela 1 – Densidade mínima de estações pluviométricas. Adaptado de OMM (2008).

Unidades Fisiográficas	Densidade mínima por estação (km <sup>2</sup> /estação)	
	Pluviométricas	Pluviográficas
Zonas costeiras	900	9.000
Zonas montanhosas	250	2.500
Planícies interiores	575	5.750
Morros	575	5.750
Pequenas ilhas (inferior a 500 km <sup>2</sup> )	25	250
Áreas urbanas		10 a 20
Zonas polares e áridas	10.000	100.000

A OMM (2008) indica que os postos devem estar distribuídos uniformemente, levando em conta as necessidades de informação e a localização de observadores. Por exemplo, é praticamente impossível manter o funcionamento de muitos postos em regiões com população local pequena ou que apresentem zonas de difícil acesso, devido à dificuldade de encontrar pessoal para realizar a observação das medidas. Em contrapartida, áreas urbanizadas apresentam grande densidade populacional, além de demandarem uma rede pluviométrica mais densa principalmente para gestão e controle dos sistemas chuva-vazão.

Com o intuito de garantir que os dados pluviométricos complementem os fluviométricos de forma a permitir análises hidrológicas e previsões de inundações, as estações pluviométricas devem ser instaladas de modo que a vazão gerada pela precipitação possa ser observada para cada estação fluviométrica com precisão. Para tal, normalmente há uma estação pluviométrica bem próxima à fluviométrica, e outra a montante. Em casos que a estação fluviométrica encontra-se em vales profundos e estreitos, é preferível que o instrumento pluviométrico esteja localizado a uma certa distância desta estação.

A rede mínima é composta por três tipos de postos, conforme a OMM (2008), sendo:

- A) Pluviômetros: consistem em aparelhos capazes de realizar, no mínimo, leituras diárias, sendo que complementarmente, devem ser registradas informações a respeito de condições climáticas;
- B) Pluviógrafos: estações que permitem realizar monitoramento horário ou sub-horário, gerando informações sobre intensidade, duração e frequência das precipitações. Devem perfazer, pelo menos, 10% da rede em climas frios. Em regiões onde há ocorrência de chuvas intensas é aconselhável que esse percentual seja ainda maior. Devem ser preferencialmente instalados em zonas urbanas (com população superior a 10.000 habitante) com extensos sistemas de drenagem e em bacias hidrográficas que possuam sistemas de controle do rio, por exemplo.
- C) Pluviômetros totalizadores: configuram uma opção para regiões pouco habitadas, onde não há disponibilidade de observadores, ou de difícil acesso, como áreas desérticas ou montanhosas. Permitem leituras mensais, sazonais ou casuais.

## **2.4 Sensoriamento remoto por satélite**

O sensoriamento remoto pode ser visto como um método de aquisição de informações de determinada região dividido em dois subsistemas, conforme escrito em Novo (2010). O primeiro subsistema trata da aquisição de dados por sensoriamento remoto e conta com componentes como fonte de radiação, plataforma, sensor e centro de dados. Posteriormente, entra em ação o sistema de produção de informação que atua na calibração e no processamento de dados e imagens.

Previsões de tempo, estudos de fenômenos oceânicos, detecção e monitoramento de desastres naturais, queimadas, desmatamento, estimativas de safras agrícolas e estimativas de precipitação pluviométrica são algumas das aplicações dos produtos de sensoriamento remoto em nível orbital (Florenzano, 2007).

Os atuais dados obtidos por sensoriamento remoto são provenientes, principalmente, de satélites, ou seja, sensores acoplados em plataformas orbitais. Estes sensores, por sua vez, são classificados em função de sua operação passiva ou ativa. A passiva remete a aparelhos que necessitam de alguma fonte de radiação externa, como a luz solar, enquanto a segunda classe refere-se equipamentos com capacidade de gerar radiação própria, propiciando a obtenção de

dados nos períodos noturnos e diurnos, como são os casos de radares, por exemplo (Blaschke e Kux, 2007).

Há uma segregação desses sistemas em relação às órbitas em que os mesmos atuam. O tipo de órbita tem relação íntima com a inclinação do satélite e com o tempo de uma volta completa em relação à Terra, sendo que essas características estão ligadas à altitude de operação da plataforma. Existem dois tipos básicos de órbitas, as polares e as geoestacionárias (Figura 2).

As órbitas polares tem inclinação de  $90^\circ$  giram em torno do globo no sentido norte-sul, podendo também serem heliossíncronas ou não-heliossíncronas, possibilitam a passagem do satélite sobre todo planeta Terra. Os satélites heliossíncronos passam pela mesma latitude sempre ao mesmo horário do dia, pois a órbita é deslocada dos  $90^\circ$  de modo que fique oblíqua em relação ao globo, contudo, possui as mesmas características dos satélites de órbitas polares. Por outro lado, as órbitas geoestacionárias, atuam com inclinação de  $0^\circ$ , ou seja, coincidem com a linha do Equador, e são assim chamadas pois o satélite se encontra sempre na mesma posição em relação a Terra, permitindo aos sensores registrarem sempre a mesma superfície. É também conhecida como geossíncrona quando a sua altitude de operação é próxima de 36 mil quilômetros, permitindo ao satélite efetuar uma volta na Terra a cada 24 horas (mesma velocidade angular de rotação da Terra) (Florenzano, 2011).

De acordo com Meneses e Almeida (2012), atualmente há uma razoável constelação de satélites capazes de gerar produtos distintos entre si, de forma a atender às demandas de diferentes usuários. Assim, como o leque de opções de imagens é grande, devem ser avaliadas as resoluções que os produtos de satélites apresentam, para que sejam selecionados os mais adequados de acordo com a finalidade do trabalho ou estudo a ser desenvolvido.

A resolução espacial, que define a área mínima imageada pelo sensor, dependente da altura e do ângulo de visada instantânea do sensor, deve ser avaliada no momento de definir a escala do trabalho, pois está relacionada com a capacidade de distinguir objetos na cena. Por exemplo sensores com resolução espacial próximas a 30 metros são destinados ao monitoramento ambiental como uso agrícola das terras, cobertura vegetal, queimadas, secas e inundações, por exemplo. Entretanto, para estudos em áreas urbanas, onde se requer maior nível de detalhamento, deve-se optar pelo uso de imagens de alta resolução ( $< 5$  metros).

A resolução temporal também tem um papel importante no acompanhamento de mudanças que ocorrem na terra, como ciclo de culturas, desmatamentos e desastres ambientais, pois refere-se à frequência que o sensor visita determinada área, ou seja, a periodicidade da revisita. A resolução radiométrica refere-se a quantidade de níveis de cinza que o sensor é capaz

de detectar e é expressa em números de dígitos binários (bits), sendo que quanto maior for esta resolução, maior será a capacidade do sensor em medir as diferenças de intensidade dos níveis de radiância.

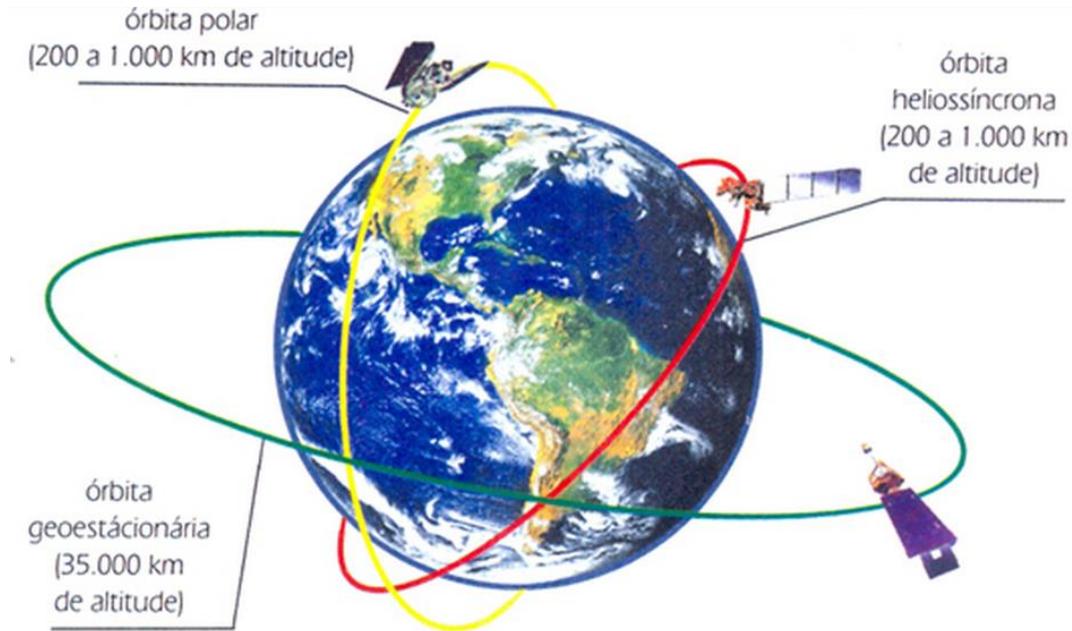


Figura 2 – Tipos de órbitas artificiais

Fonte: Florenzano (2007).

Finalmente, considerada uma das propriedades mais importantes dos sensores, está a resolução espectral, que envolve o número de bandas que o sensor possui, a largura em comprimento de onda das bandas e as posições que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético. Numa análise comparativa, um sensor com alta resolução espectral apresenta maior número de bandas, com pequenas larguras em comprimentos de ondas, distribuídas em diferentes regiões do espectro. Essa propriedade é útil na diferenciação de materiais como rochas ou sedimentos. Geralmente sensores de alta resolução espacial possuem poucas bandas espectrais, para compensar a grande quantidade de dados. Por outro lado, um sensor com baixa resolução espacial é compensado por trabalhar com um grande número de bandas espectrais (MENESES E ALMEIDA, 2012).

## 2.5 Estimativas de precipitação pluviométrica por satélite

Como mencionado anteriormente, a capacidade de gerar estimativas de precipitação pluviométrica é um dos produtos do sensoriamento remoto por satélites com grande aplicação na área hidrológica. Nóbrega et al (2008a), Viana (2009), Rozante et al. (2010), As-Syakur et al (2011), Buarque et al. (2011), Silva et al. (2012), Pereira et al. (2013), Zulkafli et al. (2014), Liu et al. (2015), Prakash et al. (2015a), compararam estimativas de satélites com dados observados de precipitação pluviométrica, no sentido de validar os produtos gerados pelos equipamentos.

Os processos metodológicos para geração de produtos de estimativa de chuva por satélite foram inicialmente empregados na década de sessenta mediante o lançamento do satélite meteorológico TIROS I (em inglês, *Television and InfraRed Observation Satellite*) no dia 1º de abril de 1960, capaz de fornecer as primeiras imagens de topos de nuvem utilizando-se de sensores infravermelhos. Em apenas 79 dias de vida, o satélite obteve milhares de imagens e mostrou a utilidade de equipamentos orbitais nos estudos do planeta. Posteriormente, mais de 30 versões do TIROS foram lançadas pelos Estados Unidos, sendo a última em 2009 (LUTGENS E TARBUCK, 2012).

As medidas de radiação infravermelha podem ser convertidas em temperatura dos alvos, conhecida como temperatura de brilho. No caso das nuvens, essa conversão representa a temperatura do topo das mesmas. Baixas temperaturas de topo de nuvem estão associadas às grandes probabilidades de ocorrência de precipitação, pois indicam um maior desenvolvimento vertical (MAIDMENT, 1993)

A radiação pertencente à faixa do infravermelho corresponde às ondas longas emitidas pelas superfícies oceânicas, terrestres e nuvens, sendo que uma das grandes vantagens de se trabalhar com o infravermelho é a possibilidade dos sensores gerarem imagens durante a noite em função da faixa espectral conhecida como infravermelho termal. Também eram feitas estimativas de precipitação a partir de radiação eletromagnética na faixa espectral visível ao olho humano. Essa faixa eletromagnética permite identificar tipos de nuvens, sendo que a refletividade dessas está associada a sua espessura. Entretanto, os produtos gerados são disponíveis apenas durante o período diurno, haja vista a necessidade da presença de luz solar para obtenção de dados (MENESES E ALMEIDA, 2012).

Algumas vantagens de se trabalhar com as bandas do visível e infravermelho é a alta resolução espacial e temporal que as mesmas oferecem quando associadas a plataformas com órbitas geoestacionárias. Em contrapartida, pode-se citar como desvantagem a relação indireta entre a taxa de precipitação da superfície com o brilho de topo de nuvens permitindo que estes produtos sejam utilizáveis apenas em grandes escalas temporais e/ou espaciais. Posteriormente, com o emprego das metodologias com micro-ondas (MW) foi possível estimar taxas de precipitação pluviométrica mais confiáveis quando comparadas às originárias de métodos com infravermelho e visível em consequência da habilidade que esta ondas eletromagnéticas tem de interagir com partículas presentes dentro e abaixo das nuvens (PETTY e KRAJEWSKI, 1996).

A difusão do uso das estimativas vem ocorrendo devido à melhora que as resoluções espaciais e temporais demonstram ao longo dos anos, além de que esses produtos tem sido vistos como uma alternativa frente às imprecisões embutidas no monitoramento convencional, bem como à escassez desses dados. Dessa forma, são grandes os investimentos em novos programas e missões espaciais por parte das agências internacionais.

Recentemente, em 27 de fevereiro de 2014, foi lançada a rede internacional de satélites chamada *Global Precipitation Measurement (GPM)*, cujo intuito é proporcionar uma nova geração de observações globais de chuva e neve. Trata-se de um núcleo com o propósito de definir uma referência padrão para unificar estimativas de precipitações provenientes de uma constelação de satélites. Iniciado pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e a *Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)*, o GPM compreende um grupo de agências espaciais, incluindo a *Centre National d'Études Spatiales (CNES)* da França, a *Indian Space Research Organization (ISRO)*, a *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, a *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)*, and others (HOU et al, 2014).

HOU et al. (2014) também mencionam que o GPM estenderá alcance de medições até precipitações com intensidade menores que 0,5 mm/h. Isso porque contará com um pacote de sensores que inclui um radar de precipitação de dupla frequência e um equipamento micro-ondas multicanais. As medidas desses equipamentos, por sua vez, vão permitir refinar algoritmos por meio da construção de um único banco de dados capaz de possibilitar a quantificação de propriedades microfísicas das partículas atmosféricas. Dessa forma, o GPM pretende auxiliar na compreensão do ciclo hidrológico global e das mudanças climáticas, bem como melhorar a previsão de eventos extremos, dentre outros benefícios para sociedade.

## 2.6 Principais produtos de precipitação por satélite

Há diversos produtos de precipitação estimada a partir de satélites, sendo que a seguir são citados os principais. O sistema automatizado PERSIANN (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks*) para estimativas de precipitações por meio de dados infravermelhos gera produtos de  $0,25^\circ$  de latitude por  $0,25^\circ$  de longitude, com resolução temporal de 3 horas. Sendo que cobre o globo entre  $50^\circ$  Norte e  $50^\circ$  Sul, com dados disponíveis desde março de 2000 até a presente data. Para geração dos produtos, o método conta com o suporte das estimativas micro-ondas 2A12 do TRMM (SOROOSHIAN et al., 2000).

Com a finalidade de melhor compreender os padrões temporais e espaciais da precipitação pluviométrica global, foi criado o GPCP (*Global Project Climatology Project*) (ADLER et al., 2003). Nele são assimilados dados de mais de 6.000 estações, além de informações de satélites geoestacionários infravermelhos de baixa órbita e sensores micro-ondas para gerar estimativas mensais de chuva com  $2,5^\circ$  de resolução espacial desde 1979. A combinação de informações se encontra na segunda versão, agregando informações de 27 produtos. Além dessa segunda versão, o programa conta com os produtos Pentad, que geram informações de precipitação de todo globo em intervalos de 5 dias e os produtos 1DD com resolução espacial de  $1^\circ$  e resolução temporal diária (disponível apenas para o período posterior a 1996).

O CMORPH (*Climate Prediction Center morphing method*) é capaz de gerar estimativas de precipitação global ( $60^\circ$  N –  $60^\circ$  S) com resolução temporal de 30 minutos, configurando uma fonte alternativa com dados desde 3 de dezembro de 2002. A grade disponível com espaçamento de 8 km é obtida via interpolação de estimativas espaçadas na faixa de 12 km a 15 km. Além dos dados de 30 minutos, também são disponibilizadas estimativas a cada 3 horas ou diárias com espaçamento de  $0,25^\circ$ , aproximadamente 25 km. A disponibilidade dos dados se dá em torno de 18 horas após as leituras de satélite. O método utiliza estimativas de precipitação pluviométrica derivadas exclusivamente de sensores micro-ondas passivos de baixa órbita. O CMORPH, então, consiste numa metodologia de combinação de algoritmos estimadores de precipitação pluviométrica, sendo que uma de suas vantagens é a possibilidade de incorporar ao método qualquer estimativa de precipitação oriunda de micro-ondas. Nesse contexto, dados infravermelhos são empregados para analisar a propagação das estimativas micro-ondas (JOYCE et al., 2004).

Fazendo o uso de dados dos satélites GOES e METEOSAT obtidos a cada 30 minutos, o Modelo Hidroestimador do CPTEC gera estimativas de precipitação pluviométrica com células de 4 km x 4 km que cobrem toda a América Latina. Da mesma forma, o produtos *STAR (Satellite Rainfall Estimates)* consistem em estimativas em tempo real fazendo uso de dados infravermelhos dos satélites GOES desde 2002, cobrindo áreas entre 65° Norte e 65° Sul com resolução temporal de 3 horas, além de também fornecerem estimativas com 6 e 24 horas acumuladas, as quais são validadas com dados observados.

Incluídos nesse leque estão os produtos TMPA, em inglês *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multisatellite Precipitation Analysis*, descritos de maneira mais detalhada em breve. Dentre os satélites que compõem os produtos do TMPA, se destaca o TRMM (melhor descrito a seguir) como principal satélite por ter sido o pioneiro no programa TMPA. No presente trabalho, quando os produtos forem denominados como estimativas TRMM ou produtos TRMM, o autor estará referindo-se aos produtos ou estimativas TMPA. Contudo é importante que fique claro que os produtos TMPA não são derivados apenas de um satélite.

## 2.7 Satélite TRMM

Resultante de uma missão conjunta entre as agências espaciais NASA e JAXA, o satélite TRMM foi lançado em 27 de novembro de 1997 com a pretensão de monitorar precipitações pluviométricas nos trópicos a partir da sua relação com o calor latente e possibilitar estudos acerca do assunto (KUMERROW et al., 2000).

Inicialmente o satélite operava em órbita não-heliossíncrona com inclinação de 35° em relação ao equador, altitude de 350 km (passando para 403 km durante 2001) e período de translação é de aproximadamente 91 minutos, circundando o globo cerca de 16 vezes por dia e propiciando alta resolução espacial e temporal. O satélite operou até 30 de outubro de 2014, quando chegou ao fim de sua missão, devido à falta de combustível.

A bordo do TRMM existem diferentes instrumentos denominados sensores, capazes de atuar em diferentes faixas do espectro eletromagnético, são eles: *TRMM Microwave Imager (TMI)*, *Precipitation Radar (PR)*, *Visible and InfraRed Scanner (VIRS)*, *Lightning Imaging Sensor (LIS)* e *Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES)*, sendo que este último falhou oito meses após o lançamento do satélite e não é descrito neste trabalho (HUFFMAN et al., 2007). A Figura 3 ilustra como ocorre a operação desses sensores.

O TMI é um instrumento de micro-ondas passivo, sendo o principal sensor do satélite e capaz de efetuar medições de precipitação sobre uma ampla área sob o satélite. O sensor é capaz de analisar quantitativamente o vapor da água, a água das nuvens e a intensidade da precipitação pluviométrica (PASSOW, 2010). O sensor TMI trabalha com imagens com um ângulo de incidência na superfície da Terra de 53°, medindo a intensidade de radiação em cinco frequências (10.7, 19.3, 21.3, 30.7 e 85.5 GHz), sendo que a principal diferença entre ele e o seu antecessor, o SSM/I (abordo do *U. S. Defense Meteorological Satellite Program*), é o par de canais de 10.7 GHz com polarizações verticais e horizontais, que fornece respostas mais lineares frente a altas taxas de precipitação, comuns em regiões tropicais (HUFFMAN et al., 2007).

Considerado o primeiro radar projetado especificamente para monitoramento de precipitação, o PR é capaz de fornecer mapas tridimensionais da estrutura de uma tempestade de alta qualidade em termos de distribuição vertical tanto sobre a terra, quanto sobre os oceanos. O PR foi desenvolvido pela JAXA juntamente com o *Japanese National Institute of Information and Communication Technology* (NICT) e, diferentemente do TMI, é um sensor ativo, uma vez que emite radiação em micro-ondas e mede a intensidade do sinal refletido por alvos presentes na atmosfera. Tal sensor foi arquitetado visando gerar informações a respeito da intensidade, distribuição, altura pluviométrica e tipos de chuva (convectiva ou estratiforme) (KUMERROW et al., 2000; TRMM, 2007; PASSOW, 2010).

Os produtos TRMM são composições dos dados coletados por esses diferentes sensores, ou seja, são originados das diferentes combinações que se pode fazer com as informações de cada equipamento a bordo do TRMM. O Quadro 1 cita os produtos resultantes que cada um dos sensores fornece. Todavia, é importante ressaltar que os dados referentes à intensidade de precipitação pluviométrica são gerados a partir de variadas fontes, inclusive sensores de outros satélites, sendo então conhecidos como produtos TMPA.

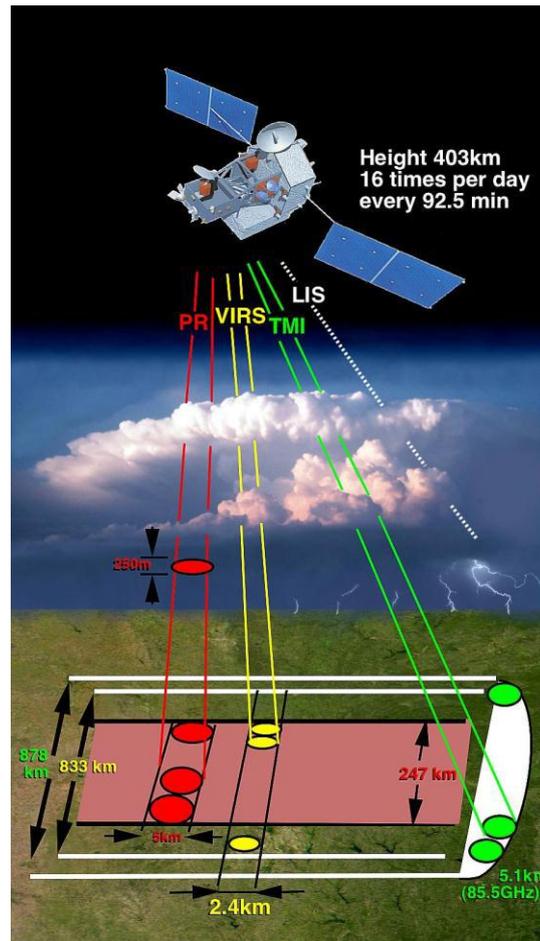


Figura 3 – Instrumentos sensores a bordo do TRMM.

Fonte: NASA (2013) - <http://pmm.nasa.gov/image-gallery/diagram-trmm-instruments-measurement-path>.

O VIRS é um radiômetro que mede o brilho da cena em cinco diferentes bandas espectrais, variando do visível ao infravermelho, sendo útil pela capacidade identificar nuvens com alta probabilidade de precipitar. O sensor trabalha com feixe de 2,4 km e aproximadamente uma zona de cobertura de 247 km. Por fim, o aparelho LIS consiste em um instrumento muito básico. Se um relâmpago ocorre dentro do período de amostra, então a localização, intensidade e tempo do evento é registrado (HUFFMAN et al., 2007).

Sensor	Nível de processamento	Produto	Unidade de Cena	Volume estimado dos dados (comprimidos)
PR	1B21	Energia recebida calibrada	Uma órbita (16/dia)	149 MB (60~70 MB)
	1C21	Refletividade do radar	Uma órbita (16/dia)	149 MB (40~50 MB)
	2A21	Corte transversal normalizado na superfície de radar	Uma órbita (16/dia)	10 MB (6~7 MB)
	2A23	Qualidade da precipitação por radar	Uma órbita (16/dia)	13 MB (6~7 MB)
	2A25	Perfil da precipitação	Uma órbita (16/dia)	241 MB (13~17 MB)
	3A25	Estatísticas mensais de parâmetros da precipitação	Mapa Global (mensal) (Grade: 5° x 5°, 0,5° x 0,5°)	40 MB (26~27 MB)
	3A26	Taxa de precipitação mensal usando método estatístico	Mapa Global (mensal) (Grade: 5° x 5°)	9,3 MB (5~6 MB)
TMI	1B11	Temperatura de brilho	Uma órbita (16/dia)	14 MB (14 MB)
	2A12	Perfil da precipitação	Uma órbita (16/dia)	97 MB (6,7~9 MB)
	3A11	Precipitação mensal oceânica	Mapa Global (mensal) (Grade: 5° x 5°)	53 KB (44 KB)
VIRS	1B01	Radiância	Uma órbita (16/dia)	92 MB (90 MB)
COMB	2B31	Perfil da precipitação	Uma órbita (16/dia)	151 MB (8 MB)
	3B31	Precipitação mensal	Mapa Global (mensal) (Grade: 5° x 5°)	442 KB (380~410 KB)
	3B42	TRMM e infravermelho, precipitação diária	Mapa Global (diário) (Grade: 1° x 1°)	242 KB (110~115 KB)
	3B43	TRMM e outras fontes, precipitação mensal	Mapa Global (mensal) (Grade: 1° x 1°)	242 KB (242 KB)

Quadro 1 – Produtos TRMM.

Fonte: Adaptado NASDA (2001).

## 2.8 Produtos TMPA

O TMPA foi projetado para combinar estimativas de precipitação de diversos satélites por meio de uma série de algoritmos. Quando possível também são combinadas precipitações observadas em solo, a fim de gerar melhores estimativas.

O TMPA depende de informações de dois tipos de sensores como entrada, os micro-ondas e os infravermelhos. As estimativas de precipitação obtidas por meio de micro-ondas são coletadas por sensores de diversos satélites de órbita baixa, como: TMI do TRMM, *Special Sensor Microwave/Imager* (SSM/I) e *Special Sensor Microwave Imager/Sounder* (SSMIS) dos satélites do *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP), o sensor *Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System* (AMSR-E) do satélite Aqua, o *Advanced Microwave Sounding Unit* (AMSU) da série de satélites da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e o *Microwave Humidity Sounders* dos satélites NOAA e do satélite da *Meteorological Operational Satellite Programme* (MetOp).

Cada um desses satélites tem conexão física direta com perfis hidrometeorológicos sobre a superfície terrestre, entretanto cada um fornece informações únicas a respeito da ocorrência de precipitações em determinado tempo e espaço. Em 1998, no início do TMPA, considerando a resolução temporal de 3 horas, a cobertura média por micro-ondas era gerada por três satélites perfazendo a varredura de aproximadamente 40% da superfície Terra entre 50° N-S. Atualmente essa cobertura chega aos 80% devido ao acréscimo do número de equipamentos orbitais.

Antes de serem incluídos na combinação dos produtos TMPA, cada pixel de micro-ondas do TMI, AMSR-E, SSM/I e SSMIS é convertido em estimativa de precipitação pluviométrica pelas suas versões do algoritmo de perfis Goddaa (*Goddard Profiling Algorithm* – GROF). E cada pixel correspondendo aos sensores micro-ondas AMSU-B e MHS são convertidos em estimativas de precipitação pelo *National Environmental Satellite Data and Information Service* (NESDIS) usando versões operacionais de algoritmos.

Os dados de infravermelho representam a segunda maior fonte de informações para o TMPA. Embora forneçam uma resolução espaço-temporal melhor quando comparados aos dados micro-ondas, as estimativas de precipitação por infravermelho trazem uma limitação, haja vista que a temperatura de brilho representa a temperatura de topo da nuvem e, de maneira implícita, a altura de topo da nuvem (HUFFMAN et al., 2007).

De maneira geral, os produtos TMPA são gerados pela inter-calibração e combinação entre estimativas de precipitação por micro-ondas. Após, as estimativas por infravermelho são criadas utilizando a precipitação por micro-ondas calibradas. Assim, as estimativas oriundas de infravermelho e micro-ondas são integradas e, por fim, relacionadas informações de dados observados em pluviômetros e pluviógrafos oriundos do GPCP e CAMS (*Climate Assessment and Monitoring System*). A Figura 4 visa demonstrar as etapas de processamento que dão origem aos produtos TMPA.

O algoritmo 3B43 refere-se a estimativas mensais com resolução espacial de  $0,25^\circ$  de latitude por  $0,25^\circ$  (aproximadamente  $625 \text{ km}^2$ ) de longitude cobrindo uma faixa do globo entre  $50^\circ$  Norte a  $50^\circ$  Sul, pois em latitudes maiores os sensores de micro-ondas e infravermelho tendem sofrerem distorções.

Os produtos 3B42 possuem a mesma resolução espacial e abrangem a mesma faixa do globo que os 3B43. Entretanto a resolução temporal é definida em 3 horas, permitindo completar o ciclo diário. Estes produtos são gerados em duas condições, sendo que a primeira é gerada de 6 a 9 horas após a observação, denominada *real-time* (RT), e a segunda 10 a 15 dias após o final de cada mês, chamada de produto de pesquisa/qualidade depois do tempo real (em inglês *post-real-time research-quality product*). O produto 3B42 RT não leva em conta os dados de precipitação pluviométrica coletados em solo (do GPCP), além disso, há algumas simplificações no seu processamento, para que possa ser gerado e disponibilizado mais rapidamente. Esta última etapa inclui dados adicionais, dentre eles a precipitação mensal observada. Os dados RT estão disponíveis gratuitamente desde fevereiro de 2002, enquanto os produtos pós tempo real tiveram início em janeiro de 1998 (HUFFMAN et al., 2007). Os três produtos mencionados estão disponíveis até 30 de outubro de 2014, quando o TRMM parou de funcionar.

Em 30 de junho de 2011, o algoritmo da versão 6 (V6) parou de gerar saídas para os dados, obrigando a implementação da versão 7 (V7) a partir de maio de 2012. A nova versão foi então utilizada para todo o período de dados (desde 1998) uma vez que a V7 representa uma melhoria em relação a V6, conforme descrito em Chen et al. (2013).

O fato dos produtos não serem disponibilizados de forma imediata se dá pela complexidade do algoritmo, bem como a necessidade de diversos dados para que se possa gerar o produto final. Contudo, isso proporciona maiores coberturas do globo. Os valores dos dados TMPA são expressados em altura de lâmina da água por tempo, ou seja, a taxa da precipitação (FENSTERSEIFER, 2013).

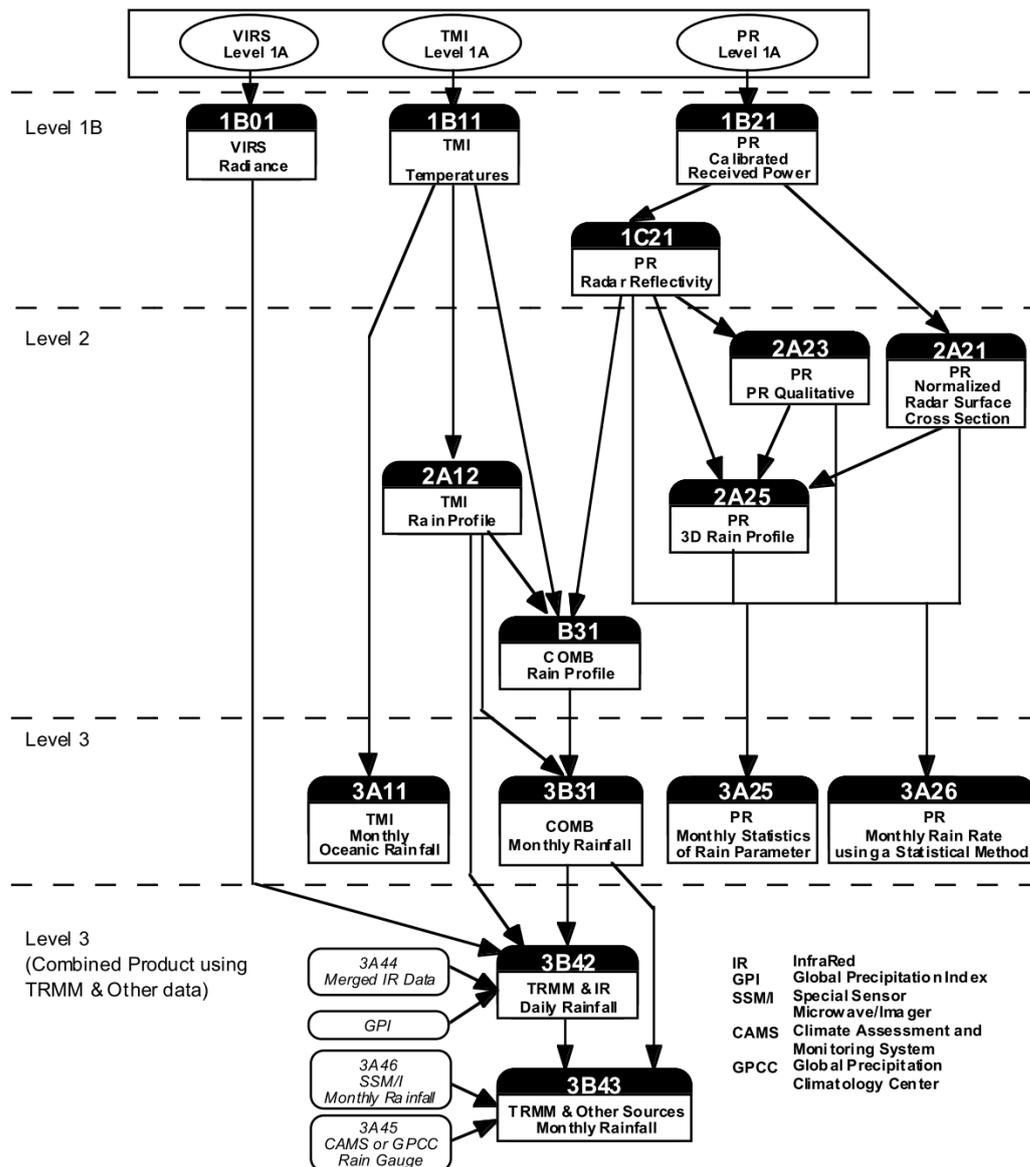


Figura 4 – Diagrama de fluxo de etapas para gerar produtos TMPA.

Fonte: NASDA (2001)

## 2.9 Utilização e avaliação dos produtos TMPA

As estimativas de chuva provenientes de sensoriamento remoto consistem numa fonte com grande potencial de utilização na área hidrológicas tanto no meio científico nacional, como demonstram as pesquisas de Collischonn (2006), Collischonn et al. (2007), Nóbrega et al. (2008b), Gonçalves (2011), Fensterseifer (2013), Pereira et al. (2013) e Jiménez e Collischonn

(2015), quanto no meio internacional, como descrevem Nicholson et al. (2003), Fisher (2004), Su et al. (2008), Rozante et al. (2010), As-Syakur et al. (2011), Prakash et al. (2015a).

No entanto, como a chuva estimada pelo TRMM corresponde à chuva média num determinado pixel, no caso específico do produto 3B42 são médias das precipitações ocorridas em cada pixel ( $0,25^\circ$  de latitude por  $0,25^\circ$  de longitude), não há uma metodologia específica para verificar se os dados estimados por satélite são satisfatórios. Desta forma, na literatura são propostas diversas metodologias para comparar dados obtidos por sensoriamento remoto e dados de estações (Quadro 2).

No trabalho apresentado por Yu et al. (2009), foram comparados os produtos 3B42 V6 com dados monitorados na China. Na metodologia da pesquisa, os autores analisaram séries de precipitação pluviométrica de acumulados de 6 horas e 24 horas, sendo que foram calculados alguns índices de desempenho (*ETS*, *hits* e *TS*), além de coeficiente de correlação de correlação, bias e erro médio quadrático. O coeficiente de correlação e o *ETS* são mais baixos para análise de acumulados de 6 horas do que de 24 horas, permitindo aos autores concluírem que os acumulados de 24 horas são mais confiáveis. Os autores também analisaram algumas estatísticas considerando o evento de chuva entre 0 e 1 mm, e posteriormente foram considerados eventos de chuva apenas as colunas de água maiores, como entre 1 e 10 mm, ou entre 10 e 25 mm, e assim sucessivamente. Logo, a medida que foram considerados intervalos de precipitação maiores, os resultados distanciaram mais do valor

Liu et al. (2015) avaliaram três produtos de estimativas de precipitação oriundas de satélites (TRMM 3B42 V7, CMORPH e PERSIANN) em uma bacia hidrográfica subtropical na China, sendo que as foram consideradas escalas diárias, mensais e anuais. As estimativas foram comparadas com dados de 52 estações em séries de 6 anos. A partir dos pontos geográficos das estações, foi interpolada uma grade com uma grade com resolução de  $0,25^\circ$  e então comparados com os pixels dos satélites. Se tratando das séries diárias, o produto proveniente do CMORPH apresentou melhor desempenho em função dos resultados de  $R^2$  e erro médio quadrático, seguido dos produtos 3B42. Em termos de análise mensal, os produtos 3B42 apresentaram os mais altos valores de  $R^2$ . Na escala anual, o TRMM apresentou a melhor performance, em função do menor valores de erro médio quadrático e os mais altos  $R^2$ , em comparação aos desempenhos dos produtos dos outros satélites.

Metodologia	Resumo	Vantagem	Desvantagem
Pixel a ponto	Tanto os dados de monitoramento quanto as estimativas de satélite não são processados previamente. A comparação é realizada entre a série monitorada e a série estimada do pixel em que a estação se encontra. É verificado qual centro de pixel está mais próximo do ponto geográfico da estação pluviométrica.	Não há necessidade de processar nenhuma informação antes de comparar os dados monitorados com as estimativas de satélite. As estimativas de satélite são mantidas e consideradas como valor referente a área do pixel. Este tipo de verificação procura reproduzir o caso em que faltando alguma informação em algum local, um técnico decide completar a informação obtendo os dados diretamente da internet como se fosse o pixel estimado fosse um posto virtual.	A comparação é realizada entre a série estimada referente a área do pixel (média de 625 km <sup>2</sup> ) e a série observada pontualmente na estação pluviométrica.
	Exemplos: Buarque et al (2011) nas bacias hidrográficas do rio Amazonas e Tocantins; Camparotto et al. (2013) em São Paulo; Fenterseifer (2013) na bacia hidrográfica do Alto Jacuí, RS; Chen et al. (2013) no Estados Unidos; Kenawy et al. (2015) na Península Ibérica; Almeida et al. 2015, no estado do Amazonas; Cai et al. (2015) com média dos postos no pixel, e Liu et al. (2015) em bacias hidrográficas na China; Satgé et al. (2016) nos Altiplanos Andinos.		
Ponto a ponto	As estimativas de satélite são interpoladas para o ponto geográfico da estação pluviométrica	Os dados oriundos de monitoramento são mantidos sem processamento. Permite a análise da qualidade das estimativas em pontos específicos.	As estimativas de satélite são processadas gerando séries interpoladas para as localizações das estações pluviométricas. Os dados de satélite são considerados como estimativas pontuais.
	Exemplos: Yu et al. (2009) na China; Soares (2014) no estado da Paraíba; Pombo e Oliveira (2015) em Angola.		
Comparação espacial (pixel a pixel)	Os dados de monitoramento são interpolados para grades com tamanho idêntico ao das estimativas de satélites, apresentando valores médios sobre a área do pixel.	As estimativas de satélite são mantidas e consideradas como valor referente a área do pixel.	Os dados de referência não são mais os monitorados e sim séries artificiais provenientes do processamento de interpolação dos dados pluviométricos.
	Exemplo: Stampoulis e Anagnostou (2012) no continente Europeu; Pereira et al. (2013) e Melo et al. (2015) em todo Brasil; Ringard et al. (2015) na região dos escudos das Guianas; Nastos et al. (2015) na Grécia; Pombo e Oliveira (2015) na Angola; Prakash et al. (2015b) na Índia.		

Comparação por Sub-pixels	É semelhante a Comparação pixel a pixel, contudo, os dados observados são interpolados para pixels menores do que os pixels das estimativas de satélite. Assim, cada pixel estimado é comparado com a média dos pixels contidos dentro dele.	A variabilidade espacial da precipitação tem maior atuação do que na comparação pixel a pixel em função da maior resolução espacial dos sub-pixels observados.	A interpolação em sub-pixels gera um volume de dados maiores, podendo tornar lento o processamento desses dados, demandando mais tempo para obtenção de resultados. Bem como a geração de séries artificiais a partir dos dados monitorados
	Exemplos: Collischonn et al. (2007) associado a interpolação da grade do satélite para pixels menores na bacia do Paraguai Superior; Viana (2009) na região Sul do Brasil.		
Análise agregada	Comparação de dados agregados. Os dados de determinadas região grande abrangência, como uma bacia hidrográfica, são agregados. Tanto as estimativas quanto os dados de monitoramento são acumulados ao longo da área em questão.	A comparação entre séries agregadas em grandes regiões acaba promovendo a compensação de erros ao longo do tempo e do espaço.	Há necessidade de interpolar os dados observados antes de compará-los com os dados estimados por satélite. Informações referentes à variabilidade espacial dentro da área de análise da chuva são omitidas.
	Exemplos: Nóbrega et al. (2008b) na sub-bacia da Amazônia Ocidental; Pinto et al. (2009) na América do Sul; Soares (2014) no estado da Paraíba.		

Quadro 2. Métodos de comparação entre estimativas de satélite e dados de monitoramento.

Em outro estudo desenvolvido na China por Cai et al. (2015), mais precisamente na bacia de Hun-Tai, foram comparados os produtos 3B42 V7 com dados monitorados de 112 estações meteorológicas distribuídas homogeneamente na área de estudo, sendo que a densidade é de aproximadamente 226,46 km<sup>2</sup>/estação. O estudo considerou o período de análise entre 1998 e 2006 e envolveu análises em escala diária, mensal e anual. A verificação das estimativas de precipitação pluviométrica se deram por meio índices de desempenho (como probabilidade de detecção de eventos e probabilidade de falsa detecção, apenas para séries diárias) e estatísticas como erro médio quadrático, erro médio absoluto, erro médio e coeficiente de correlação. Os valores obtidos a partir das análises das três escalas temporais, indicou que os resultados foram melhores a medida que foram acumulados os dados em meses e anos. Os autores também consideram que os produtos 3B42 V7 superestimaram os dados monitorados, com valor constante nas três escalas temporais estudadas.

Outro estudo recente, onde avaliaram-se os produtos 3B42 e 3B42 RT (de 2001 a 2013), ambos da versão 7, é apresentado em Prakash et al. (2015a). Em suma, os autores analisaram a

performance dos produtos na Índia em diferentes estações (em escala diária): pré-moção (março a maio), monção (junho a setembro) e pós-moção (outubro a dezembro). Para a realização do estudo foram utilizados dados interpolados de precipitação pluviométrica provenientes de aproximadamente 7.000 estações em uma grade equivalente a do TRMM. Já metodologia de comparação se baseou em números de dias com chuva, erro médio quadrático, erro sistemático e erro aleatório. Assim como observado em trabalhos anteriores, de maneira geral os produtos 3B42 RT, quando comparados aos dados de referência, apresentaram menor desempenho em relação aos 3B42, isto se dá, possivelmente, em decorrência das diferenças existentes entre os métodos de calibração de ambas as fontes. Contudo, foram observados maiores erros associados a períodos pré-moções nas análises de ambas as fontes de estimativas. Ainda, ambos os produtos superestimaram os valores de referência na maior parte do país, salvo algumas regiões orográficas.

Em Bali, na Indonésia, As-Syakur et al. (2011), dados de precipitação pluviométrica de três estações foram comparados com dados 3B42 V7 agregados em chuvas diárias. As médias diárias, quando comparadas apresentaram um coeficiente de correlação de 0,59. Entretanto somente a comparação dos dados diários com as respectivas estimativas, o coeficiente foi de 0,28. Já os dados mensais 3B43 e 3B42 agregado apresentaram uma correlação bem maior ( $>0,8$ ). Os autores também concluíram que a sazonalidade também foi bem descrita pelos dados TRMM e os dados diários foram bem representados quando convertidos na média diária. Assim, esses dados diários são capazes de estimar a variabilidade da precipitação quando consideradas médias regionais.

Stampoulis e Anagnostou (2012) realizaram um estudo avaliando os produtos 3B42 V6 no Continente Europeu, mais especificamente em duas regiões, sendo uma delas com baixas elevações e outra montanhosa. Os dados observados de 825 estações meteorológicas foram interpolados para uma grade equivalente à das estimativas TRMM, com escala temporal diária. Já o período de análise foi de 2003 a 2010. Os autores trabalharam com duas estações definidas, uma fria (novembro a abril) e outra quente (maio a outubro), sendo que os produtos 3B42 V6 superestimaram os dados observados em ambas as estações, de forma mais significativa sobre a região montanhosa na estação fria. As correlações entre as estimativas e os dados de referência apresentaram diferença dependendo da sazonalidade, quando avaliadas sobre a região montanhosa. Já nas regiões de baixas elevações, as correlações se mantiveram positivas e sem efeitos da sazonalidade.

Kenawy et al. (2015) exploraram o desempenho das estimativas 3B42 V7 na representação da precipitação pluviométrica numa região de terreno complexo na porção

nordeste da Península Ibérica, localizada entre as latitudes 39° 43' N e 43° 29' N e entre as longitudes 5° 01' O e 3° 17' L, o estudo compreendeu o período de 1998 a 2009. Para avaliar a performance das estimativas de satélite, os autores utilizaram dados abrangendo o mesmo período oriundos de 656 estações com distância média entre elas de 5 km, sendo que a metodologia de avaliação se deu pela aplicação de uma grupo de estatísticas (viés relativo, erro médio absoluto, erro médio quadrático, coeficiente de correlação de Spearman) e índices de desempenho (percentual de acertos, falso alarme, índice de sucesso crítico e bias) entre a série histórica de cada estação com a série do pixel em que ela se encontra (*pixel-to-grid*). Em função dos resultados, os autores concluíram que as estimativas 3B42 são capazes de descrever as características sazonais na maior parte da área de estudo observadas nos dados monitorados. Os autores também constataram que as estimativas representam melhor os dados observados em regiões continentais do que em regiões costeiras. Além disso, o estudo sugere que os produtos de satélite analisados tem melhor desempenho em representar eventos moderados de precipitação (de 5 mm a 25 mm por dia). Todavia, quando analisados eventos com menos de 1 mm por dia ou com mais de 50 mm por dia, o desempenho das estimativas 3B42 cai.

Nastos et al. (2015) encontraram valores de coeficiente de correlação linear maiores que 0,90 em períodos de inverno entre as estimativas 3B43 e os dados observados de 96 estações meteorológicas interpolados pelo método krigagem em uma grade de 0,25° de latitude por 0,25° de longitude (equivalente a grade das estimativas 3B43), num trabalho realizados sobre a Grécia com dados de 1998 a 2008.

Dinku et al. (2010) avaliaram os produtos 3B42 e 3B42 RT na Etiópia (com dados observados de 2003 a 2004) e na Colômbia (com dados observados de junho de 2003 a 2005) em áreas com formas de relevo complexas, localizadas entre os trópicos e com dados de qualidade oriundos uma densa rede de estações. A validação dos dados se deu por estatísticas como coeficiente de correlação, viés multiplicativo, frequência do viés e erro médio absoluto. Além disso, foram calculados índices provenientes de uma tabela de contingência, como: probabilidade de detecção, falso alarme, índice de sucesso crítico e Heidke Skill Score. Os autores constataram que na região da Etiópia, os produtos de satélite subestimam a quantidade de chuva (em lâmina de água) e a sua frequência de ocorrência. Os produtos 3B42 apresentaram melhores resultados em comparação com os 3B42 RT em termo de coeficiente de correlação, erro médio absoluto e viés na região de Etiópia, enquanto na região da Colômbia essa melhora de resultados foi representada pela probabilidade de detecção e índice de sucesso crítico. Um ponto interessante na pesquisa foi o índice falso alarme baixo para ambos os produtos na região

da Colômbia, com valores iguais a 0,11, o que indica a baixa ocorrência de estimativas geradas quando não há precipitação observada.

Zulkafli et al. (2014) realizaram um estudo envolvendo as versões 6 e 7 dos produtos 3B42 do TMPA numa área que abrange o norte do Peru e o sudeste do Equador, composta por florestas tropicais úmidas, montanhas tropicais e planícies costeiras. Os dados de satélite corresponderam ao período de 1998 a 2009 e foram agregados em valores diários, mensais, sazonais e anuais. Tais dados foram comparados com séries diárias de 184 estações no Peru e mensais de outras 79 Equador. A metodologia de comparação dos dados empregou a média anual de precipitação, o viés relativo dos dados anuais, o viés absoluto dos dados mensais, além da comparação entre as vazões geradas pelos dados (estimado por modelo).

Em suma, os autores mencionaram que o V7 tem melhor concordância com os dados observados, em comparação com o V6, em função da redução de valores de viés negativos em estações muito chuvosas. Os autores apontam as mudanças no algoritmo que permitem quantificar chuvas intensas como causador dessa melhora. Em relação às comparações de vazões estimadas e observadas, o V7 apresentou melhor desempenho. Da mesma forma, Prakash et al. (2015b) analisaram as duas versões das estimativas 3B42 de 1998 a 2010 em escala diária sobre a Índia, constatando a melhora das estimativas do V7 em relação ao V6.

Ringard et al. (2015) também avaliaram o desempenho das estimativas 3B42 e 3B42 RT, ambas da versão 7, durante o período de 2001 a 2012, na região dos escudos da Guianas, com área de mais de 2 milhões de quilômetros quadrados, mais especificamente entre as latitudes 2° Sul e 6° Norte e as longitudes 45° a 62° Oeste. As estimativas de satélite foram comparadas com dados monitorados (93 estações) interpolados para uma grade de mesmas dimensões do TRMM pelo método de triangulação com interpolação linear. As análises comparativas se deram por estatísticas como coeficiente de correlação, viés, viés relativo, erro médio quadrático, percentual de acertos em dias de chuva e falsos alertas. Os produtos 3B42 apresentaram a melhor correlação (0,40) e menor viés relativo (-23,8%), para dados diários. Todas as estatísticas aplicadas aos dados 3B42 RT resultaram valores ligeiramente piores aos obtidos pela análise dos produtos 3B42.

Num trabalho realizado na região dos Altiplanos Andinos, os dados 59 estações do período de 2005 a 2007 foram comparados com pixels TRMM 3B42 em que cada estação se encontra inserida. Em caso de mais de uma estação no mesmo pixel, a opção adotada foi média aritmética entre os valores das séries das estações contidas dentro do pixel. De modo geral, os resultados mostraram que os produtos derivados de múltiplos satélites tem menor qualidade em pixels situados na região costeira do que em pixels mais distantes da costa. Por exemplo, o

coeficiente de correlação para pixels na costa foi de 0,1 enquanto para os demais pixels 0,7. Da mesma forma se comportam o viés e o erro médio quadrático (SATGÉ et al., 2016).

Pereira et al. (2013) utilizaram estimativas mensais referentes aos produtos de 3B43 V6 do TRMM no período de 1998 a 2011 numa avaliação em nível nacional (Brasil). Para tal, as estimativas foram comparadas com dados observados interpolados por Krigagem para uma grade de  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ . Os dados foram separados em função das macrorregiões brasileiras, sendo que nas cinco o  $R^2$  foi superior a 0,90. O que condiz com os resultados das comparações mensais apresentados por Su et al. (2008) num estudo desenvolvido na bacia hidrográfica do rio da Prata, com dados de 3 horas (3B42 V7) acumulados por mês, onde o  $R^2$  chegou a 0,99 numa estação da bacia do rio Paraná, com erro médio quadrático de 13%. Os valores de  $R^2$  referentes aos dados diários variaram, na maioria dos casos, de 0,7 a 0,8.

No mesmo contexto, com o objetivo de avaliar a qualidade das estimativas 3B42 V6 e V7 no Brasil, Melo et al. (2015) compararam as estimativas de satélite com uma grade, equivalente dos produtos de satélite, proveniente de aproximadamente 3.625 estações, totalizando 11.131 pixels. As análises foram desenvolvidas sob cinco macro regiões brasileiras (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Noroeste e Nordeste). Foram utilizadas séries diárias e mensais de 14 anos (janeiro de 1998 a junho de 2011). Os autores constataram que a qualidade dos produtos 3B42 V6 e V7 dependem da escala temporal em que forem trabalhados, tendo em vista que as estimativas concordaram melhor com os dados observados na escala mensal do que na diária. Além disso, as estimativas representam melhor os dados de monitoramento em estações secas.

Um estudo desenvolvido por Buarque et al. (2011) nas bacias hidrográficas do rio Amazonas (parte brasileira) e do rio Tocantins, comparou estimativas do produto 3B42 (acumulados em precipitação diária) com dados observados em estações no período de 2003 a 2005. Os autores encontraram correlações entre as duas fontes de dados de 0,70 para média de chuva anual, 0,57 para média de dias úmidos, 0,68 para média de dias com precipitação maior ou igual a 2 mm e 0,380 para média considerando o quantil de 95% dos dados.

Ainda em relação aos dados 3B43, numa pesquisa realizada por Almeida et al. (2015), os produtos de satélites foram comparados com dados de sete estações meteorológicas convencionais, sendo comparada a série da estação com a série do pixel mais próximo. O trabalho foi realizado no estado do Amazonas com dados do período de 2004 a 2008. O erro médio quadrático ficou na faixa de 60 mm/mês, coeficiente de correlação linear na casa dos 80% e índice de concordância 0,85. Assim, os autores concluíram que as estimativas 3B43 apresentaram boa similaridade com os dados observados, sendo que os produtos de satélite representaram corretamente a variabilidade sazonal da precipitação.

Outro trabalho na região da bacia hidrográfica do rio Amazonas, também envolvendo os produtos 3B42 com três horas de resolução temporal, é apresentado em Paiva et al. (2011). As estimativas de precipitação corresponderam ao período de 1998 a 2009 e a partir destas foram calculadas a média de chuva anual, a média anual de dias úmidos (com precipitação superior a 2 mm) e média anual de chuva acumulada. Em áreas próximas a grandes rios foram observadas reduções na média anual e na média de dias úmidos, sendo maiores nos períodos da tarde, quando ocorre predominância de chuvas convectivas.

Com o objetivo de avaliar as estimativas mensais fornecidas pelo algoritmo 3B43 V6 para o estado do Rio Grande do Norte, no período de 1998 a 2008, Silva et al. (2012) aplicaram técnicas baseadas estatísticas como correlação linear e em índices provenientes de uma tabela de contingência, como probabilidade de detecção, razão do falso alarme e bias. Os dados de satélite foram comparados com um conjunto de 21 estações, agrupadas em três regiões, com correlações lineares distintas em cada uma: Litoral (0,78), Seridó (0,89) e Oeste (0,93). Também pode-se observar que os produtos 3B43 superestimaram os valores observados em zonais mais secas e subestimaram em áreas mais úmidas. Também foi reconhecido a baixa capacidade que as estimativas têm em representar as precipitações mais intensas, pois os índices da tabela de contingência apresentaram seus piores valores quando aplicados no último quartil dos dados.

Jiménez e Collischonn (2015) apresentaram uma proposta para interpolação de dados de chuva na bacia hidrográfica do rio Tocantins com base em informações pluviométricas diárias e estimativas 3B42 e 3B42 RT, levando em conta o método de interpolação ponderada pela distância, denominado CHUVASAT. Os produtos 3B42 foram empregados na metodologia apenas entre os anos de 1998 a 2000, posteriormente foi utilizado o 3B42 RT (disponível a partir de 200), uma vez que o trabalho abrangeu o período de 1998 a 2006. Assim, os autores constataram que o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) foi melhor para as séries interpoladas pelo CHUVASAT em quase a totalidade das análises e mencionam que os resultados sugerem que produtos de satélite e dados de monitoramento apresentam informações úteis em hidrologia, quando combinados.

Collischonn et al. (2007) avaliaram o produto 3B42 integrados para acumulados diários na bacia do Alto Paraguai até o posto fluviométrico de Descalvados (área de 48.530 km<sup>2</sup>). Os dados TRMM e observados, correspondente ao período de dois anos, foram comparados em uma grade de 0,1° x 0,1°, possibilitando identificar regiões onde os dados tem maior similaridade. Os autores constataram que os dados de satélite estimam os observados de maneira razoável em uma comparação de valores médios diários, principalmente na

representação de estações úmidas e secas. Se tratando dos totais acumulados, o satélite superestima a precipitação total em 8% ao longo dos dois anos. Os valores de coeficiente de correlação variaram de 0,25 a 0,64 e os autores mencionam que essas diferenças não devem ser levadas como definitivas, uma vez que se comparou o TRMM com uma rede pluviométrica esparsa, que pode conter incertezas, logo, deve-se utilizar as estimativas TRMM com cuidado e, de preferência, após realizar estudos da aplicação dessas estimativas na área em questão.

Camparotto et al. (2013) realizaram uma pesquisa no estado de São Paulo em que empregaram os produtos 3B42 do TMPA agrupados em escala mensal para posterior comparação com dados pontuais provenientes de 30 estações, sendo de 2003 a 2010 o período de análise. Os autores apontam que os menores valores de erro médio absoluto nos meses de inverno, possivelmente pela ocorrência de precipitações generalizadas e de baixa intensidade causadas pelas entradas de massas de ar frio.

Júnior et al. (2014) constataram o potencial para preenchimento de falhas que os produtos 3B43 apresentam, principalmente em relação ao auxílio no entendimento da distribuição temporal e espacial da precipitação pluviométrica, num trabalho realizado em Seropédica, Rio de Janeiro, considerando o período de 2000 a 2012.

Viana (2009) utilizou dados mensais observados em postos pluviométricos e estimativas mensais dos produtos 3B43 na área correspondente a Região Sul do Brasil. Os dados de satélite foram validados pela média de três a cinco postos para cada amostra 3B43, bem como pelo método de dupla-massa. A qualidade das estimativas foi analisada por meio do coeficiente de correlação de Pearson (média regional igual a 0,90), da raiz quadrada do erro médio quadrático (média regional igual a 39,5 mm/mês ou 28,0%) e do viés (média regional igual a 12,5 mm/mês ou 9,0%).

Enfim, pode-se considerar grande a quantidade de pesquisas envolvendo esses produtos de satélite e que é viável realizar estudos para áreas distintas, haja vista que os mesmo demonstram bons resultados quando comparados aos dados observados e se comportam de maneira diferente em cada região. Contudo, nota-se que há um leque de métodos utilizados para avaliação da qualidade de estimativas, alguns com foco em análises pontuais, outros em comparações espaciais, alguns fazendo uso de interpoladores e outros mantendo os dados intactos. Logo, deve-se ter a cautela de definir o método dependendo do objetivo da análise.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O estado de Rio Grande do Sul, definido como área de estudo, localiza-se na macrorregião Sul do Brasil, entre as coordenadas 27° e 34° de latitude Sul e 49° 58° de longitude Oeste. Ao norte faz divisa com o estado de Santa Catarina, ao sudeste é limitado pelo Oceano Atlântico, ao noroeste pela Argentina e ao sudoeste pelo Uruguai. O Estado abrange 497 municípios somando 10.693.929 habitantes distribuídos numa superfície de 281.730,22 km<sup>2</sup>, acarretando numa densidade populacional de 37,96 hab/km<sup>2</sup> conforme o Censo de 2010.

De acordo com a classificação climática de Köppen, no RS há predominância do clima Cfa, caracterizado pela umidade em todas as estações e verões quentes. O clima Cfb também é encontrado no Estado, em sua porção norte/nordeste, também úmido em todas as estações, porém com verões moderadamente quentes.

O RS é dividido em três grandes regiões hidrográficas, sendo elas: Região Hidrográfica do Guaíba, Região Hidrográfica do Uruguai e Região Hidrográfica das Bacias Litorâneas. Em menor escala essas três regiões são subdivididas em 25 bacias hidrográficas para fins de gestão. A figura 6 ilustra a distribuição de estações pluviométricas nas bacias hidrográficas, bem como a grade de pontos TRMM utilizados neste trabalho. No total são 290 postos com dados a partir de 1998, sendo 272 da ANA e 18 do INMET. Na mesma figura há um gráfico das médias mensais em cinco regiões do Estado.

De acordo com Reboita et al. (2010), a região Sul do Brasil apresenta precipitação pluviométrica bem distribuída ao longo do ano, além de apresentar totais elevados (entre 1050 mm/ano até 2100 mm/ano). Isto se dá porque o RS está localizado em uma zona de transição de sistemas atmosféricos de origem polar e tropical, logo há presença de massas de ar e frentes que mantêm a precipitação distribuída igualmente durante o ano todo. Entretanto, mesmo que não haja uma estação de seca no RS, muitas vezes ocorrem episódios de estiagens ou precipitações intensas devido a bloqueios atmosféricos. Muitos desses episódios de estiagens também podem estar associados ao fenômeno *La Niña*, enquanto eventos de enchentes podem estar associados ao *El Niño*, conforme descreve Sartori (2003).

Conforme já mencionado, o RS sofreu, ao longo de sua história, com eventos extremos de precipitação pluviométrica (enchentes e estiagens). Os anos de 1940 e 1941 foram de

excessos de chuvas no RS, devido a atuação do *El Niño*, acarretando na histórica enchente de 1941. Em alguns locais do Estado, o volume de chuva entre abril e maio desse ano foi de 1.000 mm. No mesmo ano, o município de Rio Grande, por exemplo, registrou um total anual de 1.828 mm, muito acima da média anual de 1.200 a 1.300 mm. As cidades ficaram intransitáveis, parte das indústrias paralisadas, diversas famílias expulsas de seus lares e impedidas de trabalhar, comunicações interrompidas (TORRES, 2012).

Além disso, há necessidade de conhecer a dinâmica e quantificar chuvas no Estado, haja vista que o mesmo é um grande produtor agropecuário, em principal a produção de soja. Todavia, o rendimento dessa cultura está associado diretamente com a variabilidade das chuvas. Matzenauer et al. (2003) apontam que a deficiência hídrica ocorre frequentemente no período crítico da soja e pode-se esperar redução de rendimento em 9 de cada 20 safras. Entretanto, ainda no contexto agrícola a ocorrência de produções recorde são cada vez mais comuns devido à implementação de tecnologias favoráveis ao aumento da eficiência de produção (FARSUL, 2012).

Uma das características da região Sul é a homogeneidade em termos de precipitação pluviométrica, bem como o clima Mesotérmico do tipo Temperado quase absoluto. A sua posição latitudinal (entre latitudes médias) propicia uma intensa insolação que, aliada a existência de superfícies líquidas como as áreas litorâneas e a concentração de núcleos de condensação, propiciam a evaporação e o acréscimo de chuvas em seu território (Niemer, 1990). Sartori (2003) afirma que a cadeia de tipos de tempo é o que torna o RS ideal em termos de necessidades térmicas e hídricas, bem como insolação para culturas. A figura 6 traz as isoietas anuais médias de 1977 a 2006 do estado do Rio Grande do Sul.

A precipitação pluviométrica na região do RS está relacionada a sistemas frontais (sendo que entre abril a dezembro ocorrem, no mínimo, 4 desses sistemas por mês), ciclones e frentes frias, complexos convectivos de mesoescala, sistemas ciclônicos em nível médio e bloqueios atmosféricos. Há também a ocorrência de sistemas de circulação locais, como brisas (como ocorre na região litorânea em função do deferente aquecimento do oceano em relação ao continente) e a indireta influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (REBOITA et al., 2010).

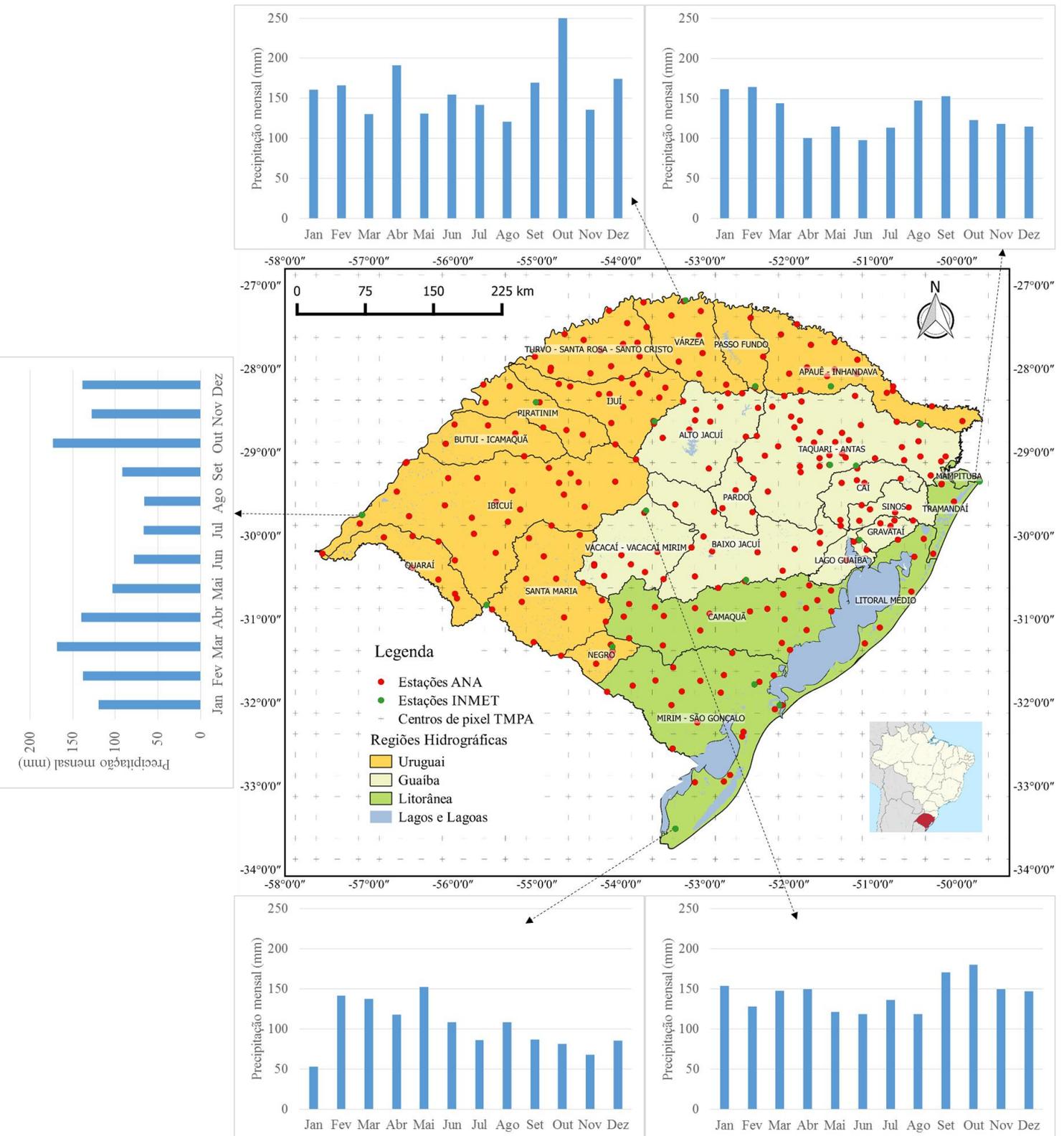


Figura 5 – Médias mensais de precipitação das regiões do RS, localização das bacias hidrográficas, centros de pixels TRMM e estações pluviométricas da ANA e do INMET.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com Wollmann (2014), juntamente com os fortes sistemas atmosféricos que ocorrem no inverno, gerando certa sazonalidade das cheias, o relevo do RS atua na ocorrência de precipitação pluviométrica como o efeito orográfico que o Escudo Uruguaio-Sul-Riograndense e o Planalto da bacia hidrográfica do rio Paraná favorecem. Grimm (2009) comenta que efeitos topográficos são notáveis na região Sul, sendo que a ascensão do ar sobre barreiras topográficas tem relação com precipitações intensas. A Figura 7 traz o relevo do Estado.

Se tratando de massas de ar, responsáveis pela distribuição pluviométrica e térmica na Região Sul, o estado do RS, especificamente, é influenciado por três massas de ar. A Massa Tropical Atlântica (MTA), ocorre principalmente na região Leste e é úmida, quente, além apresentar tendência à estabilidade. Nas regiões Norte e Oeste a Massa Tropical Continental (MTC) predomina. Entretanto, na região Noroeste ocorre um bloqueio da MTC devido à ação da MTA, favorecendo a ocorrência de precipitações contínuas. Na parte Sul do Estado, há grande influência da Massa Polar Atlântica fria (MPA) (BRITTO, 2006; ROSSATO, 2011).

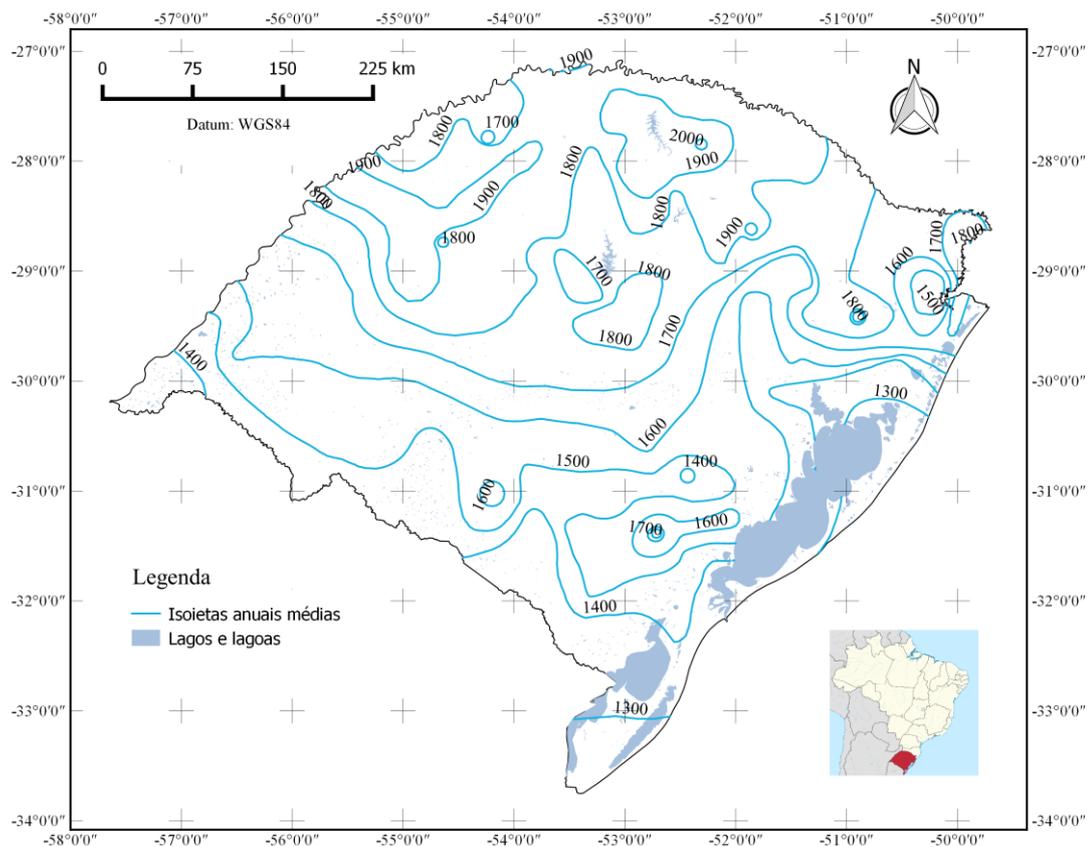


Figura 6 – Isoietas anuais médias de 1977 a 2006.

Fonte: Autoria própria a partir de informações do CPRM (2011)

Alguns fenômenos ocorrem grande escala e geram alterações na ocorrência precipitação pluviométrica no RS. O fenômeno El Niño-Oscilação Sul produz alterações na temperatura superficial das águas marítimas, no vento e na convecção tropical. Durante a ocorrência do fenômeno a temperatura de superfície do oceano Pacífico aumenta gerando maior convecção atmosférica, com exceção de sua porção Oeste que esfria. Assim, a precipitação total anual tende a aumentar na Região Sul do Brasil (zonas próximas a latitude 20° Sul) por mecanismos de teleconexões atmosféricas. Já em anos de La Niña, há redução dos totais de chuva na Região Sul do Brasil (GRIMM, 2009).

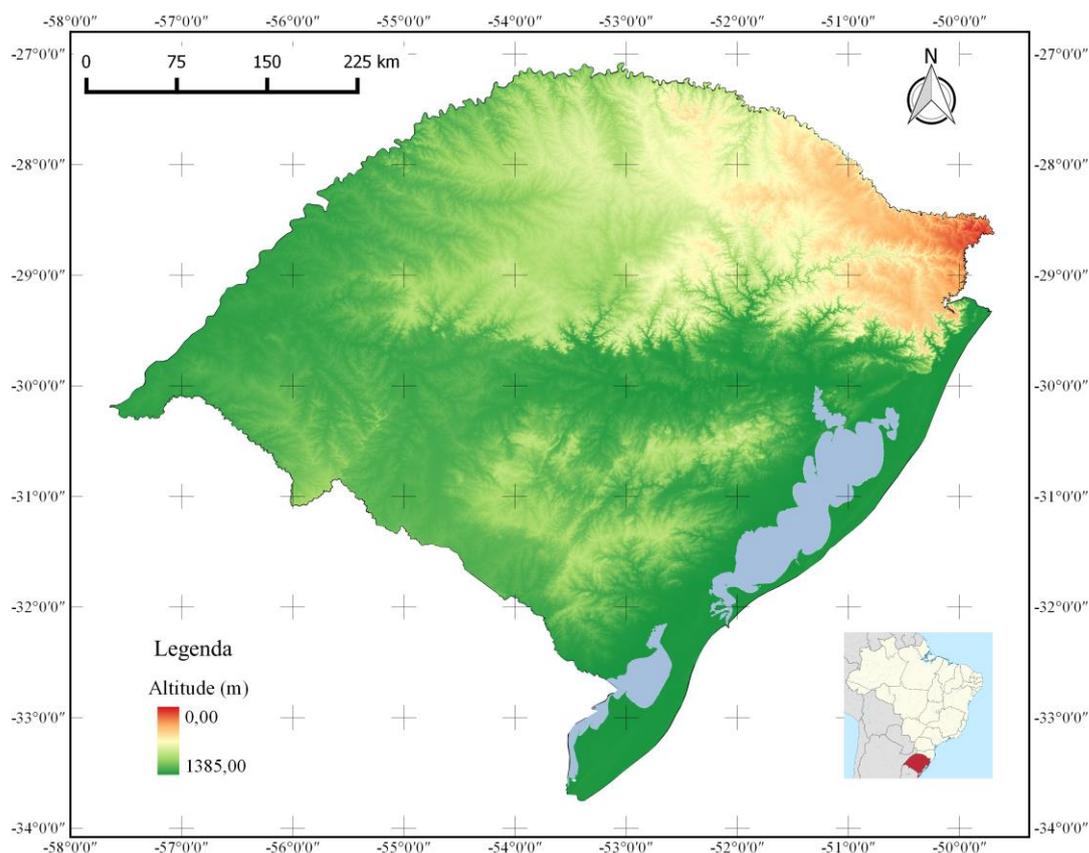


Figura 7 – Mapa hipsométrico do Rio Grande do Sul

Fonte: Autoria própria a partir de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

### 3.2 Visão Geral da Metodologia

De maneira geral, o estudo consiste uma análise comparativa entre os produtos 3B42 V7 do satélite TRMM e precipitações observadas em estações pluviométricas do Estado. Embora conceitualmente simples, a pesquisa demanda uma série de passos envolvendo manipulação e processamento dos dados de ambas as fontes.

Os dados observados foram selecionados de acordo com a disponibilidade de informações a partir de 01/01/1998 até 31/12/2013 provenientes dos sistemas Hidroweb-ANA ([hidroweb.ana.gov.br/](http://hidroweb.ana.gov.br/)) e BDMEP-INMET ([www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/](http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/)), de forma a abranger o período comum ao das estimativas de satélite. Ao mesmo passo, as estimativas geradas pelos algoritmos 3B42 V7 TRMM foram obtidas numa grade regular de pixels com resolução espacial de  $0,25^\circ$  de latitude por  $0,25^\circ$  de longitude disponíveis de 3 em 3 horas na página eletrônica *TRMM Online Visualization and Analysis System* (TOVAS) da NASA. Tanto os dados observados quanto as estimativas do TRMM são disponibilizadas gratuitamente.

As análises foram feitas de forma pontual e espacializada (abrangendo todo o RS). Para poder comparar produtos diferentes como dados pontuais (estações pluviométricas) com dados distribuídos (grade de estimativas com pixels de  $0,25^\circ$  de latitude por  $0,25^\circ$  de longitude) foram realizadas interpolações tanto dos dados observados para uma grade equivalente, quanto das grades TRMM para os pontos das estações, ou seja, dos observados para o TRMM e vice-versa. Como vários casos são possíveis, os detalhes são analisados nos itens a seguir.

É importante ressaltar que os produtos TRMM analisados (3B42) se referem a uma precipitação média numa área de aproximadamente  $625 \text{ km}^2$  (tamanho de cada pixel) enquanto os dados observados consistem em informações pontuais e, desta forma, não existe uma metodologia padrão para comparar ambas magnitudes.

Para comparação, foram aplicadas algumas estatísticas clássicas como média, máxima, desvio padrão, número de dias com e sem chuva e chuva acumulada. Posteriormente testes estatísticos mais específicos foram empregados, juntamente com índices de desempenho, conforme descrito nos itens a seguir. Finalmente foi avaliada a capacidade das estimativas de satélite em representar precipitações extremas, descritas por curvas intensidade-duração-frequência (IDF).

### 3.2.1 Precipitação Observada

As séries de precipitações pluviométricas observadas foram referentes aos dados diários monitorados em pluviômetros dentro dos limites estado do Rio Grande do Sul, disponibilizados pelo sistema HIDROWEB da ANA (correspondente ao acumulado das 7 horas de um dia até as 7 horas do dia seguinte), e pelo BDMEP do INMET (referentes ao somatório das 9 horas de um dia até as 9 horas do dia seguinte). A seleção dos postos de monitoramento foi de acordo com a disponibilidade temporal dos mesmos.

Em relação as estações da ANA, os pluviômetros utilizados são do tipo *Tipping-Bucket*, com resolução de 0,20 mm ou 0,25 mm, faixa de medição de 0 a 200 mm/hora, exatidão de 0,1 mm ou menor para chuvas até 5 mm/hora, de melhor ou igual a 2% para chuvas entre 5 e 50 mm/hora e melhor ou igual a 5% para chuvas de 50 a 200 mm/hora. A área de captação dos pluviômetros varia de 300 a 480 cm<sup>2</sup> (ANA, 2011).

Embora existam 522 postos pluviométricos no Estado, no presente estudo foram utilizados apenas estações com dados a partir de 1998, tendo em vista que a disponibilidade dos produtos TMPA é a partir de janeiro de 1998, totalizando 290 pontos (272 da ANA e 18 do INMET) O período de dados foi estendido até 31 de dezembro de 2013. Os dados da ANA e do INMET não foram utilizados em conjunto, uma vez que o intervalo de leitura de cada um é diferente.

Em relação as 272 estações da ANA, nota-se que as séries disponibilizadas contem falhas, sendo que em 2007, por exemplo, somente 50 estações pluviométricas apresentam séries anuais com 10% ou menos de falhas, conforme apresenta a figura 8. Todavia, em anos como 2005, 2011 e 2012, há séries com 90% dos dados anuais registrados em mais de 200 estações.

Logo, a quantidade de estações com dados disponíveis varia ao longo do período de estudo, sendo que no presente trabalho foram utilizados os dados disponíveis em cada dia analisado.

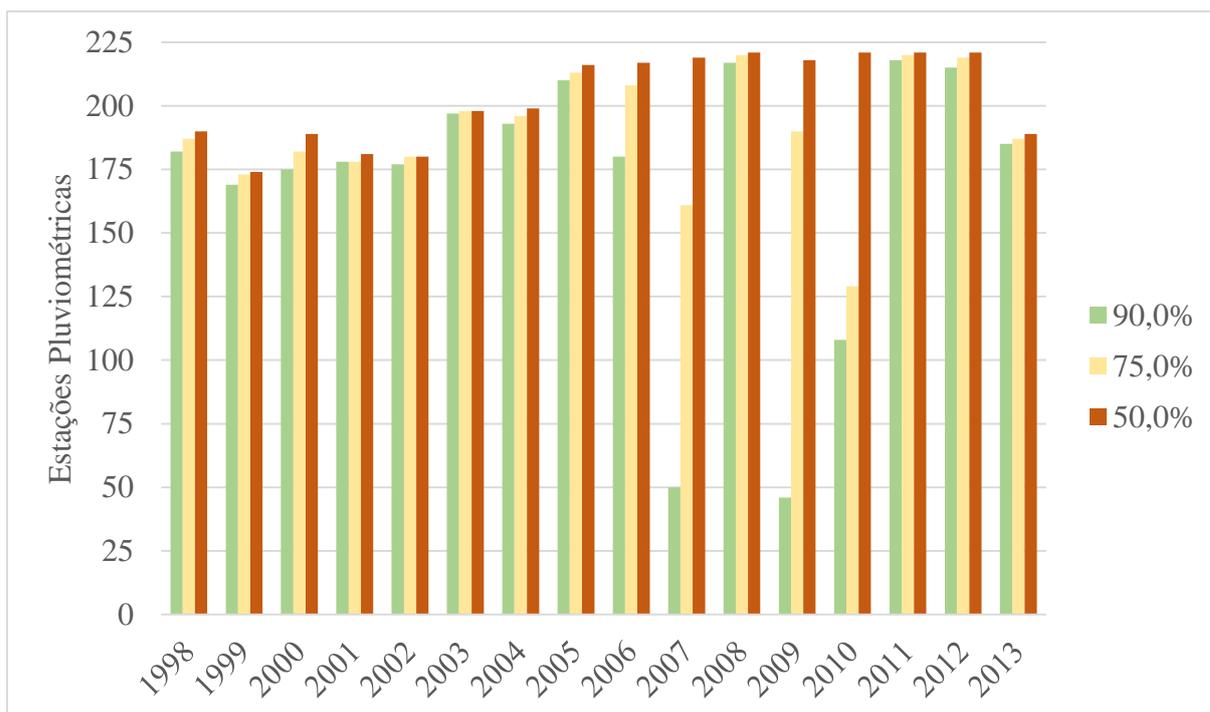


Figura 8 – Número de estações pluviométricas da ANA com 50%, 75% e 90% dos dados anuais registrados, considerando o período de 1998 a 2013.

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Produtos 3B42 V7

No que diz respeito às estimativas do TRMM, as mesmas são produtos dos algoritmos 3B42 V7 com resolução espacial de  $0,25^\circ$  por  $0,25^\circ$  e estão disponíveis para download em formatos NETCDF, HDF e TXT na seguinte página eletrônica: <http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas>. Os dados 3B42 V7 estão disponíveis em acumulados de três em três horas, em horas UTC (Coordinated Universal Time ou Hora de Greenwich), totalizando oito estimativas por dia. Os produtos foram adquiridos levando em conta o período de 1º de janeiro de 1998 e 31 de dezembro de 2013.

Os produtos de 3 horas do 3B42 foram acumulados em intervalo de tempo diário levando em conta os dados de referência (ANA ou INMET), ou seja, quando as estimativas acumuladas diárias foram comparadas com os dados da ANA, optou-se pelo somatório das 7 horas de um dia até as 7 horas do dia seguinte, logo, as estimativas do satélite serão acumuladas

das 9 UTC até as 9 UTC do dia seguinte, de forma que tenham intervalos comparáveis aos dados observados. Porém, quando os as estimativas de satélite foram comparadas com os dados do INMET, as mesmas foram acumuladas das 9 horas de um dia até as 9 horas do dia seguinte (das 12 UTC até as 12 UTC do dia seguinte).

### 3.3 Métodos de comparação

Conforme já mencionado, a chuva estimada pelo TRMM corresponde a chuva média num determinado pixel enquanto que a precipitação é uma informação pontual. Desta forma, não há uma metodologia consagrada para verificar se os dados estimados por satélite são satisfatórios.

Logo, foram adotados diversos métodos de comparação entre as estimativas 3B42 V7 e os dados observados, resumidos no Quadro 2 do Item 2.9, sendo que em todos os casos o período de análise foi de 1998 a 2013 e as comparações foram feitas com base em séries diárias, acumulados quinzenais e acumulados de 30 dias.

No método pixel a ponto somente foram utilizados dados oriundos das estações pluviométricas do INMET, logo, foram 18 comparações entre a série cada estação e a série do TRMM cujo centro de pixel está mais próximo do pluviômetro. Essa forma de avaliar as estimativas de satélite é interessante pois não altera nenhum dos componentes da comparação (estimativa e dado monitorado), além de ser uma forma rápida de desenvolver.

No método ponto a ponto, as estimativas 3B42 foram interpoladas para os pontos geográficos das estações por meio de um interpolador bilinear. Assim as estimativas de satélite foram consideradas como dados pontuais e então comparadas com as séries das estações pluviométricas. Nesse caso também só foram utilizados dados das 18 estações do INMET.

Já no método de comparação espacial (pixel a pixel) os dados provenientes do monitoramento pluviométrico foram interpolados pelo método do Inverso do Peso da Distância (em inglês, *Inverse Distance Weighted – IDW*) com potência igual a 2, ou seja, o inverso da distância ao quadrado. Os dados monitorados foram interpolados para uma grade de mesmas dimensões das estimativas 3B42, ou seja, com mesmo tamanho de pixel, de modo que houvesse a sobreposição perfeita entre grade interpolada a partir dos dados observados e a estimada pelo satélite. Nessa etapa, foram utilizados os dados provenientes da ANA, totalizando 272 estações pluviométricas distribuídas no RS.

Ao total, obteve-se o total de 491 pixels ao longo da área de estudo. Em função do período de análise (1998 a 2013), foram comparadas precipitações referentes a 5.841 dias, na análise diária. Enquanto isso, nas análises envolvendo somatórios de 15 e 30 dias, totalizaram-se 389 e 194 comparações, respectivamente.

Tendo em vista que as estimativas 3B42 são médias das precipitações ocorridas em cada pixel ( $0,25^\circ$  de latitude por  $0,25^\circ$  de longitude), optou-se ainda por fazer uma análise onde os dados observados foram interpolados para sub-pixels com resolução espacial de  $0,125^\circ$ , ou seja, cada pixel 3B42 foi comparado com a média aritmética de 4 pixels menores, provenientes dos dados de monitoramento. Tal método de comparação foi denominado, no presente trabalho, como Comparação por Sub-pixels. Da mesma forma que a comparação Pixel a Pixel, o método análise por Sub-pixels também contou com o IDW com potência 2 para interpolação dos dados observados, sendo esses dados de monitoramento oriundos do banco de dados da ANA seguindo recomendações de Longley et al. (2012) e Xavier et al. (2015).

A análise agregada, por sua vez foi a forma adotada para verificar a qualidade das estimativas em termo médios, sem levar em conta a variabilidade espacial da precipitação pluviométrica. Para tal, foram comparados dados observados interpolados pelo IDW com as estimativas 3B42. Contudo, diferentemente do método pixel a pixel, a comparação da análise agregada foi entre os acumulados dos pixels interpolados e estimados sobre uma região escolhida. No caso, foram selecionadas 25 regiões para aplicação deste método, sendo as bacias hidrográficas pertencentes às três regiões hidrográficas do Estado (do Uruguai, Guaíba e Litoral).

Em relação a etapa correspondente à análise agregada, é importante ressaltar que o acumulado foi feito ao longo da área de cada bacia, considerando a precipitação média. Dessa forma, o valor de precipitação em cada pixel (estimado ou interpolado) foi multiplicado pela razão entre a parcela da sua área contida nos limites da bacia hidrográfica em questão e a área total do pixel, sendo esta relação igual a 1 nos casos em que o pixel se encontrava totalmente inserido nos limites da bacia. A Figura 9 tem o objetivo de ilustrar as etapas do trabalho, bem como as metodologias de comparação associadas as respectivas fontes de dados.

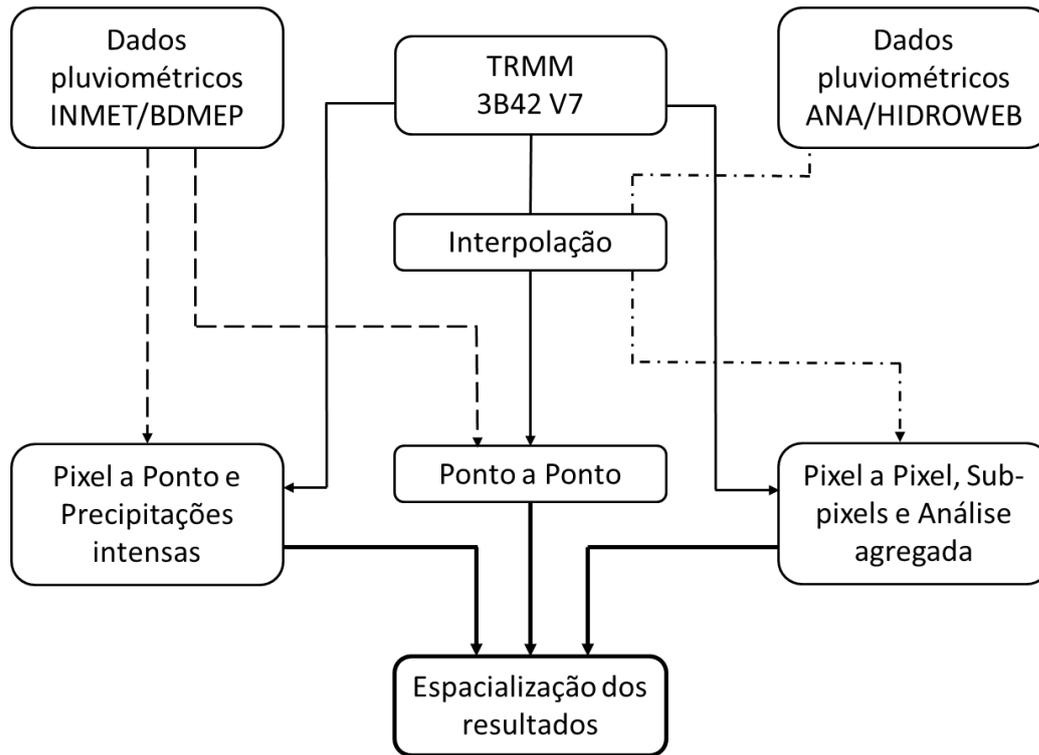


Figura 9 – Diagrama de fluxo das etapas metodológicas.

Fonte: Autoria própria.

### 3.4 Testes Estatísticos

A análise da qualidade dos produtos de satélite foi realizada comparando as séries observadas e estimadas pelo algoritmo V7 por meio de estatísticas como volume precipitado acumulado, média, desvio padrão, máxima diária, número de dias com e sem chuva e chuva acumulada para ambas as séries. Além disso, os dados foram comparados de forma pontual em alguns postos de forma a compreender de maneira inicial e mais simplificada a relação entre as duas fontes. De maneira mais aprofundada, foram realizadas análises empregando outras estatísticas no sentido de validar as precipitações estimadas pelo TRMM.

### 3.4.1 Índices de desempenho

Inicialmente foram feitas verificações por meio de índices de desempenho (*skill scores*) conforme descrito em Wilks (2006). Comparando as séries observadas e estimadas, pode acontecer uma das quatro situações, dependendo se o evento aconteceu (foi observado) ou não e se foi estimado (ou não) pelo satélite. Wilks (2006) apresenta quatro possibilidades diferentes (categorias) conforme Quadro 3, sendo elas: acertos de chuva, falso alarme, evento (de chuva) não detectado e acerto em dia seco, representadas, respectivamente, pelas letras a, b, c e d.

		Precipitação Observada	
		Sim	Não
Precipitação	Sim	a	b
	Estimada	Não	c

Quadro 3. Possibilidades de ocorrência de eventos. Adaptado de Wilks (2006).

No entanto foi necessário converter as séries estimadas e observadas de precipitação em código binário, onde valores iguais 0 representarão a não ocorrência de chuva (ou chuva menor que 1 mm) e, havendo chuva, os valores foram substituídos por 1. Nessa etapa, foi identificado como evento de chuva quando a precipitação estimada ou a observada for igual ou maior a 1 milímetro, de acordo com o apresentado em McBride e Ebert (2000). Os autores analisaram os efeitos de diversos limiares mínimos (0,1, 1, 2, 5, 10, 20, 50 mm por dia) na comparação de dados observados com modelos de previsão meteorológica, obtendo bons resultados estatísticos considerando 1 mm como valor mínimo para caracterizar ocorrência de chuva. Desse modo, foi possível calcular índices a partir das combinações entre as precipitações estimadas e medidas.

Os índices de desempenho calculados empregando as categorias foram: percentual detecção de eventos (PC), percentual de acertos (H), percentual de falsos alertas (FAR e F), índice de sucesso crítico (CSI) e a razão entre eventos estimados “sim” e observados “sim” (B). Também foi analisada a capacidade de acertos com a finalidade de verificar o desempenho das previsões, por meio de equações como a precisão de previsão ao acaso (HSS) e a qualidade de separação de acertos e alarmes falsos (PSS).

A descrição breve dos itens a seguir teve como base a obra de Wilks (2006) e estão resumidas no Quadro 4. O PC possivelmente seja a medida mais direta e intuitiva de precisão de estimativas para eventos não probabilísticos isolados, sendo calculado pela razão entre os acertos de ocorrência e não ocorrência de eventos pelo número total de eventos “n”, assim, quanto mais próximo da unidade melhor é o desempenho.

O índice H consiste na divisão entre a quantidade de acertos em eventos de chuva e o número de observações de eventos, sendo que o melhor desempenho é representado pelo valor índice igual a um. Os eventos estimados pelo satélite e não observados nos postos são computados pelo percentual de falsos alertas ou falso alarme (FAR), o qual tem orientação negativa, logo, deve-se preferir valores próximos de zero para este índice. O índice F, também é conhecido como percentual de falsos alertas, mas difere do FAR por considerar apenas as não ocorrências e não estimativas (também com orientação negativa).

O índice de sucesso crítico (CSI) configura-se como a razão entre as previsões corretas e o número de vezes que os eventos foram previstos e/ou observados, deve-se preferir por valores próximos da unidade. O índice CSI refere-se ao percentual de acertos por parte das estimativas, sem levar em conta os dias sem observação de chuva que foram estimados de maneira correta. O CSI avalia se o melhor número de acertos eventualmente não é ofuscado por um número muito grande de falsos alertas.

Índice de desempenho	Sigla	Equação
Percentual de detecção de eventos	PC	$\frac{a + d}{n}$
Percentual de acertos	H	$\frac{a}{a + c}$
Falsos alertas (para estimativas “sim”)	FAR	$\frac{b}{a + b}$
Falsos alertas (para observadas “não”)	F	$\frac{b}{b + d}$
Índice de sucesso crítico	CSI	$\frac{a}{a + b + c}$
Bias	B	$\frac{a + b}{a + c}$

Desempenho de Heidke	HSS	$\frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)}$
Desempenho de Peirce	PSS	$\frac{ad - bc}{(a + c)(b + d)}$

Quadro 4. Índices de desempenho derivados da tabela de contingência. Adaptado de Wilks (2006).

O Biais (B) consiste na comparação entre a média estimada e observada pela divisão do número de “sim” estimado pela quantidade de “sim” observado. O valor de B igual a unidade indica que o evento foi estimado o mesmo número de vezes que foi observado. Quando Biais for maior que 1, há então superestimativa do número de vezes que os eventos foram observados. E quando Biais for menor que um, representa a subestimativa desse número de eventos. Nota-se que o Biais não fornece informações sobre a relação entre estimativas e observações de eventos particulares, portanto não se trata de uma medida de precisão. Como medida básica de precisão foi aplicado o índice HSS (*Heidke Skill Score*), conhecido também como precisão de estimativa ao acaso. Quando próximo da unidade, o índice indica perfeitas estimativas, o índice é igual a zero quando as estimativas forem equivalentes à de referência e é menor que zero quando as estimativas são piores que a de referência. Já o PSS (*Peirce Skill Score*) é, basicamente, a capacidade de separação dos acertos e falsos alertas, ou seja, a subtração entre H e F, onde o valor próximo da unidade indica o melhor desempenho, zero representa estimativas ao acaso e valores negativos para estimativas inferiores.

#### 3.4.2 Outros testes

O coeficiente de correlação linear de Pearson (equação 1) mede a associação numérica entre as duas variáveis de forma linear.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P)(S_i - S)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - S)^2}} \quad (1)$$

Sendo  $P_i$  a precipitação observada no momento  $i$ ,  $P$  a precipitação média da série observada,  $S_i$  a precipitação estimada no momento  $i$  e  $S$  a precipitação média estimada.

Uma vez que todos os pontos estão sobre a reta o coeficiente resulta em -1 e 1, configurando uma forte correlação, sendo que no primeiro caso quando há uma relação negativa perfeita (inversamente proporcional) e quando  $r$  é igual a 1, a relação entre duas variáveis é positiva perfeita, ou seja, se um valor aumenta, o outro também aumentará. Caso o coeficiente resulte em 0 quando o ajustamento da reta é pobre a ponto de que uma variável não interfere em nada na outra, entretanto ainda pode haver dependência não linear que deve ser verificada por outros meios (BARBETTA et al., 2009)

O erro médio absoluto (EMA) apresentado na equação 2 sempre fornece resultados em valores positivos, pois não distingue superestimativas de subestimativas.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - P_i| \quad (2)$$

Outra forma de avaliar a diferença entre as estimativas de satélite e os dados observados é o erro médio quadrático (EQM) (equação 3), que consiste na média do quadrado do erro. O resultado ideal do erro médio quadrático é zero, que infere perfeita estimativa das precipitações observadas.

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - P_i)^2} \quad (3)$$

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), indicado na equação 4, tem uso na verificação de modelos hidrológicos e, neste caso, foi aplicado a fim de avaliar as estimativas de satélite. De acordo com Collischon (2006), o NS reflete a fração da variância de dados que é concordante com as estimativas, podendo variar de  $-\infty$  a zero, sendo que valores inferiores a 0,5 não representam dados confiáveis. Silva et al. (2008) e Collischon (2001) afirmam que quando NS for 0,75 ou maior significa bom desempenho das estimativas e valores menores que 0,36 são inaceitáveis. Quando a resultante estiver dentro dos limites inferior e superior (0,36 e 0,75, respectivamente) o desempenho é considerado razoável.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2} \quad (4)$$

O viés estatístico (equação 5) pode indicar se as estimativas apresentam alguma tendência a superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) os dados

observados. Sua avaliação leva em consideração o sinal e a magnitude do resultado. O viés relativo é calculado da mesma forma e posteriormente dividido pela precipitação média observada (de referência) e permite analisar o resultado em percentuais. No presente estudo, deve-se ter o cuidado em diferenciar o viés estatístico do índice de desempenho bias, pois trabalhos em inglês podem se referir ao viés estatístico como bias.

$$viés = \sum_{i=1}^n (S_i - P_i) \quad (5)$$

### 3.5 Verificação da estimativa de precipitação com diferentes probabilidades

Além das estimativas de acumulados diárias, quinzenais e mensais, foi verificado se os produtos TRMM são capazes de estimar com qualidade probabilidades de precipitação, de forma a serem utilizados, entre outras atividades, em projetos de estruturas hidráulicas. Ou seja, verificar a qualidade das estimativas de precipitações com variados tempos de retorno.

Inicialmente, por meio da distribuição de Gumbel (equação 6), foram determinadas precipitações com tempo de retorno variando de 2 a 25 anos, tanto para os dados diários observados, quanto para as estimativas de satélite (as estimativas de 3 horas dos produtos 3B42 foram somadas de forma que coincidam com as leituras diárias). As estimativas de satélite utilizadas foram provenientes dos valores do pixel correspondente a cada estação sem realização de qualquer tipo de interpolação.

Foram utilizadas apenas estações do INMET que possuíssem equações IDF existentes. As estimativas de satélite utilizadas foram provenientes dos valores do pixel correspondente a cada estação, ou seja, sem processamento prévio das estimativas 3B42. Sendo assim, as estações selecionadas foram referentes as seguintes localidades: Bagé, Caxias do Sul, Cruz Alta, Encruzilhada do Sul, Iraí, Passo Fundo, Porto Alegre, Rio Grande, Santa Maria, Santa Vitória do Palmar, São Luiz Gonzaga e Uruguaiana.

$$x = \bar{x} - s\{0,45 + 0,7797 \cdot \ln[\ln(\frac{TR}{TR-1})]\} \quad (6)$$

Sendo  $x$  é a precipitação diária  $\bar{x}$  é a média das precipitações máximas anuais,  $s$  o desvio padrão e TR o tempo de retorno desejado.

Com a finalidade de melhor estimar as diferenças regionais entre as duas fontes de dados, em cada estação foi determinado um coeficiente de ajuste denominado  $C_{adj}$ . Este coeficiente indica a diferença percentual entre a precipitação com tempo de retorno de 10 anos oriunda dos produtos 3B42 e dos dados observados (Equação 7).

$$C_{adj} = \left(1 - \frac{P_{TRMM}^{10} - P_{Obs}^{10}}{P_{Obs}^{10}}\right) \cdot 100\% \quad (7)$$

Sendo  $C_{adj}$  é o coeficiente de ajuste,  $P_{TRMM}^{10}$  é a precipitação diária com tempo de retorno de 10 anos dos produtos 3B42 e  $P_{Obs}^{10}$  é a precipitação diária com tempo de retorno de 10 anos oriunda da série de dados monitorados. A escolha de 10 anos de tempo de retorno é porque este valor é muito utilizado em projetos de drenagem urbana e, como descrito no próximo item, pode ser utilizado para estimativa de chuvas intensas em locais sem dados.

### 3.6 Uso dos produtos TRMM para determinação de precipitações intensas

Com o intuito de analisar a capacidade que os produtos de satélite tem em representar precipitações intensas, foi aplicada a equação de Bell (1969) descrita na equação 8, tanto nos dados observados, quanto nos estimados. Bell (1969) propôs esta equação para estimativa de precipitação intensa em locais sem dados a partir de informações de apenas uma variável, a precipitação com duração de 60 minutos e tempo de retorno de 10 anos. Esta equação resulta num valor de lâmina da água, que pode ser dividida pela sua duração para obtenção do valor de intensidade da chuva com durações superiores a 2 horas.

$$P_t^T = (0,21 \ln Tr + 0,52)(0,54 t^{0,25} - 0,50)P_{60}^{10} \quad (8)$$

Sendo Tr é o tempo de retorno, t a duração e  $P_{60}^{10}$  a precipitação com duração de 60 minutos e tempo de retorno de 10 anos.

Para a aplicação de Bell (1969) a precipitação de um dia e tempo de retorno de 10 anos (obtida pela distribuição estatística) foi utilizada para obtenção da lâmina da água com duração

de 60 minutos e tempo de retorno de 10 anos, conforme as relações entre precipitações com diferentes durações (DENARDIN E FREITAS, 1982; BELTRAME et al., 1991), permitindo obter a o valor da variável de entrada da equação.

Como na etapa anterior, foram utilizadas apenas as 12 estações do INMET que possuem equações IDF existentes. Assim, foi possível comparar as curvas IDF existentes com as equações geradas pelas aplicações dos dados estimados e observados na equação de Bell para um mesmo ponto (estação).

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Comparação Pixel a Ponto**

A avaliação inicial foi realizada comparando as series históricas das estimativas de precipitação em cada pixel TRMM e dos postos pluviométricos, ou seja, compararam-se dados pontuais de estações pluviométricas do INMET com estimativas dos respectivos pixels TRMM. Uma vez que a área aproximada de cada pixel é de 625 km<sup>2</sup>, e as estimativas de precipitação por satélite são resultantes de uma média da precipitação pluviométrica que ocorre nessa região, este primeiro método de avaliação pode induzir a erros em função da precipitação pontual da estação ser comparada com estimativas de um pixel.

A Figura 10 traz as séries (do pixel e observada) acumuladas de duas localidades, Uruguaiana (a) e Caxias do Sul (b). Em ambos os casos é possível notar que o produto 3B42 V7 superestima os valores observados nas estações, sendo que em Uruguaiana o produto de satélite superestimou em 12,3% o total precipitado, enquanto em Caxias do Sul esse valor foi 5,5%, como é possível observar nos gráficos, uma vez que a maior distância entre as linhas das séries indica maior superestimava. As mesmas análises gráficas para das demais estações estão disponíveis no Apêndice A. Contudo não foram feitos os gráficos para os dados da metodologia Ponto a Ponto, tendo em vista que não foi possível notar diferença visual em relação aos resultados obtidos pelo método Pixel a Ponto.

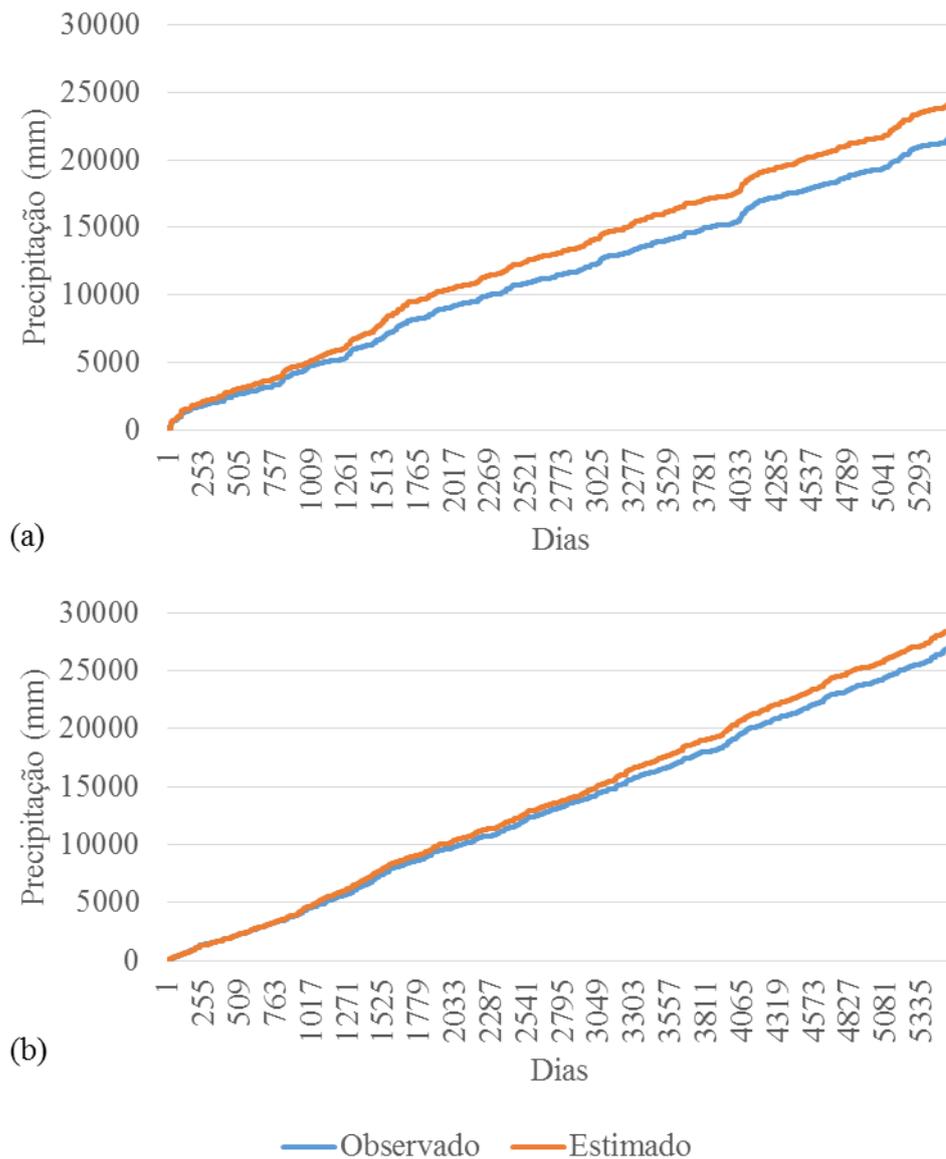


Figura 10 – Séries de precipitações acumuladas (pixel e observada) em Uruguaiana (a) e Caixas do Sul (b).

Da mesma forma, a Figura 11 mostra os valores diários dos dados estimados e observados ao longo do tempo na estação pluviométrica de Cruz Alta, onde é possível verificar que os dados de satélite superestimam os observados, inclusive nos valores máximos de precipitação pluviométrica. A parcela em branco indica a falta de dados observados na estação pluviométrica, sendo que nesse caso corresponde ao período de 1° de janeiro de 2001 a 1° de setembro de 2001. Os gráficos das séries das outras estações (tanto Pixel a Ponto, quanto Ponto a Ponto) estão disponíveis no Apêndice B.

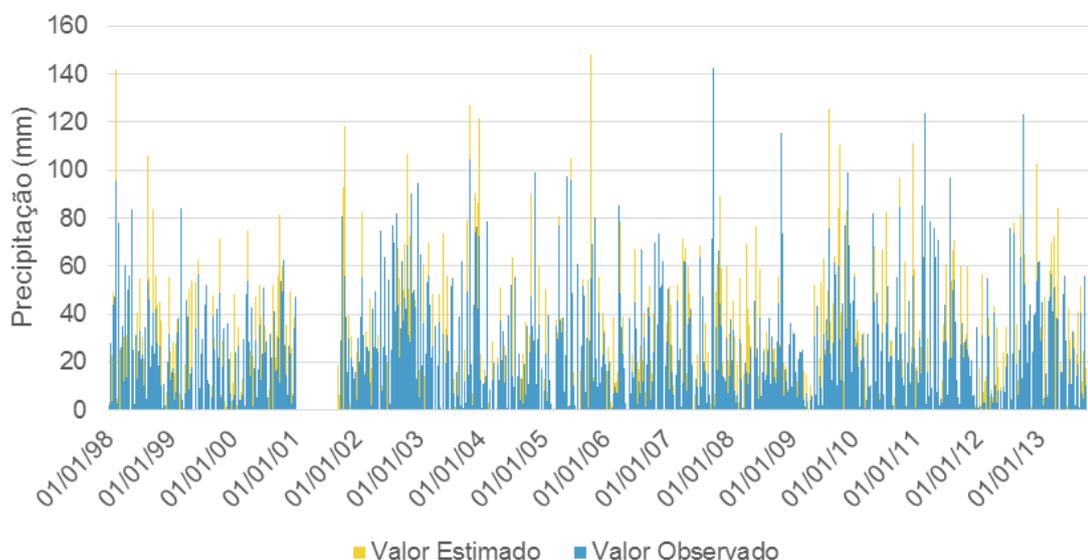


Figura 11 – Série de precipitação diária (observada e estimada no pixel) referentes a estação pluviométrica de Cruz Alta.

Nessa etapa são apresentados os resultados obtidos nas comparações pixel a ponto, ou seja, quando comparada a série de dados observados de uma estação com as estimativas do pixel TRMM onde a estação se encontra. As avaliações por índices de desempenho e pelas outras estatísticas apresentadas na metodologia foram discutidas separadamente.

Camparotto et al. (2013) aplicaram a mesma metodologia (pixel a ponto) para os dados 3B42 agrupados em escala mensal no estado de São Paulo, sendo que as comparações foram avaliadas por estatísticas como erro médio absoluto, erro médio quadrático e coeficiente de correlação linear. Os resultados encontrados pelos autores foram semelhante aos obtidos no presente trabalho

#### 4.1.1 Avaliação por índices de desempenho

Os valores de F (falso alarme para eventos não observados, mas estimados pelo satélite) foram iguais ou menores a 0,10, ou seja, considerando as localidades apresentadas, no pior dos

casos o satélite estima chuva em apenas 10% dos dias em que não é observada precipitação (Figura 12d).

O valor máximo de FAR foi de 0,31 na estação de Santa Vitória do Palmar, indicando que em 31% dos casos em que a precipitação é estimada ela não é observada (Figura 12b). Nas demais localidades o FAR variou entre 0,17 e 0,25, com média igual a 0,22.

Basicamente os índices FAR e F diferem em função do primeiro considerar apenas os casos em que ocorreram estimativas maiores que zero e o segundo apenas os casos em que não houveram volumes observados em solo. O FAR indica a percentagem de vezes em que o evento foi estimado mas não foi observado, enquanto o F representa o percentual de vezes em que o evento não foi observado mas foi estimado.

O índice PC, que indica o percentual de detecção da ocorrência e não ocorrência de chuva pelas estimativas, variou de 0,84 a 0,90, com média de 0,87, apresentando pior desempenho na detecção de eventos na região litorânea (Figura 12a).

O índice de desempenho H indica o percentual de acertos de ocorrência de chuva e variou de 0,64 a 0,80, sendo que, novamente a região litorânea apresentou os piores valores, variando de 0,64 a 0,66 (Figura 12c). Os índices PC e H tiveram um comportamento semelhante, com maiores valores na porção Oeste do Estado. De acordo com Kenawy et al. (2015), um dos motivos desse baixo desempenho na região litorânea, pode ser em função do tamanho da célula das estimativas 3B42 ser grande o suficiente para incorporar porções de corpos d'água vizinhos. Assim, como os valores das estimativas são uma média das informações de todo o pixel, as informações coletadas pelos sensores nesses corpos d'água também serão computadas em função da área que o pixel abrange.

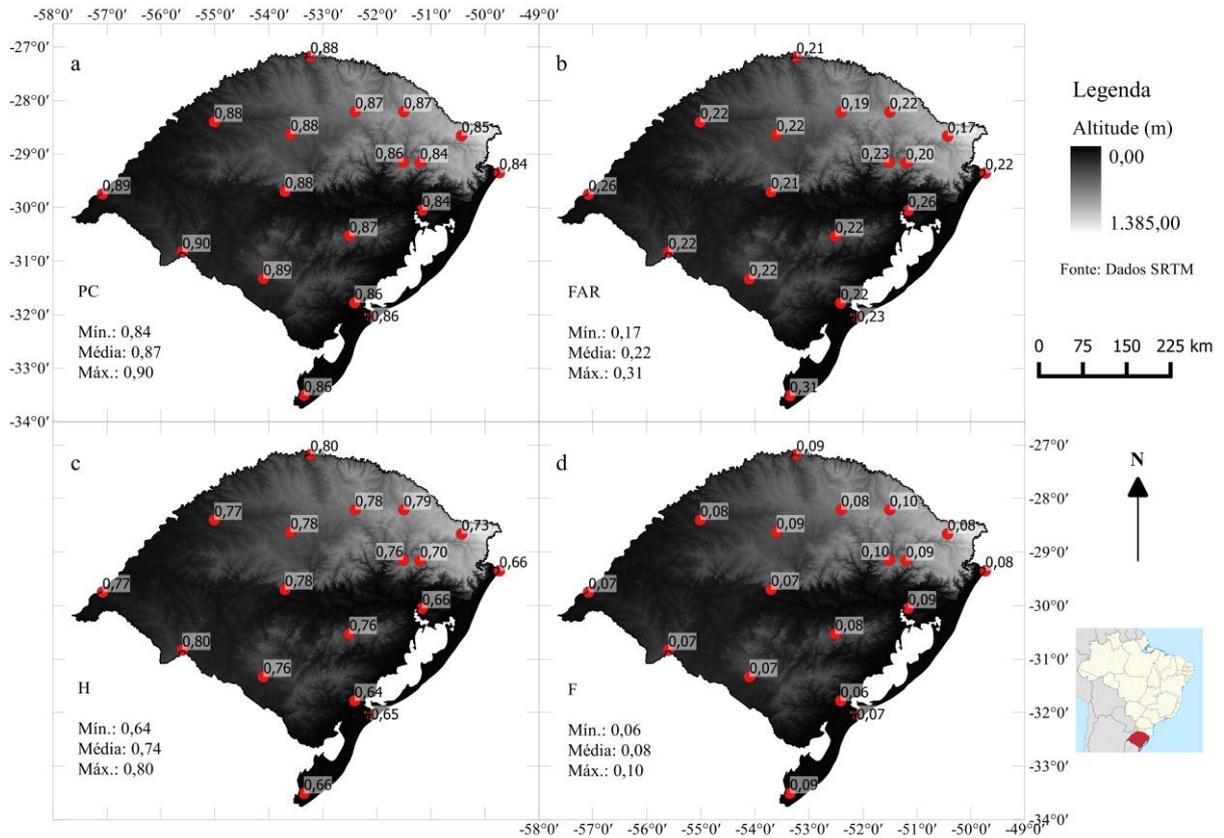


Figura 12 – Índices de desempenho PC (a), FAR (b), H (c) e F (d) para análise pixel a ponto.

Os valores CSI (Figura 13a), que indicam a razão entre as previsões corretas do evento acontecer e o número de vezes que os eventos foram previstos e/ou observados, variaram de 0,51 a 0,66, com média de 0,61, ou seja, em média, 61% dos dias com chuva são estimados corretamente. Observa-se que as localidades que apresentaram o resultado desse índice menor que a média dos valores estão situadas na região leste do Estado, com exceção de Uruguaiana, localizada no extremo oeste.

O Bias (Figura 13b) permite analisar quantas vezes mais ou quantas menos os eventos observados foram estimados. Nesse caso, os valores variaram de 0,82 a 1,04, com média de 0,95.

O índice HSS (Figura 13c), conhecido também como precisão de estimativa ao acaso, apresentou média de 0,66, variando de 0,58 a 0,73. O PSS, por sua vez, se comportou da mesma forma que o HSS. A região que abrange desde o norte do RS até o sudoeste apresentou os melhores valores de PSS, indicando a maior capacidade que o satélite tem de separar acertos e falsos alertas nessas localidades, conforme traz a Figura 13d.

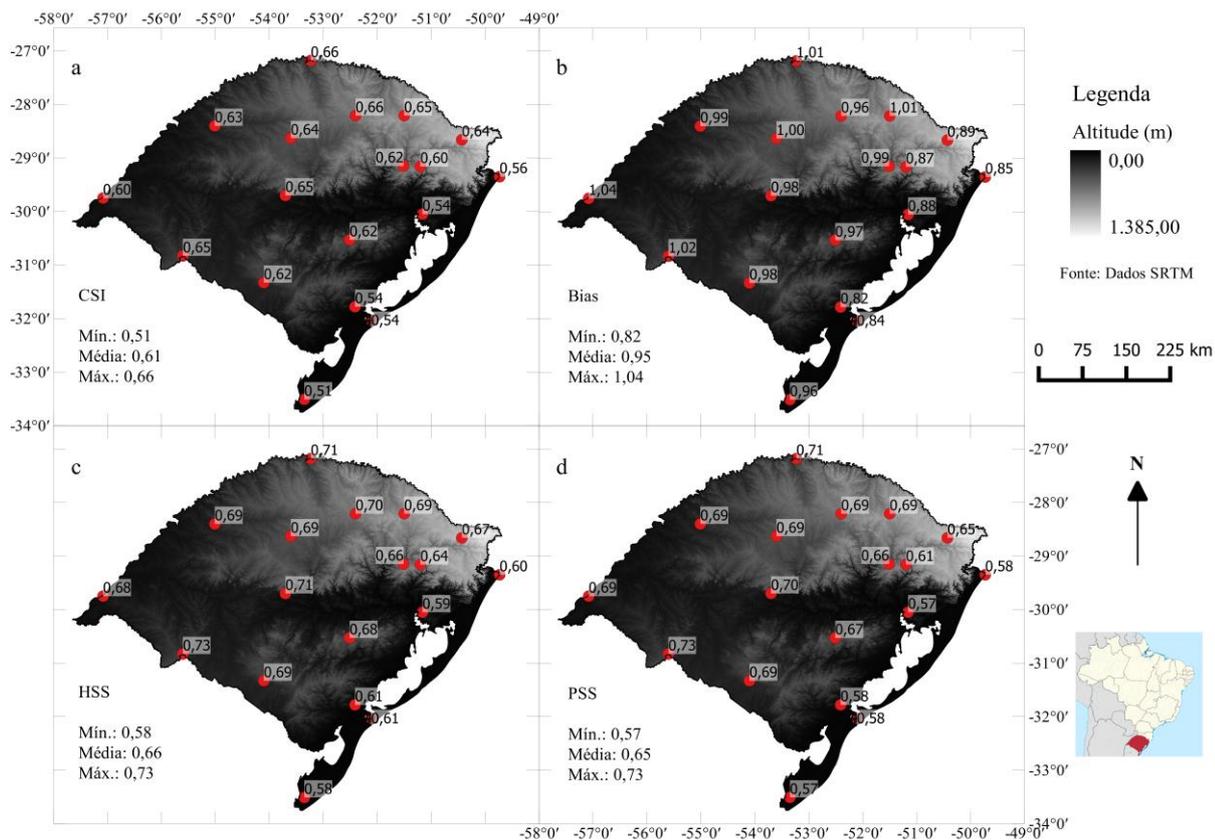


Figura 13 – Índices de desempenho CSI (a), Bias (b), HSS (c) e PSS (d) para análise pixel a ponto.

#### 4.1.2 Avaliação por outras estatísticas

O viés relativo apresentou média de 9,26% (superestimativa), considerando as 18 comparações. Na localidade de Lagoa Vermelha foi onde o viés apresentou maior valor (próximo a 23%), seguida de Santa Vitória do Palmar (em torno de 16,5%) e menor valor em Cruz Alta (próximo a 0%), seguido de São Luiz Gonzaga (viés abaixo de 2%).

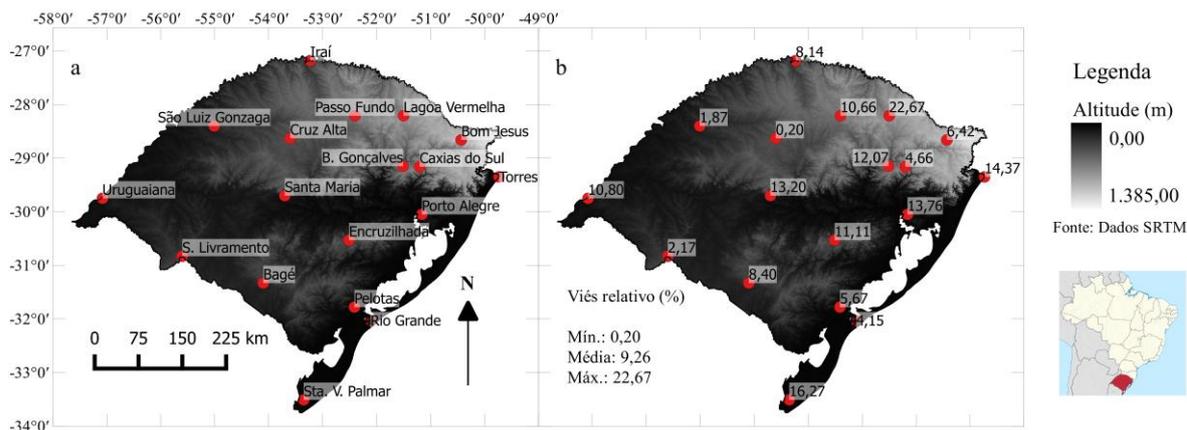


Figura 14 – Localidades (a) e viés relativo (b) para análise pixel a ponto.

Tanto os resultados de coeficientes de correlação, quanto de NS e EQM relativo, apresentaram melhorias a medida em que foram utilizadas séries quinzenais e mensais. Os valores médios para análises diárias, quinzenais e mensais foi 0,72, 0,82 e 0,90, respectivamente. Os valores do coeficiente de correlação variaram de 0,62 a 0,79 para dados diários (Figura 15a), de 0,71 a 0,88 para acumulados de quinze dias (Figura 16a) e de 0,82 para 0,95 para dados mensais (Figura 17a), em concordância com os dados apresentados em As-Syakur et al. (2011) e Kenaway et al. (2015).

Todos os resultados de NS aplicados em dados diários (Figura 15b) foram abaixo de 0,52 (média igual a 0,30), concordando com o apresentado em Fensterseifer (2013), num trabalho realizado na bacia hidrográfica do rio Jacuí, RS. Todavia, se tratando de séries quinzenais (Figura 16b) e mensais (Figura 17b), os resultados de NS variaram, respectivamente, de 0,32 a 0,71 (média igual a 0,56) e de 0,52 a 0,90 (média igual a 0,76). Localidades como Pelotas e Torres apresentaram os piores valores em termos de coeficiente de correlação a NS, enquanto Iraí, Passo Fundo, São Luiz Gonzaga e Bom Jesus apresentaram os melhores resultados para esses coeficientes.

O EMA variou entre 3,01 mm a 4,36 mm (com média de 3,62 mm), quando aplicado em acumulados diários (Figura 15c). Já quando calculado sob acumulados quinzenais (Figura 16c) e mensais (Figura 17c), o EMA variou, respectivamente, de 20,22 mm a 29,86 (com média de 24,53 mm) e de 21,64 mm a 39,29 mm (com média de 28,05 mm). Os resultados de EMA ficaram próximos aos apresentados por Kenaway et al (2015) num trabalho realizado na Península Ibérica.

O EQM, apresentado de forma relativa, aplicado às séries diárias (Figura 15d) resultou em valores inferiores a 12 mm, já quando calculado em séries quinzenais (Figura 16d), a média das estações foi de 35,33 mm, enquanto as séries mensais (Figura 17d) apresentaram valores de EQM entre 29,08 mm e 51,08 mm, com média de 38,53 mm.

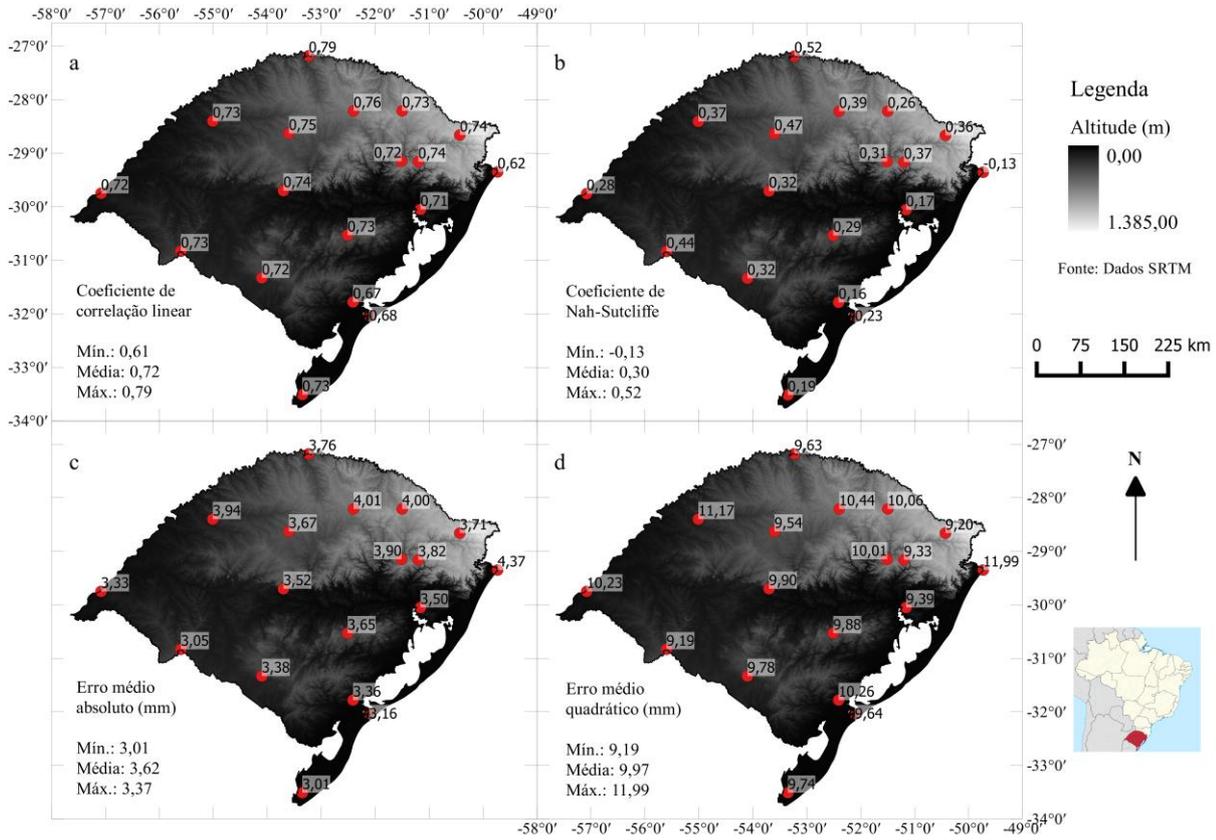


Figura 15 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries diárias da análise pixel a ponto.

De maneira geral, os dados oriundos da localidade de Torres (região litorânea) apresentaram baixíssimo desempenho, como os valores de coeficiente de correlação diário (0,62), NS diário e quinzenal (-0,13 e 0,32, respectivamente) e EQM mensal (44,82 mm). As estações Pelotas e Rio Grande também não se mostraram com desempenhos bons perante aos cálculos realizados, principalmente a primeira, que apresentou os piores valores de EQM e coeficiente de correlação na análise quinzenal (40,11 mm e 0,71, respectivamente).

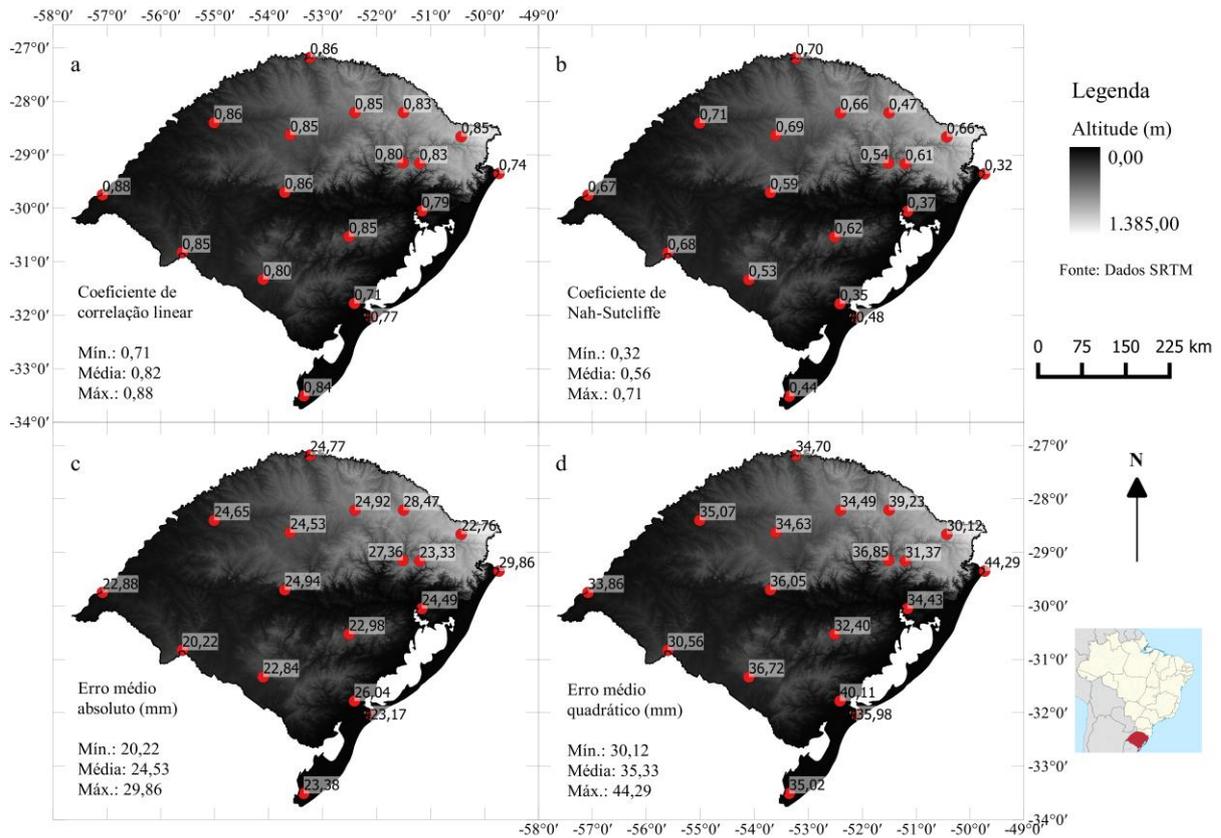


Figura 16 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries quinzenais da análise pixel a ponto.

Em contrapartida, a estação localizada em Iraí, que apresentou bom desempenho em todas as análises, principalmente nas comparações de dados diários, onde apresentou os valores mais altos de coeficiente de correlação e NS (0,79 e 0,52, respectivamente). Houve destaque também por parte da estação São Luiz Gonzaga (noroeste do RS), que apresentou bons valores em termos de coeficiente de correção mensal (0,95, o melhor entre as estações) e de NS quinzenal e mensal (0,71 e 0,90, respectivamente). Dessa forma, pode-se notar que muitas das estações que apresentaram os melhores desempenhos estão localizadas em regiões de Planalto (ou seja, em elevadas altitudes), como são os casos de São Luiz Gonzaga, Iraí, Bom Jesus e Passo Fundo, por exemplo. Já os dados que apresentaram os piores resultados são provenientes de estações pluviométricas dos municípios de Pelotas, Rio Grande e Torres, localizados ao leste do Estado.

Em termos de coeficiente de correlação, erro médio quadrático e viés, os resultados (valores e comportamentos das estatísticas) da metodologia Pixel a Ponto foram concordantes com os valores apresentados em Satgé et al. (2015), sobretudo na análise mensal das séries. Em

relação aos resultados de coeficiente de correlação linear e erro médio quadrático, pode-se afirmar que foram coincidentes com os discutidos em Almeida et al. (2015).

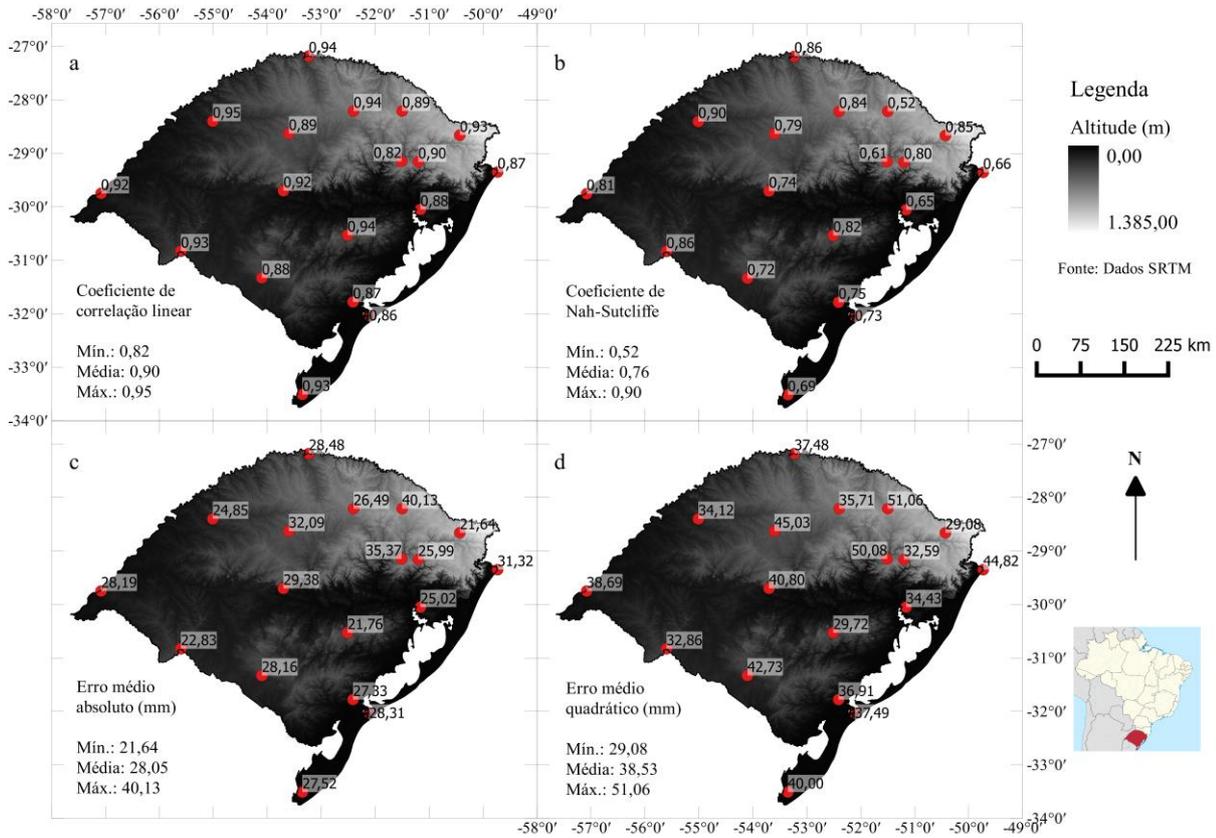


Figura 17 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries mensais da análise pixel a ponto.

## 4.2 Comparação ponto a ponto

Quando utilizadas as séries estimadas interpoladas para o local (ponto) da estação, nota-se que os valores dos produtos de satélite se aproximam mais dos observados. Entretanto essa alteração não é tão expressivo, conforme demonstra a Tabela 2, que traz valores de média, desvio padrão, máxima, total precipitado, número de dias com chuva e número de dias sem chuva referentes à estação pluviométrica de São Luiz Gonzaga. Sendo que, apenas para o total de dias com chuva e sem chuva é que as séries interpoladas apresentaram valores mais divergentes quando comparados aos resultados obtidos por meio da série do pixel

correspondente a estação. Para o cálculo da média, por exemplo, os dias com precipitação menor que 1 mm tiveram seus valores de chuva convertidos para zero, ou seja, dia sem chuva.

Tabela 2 – Média, desvio padrão, máxima, total, dias com chuva e dias sem chuva das séries pluviométricas observada, estimada no pixel e interpolado no ponto, referente à estação de São Luiz Gonzaga, entre 1998 e 2013.

	Observado	Estimado Pixel	Estimado Interpolado
Média (mm)	5,32	5,41	5,38
Desvio Padrão (mm)	14,08	15,75	15,05
Máxima (mm)	149,50	205,35	169,38
Total precipitado (mm)	29669,10	30192,30	30036,97
Dias com chuva ( $\geq 1$ mm)	1472	1455	1522
Dias sem chuva ( $< 1$ mm)	4108	4125	4058

Nesse caso também foram utilizadas informações de 18 estações pluviométricas do INMET, já as estimativas foram provenientes de 18 processos de interpolação bilinear, de modo a analisar a qualidade das estimativas em pontos específicos, considerando os dados de satélite como medidas pontuais.

A Figura 18 traz as séries (estimada interpolada e observada) acumuladas de duas localidades, Uruguaiana (a) e Caxias do Sul (b). Em ambos os casos é possível notar que o produto 3B42 V7 superestima os valores observados nas estações, sendo que em Uruguaiana o produto de satélite superestimou em 11,5% o total precipitado, enquanto em Caxias do Sul esse valor foi 5,7%, como é possível observar nos gráficos, uma vez que a maior distância entre as linhas das séries indica maior superestimava por parte das estimativas.

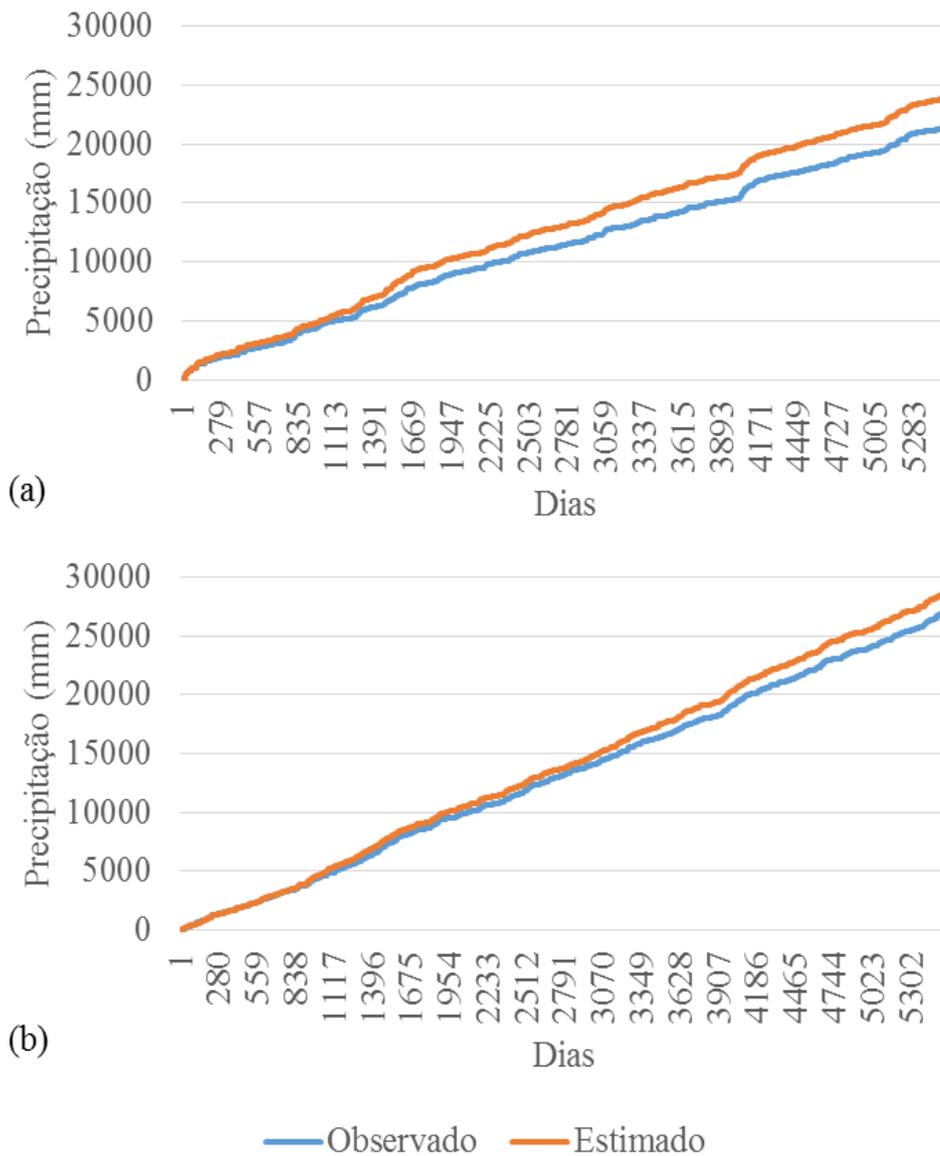


Figura 18 – Séries acumuladas (estimada interpolada e observada) em Uruguaiana (a) e Caixas do Sul (b).

Da mesma forma, a Figura 19 mostra os valores diários dos dados estimados interpolado e observados ao longo do tempo na estação pluviométrica de Cruz Alta, onde é possível verificar que os dados de satélite superestimam os observados, inclusive nos valores máximos de precipitação pluviométrica. Em relação a mesma análise na comparação Pixel a Ponto, alguns valores de pico foram reduzidos, chegando mais próximo aos observados

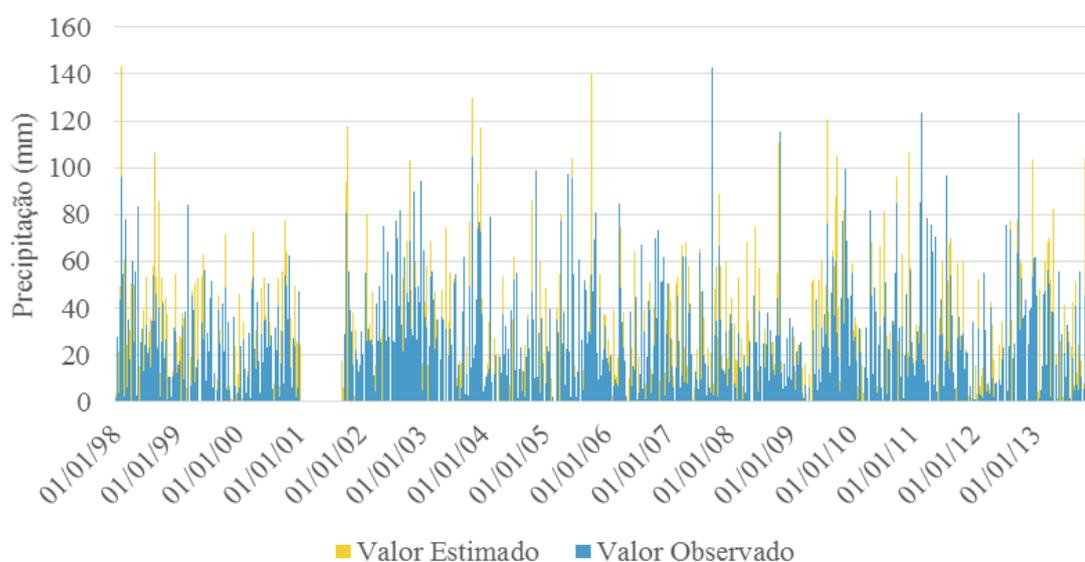


Figura 19 – Série observada e estimada (interpolada) referentes a estação pluviométrica de Cruz Alta.

#### 4.2.1 Avaliação por índices de desempenho

A análise dos índices aplicados às séries diárias observadas e estimadas interpoladas mostraram que os índices de desempenho se comportaram de maneira semelhante ao encontrado na metodologia pixel a ponto. O índice PC (Figura 20a), teve média de 0,87, variando de 0,83 a 0,90.

O índice de desempenho H variou de 0,66 a 0,83, com média de 0,76 (Figura 20c). Os índices PC e H calculados pela metodologia ponto a ponto também se comportaram e maneira semelhante apresentaram resultados inferiores na região litorânea, sobretudo nas localidades de Santa Vitória do Palmar e Rio Grande.

Os valores de F (Figura 20d) foram iguais ou menores a 0,14, sendo que aumento em 4% em relação aos resultados obtidos na metodologia pixel a ponto. E, da mesma forma que na metodologia anterior, a localidade de Santa Vitória do Palmar apresentou o maior valor de FAR (Figura 20b) igual a 0,41, sendo que o índice apresentou média de 0,24 e valor mínimo de 0,18, indicando que, em média 24% dos eventos são estimados, porém não observados.

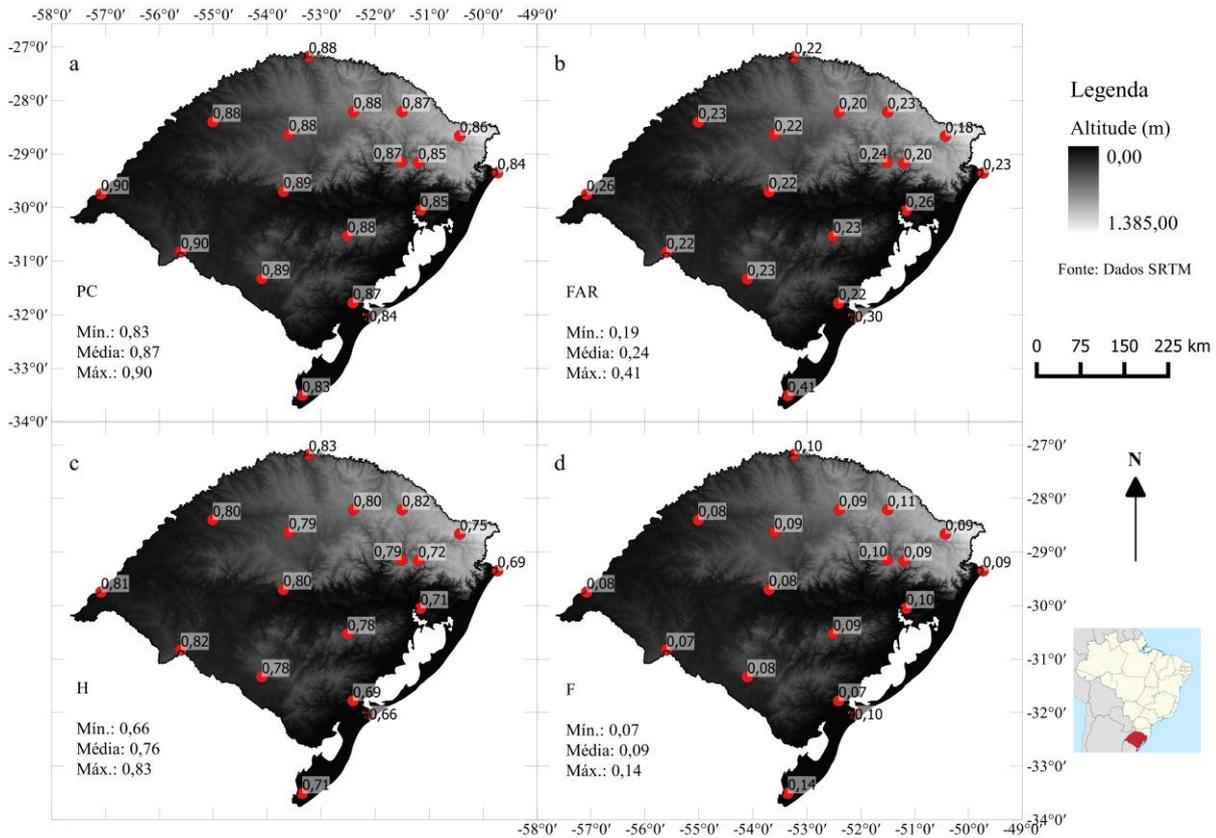


Figura 20 – Índices de desempenho PC (a), FAR (b), H (c) e F (d) para análise ponto a ponto.

Os valores CSI (Figura 21a) variaram de 0,48 a 0,68, com média de 0,62, apresentando o mesmo comportamento entre as localidades obtido por meio da metodologia ponto a pixel. O Bias (Figura 21b) indicou que os produtos 3B42 subestimaram em até 11% (valor de Pelotas) a ocorrência de chuva diária e superestimaram em até 19% (valor de Santa Vitória do Palmar). Já o índice HSS (Figura 21c) apresentou média de 0,67, variando de 0,53 a 0,74. O PSS (Figura 21d) variou de 0,57 a 0,75, com média de 0,67, sendo que os piores valores pertencem as localidades situadas na região leste do RS.

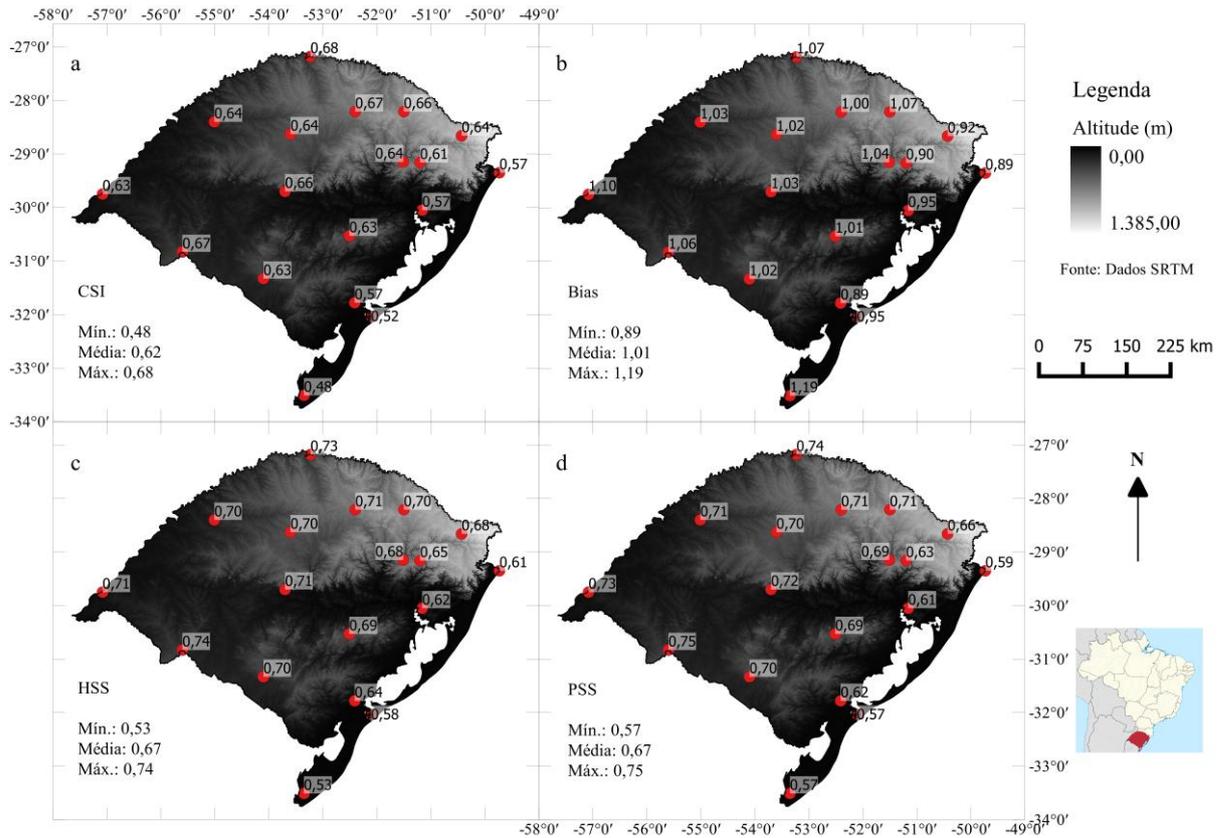


Figura 21 – Índices de desempenho CSI (a), Bias (b), HSS (c) e PSS (d) para análise ponto a ponto.

De maneira geral, a interpolação das estimativas 3B42 para os pontos geográficos das estações pluviométricas gerou melhora dos índices nas estações que já apresentaram bom desempenho nas metodologias ponto a pixel. As localidades que apresentaram piores desempenhos na metodologia ponto a pixel, principalmente as situadas na região litorânea, registraram desempenhos ainda piores quando empregadas as estimativas interpoladas.

É possível notar que, embora os valores máximos de CSI, HSS e PSS, os valores mínimos diminuíram e a média teve acréscimo pouco notável. O índice de desempenho H apresentou melhora na metodologia ponto a ponto, haja vista que a média e o valor máximo do índice aumentaram, enquanto o valor mínimo se manteve o mesmo. Os falsos alertas F e FAR também apresentaram piores valores médios, máximos e mínimos na metodologia ponto a ponto, sendo que em boa parte das localidades os falsos alertas aumentaram.

### 5.2.2 Avaliação por outras estatísticas

Para todas as localidades, (Figura 22a), o viés, com mesmo comportamento que na metodologia pixel a ponto (Figura 22b), teve média de 9,34%. Entretanto, o viés apresentou valores mais elevados quando utilizadas estimativas interpoladas, o que infere num maior superestimativa por parte dos produtos 3B42. Novamente a localidade de Lagoa Vermelha foi onde o viés apresentou maior valor (próximo a 24%), indicando que os produtos 3B42 superestimam em quase 25% os dados monitorados nessa estação.

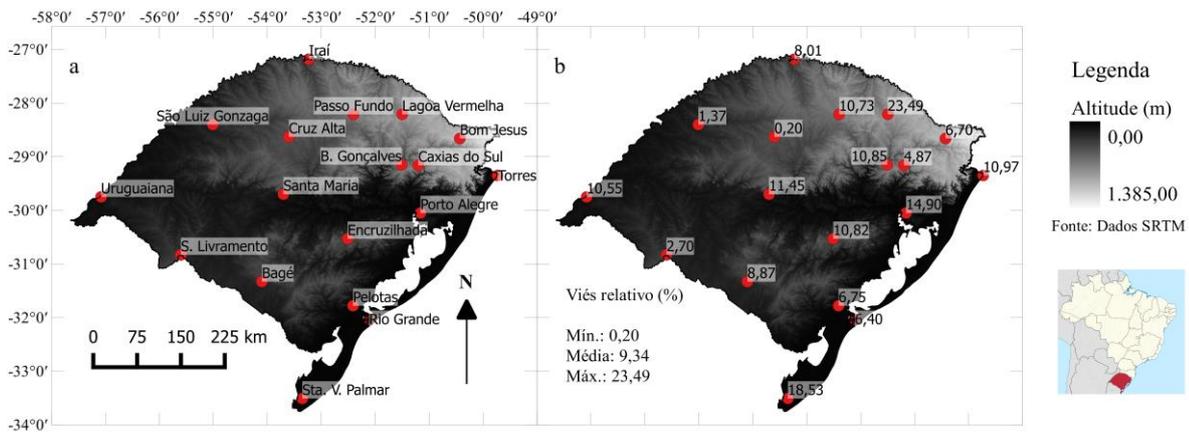


Figura 22 – Localidades (a) e viés relativo (b) para análise ponto a ponto.

Perante uma visão geral, os resultados de coeficientes de correlação, NS e EQM relativo, apresentaram melhorias a medida em que foram utilizadas séries de 15 dias acumulados ou mensais. As comparações com produtos 3B42 interpolados para os pontos das estações geraram coeficientes de correlação médios de 0,74 para dados diários (Figura 23a), 0,83 para acumulados quinzenais (Figura 24a) e de 0,91 para dados mensais (Figura 25a). Os coeficientes de correlação variaram de 0,64 a 0,80 na análise diária, de 0,71 a 0,89 para dados acumulados de 15 dias e de 0,82 a 0,96 para séries mensais.

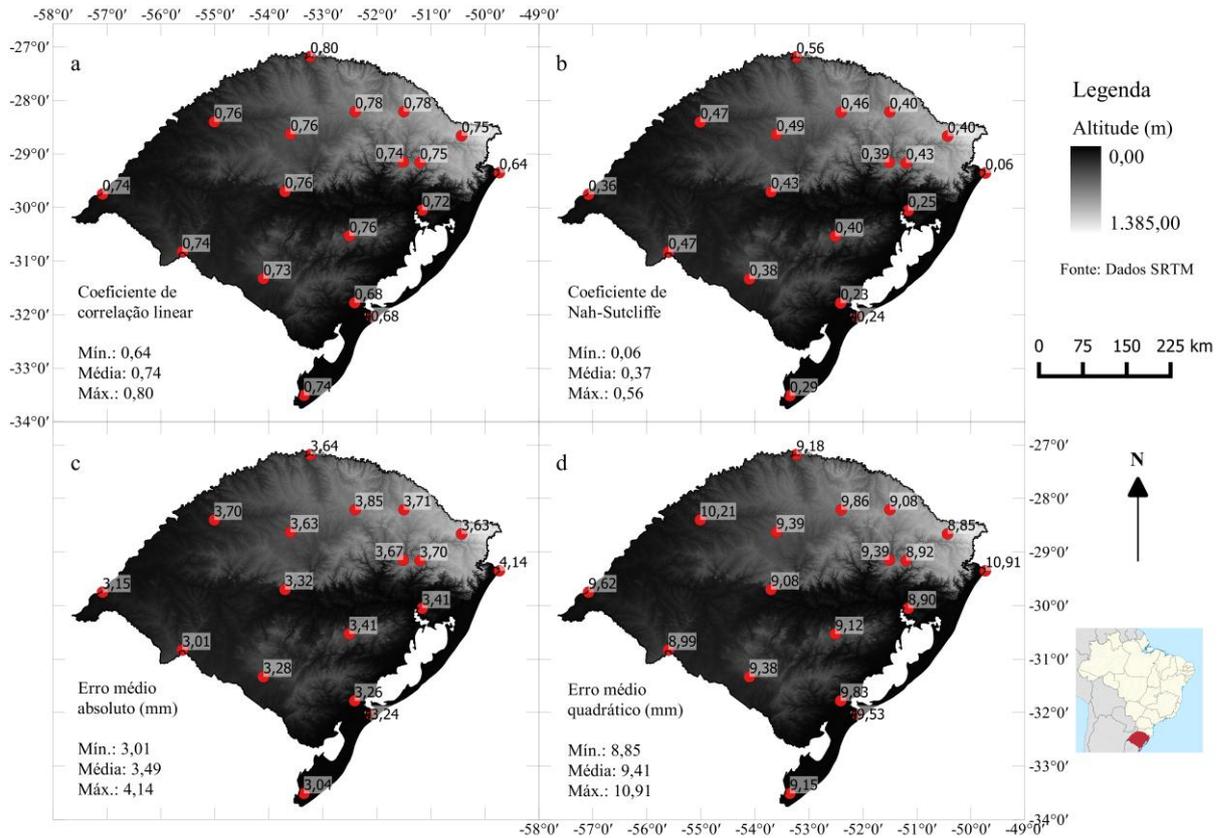


Figura 23 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries diárias da análise ponto a ponto.

Comparando os valores de coeficiente de correlação com os obtidos pela metodologia pixel a ponto, é possível afirmar que, de modo geral, houve melhora dos resultados, principalmente nos oriundos das análises diárias.

Assim como o coeficiente de correlação, o NS e o EQM também apresentaram melhoras nos resultados se comparados aos valores obtidos na análise pixel a ponto. O coeficiente NS resultante da análise diária (Figura 23b) apresentou valor médio de 0,37, indicando um desempenho razoável por parte das estimativas. Os resultados quinzenais (Figura 24b) e mensais (Figura 25b) apresentaram valores médios de NS iguais a 0,60 e 0,77, respectivamente.

Localidades situadas ao leste do RS apresentaram pior valores de NS, como Pelotas, Rio Grande, Torres, Santa Vitória do Palmar e Porto Alegre. Exemplos como São Luiz Gonzaga, Iraí e Passo Fundo apresentaram excelentes resultados de coeficiente de correlação e NS.

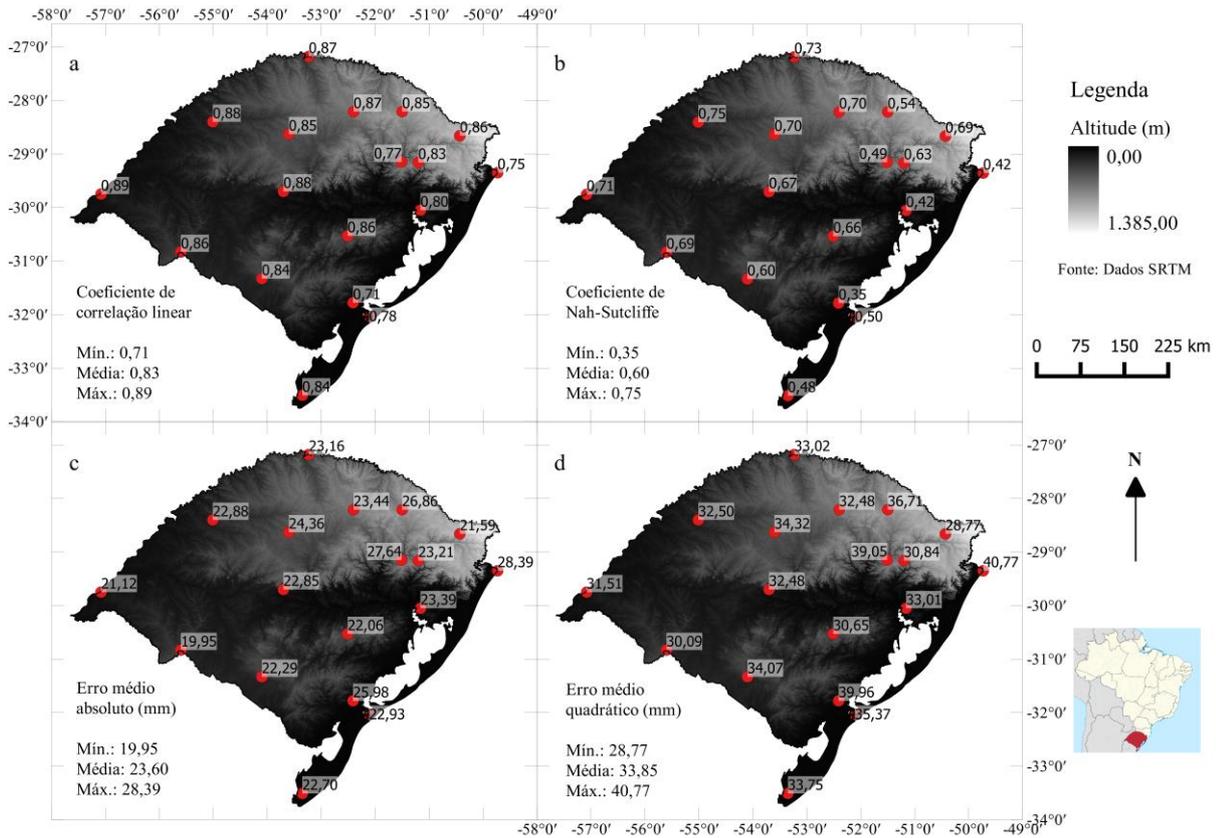


Figura 24 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries quinzenais da análise ponto a ponto.

O EMA, variou entre 3,01 mm a 4,14 mm, com média de 3,62 mm, para dados diários (Figura 23c). Pode-se observar que não há grande divergência entre os valores de EMA diário, quinzenal (Figura 24c) e mensal (Figura 25c) entre as localidades estudadas, com exceção de alguns pontos que se destacaram.

O EQM relativo diário (Figura 23d) teve pouca alteração em relação a metodologia anterior, sendo que em alguns casos até houve o aumento do EQM quando utilizados produtos TRMM interpolados. O EQM quinzenal (Figura 24d) médio foi de aproximadamente 33,85 mm, atingindo valor máximo de 40,77 na localidade de Torres. Já, o EQM mensal (Figura 25d) apresentou valor médio de 37,29 mm, com pior resultado em Lagoa Vermelha (51,88 mm) e melhor valor em Bom Jesus (28,61 mm) Assim como a maior parte das estatísticas, o EQM apresentou piores valores nas localidades próximas a região litorânea do Estado.

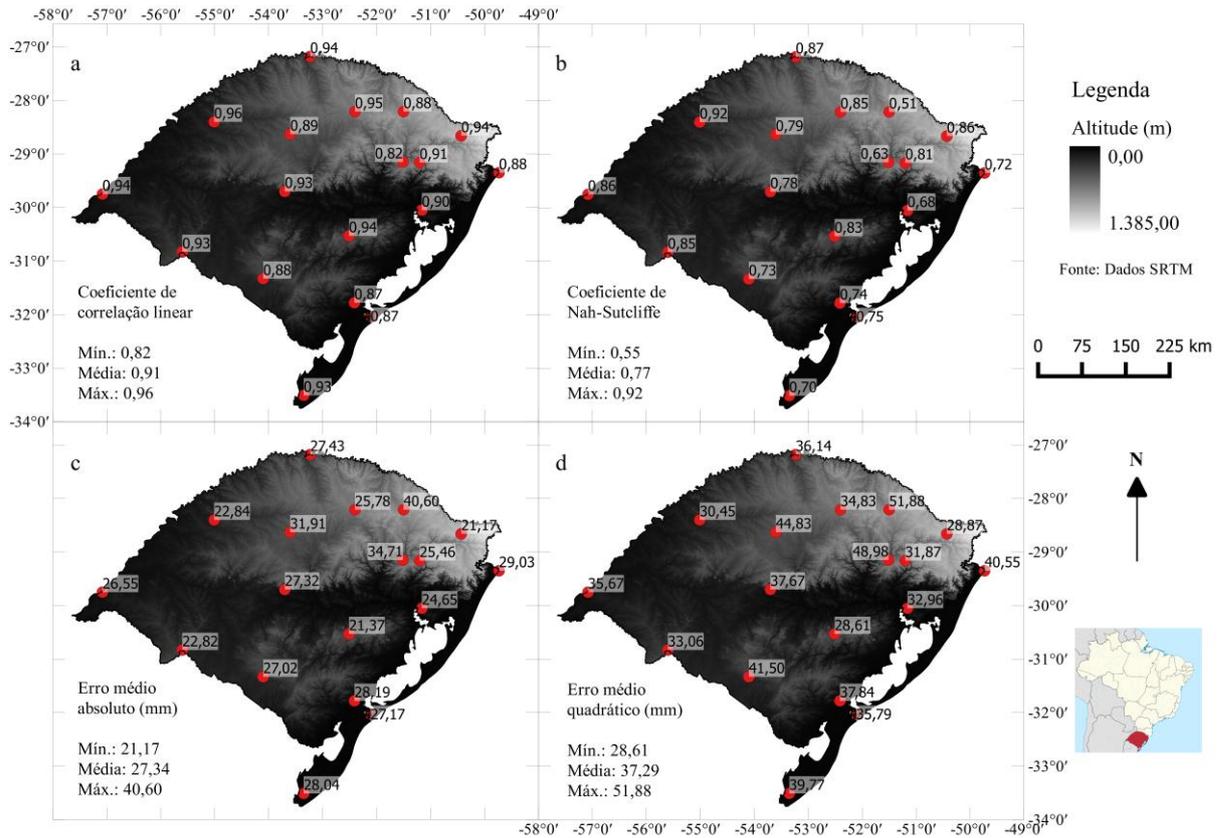


Figura 25 – Coeficiente de correlação linear (a), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (b), Erro médio absoluto (c) e Erro médio quadrático (d) para séries mensais da análise ponto a ponto.

### 4.3 Comparação espacial (pixel a pixel)

A comparação pixel a pixel, por sua vez, refere-se a comparação entre estimativas dos pixels e dados observados interpolados para uma malha com as mesmas dimensões da grade gerada pelo satélite. Da mesma forma que na comparação pixel a ponto e ponto a ponto, as avaliações por índices de desempenho e pelas outras estatísticas foram discutidas separadamente.

#### 4.3.1 Avaliação por índices de desempenho

De maneira geral, os índices de desempenho calculados na metodologia pixel a pixel apresentaram valores mínimos e médios inferiores aos obtidos por meio dos métodos Pixel a Ponto e Ponto a Ponto. As regiões do extremo sul e litorânea novamente se destacaram por apresentarem resultados inferiores. O índice PC, apresentado na Figura 26, teve média de 0,79, com variação de 0,62 a 0,87.

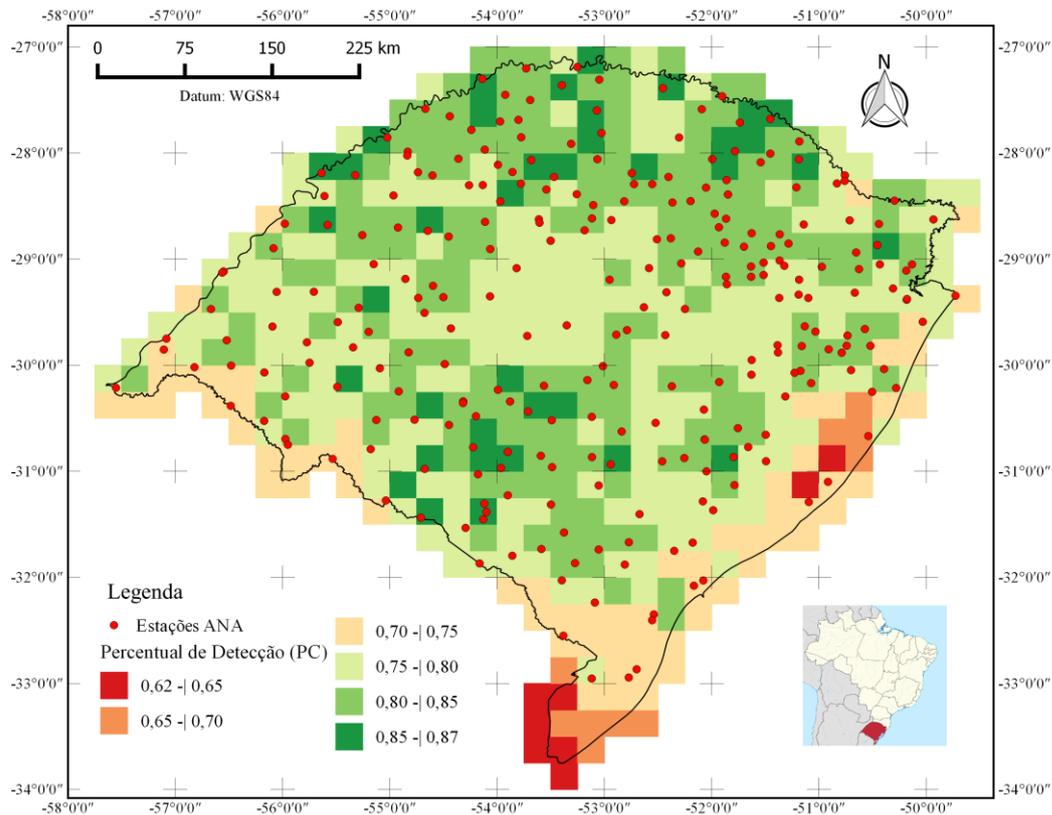


Figura 26 – Percentual de detecção (PC) para análise pixel a pixel

Contudo, as regiões Sul e Litorânea, onde se encontram os menores valores também são as que apresentam baixa densidade de postos pluviométricos, o que influencia no processo de interpolação dos dados observados para pixels, impactando diretamente nos resultados finais. Já os melhores percentuais de detecção situaram-se nas porções Norte, Noroeste e Sudoeste do Estado, localizadas em regiões de planaltos. Cerca de 47% dos pixels analisados apresentaram percentual de detecção maior ou igual a 0,80, indicando que em 80% do período as estimativas 3B42 são capazes de detectar de maneira correta a ocorrência ou não de chuva.

Os melhores resultados em relação aos acertos em dias de chuva (H) na porção Norte do Estado e também em alguns pixels sobre o Planalto Sul-Riograndense (área central), sendo que somente 34% do total de pixels foram acima de 0,60. A região Sul chegou a apresentar

valores menores que 0,35, ou seja, em 65% das ocorrências de chuva, as estimativas não detectam precipitação. Ao longo do Estado, o H variou de 0,33 a 0,79, com média de 0,57, conforme ilustra a Figura 27. Além disso, o valor máximo de H não diferenciou muito dos obtidos pelas metodologias Pixel a Ponto e Ponto a Ponto.

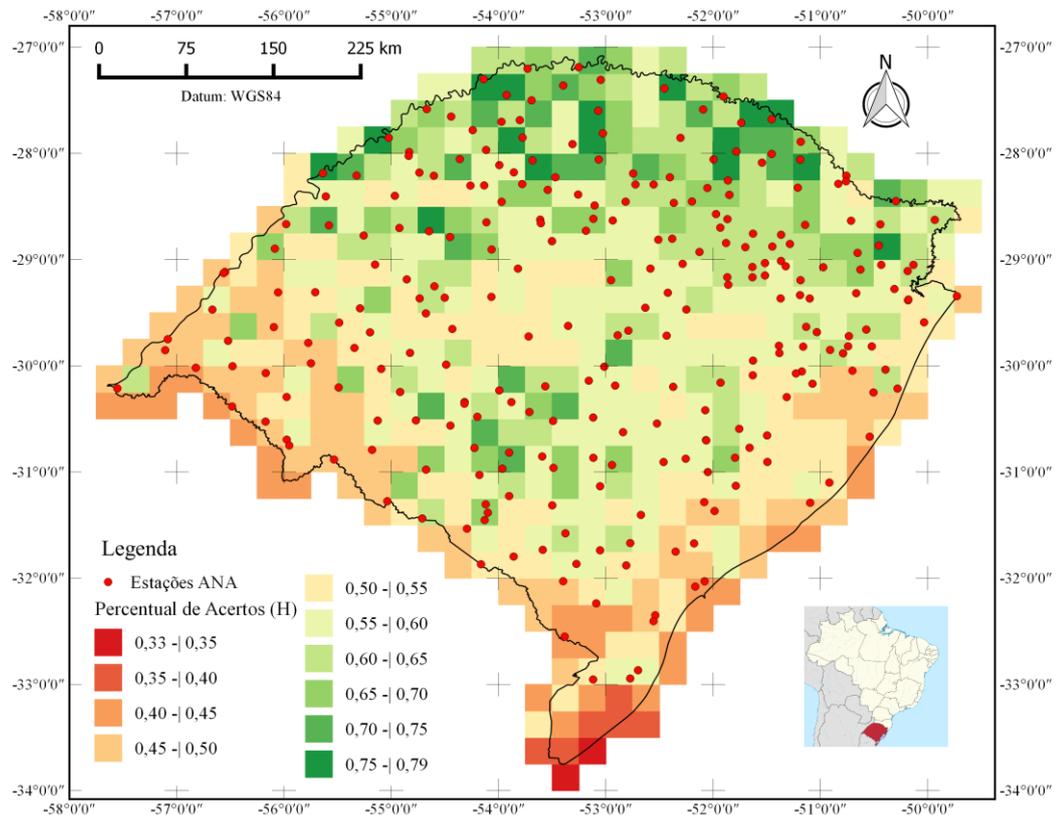


Figura 27 – Percentual de acertos (H) para análise pixel a pixel

Em 379 dos 491 pixels (aproximadamente 77%), o índice FAR, que refere-se aos falsos alertas para dias em que houveram precipitações estimadas, foi menor que 0,15, ou seja, nessas regiões apenas 15% ou menos das vezes em que a precipitação é estimada e não observada. É possível observar na Figura 28 que as regiões Norte e Nordeste apresentaram alguns casos com FAR maior que 0,38, embora tenham sido regiões nas quais obtiveram-se bons resultados nas demais estatísticas, o que leva a crer que, mesmo que a precipitação tenha ocorrido, a mesma não apresentou um volume considerável no momento da leitura dos dados no pluviômetro ou então que a distribuição da precipitação não tenha sido uniforme dentro do pixel, o que é uma consideração plausível, haja vista que é uma área em torno de 625 km<sup>2</sup>. Os valores de H e FAR foram muito próximos dos encontrados em Ringard et al. (2015), em um trabalho realizado na região dos escudos das Guianas.

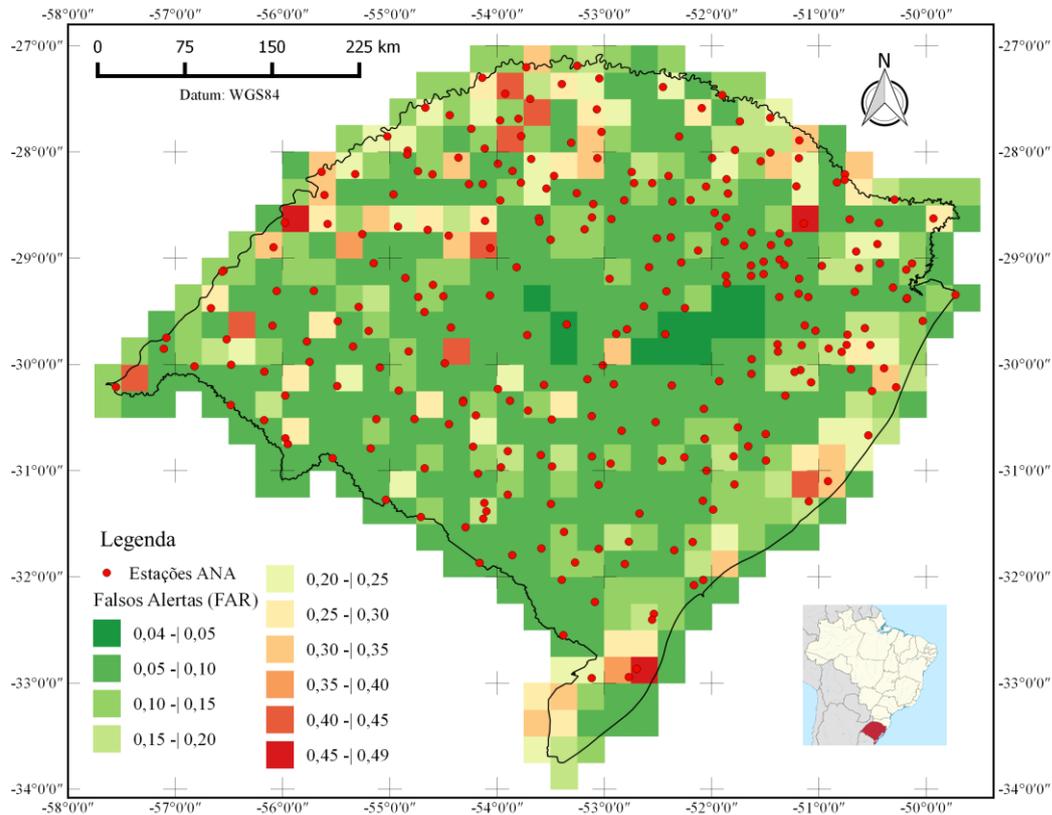


Figura 28 – Falsos alertas (FAR) para análise pixel a pixel.

O falso alarme F (Figura 29), que tem relação com dias em que não foi observada precipitação pluviométrica foi abaixo de 0,10 em quase todo o Estado (90% dos pixels), logo nessas regiões apenas 10% não é observada mas é estimada. Além disso, em média o índice de desempenho F no estado do Rio Grande do Sul foi 0,05. Assim pode-se inferir que na maior parte do RS as estimativas são capazes de detectar períodos de estiagem de forma eficiente. Contudo, na porção litorânea o F chegou a atingir 0,33, possivelmente em função da proximidade com o oceano. As regiões Norte, Noroeste e Sul também apresentaram alguns valores superiores a 0,10.

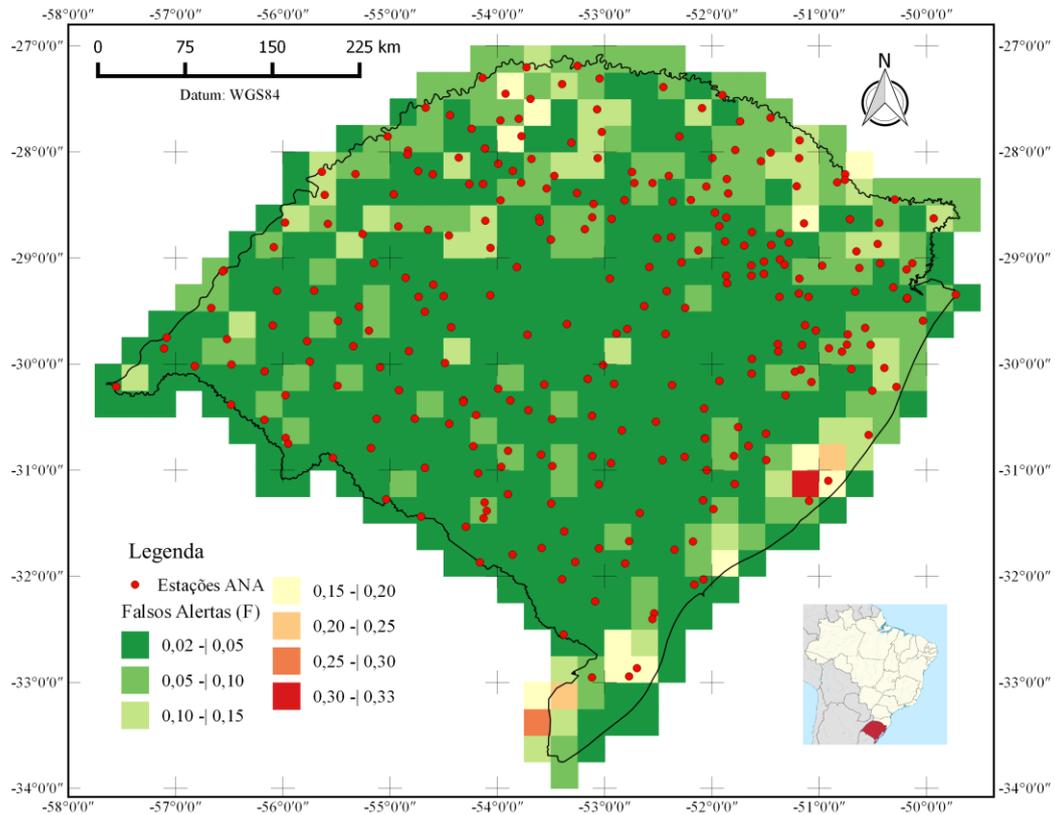


Figura 29 - Falsos alertas (F) para análise pixel a pixel.

O índice de sucesso crítico (CSI) apresentado na Figura 30 teve comportamento semelhante aos encontrados nas comparações Pixel a Ponto e Ponto a Ponto, haja vista que a região Sul, Oeste e Litorânea, sendo que os valores mínimos foram abaixo de 0,35 na porção do extremo Sul do Estado. Todavia, o CSI apresentou média de 0,56, com valores máximos superiores a 0,60, localizados na Região Norte e no Escudo Sul-Riograndense.

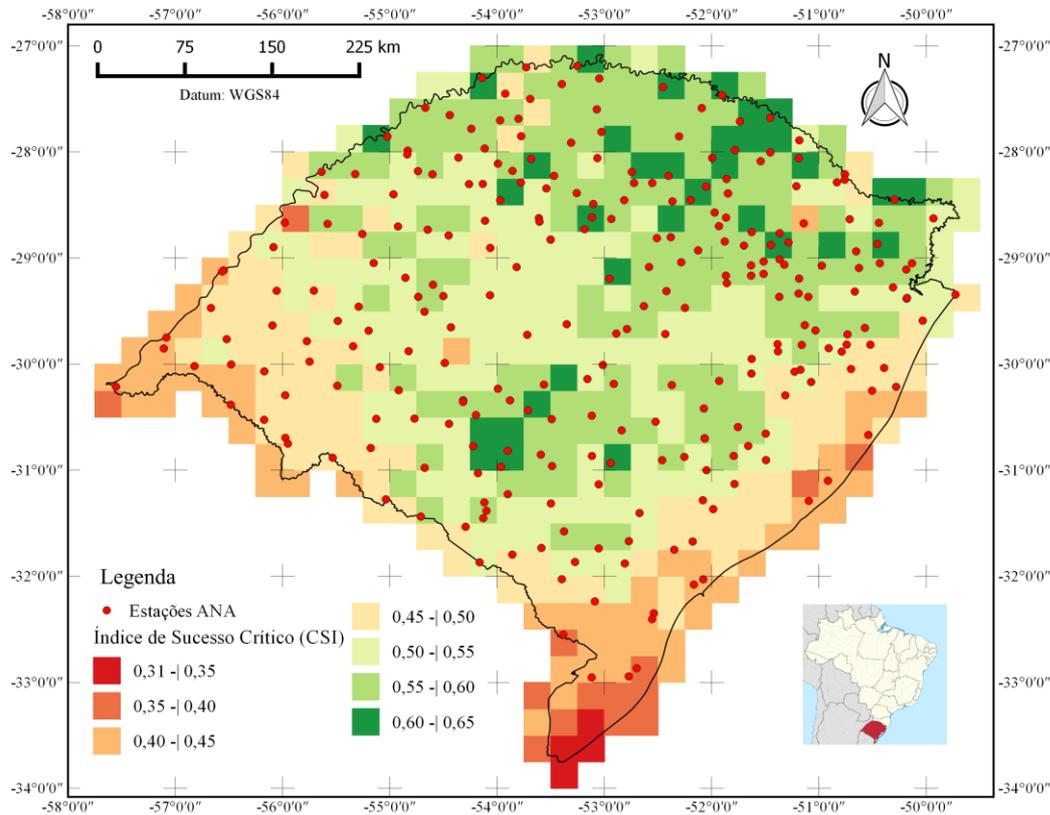


Figura 30 – Índice de sucesso crítico (CSI) para análise pixel a pixel.

Valores de CSI iguais ou superiores a 0,50 são encontrados em mais de 65% dos pixels analisados, distribuídos na região Sudoeste, Central, Norte, Nordeste e Noroeste, o que permite indicar que nessas áreas os produtos 3B42 estimaram de forma correta 50% ou mais dos dias em que a precipitação pluviométrica é observada, sem levar em conta os acertos em dias secos. Assim como em outras estatísticas, o CSI teve melhor performance em regiões de planalto, ou seja com altitudes elevadas. Os valores dos índices PC, H, FAR e CSI foram semelhantes aos apresentados em Fensterseifer et al. (2016).

O índice de precisão de estimativa ao acaso HSS (Figura 31) e o índice de separação de acertos e falsos alertas PSS (Figura 32) se comportaram de forma semelhante, tanto pelos valores máximos e mínimos atingidos, quanto pelas regionalizações. Os valores mínimos, médios e máximos foram, respectivamente, 0,69, 0,54 e 0,23 para o HSS e 0,69, 0,52 e 0,23 para o PSS. Em ambos os casos, os melhores valores situaram-se nas regiões de planalto, enquanto os valores mais baixos ocorreram nas áreas que já vinham apresentando baixa performance em relação aos outros índices de desempenho, são elas: região litorânea, região Sul e porção Oeste do RS.

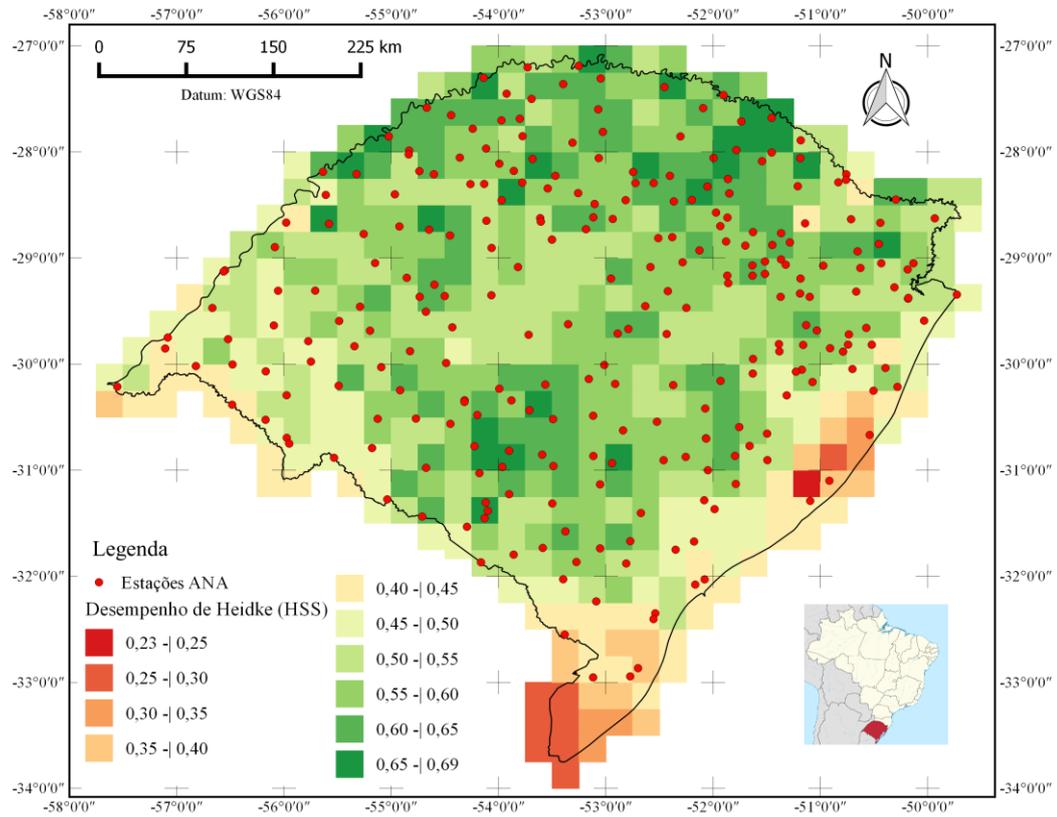


Figura 31 – Desempenho de Heidke (HSS) para análise pixel a pixel.

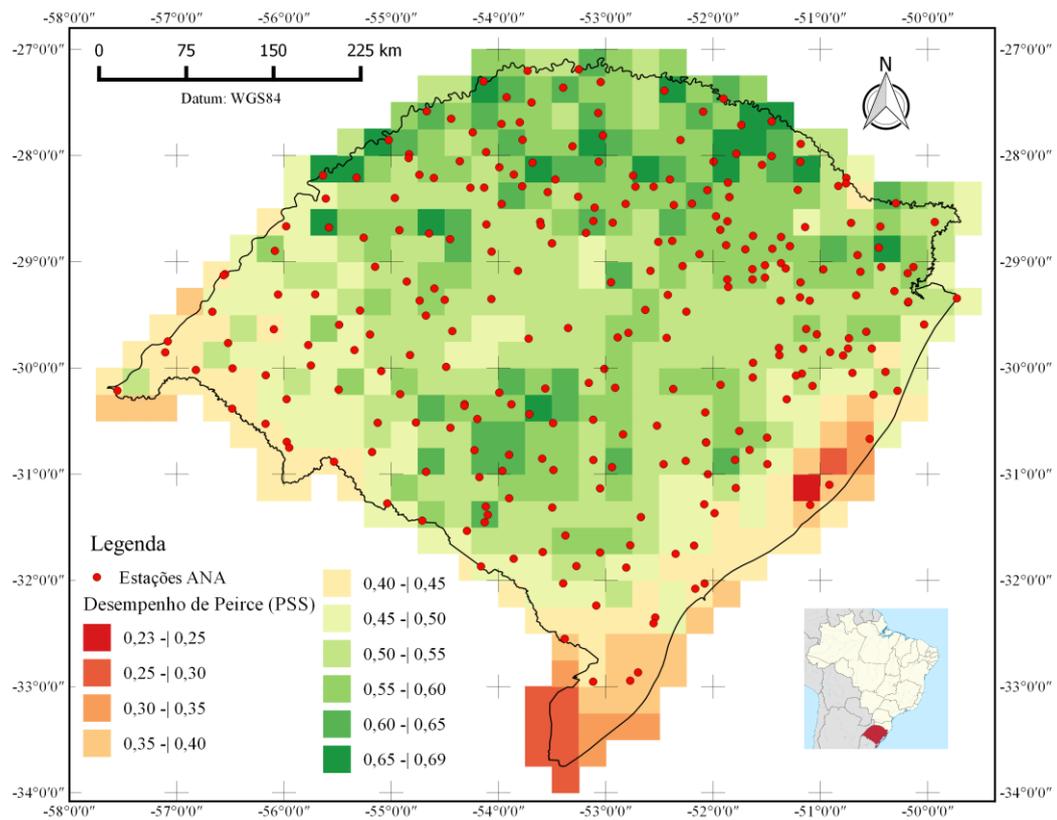


Figura 32 – Desempenho de Peirce (PSS) para análise pixel a pixel.

O bias (Figura 33), por sua vez, teve variação bem maior do que a obtida nas metodologias anteriores, sendo que o índice teve valores de mínimo e máximo igual a, respectivamente, 0,38 e 1,37.

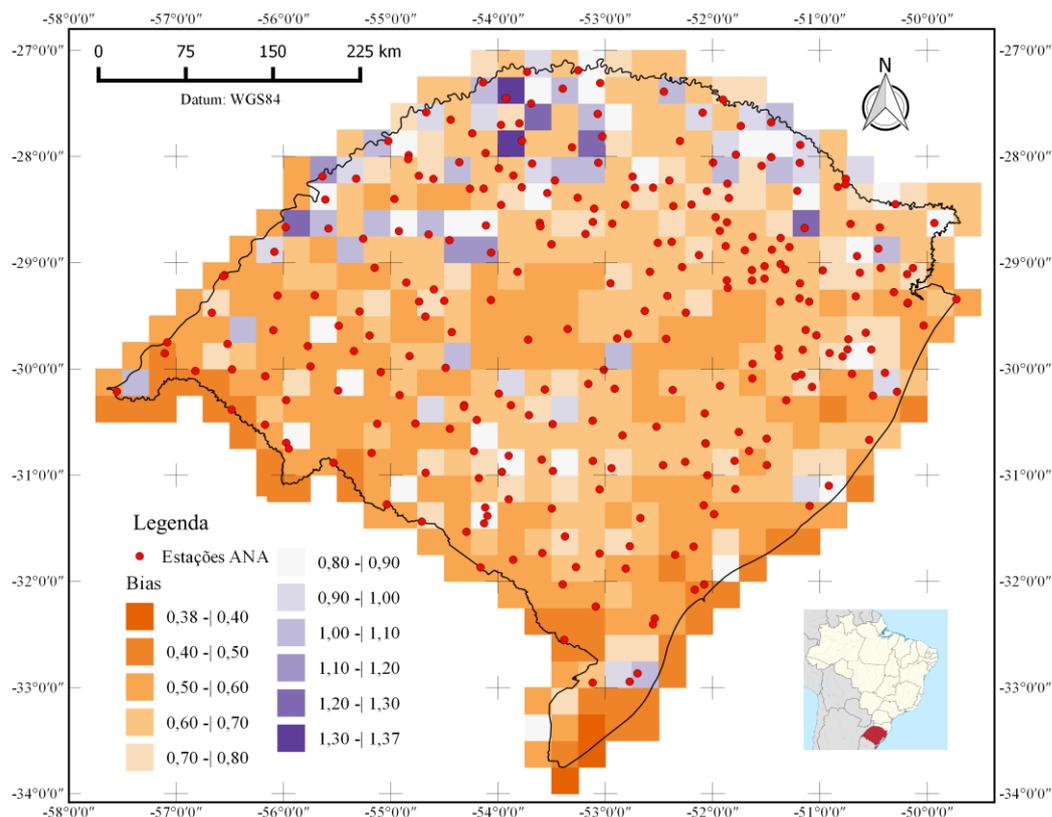


Figura 33 – Bias para análise pixel a pixel.

#### 4.3.2 Avaliação por outras estatísticas

Em relação aos 491 pixels considerados, assim como nas metodologias de comparação empregadas anteriormente, os resultados melhoraram a medida em que os dados foram analisados em somatórios de 15 e 30 dias. Ao longo do Estado, o coeficiente de correlação linear diário, indicado na Figura 34, apresentou média 0,69, sendo que em algumas regiões atingiram 0,40, como o extremo sul e a porção oeste do RS.

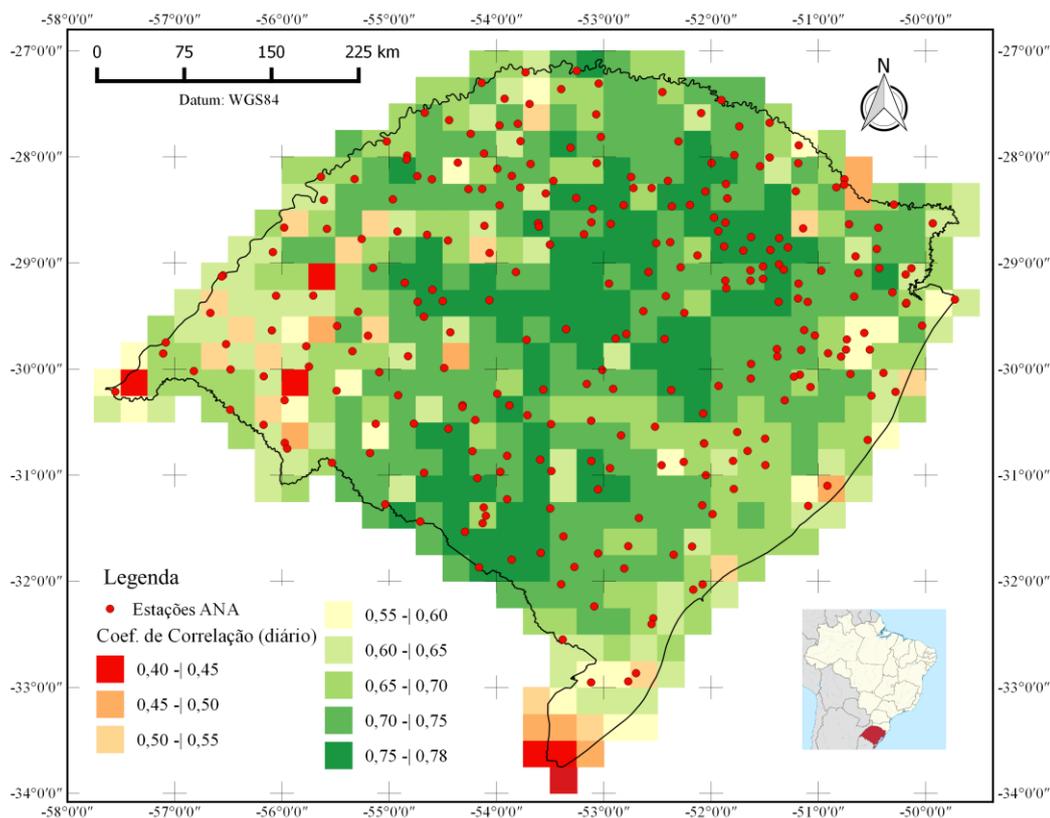


Figura 34 – Coeficiente de correlação linear com séries diárias para análise pixel a pixel.

Os valores máximos do coeficiente de correlação diário foram identificados ao longo de toda a área de estudo, sobretudo numa faixa do sudoeste ao nordeste, passando pela região central, onde a estatística chega a 0,78. Somente em 3% dos casos, o resultado do coeficiente de correlação diário foi inferior a 0,50, enquanto em quase 18% do pixels os resultados passaram de 0,75. Os resultados condizem com os encontrados em Buarque et al. (2011) na região do rio Amazonas.

Os resultados referentes ao cálculo do coeficiente de correlação para somatórios quinzenais (Figura 35), por sua vez, já permitiu observar algumas discrepâncias entre regiões do Estado.

Por exemplo, a região do extremo Sul do RS continuou a apresentar valores ruins, abaixo de 0,50, o que pode ser decorrente da baixa densidade de estações pluviométricas e/ou da grade parcela de umidade oriunda do Oceano Atlântico. As regiões Litorânea e Norte também se distinguiram por apresentar resultados do coeficiente de correlação quinzenal ligeiramente abaixo dos identificados nas porções Central, Oeste e Noroeste do RS, sendo que nessas três últimas a maioria dos pixels apresentaram resultados maiores que 0,85. Nessa análise quinzenal,

alguns pixels chegaram a atingir correlação maior que 0,90. De forma geral, em aproximadamente 84% dos casos, as correlações quinzenais se igualaram ou superaram 0,80, sendo que a média de todos os pixels foi de 0,83.

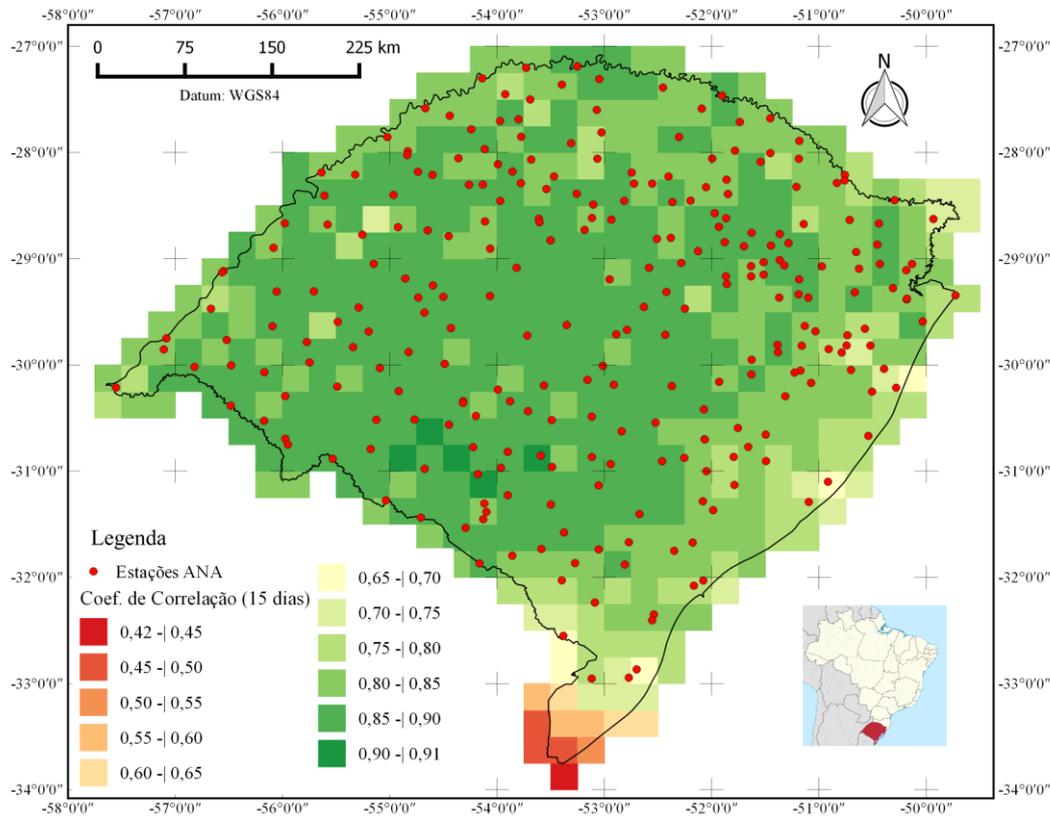


Figura 35 – Coeficiente de correlação linear com séries de somatórios de 15 dias para análise pixel a pixel.

Finalmente, os coeficientes de correlação linear calculados com somatórios de 30 dias (Figura 36) chegaram 0,94, sendo que em torno de 44% dos pixels os resultados foram acima ou igual a 0,90, localizados, em sua maioria, nas regiões Oeste, Noroeste, Central e Sudoeste do RS.

A análise regional foi semelhante a discutida nas correlações quinzenais, ou seja, a região sul apresentando os piores valores (ainda abaixo de 0,50) e a região Litorânea do Estado com correlações um pouco abaixo de 0,87, valor correspondente a média dos coeficientes de correlação de 30 dias dos 491 pixels.

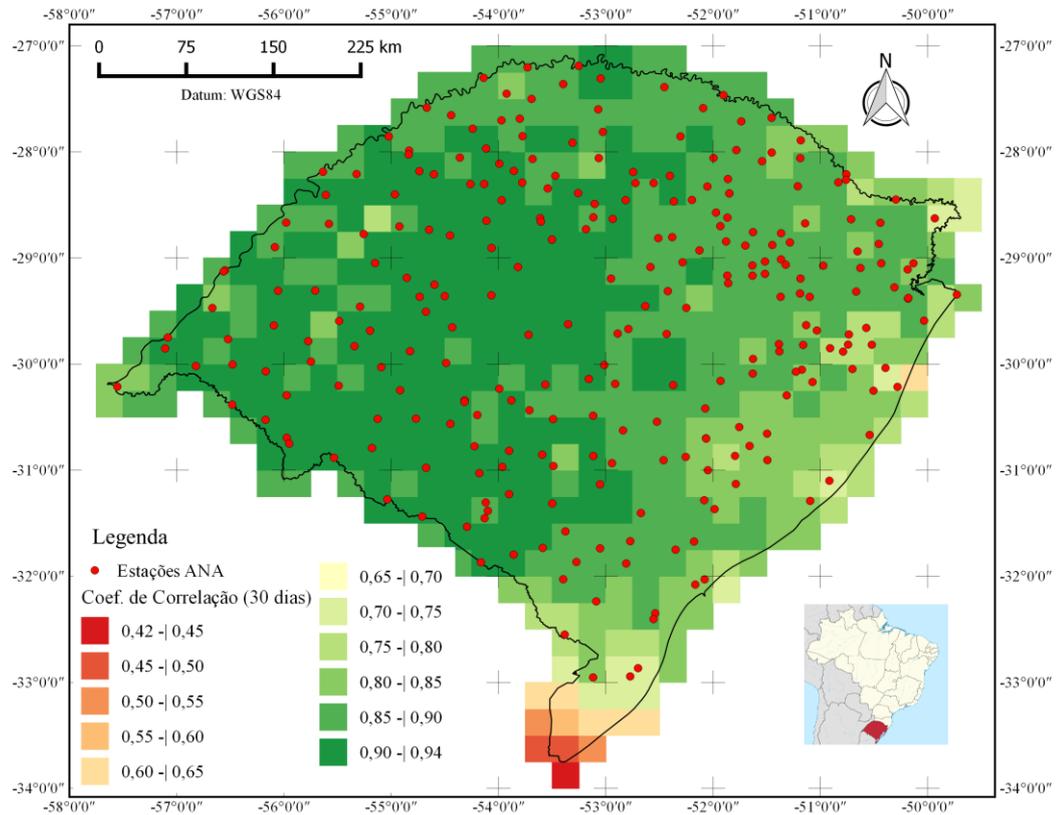


Figura 36 – Coeficiente de correlação linear com séries de somatórios de 30 dias para análise pixel a pixel.

Os valores de coeficiente de correlação apresentados estão de acordo com os encontrados em outras pesquisas envolvendo estimativas mensais do TRMM, como em Viana (2009) para o Sul do Brasil, Silva et al. (2012) que, num trabalho realizado no Rio Grande do Norte, também identificou decréscimo do coeficiente de correlação em pixels localizados na região Litorânea. Além de As-Syakur et al. (2011) num trabalho na região da Indonésia, como Fensterseifer (2013), num estudo na bacia hidrográfica do Alto Jacuí – RS, Pereira et al. (2013), que analisou de forma separada todas as regiões do Brasil e Cai et al. (2015), num trabalho realizado na China.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe proveniente da comparação dos dados diários (Figura 37) apresentou melhores resultados na região norte e noroeste do Estado, além de que somente 119 dos 491 pixels (aproximadamente 24%) atingiram valores positivos.

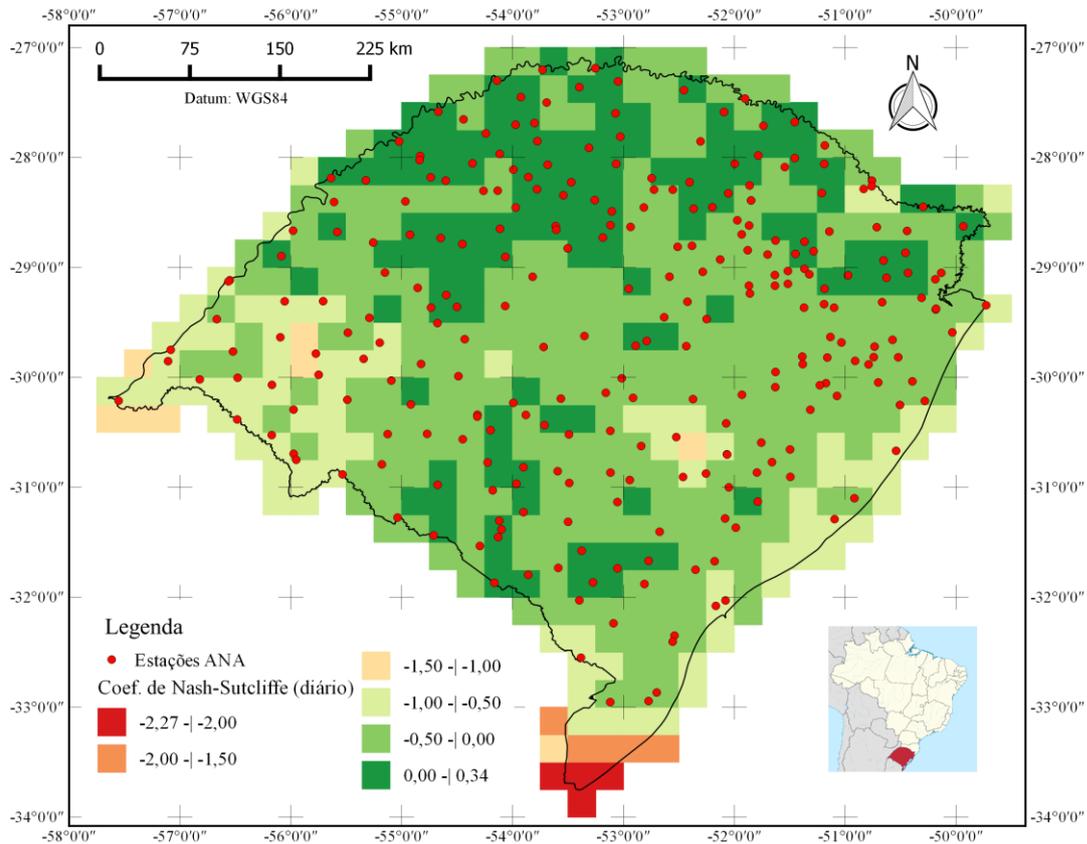


Figura 37 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries diárias para análise pixel a pixel.

Houve grande variância entre os valores de NS, haja vista a média dos pixels igual a -0,25 e o desvio padrão de 0,38. Logo, tal estatística indica a falta de eficiência que as estimativas 3B42 tem em representar os dados observados em algumas regiões, seja pela escassez de dados de monitoramento de qualidade ou incapacidade de representar sistemas ocorrência de chuva que atuam no Estado.

Entretanto, a análise quinzenal dos coeficientes NS acusa que em torno de 44% dos pixels foram acima de 0,50 enquanto 385 pixels (78%) apresentaram NS diário igual ou superior a 0,36, o que permite inferir que são resultados razoáveis, uma vez que estão dentro do intervalo de 0,36 e 0,75. A mesma regionalização discutidas a respeito do coeficiente de correlação linear já fica bem mais clara no mapa referente ao NS quinzenal, representado pela Figura 38.

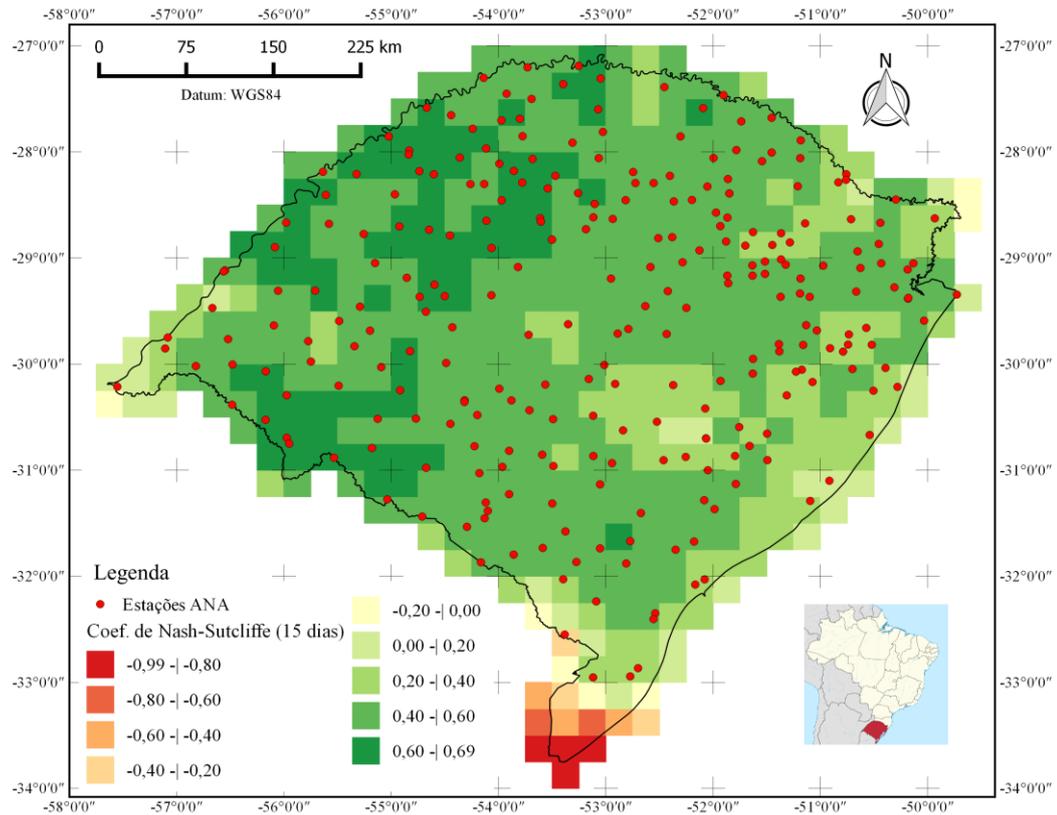


Figura 38 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries de somatórios de 15 dias para análise pixel a pixel.

A análise do NS com somatórios de 30 dias (Figura 39) destaca ainda mais os bons resultados encontrados nas regiões oeste, noroeste e sudoeste do RS onde os valores chegaram até 0,81 enquanto a média no Estado foi de 0,52. Cerca de 85% dos casos apresentaram valores superiores a 0,36. A região sul novamente se destacou por apresentar os piores resultados. Além disso, a região localizada entre as latitudes  $-30^{\circ}$  e  $-31^{\circ}$  Sul e longitudes  $-52^{\circ}$  e  $-53^{\circ}$  também apresentaram valores abaixo dos encontrados nos pixels ao redor, possivelmente em função da baixa densidade de estações pluviométricas e a complexidade topográfica que a região oferece, uma vez que a área abrange o Escudo Sul-Riograndense.

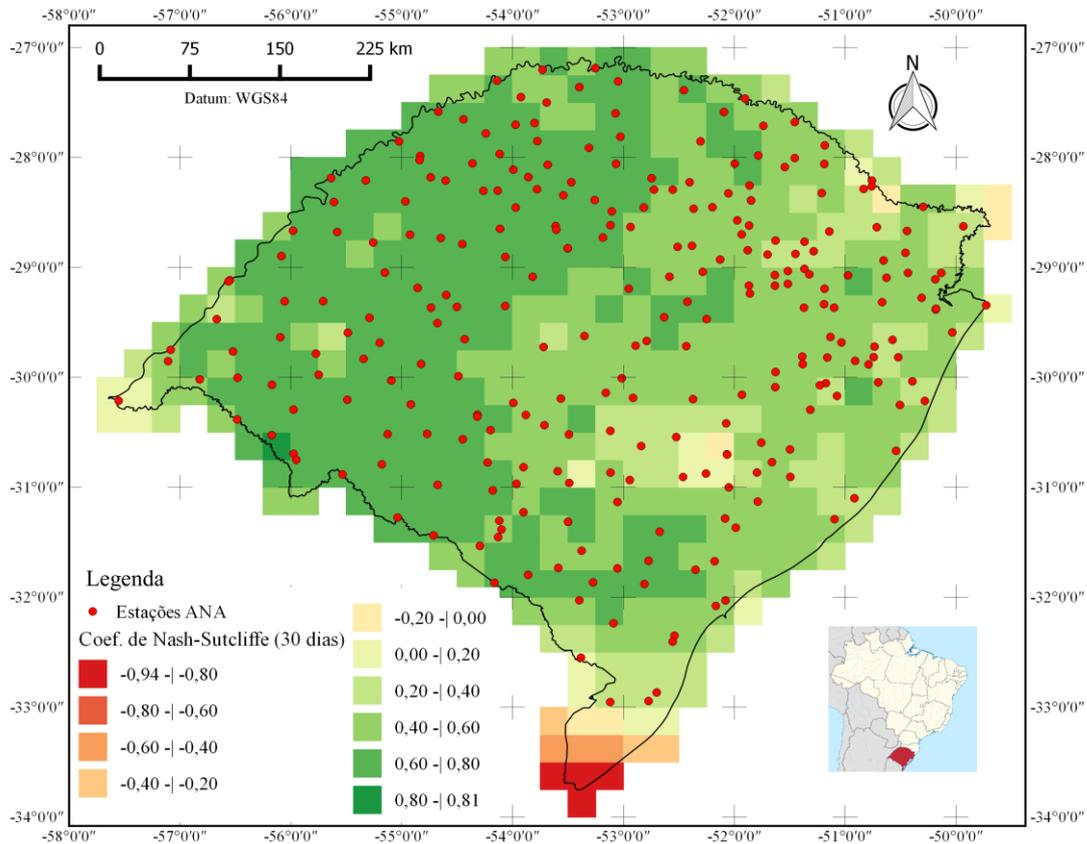


Figura 39 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries de somatórios de 30 dias para análise pixel a pixel.

O EMA diário (Figura 40) teve média de 3,97 mm, sendo os menores valores foram identificados, principalmente, na região do Escudo Sul-Riograndense, onde chegou até 3,2 mm. Em alguns pixels da região Nordeste e Noroeste, o EMA atingiu valores superiores a 5,3 mm.

Na análise do EMA quinzenal (Figura 41), a regionalização já fica mais evidente, com bons valores na parte Sudoeste e Nordeste, chegando a erros médios absolutos menores que 20 mm, enquanto a região Sul do Estado apresenta os maiores valores de EMA, como nas demais estatísticas analisadas, com valores superiores a 35 mm. Em média o EMA quinzenal foi de 24,85 mm.

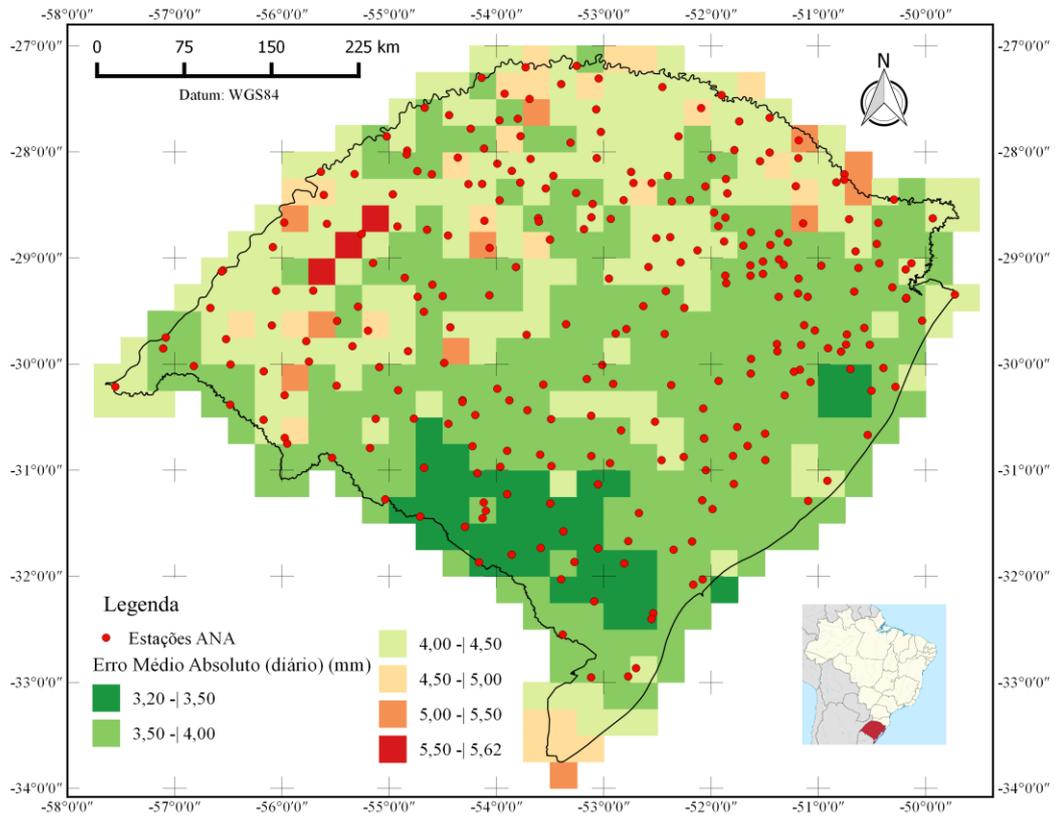


Figura 40 – Erro médio absoluto com séries diárias para análise pixel a pixel.

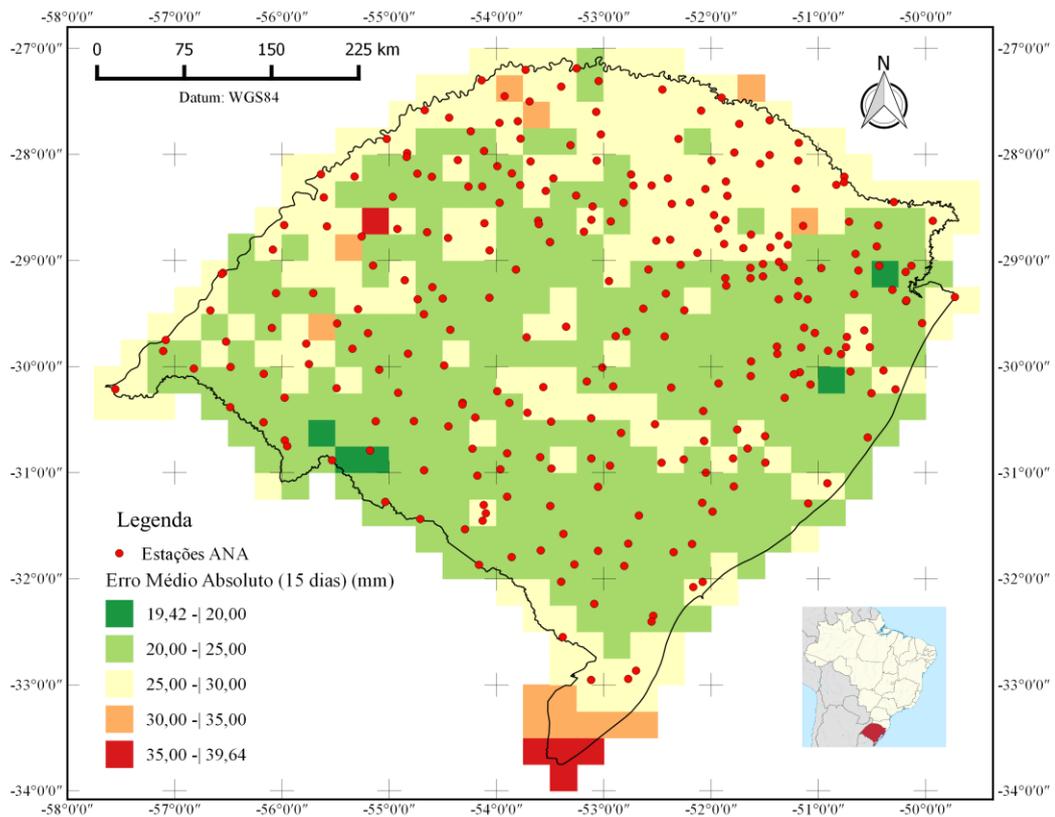


Figura 41 – Erro médio absoluto com séries de somatórios de 15 dias para análise pixel a pixel.

Por fim, o EMA calculado a partir do acumulado de 30 dias (Figura 42) atingiu máximos superiores a 55 mm e mínimos inferiores a 25 mm, com média igual a 34,97 mm. O EMA de 30 dias apresentou o mesmo comportamento do EMA de 15 dias. Contudo, houve melhora dos resultados na região do Noroeste do Estado, a qual apresenta bons resultados perante outras estatísticas discutidas nesse trabalho. Os resultados obtidos para EMA foram equivalentes aos apresentado em Melo et al. (2015) para região Sul do Brasil.

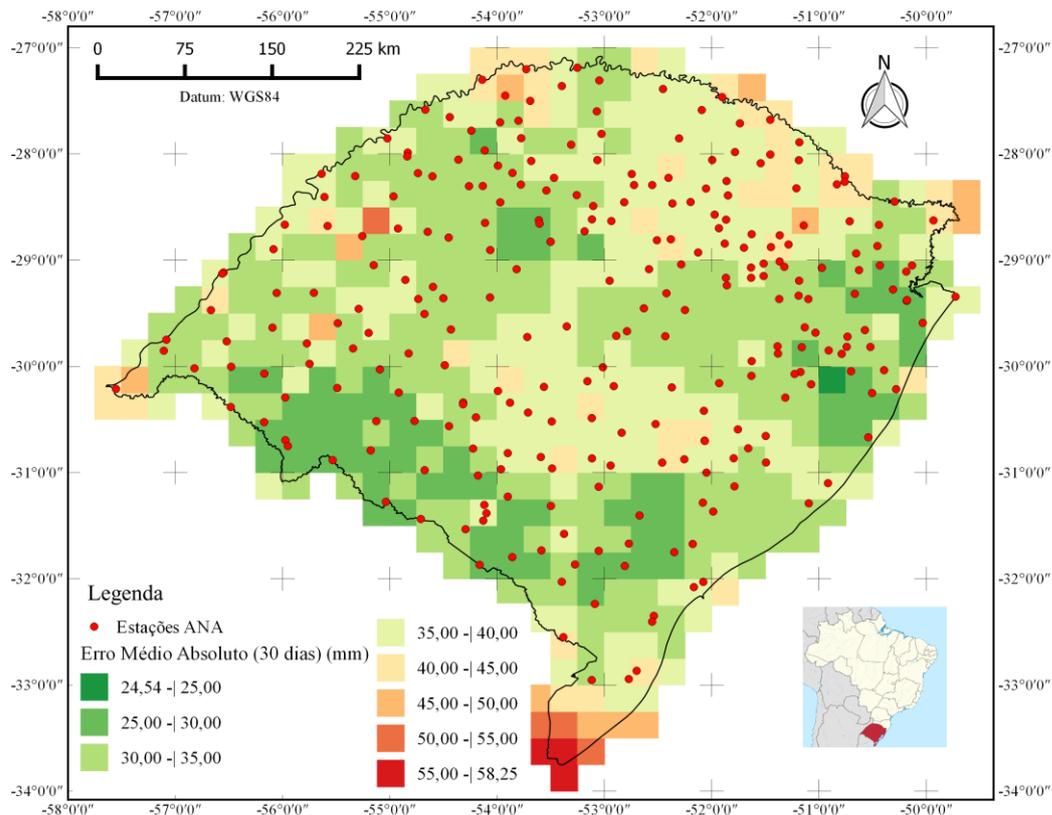


Figura 42 – Erro médio absoluto com séries de somatórios de 30 dias para análise pixel a pixel.

O EQM com dados diários (Figura 43) apresentou valores superiores a 8,13 mm, com média de 10,26 mm e máximo de 14,65 mm, valores próximos dos obtidos em Ringard et al. (2015). O EQM calculado com acumulados quinzenais, especializado na Figura 44, apresentou média de 34,97 mm, com valores mínimos abaixo de 35 mm na metade Norte do Estado. Em contrapartida a região do extremo Oeste e extremo Sul apresentaram pixels em que o EQM quinzenal foi superior a 45 mm.

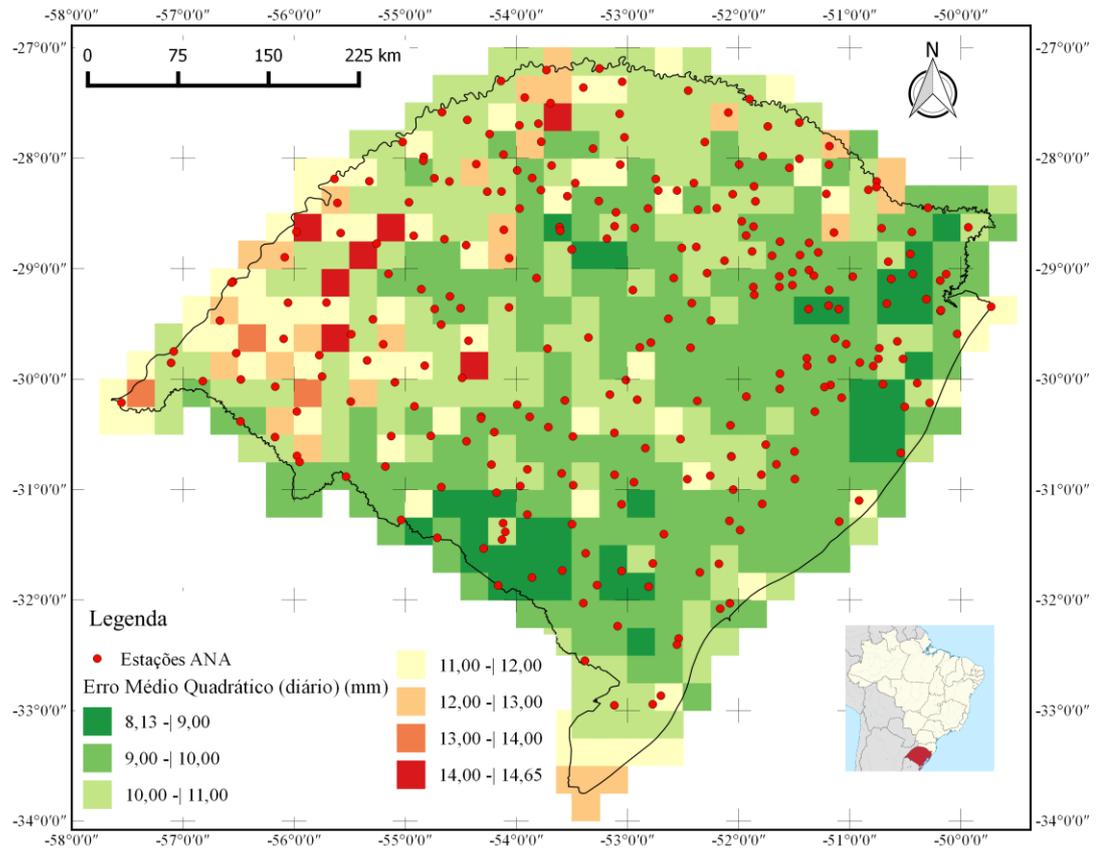


Figura 43 – Erro médio quadrático com séries diárias para análise pixel a pixel.

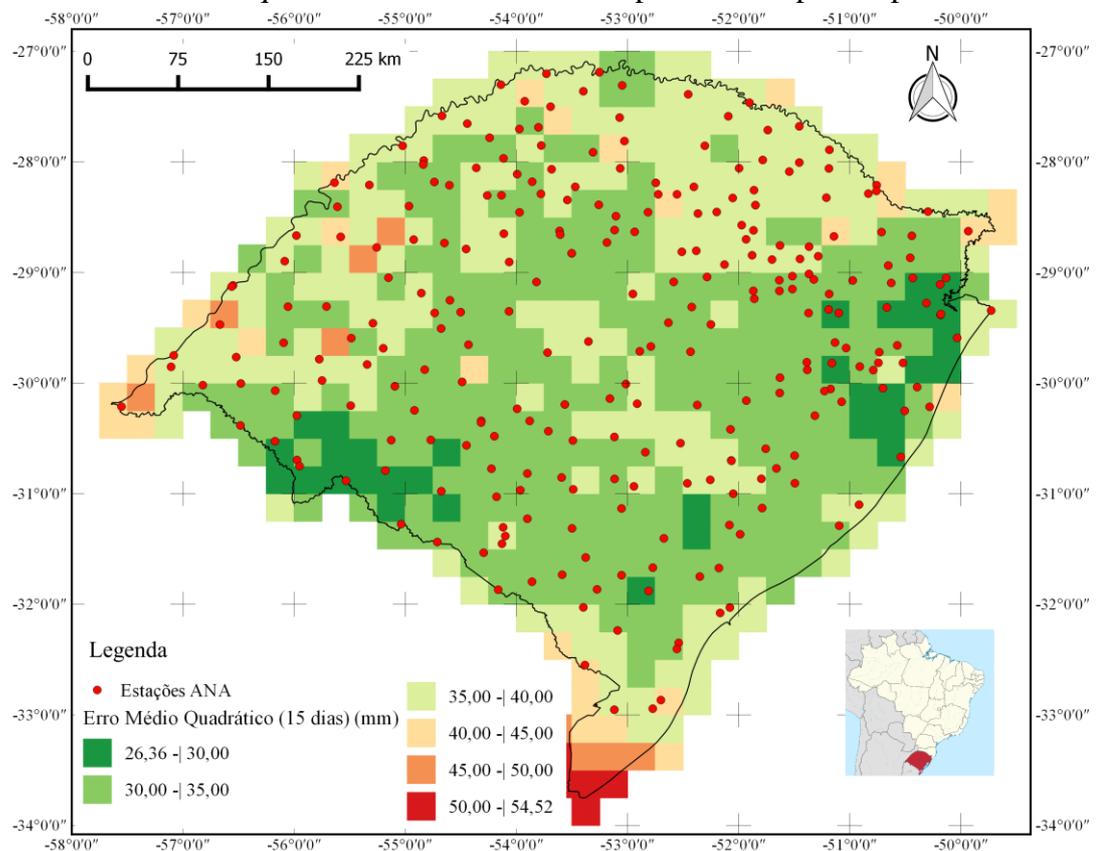


Figura 44 – Erro médio quadrático com séries de somatórios de 15 dias para análise pixel a pixel.

Finalmente, como apresentado na Figura 45, o EQM calculado para acumulados de 30 dias acusou maiores erros nas regiões Sul e Oeste, onde chegou a 78,79 mm, enquanto os melhores resultados atingiram 32,85 mm sobretudo nas regiões Nordeste, e Sudoeste. Em média, o EQM de 30 dias foi de 47,04 mm.

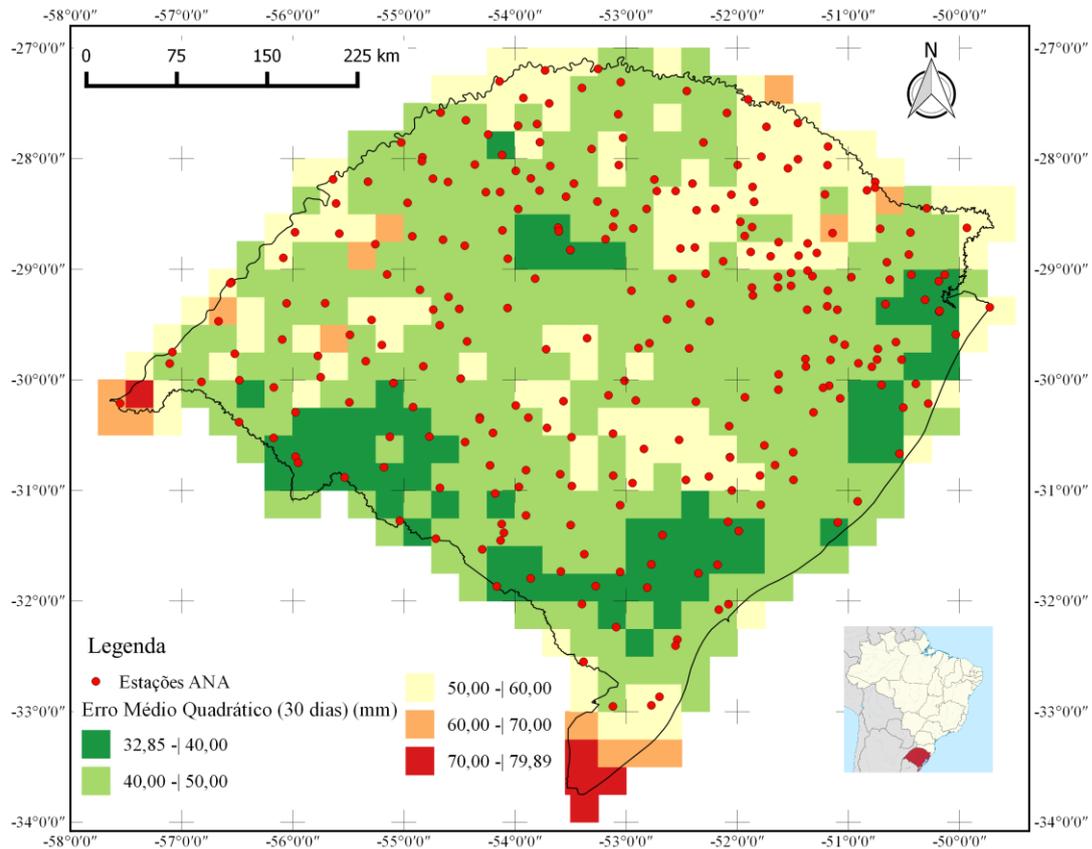


Figura 45 – Erro médio quadrático com séries de somatórios de 30 dias para análise pixel a pixel.

O EQM fornece um meio de escolher o melhor estimador: um EQM mínimo frequentemente, mas nem sempre, indica a variação mínima e, portanto, um bom estimador. Um dos problemas é que o EQM coloca mais peso em grandes erros do que em pequenos enfatizando, assim, dados discrepantes com relação a mediana de dados de amostra.

O viés relativo (Figura 46) indicou que as estimativas superestimaram os valores observados, em maior magnitude, principalmente na região do escudo sulriograndense. Nas regiões Sudoeste, Noroeste e litorânea, os valores de viés ficaram abaixo de 10%. Nota-se houveram subestimativas, principalmente na região do extremo Sul, onde a densidade de

estações pluviométricas é baixa. A maioria dos pixels resultou em viés entre 10% e 20%, sendo que a média foi de 11,7%.

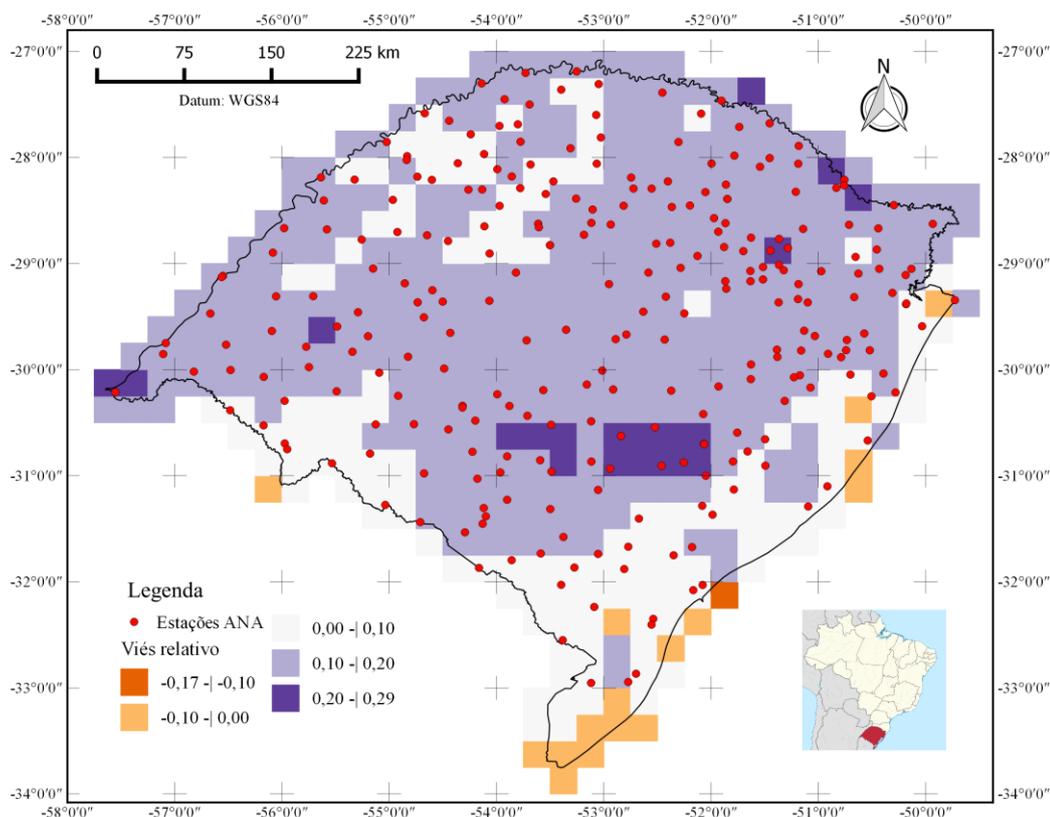


Figura 46 – Viés relativo para análise pixel a pixel.

Em termos de EMA e EQM, os resultados encontrados no presente trabalho com a metodologia de comparação Pixel a Pixel estão em concordância com outros estudos, como Viana (2009), numa análise na região Sul do Brasil, Fensterseifer (2013), num estudo da qualidade das estimativas de satélite na bacia do Alto Jacuí – RS, Pereira et al. (2013), que apresentaram dados específicos da região Sul do Brasil e Cai et al. (2015), que apresentam erros muito próximos para região da China. Além de um estudo na Península Ibérica realizado por Kenaway et al. (2015) e de outro trabalho desenvolvido na Grécia por Nastos et al. (2015). Em relação aos resultados referentes a viés, coeficiente de correlação, erro médio quadrático e os índices de percentual de acertos e falsos alertas, pode-se indicar que foram concordantes com os dados apresentados em Ringard et al. (2015).

## 4.5 Comparação por Sub-pixels

Assim como nas demais metodologias empregadas, os resultados foram discutidos separadamente (índices de desempenho e demais estatísticas). De modo geral, os valores obtidos por essa metodologia foram muito próximos dos obtidos por meio da análise Pixel a Pixel.

### 4.5.1 Avaliação por índices de desempenho

O índice PC variou de 0,63 a 0,86, com média de 0,76. Assim como na análise Pixel a Pixel, os melhores resultados foram encontrados nas regiões Norte, Noroeste e Sudoeste do Estado, enquanto as regiões Litorânea e extremo Sul apresentaram os piores valores do índice. Nota-se, sobretudo, que a distribuição dos valores de PC na metodologia com Sub-pixels gerou um mapa com áreas mais homogêneas em termos de classes, em relação ao mapa apresentado na comparação Pixel a Pixel, como são os casos das regiões Oeste e Norte, por exemplo (Figura 47).

Já o Percentual de Acertos (H), teve o valor máximo igual a 0,71 (0,08 menor do que o encontrado em Pixel a Pixel), com valor mínimo igual a 0,33 e média 0,56. Assim como o PC, a distribuição do H se deu da mesma forma ao apresentado em Pixel a Pixel, como é possível notar na Figura 48, entretanto de maneira mais homogeneia. Em 31% dos pixels analisados (maioria localizados nas regiões de Planalto), o H foi superior a 0,60, indicando que nesses casos, a chuva observada é estimada de maneira correta em, no mínimo, 60% dos casos.

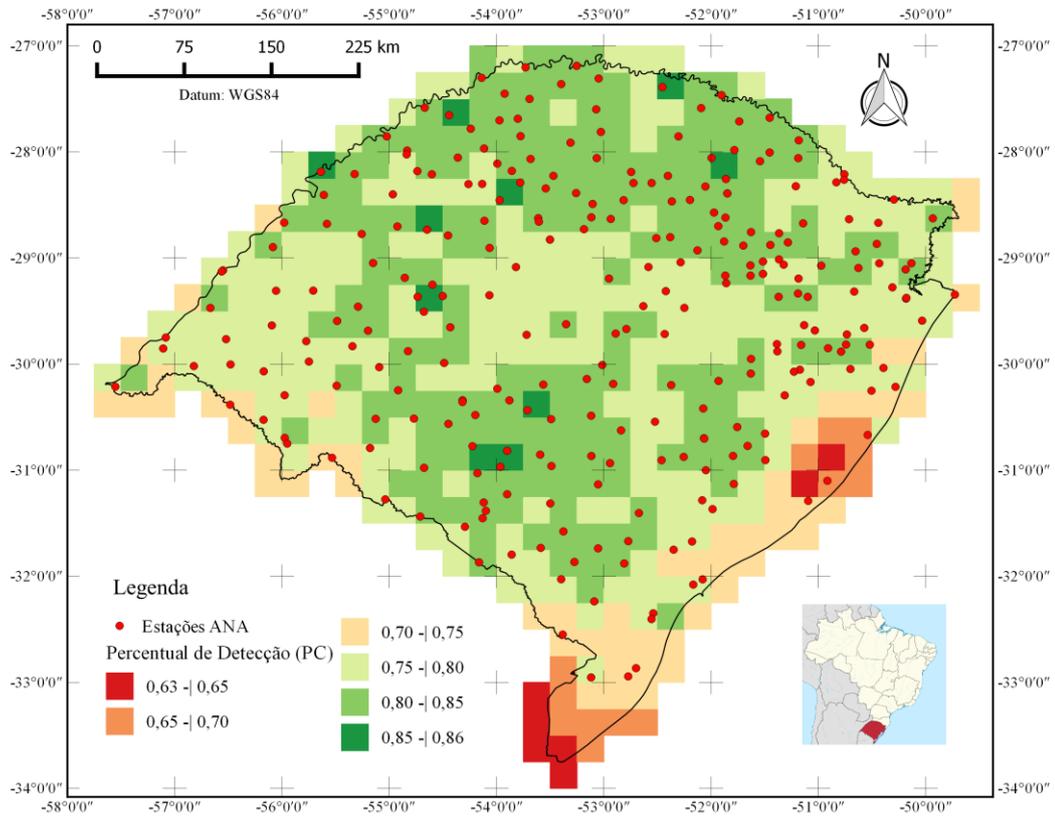


Figura 47 – Percentual de detecção (PC) para comparação por Sub-pixels.

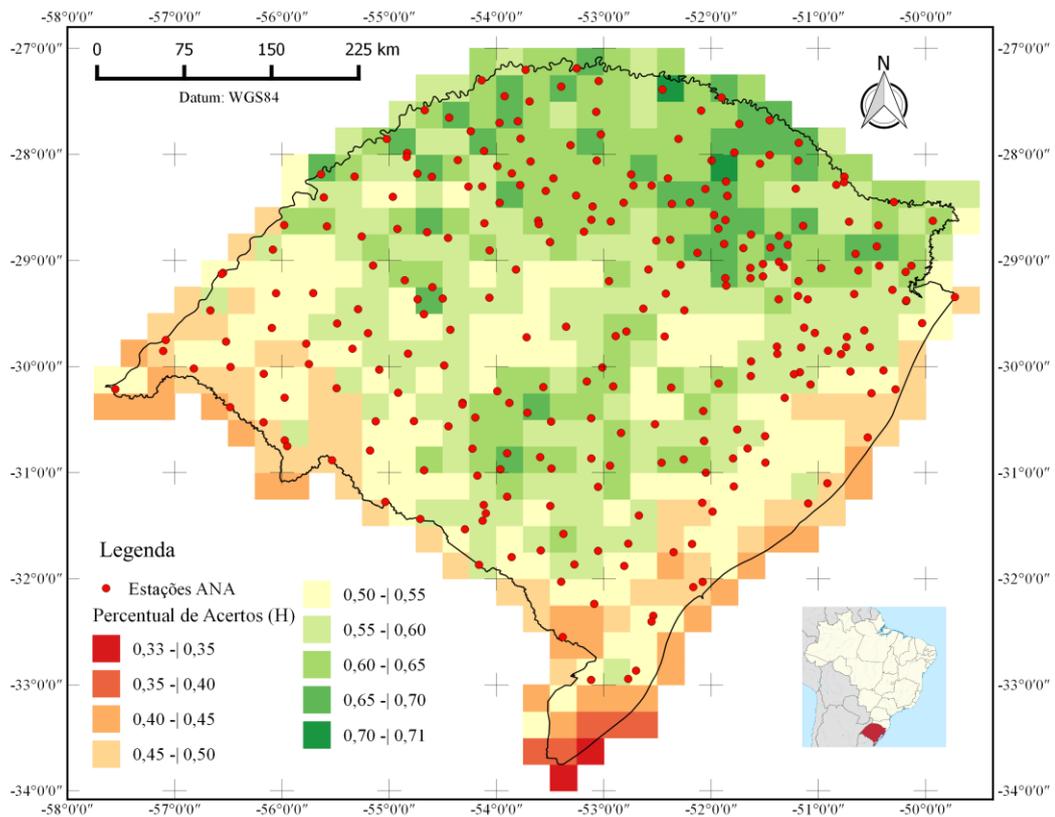


Figura 48 – Percentual de acertos (H) para comparação por Sub-pixels.

O valor médio de FAR (Figura 49) foi 0,10, ou seja, em média 10% dos casos em que a precipitação é estimada ela não ocorre. Entretanto esse valor foi maior em algumas áreas como o extremo Sul e o Leste do Estado, onde houveram valores maiores que 0,30, chegando até em 0,45. Houve melhora dos resultados de FAR em relação ao calculado pela metodologia Pixel a Pixel, tanto em termos de média (0,13 no Pixel a Pixel), quanto se tratando de valor máximo (0,49 no Pixel a Pixel).

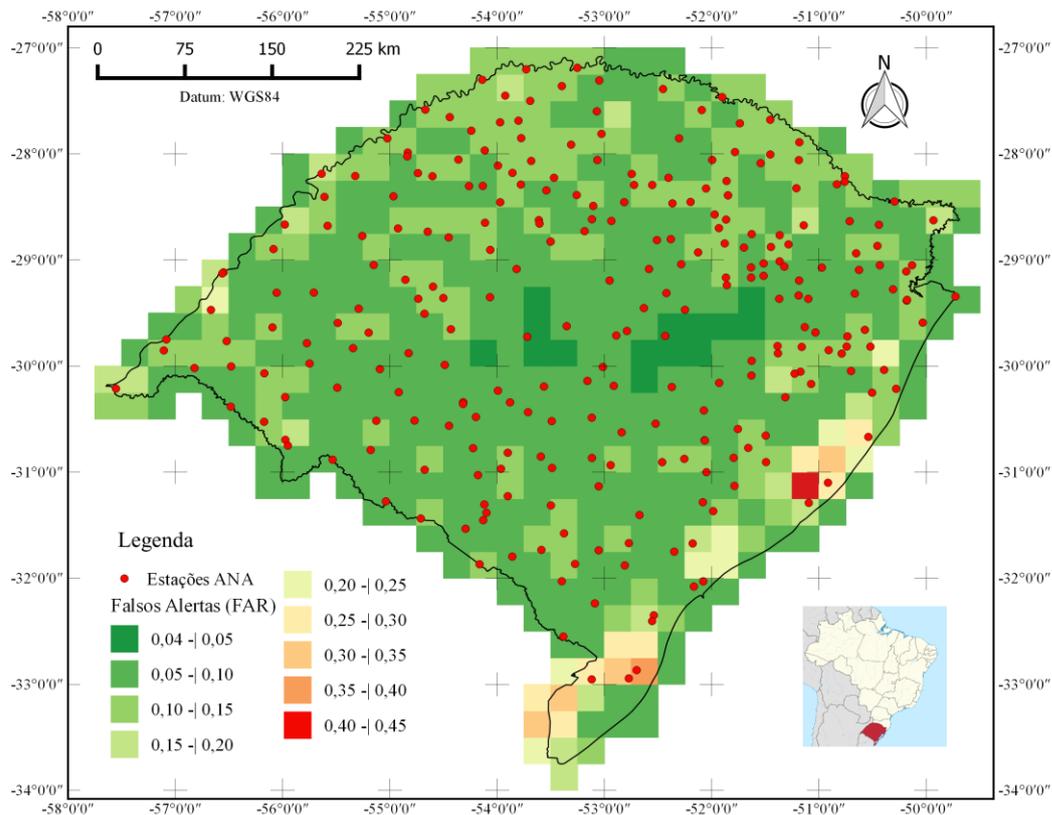


Figura 49 – Falsos alertas (FAR) para comparação por Sub-pixels.

O F apresentou melhora dos valores da metade Oeste do Estado e da região Nordeste, em relação aos resultados da metodologia Pixel a Pixel. Conforme a Figura 50, os valores foram mais homogêneos ao empregar a metodologia de Sub-pixels. Contudo, os valores de máximo, médio e mínimo, foram os mesmos encontrados na metodologia anterior (0,33, 0,05 e 0,02, respectivamente). Os piores valores se concentraram nas regiões do Litoral médio e Sul, da mesma forma que outros índices já se comportaram.

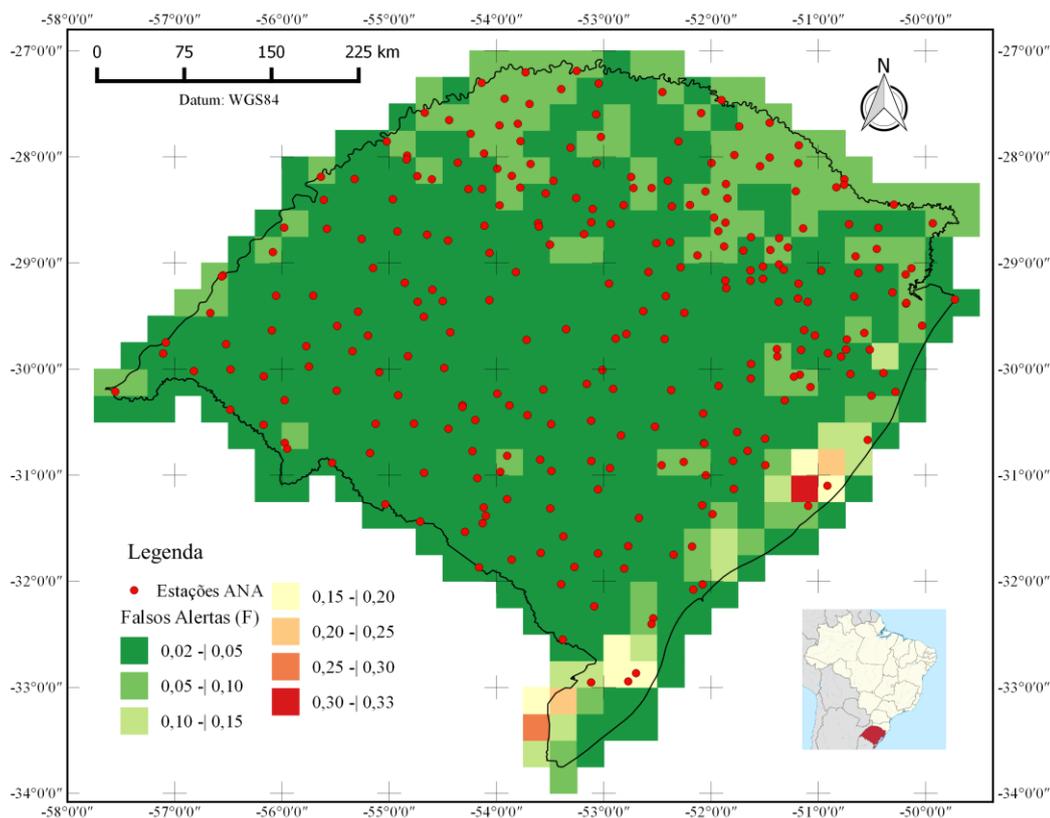


Figura 50 – Falsos alertas (F) para comparação por Sub-pixels.

O Índice de Sucesso Crítico (CSI), apresentado na Figura 51, teve valor médio ligeiramente maior que o resultante da metodologia Pixel a Pixel, igual a 0,53, com valores de mínimo e máximo iguais a, respectivamente, 0,31 e 0,64. Os melhores valores se encontraram nas regiões de Planalto, sobretudo nas porções Norte e Nordeste do RS. Nota-se um decréscimo gradativo dos valores de CSI nos pixels da porção Oeste, enquanto as regiões do extremo Sul e Litorânea apresentam os mais baixos valores.

Os índices de desempenho HSS e PSS tiveram tão pouca variação em relação aos valores obtidos em Pixel a Pixel, que os mínimo, médios ou máximos se mantiveram os mesmos, assim como o enquadramento dos pixels nas classes, como pode-se observar nas Figuras 52 e 53, respectivamente.

O índice bias (Figura 54), por sua vez teve variação menor do que a encontrada na metodologia Pixel a Pixel. Além disso os valores da região Norte ficaram mais próximos de 1, indicando bom desempenho por parte das estimativas.

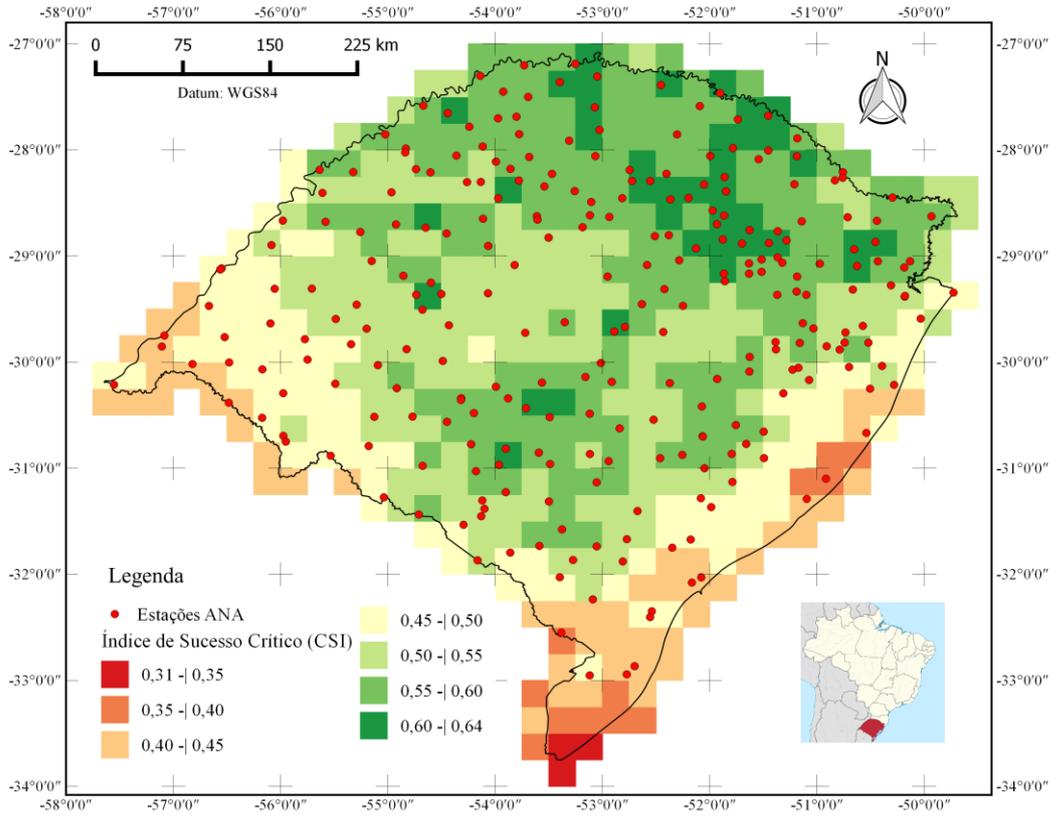


Figura 51 – Índice de sucesso crítico (CSI) para comparação por Sub-pixels.

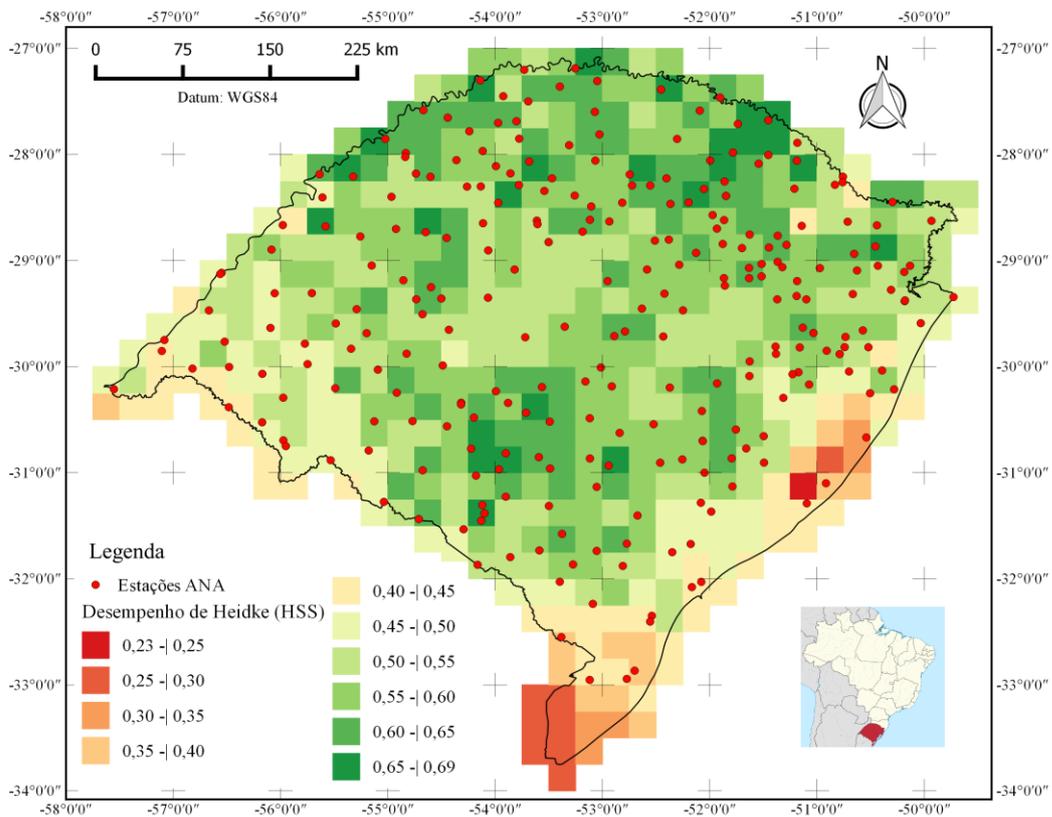


Figura 52 – Desempenho de Heidke (HSS) para comparação por Sub-pixels.

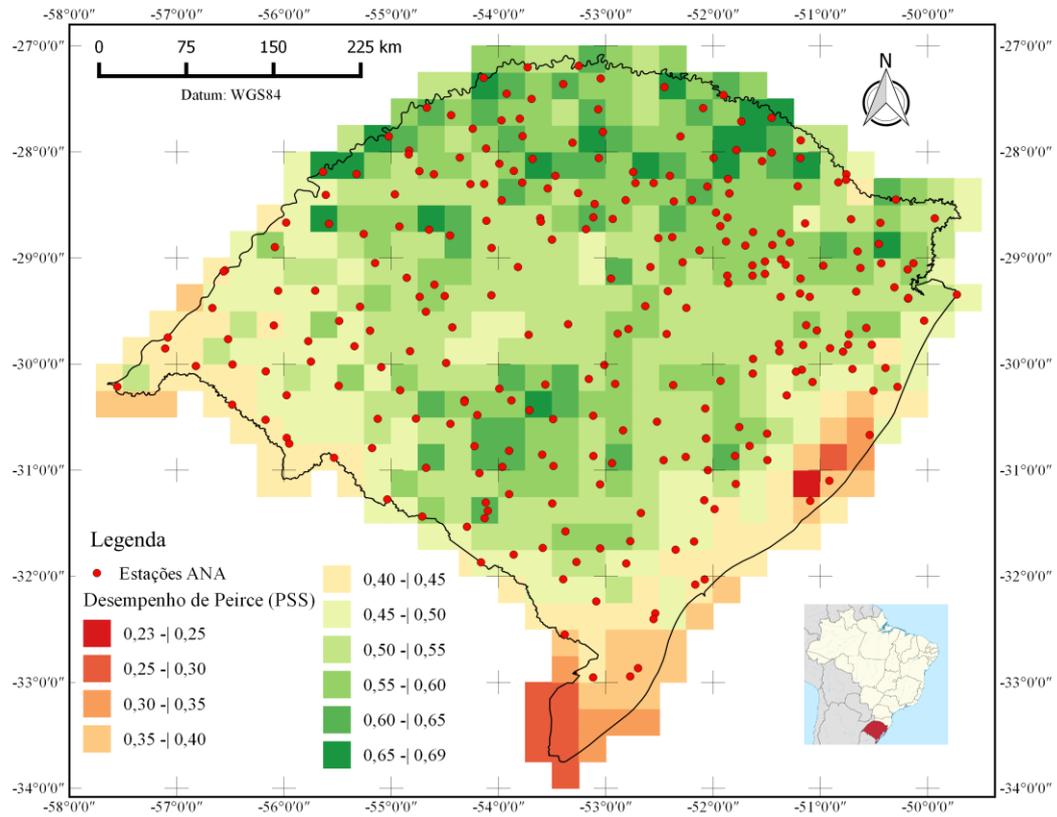


Figura 53 – Desempenho de Peirce (PSS) para comparação por Sub-pixels.

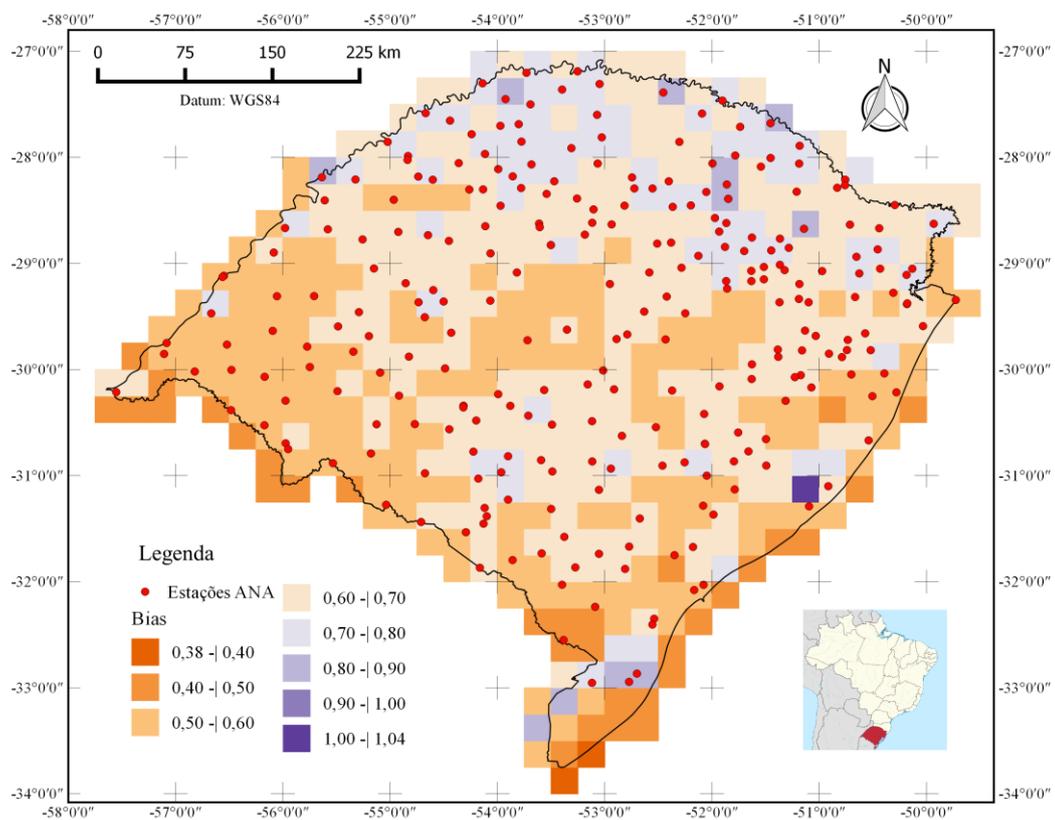


Figura 54 – Bias para comparação por Sub-pixels.

#### 4.5.2 Avaliação por outras estatísticas

Da mesma forma que os dados se comportaram nas outras metodologias, na Comparação por Sub-pixels os resultados melhoraram a medida que as séries foram acumuladas em totais de 15 e 30 dias. O coeficiente de correlação linear diário (Figura 55) teve bons valores ao longo do Estado, sobretudo nas regiões do Sudoeste, Norte e Nordeste, além da região Central.

Dos 491 pixels analisados, 213 (aproximadamente 43%) apresentaram coeficiente de correlação linear superior a 0,70, sendo que o valor máximo do coeficiente foi 0,79. Em média o coeficiente atingiu valores 0,71, com um mínimo de 0,40 na região do extremo Sul, a qual, juntamente com as regiões Litorânea e Oeste, apresentaram os piores resultados.

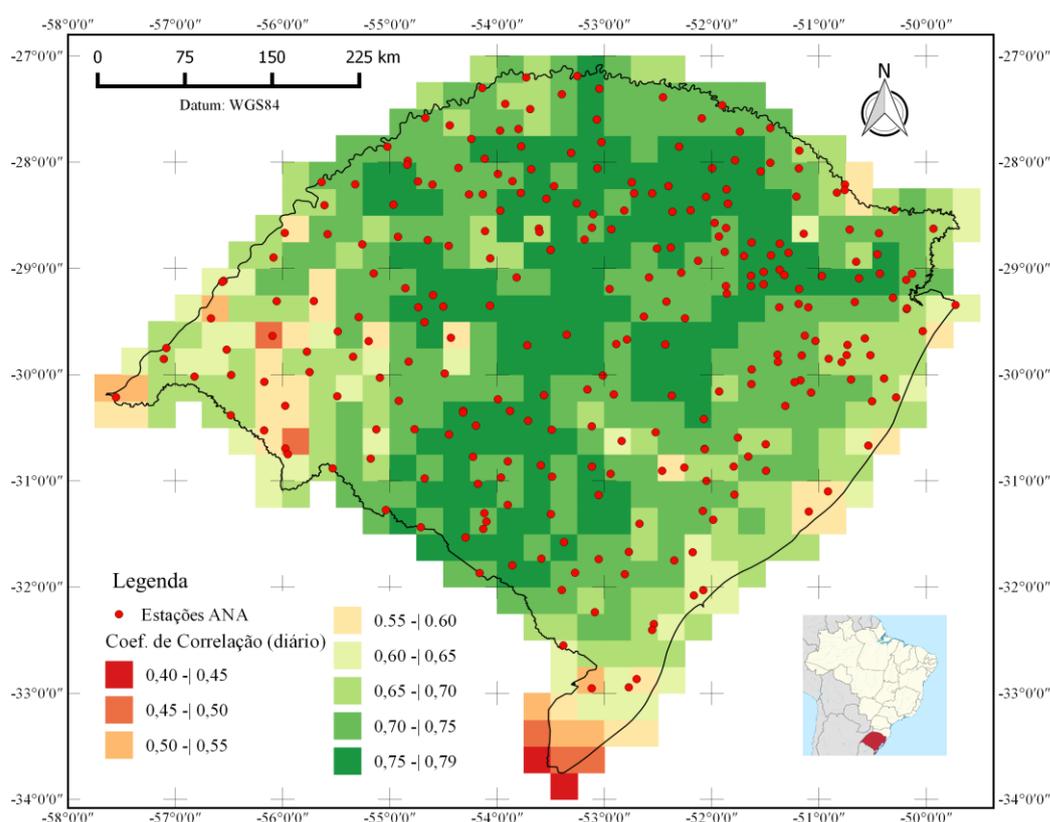


Figura 55 – Coeficiente de correlação linear com séries diárias para comparação por Sub-pixels.

Em relação ao coeficiente de correlação calculados com séries de 15 dias acumulados, os valores variaram de 0,42 a 0,91 com média de 0,84. Na Figura 56 observa-se o decréscimo dos valores de  $r$  ao Leste e ao extremo Sul do Estado, comportamento também identificado na análise Pixel a Pixel com séries de 15 dias acumulados.

Já na Figura 57, referente aos coeficientes de correlação com séries de acumulados de 30 dias, esse decréscimo dos valores é ainda mais evidente, sendo que praticamente todos os pixels da porção Oeste do Estado apresentam valores maiores que 0,90, chegando até a 0,95. Na porção Litorânea os valores giram em torno de 0,70 a 0,80, chegando a 0,43 no extremo Sul do RS. Em média o  $r$  de 30 dias foi de 0,88.

Ao comparar os presentes valores de coeficiente de correlação com obtidos com a metodologia Pixel a Pixel, verifica-se que não houve grandes diferenças entre os dois casos, haja vista que a maior diferença se deu no coeficiente de correlação diário, com melhora da média de 0,69 (Pixel a Pixel) para 0,71 (Comparação por Sub-pixels).

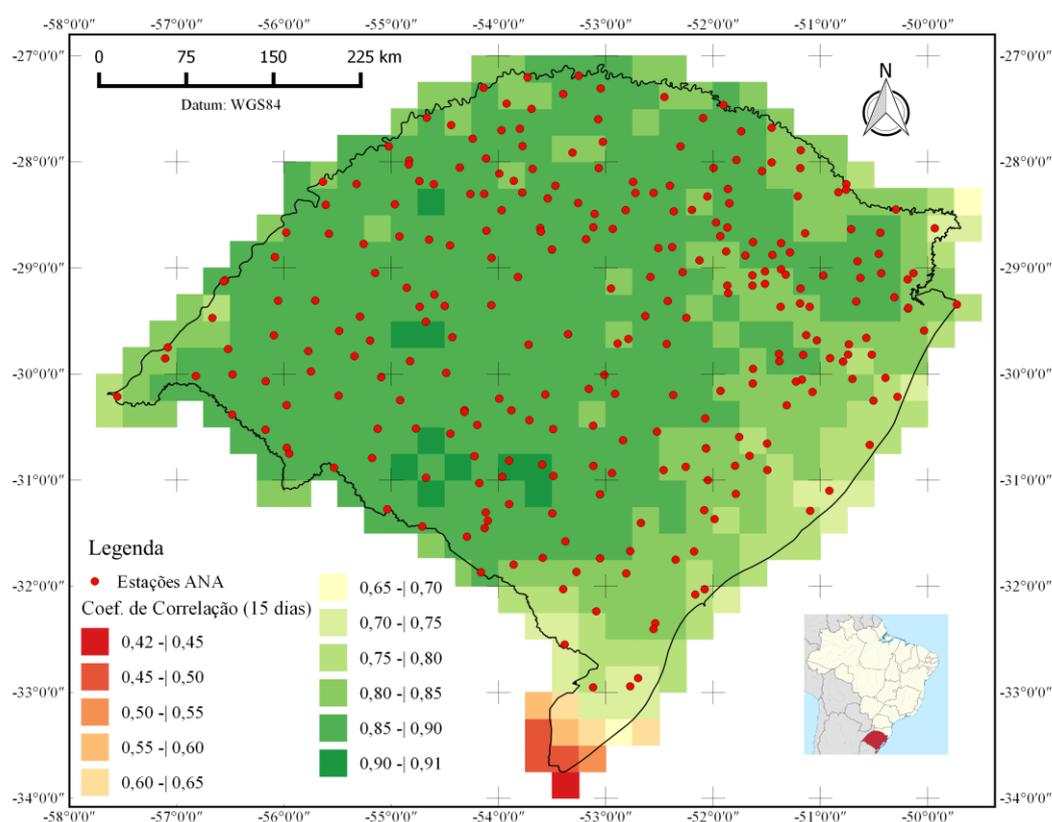


Figura 56 – Coeficiente de correlação linear com séries de somatórios de 15 dias para comparação por Sub-pixels.

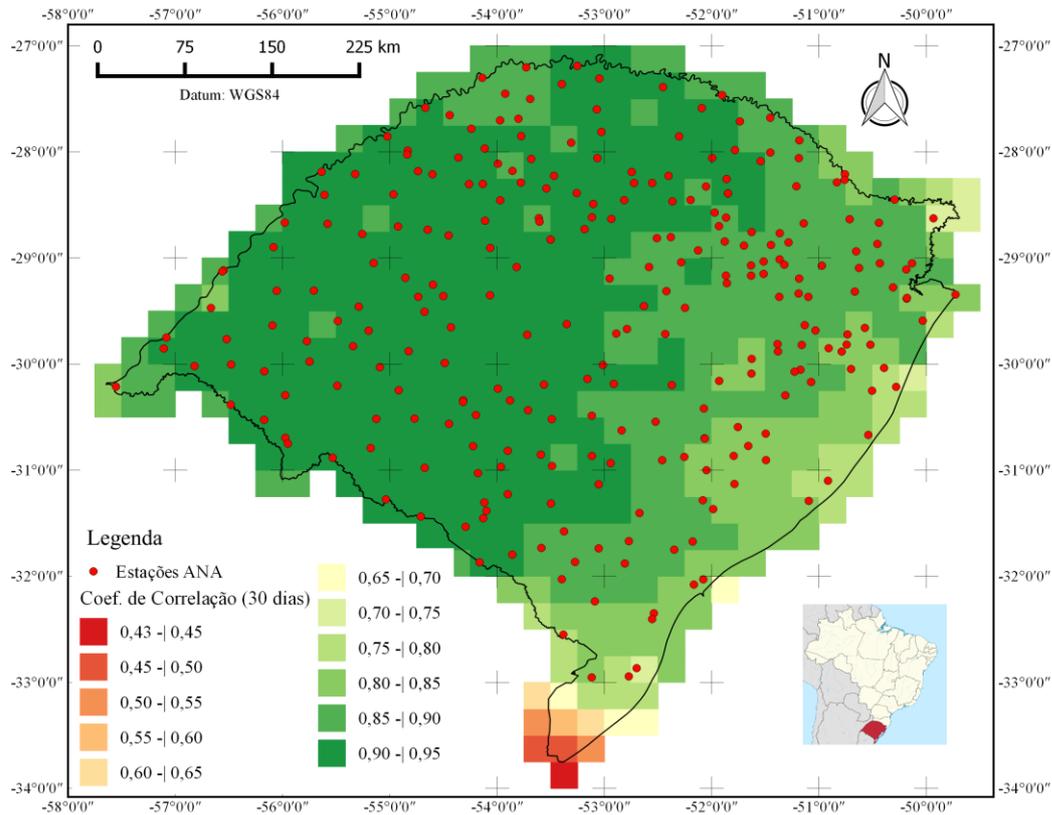


Figura 57 – Coeficiente de correlação linear com séries de somatórios de 30 dias para comparação por Sub-pixels.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe diário (Figura 58), assim como na comparação Pixel a Pixel, também apresentou melhores resultados na região norte e noroeste do Estado. Além disso, o NS diário teve variação de -2,25 a 0,34, com média igual a -0,24, sendo que 361 (73,5%) pixels apresentaram valores inferiores a zero.

Já o NS calculado com séries de acumulados quinzenais (Figura 59) teve resultados bem melhores. Cerca de 96% dos pixels apresentaram valores acima de zero e quase 81% tiveram NS 15 resultante maior ou igual a 0,35, o que já é considerado razoável. Os pixels que tiveram valores abaixo de 0,35, localizaram-se, principalmente, nas regiões do extremo Sul, Litorânea e extremo Oeste. Assim a média do NS de 15 dias foi 0,44, sendo que o mínimo e o máximo foram, respectivamente, -0,97 na região do extremo Sul do RS e 0,70 na região Sudoeste.

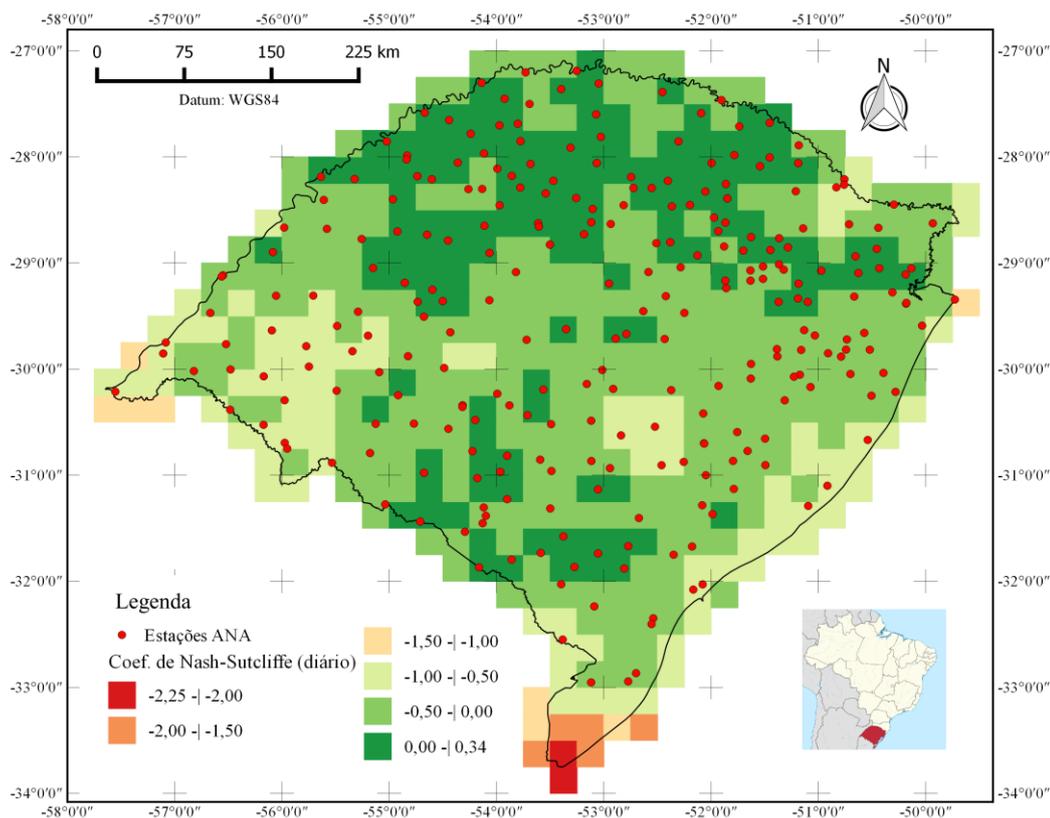


Figura 58 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries diárias para comparação por Sub-píxeis.

Como demonstra a Figura 60, o NS calculado com somatórios de 30 dias gerou valores que, gradativamente, decrescem a medida que avançam da porção Oeste para Leste, possivelmente em função dos efeitos na maritimidade nas leituras do satélite. Pode-se notar menores valores de NS 30 nas porções Litorânea, extremo Sul e na região da depressão Central, entre os dois Planaltos. O NS 30 teve média de 0,53 e valor máximo igual a 0,84, sendo que 429 dos 491 píxeis (aproximadamente 87%) apresentaram resultados maiores que 0,35.

Em relação aos valores de NS diário, NS 15 e NS 30 calculados pela metodologia Pixel a Pixel não houveram grandes diferenças (entre 1% e 3%). Contudo, pode-se afirmar que os valores melhoraram ligeiramente, de modo geral.

O EMA diário (Figura 61), diferentemente das outras estatísticas, apresentou valores diferentes aos obtidos na metodologia Pixel a Pixel, sobretudo em relação ao máximo diário que na metodologia anterior foi igual a 5,62 mm e na comparação por Sub-píxeis atingiu 4,98 mm redução em torno de 11%. Todavia, os demais valores de EMA, tanto diário quanto de 15 e 30 dias, não diferenciaram tanto dos obtidos em Pixel a Pixel em termos de valores mínimos, médios e máximos.

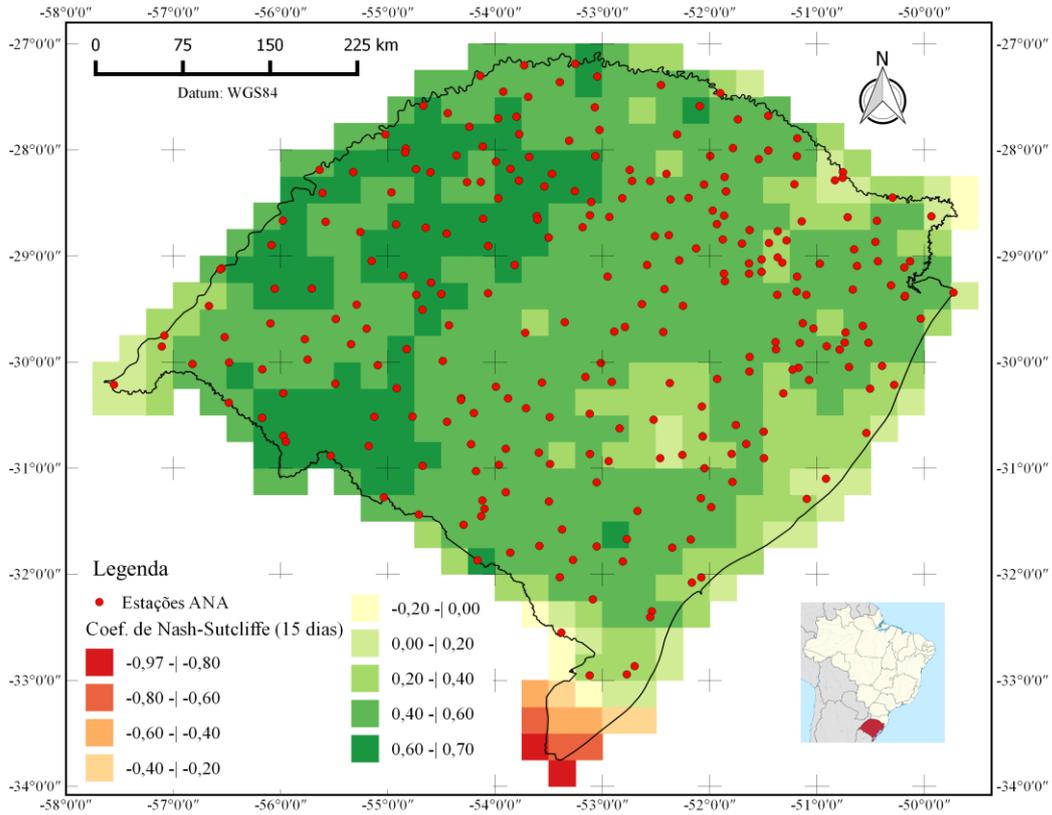


Figura 59 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries de somatórios de 15 dias para comparação por Sub-pixels

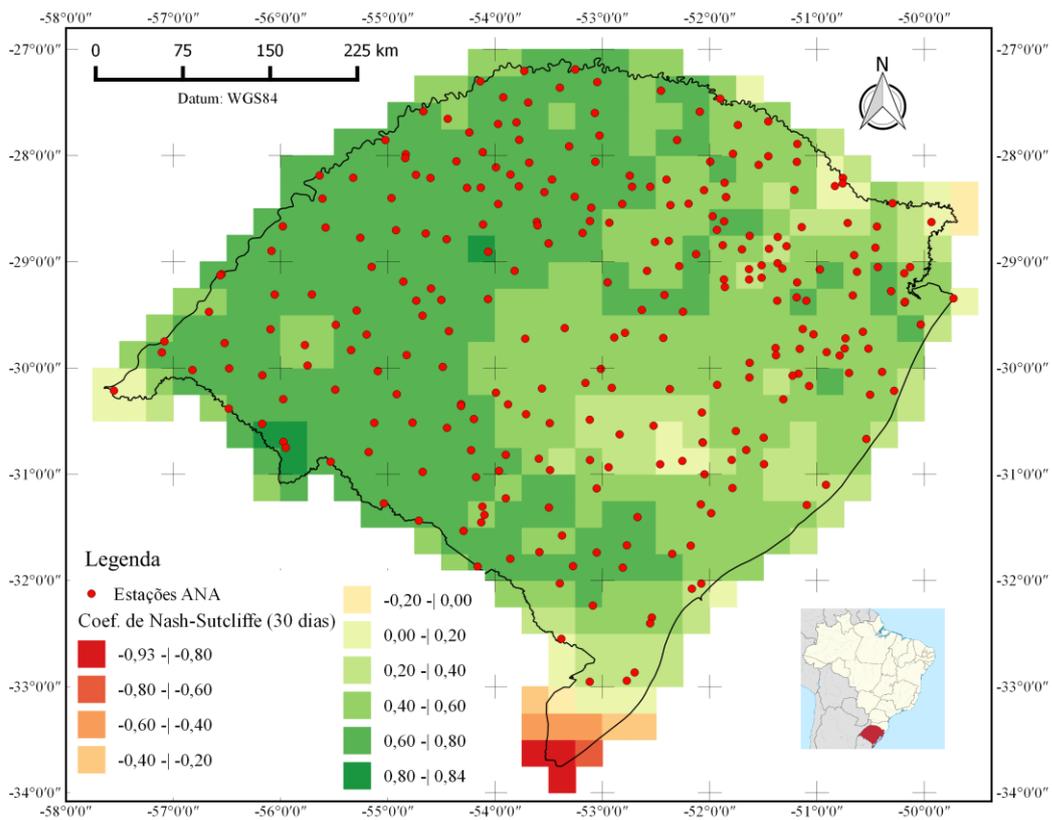


Figura 60 – Coeficiente de Nash-Sutcliffe com séries de somatórios de 30 dias para comparação por Sub-pixels

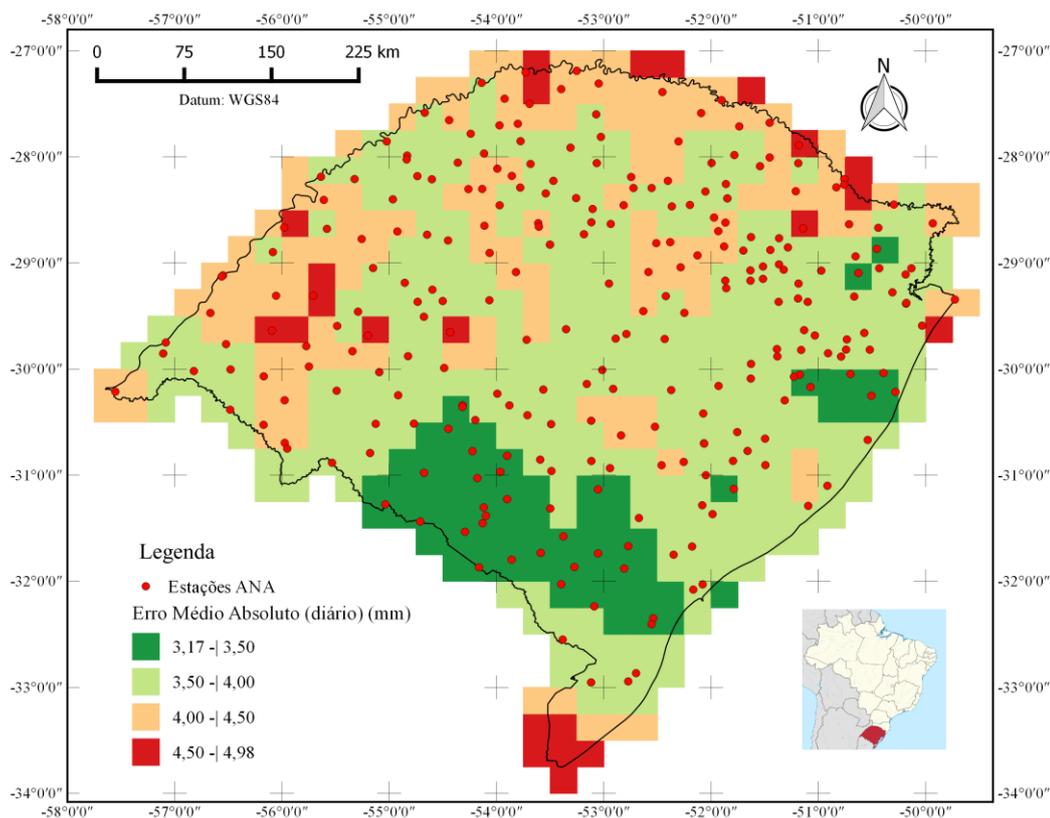


Figura 61 – Erro médio absoluto com séries diárias para comparação por Sub-pixels

A região do Planalto Sulriograndense apresentou os menores valores de EMA diário, onde atingiu 3,17 mm. Já os maiores erros foram em localidades como extremo Sul, Oeste, Norte e Nordeste do RS. Em média o EMA diário foi de 3,88 mm, considerando os 491 pixels analisados.

O mesmo comportamento é notado no mapa referente ao EMA quinzenal (Figura 62), sendo que seus valores variaram de 19,41 mm a 39,33 mm, com média de 24,21, e no mapa referente ao EMA de 30 dias (Figura 63), com valores de mínimo, médio e máximo iguais a 24,81 mm, 33,96 mm e 57,83 mm, respectivamente.

O EQM com dados diários (Figura 64) apresentou valores superiores a 8,14 mm, com média de 9,97 mm e máximo de 12,95. O EQM calculado com acumulados quinzenais (Figura 65) apresentou média de 26,55 mm com valores abaixo de 35 mm na metade Norte do Estado. Por fim, o EQM calculado para acumulados de 30 dias (Figura 66) acusou maiores erros nas regiões Sul e Oeste, onde chegou a valores acima de 60 mm enquanto os melhores resultados atingiram menos de 40 mm principalmente nas regiões Noroeste, e Sudoeste. Em média, o EQM de 30 dias foi de 45,78 mm

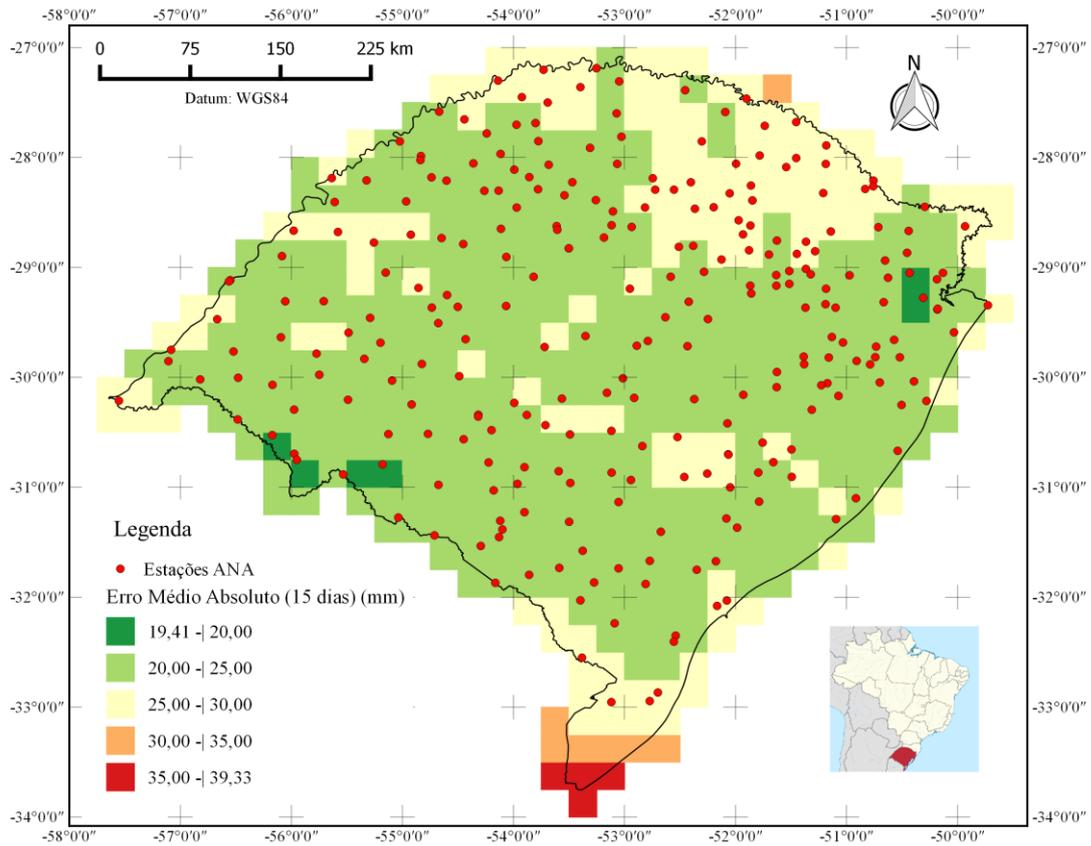


Figura 62 – Erro médio absoluto com séries de somatórios de 15 dias para comparação por Sub-pixels.

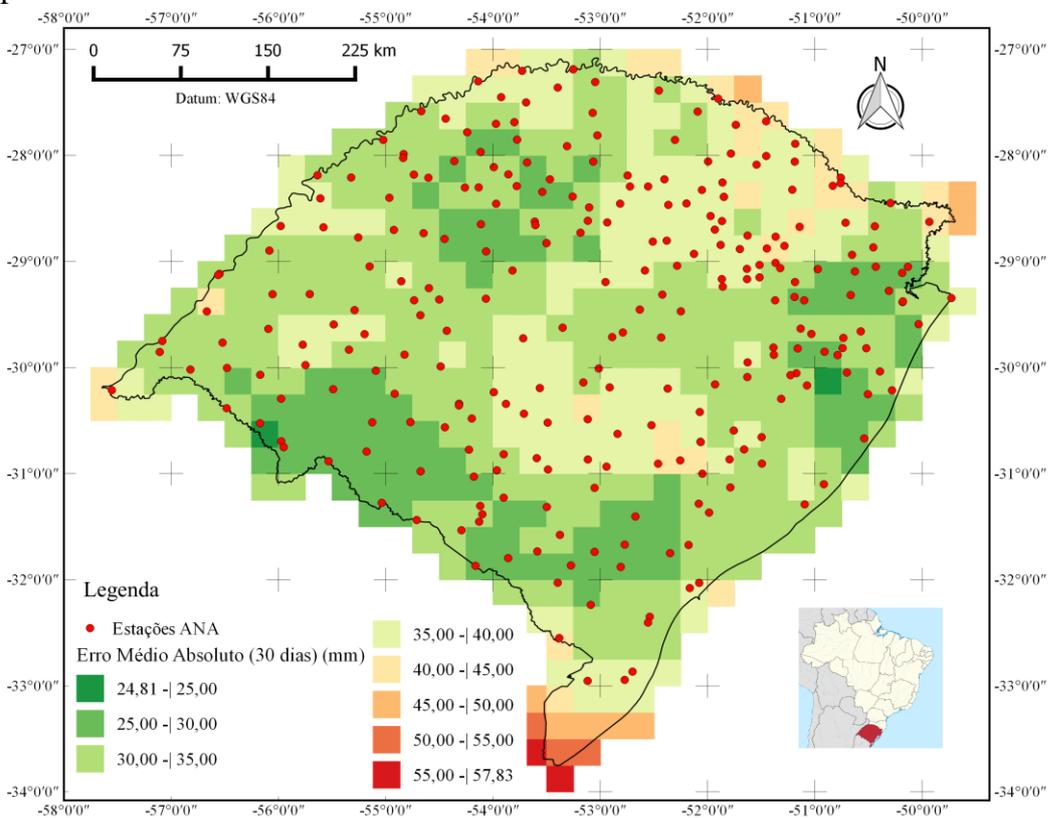


Figura 63 – Erro médio absoluto com séries de somatórios de 30 dias para comparação por Sub-pixels.

Em relação aos valores de EQM diário obtidos na comparação Pixel a Pixel, pode-se apontar a melhora dos dados ao utilizar Sub-pixels, principalmente em relação aos valores máximos de EQM diário, EQM 15 e EQM 30 que tiveram redução em relação aos EQM calculados em Pixel a Pixel.

Assim, pode-se constatar que a interpolação dos dados observados em sub-pixels pode diminuir os erros entre as estimativas e os dados de monitoramento, em função de tratar primeiramente de áreas menores e posteriormente realizar a média entre elas, haja vista que desta forma a grade referente aos dados observados interpolados tem mais representatividade em termos de variabilidade espacial da precipitação pluviométrica.

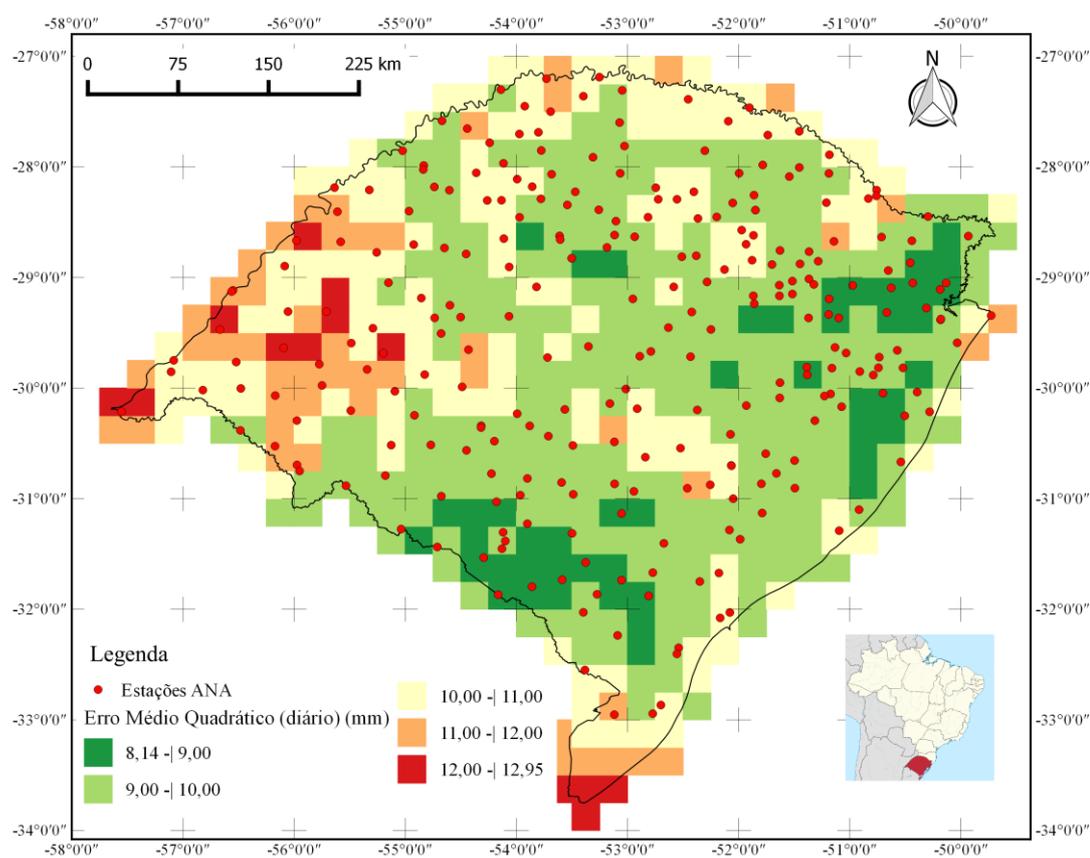


Figura 64 – Erro médio quadrático com séries diárias para comparação por Sub-pixels.

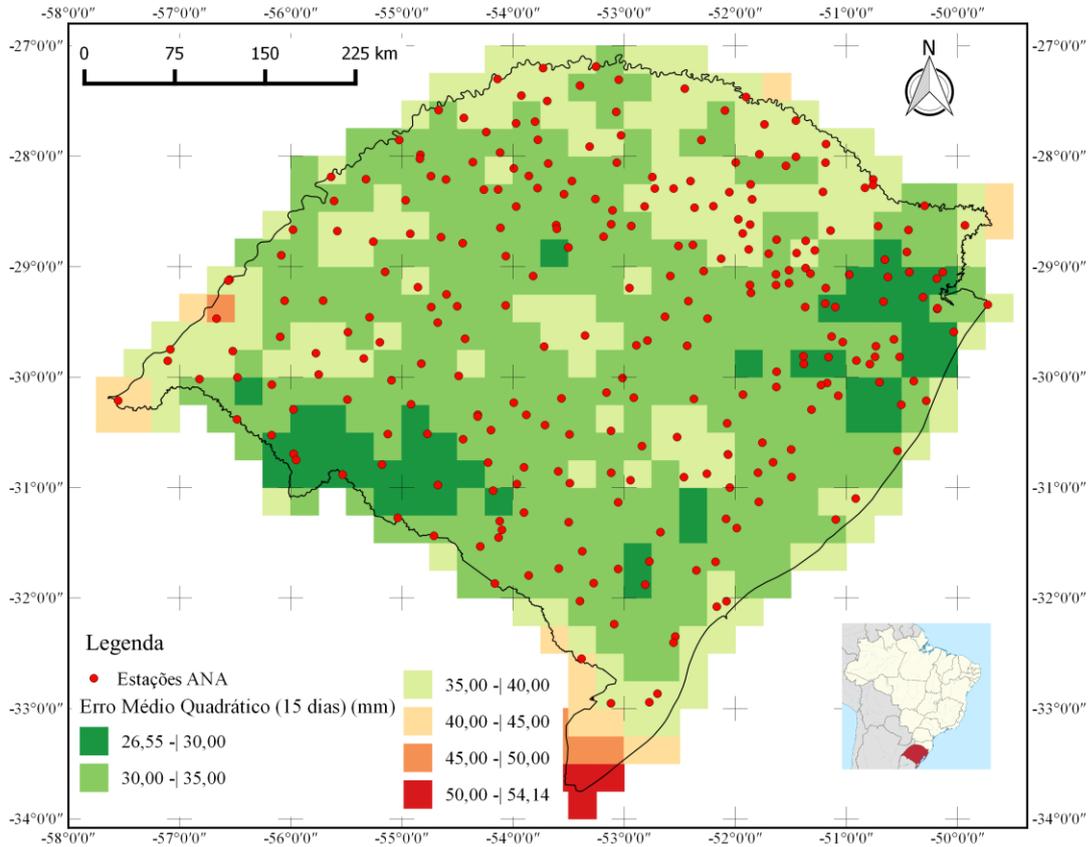


Figura 65 – Erro médio quadrático com séries de somatórios de 15 dias para comparação por Sub-pixels.

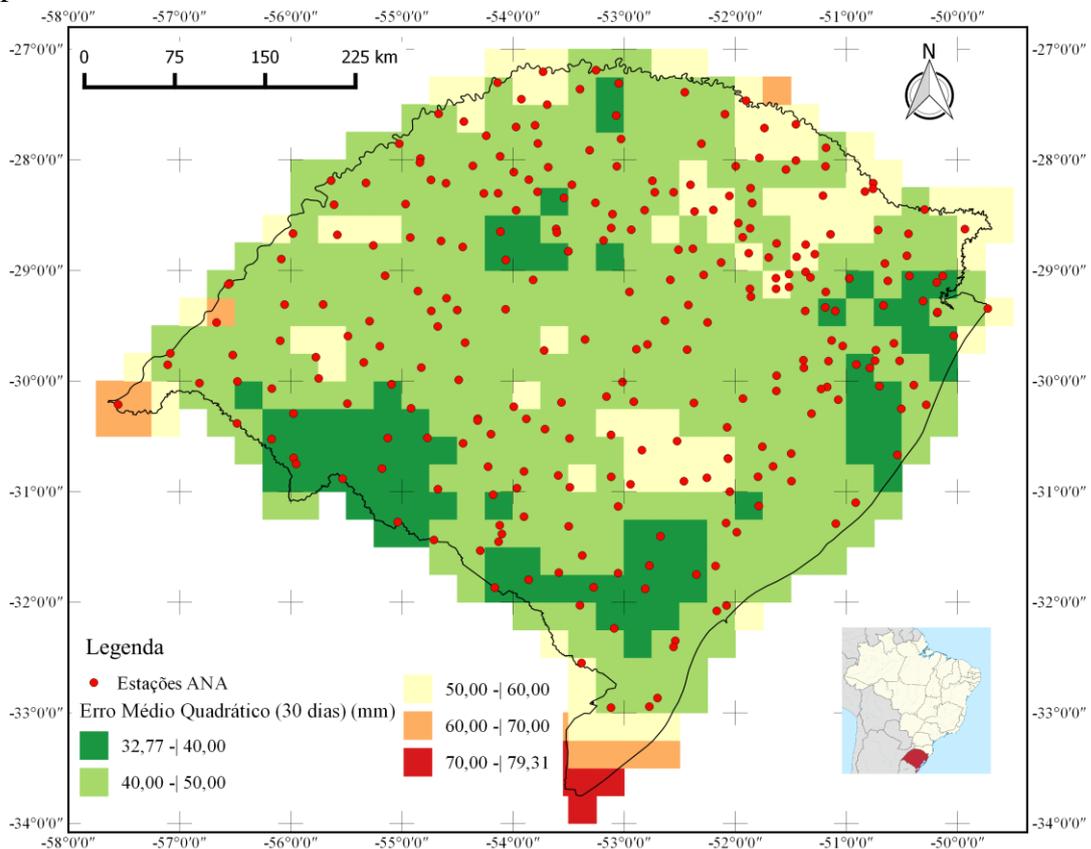


Figura 66 – Erro médio quadrático com séries de somatórios de 30 dias para comparação por Sub-pixels.

O viés relativo (Figura 66) teve comportamento muito semelhante ao viés calculado na metodologia Pixel a Pixel. Contudo, pode-se notar que algumas regiões ficaram melhores definidas como o escudo Sul Riograndense. O valor mínimo se manteve o mesmo (-17,17%), entretanto o valor máximo foi reduzido de uma superestimativa de 29% (no Pixel a Pixel) para aproximadamente 25%. Em geral ambas as metodologias apresentaram resultados semelhantes, sendo que na comparação por Sub-pixels o viés médio foi de 11,76%

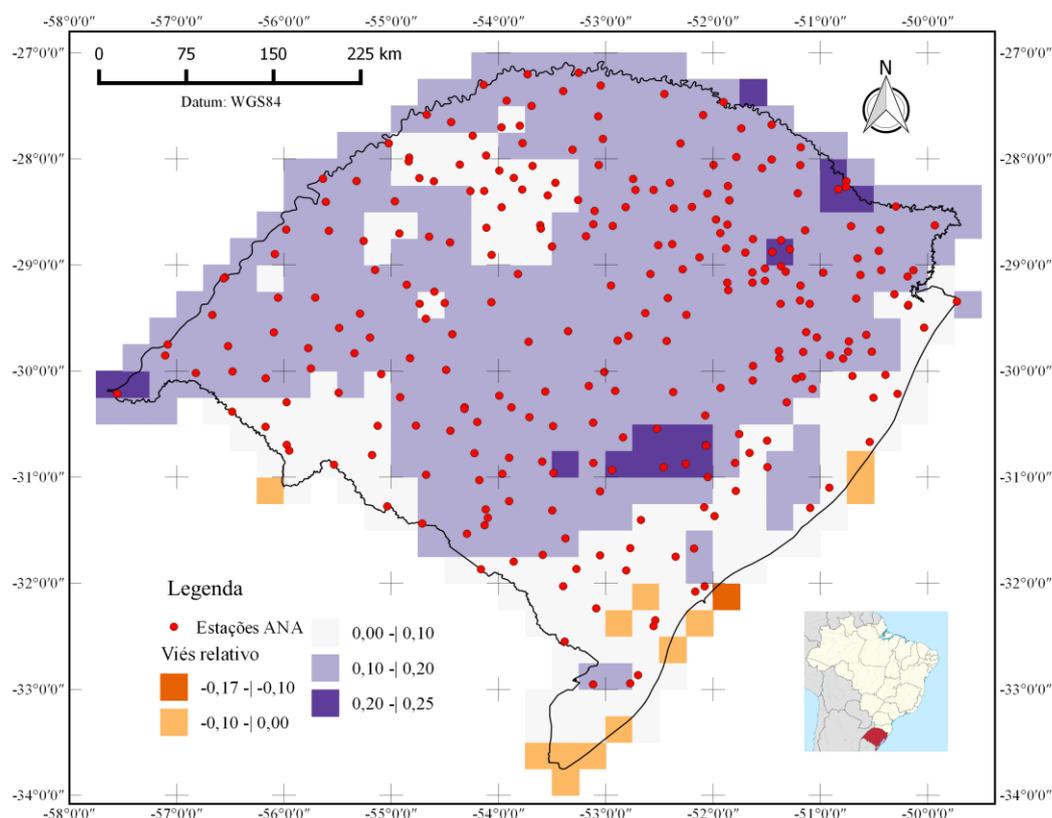


Figura 67 – Viés relativo para comparação por Sub-pixels.

#### 4.6 Análise agregada

Os resultados dos cálculos estatísticos aplicados à análise agregada se comportaram de forma semelhante ao obtido nas demais metodologias de comparação. A medida que as séries diárias foram acumuladas em totais de 15 e 30 dias, os valores de  $r$ , NS, EMA e EQM melhoraram. Contudo, na metodologia de análise agregada, é imprescindível que os resultados

estatísticos sejam interpretados juntamente com as áreas das respectivas regiões, uma vez que bacias menores normalmente apresentaram resultados inferiores às bacias de maior porte em alguns cálculos. Isto pode ser explicado em função de que a metodologia de análise agregada gera compensação de erros oriundos da variabilidade espacial da precipitação pluviométrica, sendo esta compensação mais influente a medida que a área analisada é maior.

Contudo, mesmo a variabilidade espacial da precipitação pluviométrica sendo omitida e compensando erros, a localização da bacia ainda tem grande peso nos resultados. Assim como nas metodologias anteriores, a região litorânea apresentou resultados abaixo da média em bacias hidrográficas com áreas pequenas em relação as demais, tais como as bacias do Litoral Médio, Tramandaí e Mampituba que apresentaram valores negativos de NS diário. Ainda, as bacias do Caí, Gravataí e Lago Guaíba, pertencentes a região do Guaíba também apresentaram baixos valores diários de NS e r. A bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, embora com mais de 25 mil km<sup>2</sup>, teve resultados ruins em relação ao NS e r diário, possivelmente em função da sua proximidade com a região Leste do Estado, onde há presença de grandes lagoas, além do oceano. A Figura 68 tem o objetivo de localizar geograficamente as 25 bacias hidrográficas estudadas em suas respectivas regiões hidrográficas, bem como a distribuição dos postos da ANA no território do Rio Grande do Sul.

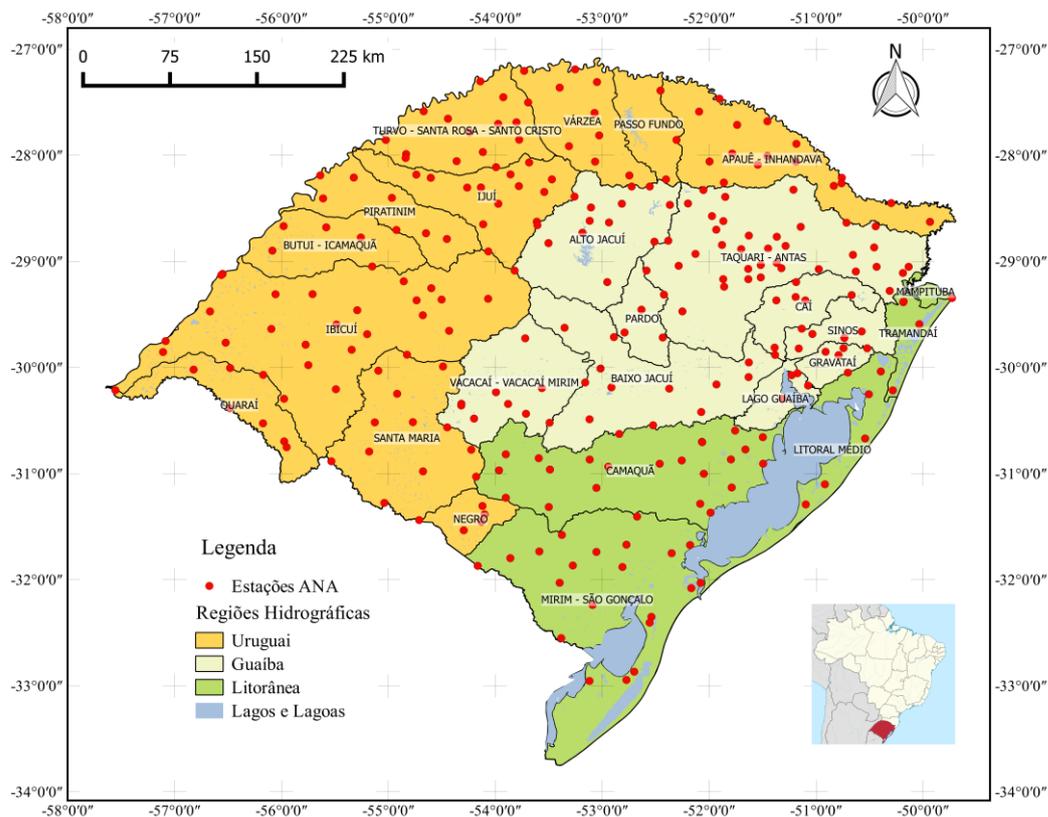


Figura 68 – Bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul e estações pluviométricas da ANA.

De modo geral, os melhores resultados diários, apresentados na Tabela 3, ficaram por conta das bacias hidrográficas da região Norte (Apauê – Inhandava, Turvo – Santa Rosa – Santo Cristo e Várzea), região Noroeste (Ijuí e Butui – Icamaquã) e na região Oeste (Quaraí e Ibicuí).

Tabela 3 – Área, r, EMA, EQM e NS e Viés das séries diárias das bacias hidrográficas estudadas

Região Hidrográfica	Bacia	Número de estações	Área (km <sup>2</sup> )	r	EMA (mm)	EQM (mm)	NS	Viés (%)
Guaíba	Alto Jacuí	14	13069,23	0,85	1,99	4,61	0,38	16,51
	Baixo Jacuí	12	17415,25	0,82	1,59	4,00	0,18	16,42
	Caí	7	4966,83	0,72	1,62	4,13	-0,10	17,12
	Gravataí	5	2012,81	0,68	1,57	4,22	-0,27	16,95
	Lago Guaíba	4	2469,21	0,70	0,95	2,42	-0,27	11,47
	Pardo	5	3640,16	0,79	1,45	3,52	0,04	16,73
	Taquari - Antas	36	26344,3	0,85	2,11	4,89	0,44	12,03
	Sinos	5	3687,07	0,70	1,43	3,80	-0,27	17,22
Litorânea	Vacacaí - Vacacaí Mirim	10	11127,3	0,81	1,74	4,41	0,20	20,72
	Camaquã	23	21564,26	0,84	1,65	4,24	0,32	17,59
	Mampituba	1	715,9	0,62	0,83	2,27	-0,35	18,61
	Litoral Médio	5	6491,87	0,77	1,00	2,51	-0,05	11,07
	Mirim - São Gonçalo	20	25785,83	0,81	1,63	4,04	0,31	5,96
Uruguai	Tramandaí	4	2741,56	0,71	1,06	2,91	-0,36	19,38
	Apauê - Inhandava	17	14500,4	0,84	1,41	3,36	0,51	10,87
	Butui - Icamaquã	5	8080,73	0,83	1,53	3,49	0,41	16,91
	Ibicuí	24	35271,78	0,86	1,78	4,04	0,43	15,40
	Ijuí	14	10741,01	0,84	1,50	3,50	0,39	18,82
	Piratinim	7	7689,75	0,83	1,36	3,06	0,32	19,31
	Negro	4	3016,99	0,75	1,22	3,16	-0,05	7,34
	Passo Fundo	3	4852,15	0,79	1,46	3,48	0,33	13,64
	Quaraí	8	6689,22	0,79	0,90	2,65	0,11	9,33
	Santa Maria	13	15759,5	0,81	1,82	4,61	0,15	18,21
	Turvo - Santa Rosa - Santo Cristo	15	10855,44	0,83	1,72	4,03	0,40	18,07
	Várzea	10	9516,22	0,83	1,58	3,74	0,44	12,71

O coeficiente de correlação linear diário teve valor médio de 0,79, variando de 0,62 a 0,86. Já o NS diário variou entre -0,36 a 0,51, com valor médio de 0,15. O coeficiente de correlação diário condiz com os resultados apresentados em Nóbrega (2008b). Os resultados de EMA e EQM diários tiveram média igual a 1,50 mm e 3,64 mm, respectivamente, configurando menores erros dos que obtidos nas demais metodologias.

Os valores de viés relativo obtidos pela metodologia de análise agregada coincidiram com o restante do trabalho, sendo que o valor máximo foi de 20,65% na bacia hidrográfica do rio Vacacaí - Vacacaí Mirim e o valor mínimo ficou por conta da bacia do Mirim - São Gonçalo, atingindo apenas 5,93%. Em média o valor foi de 15,53%.

O coeficiente de correlação referente as análise com acumulados de 15 dias, variou entre 0,83 (Lago Guaíba) e 0,94 (Baixo Jacuí), com média de 0,90, enquanto o NS apresentou média de 0,64, com variação de 0,41 (Lago Guaíba) a 0,78 (Quaraí). O EMA apresentou média de 9,04 mm, sendo o menor valor igual a 4,87 mm (Lago Guaíba) e o maior referente a bacia hidrográfica do Alto Jacuí (12,72 mm). O EQM, por sua vez, teve média de 12,81 mm, variando de 6,95 mm (Lago Guaíba) a 17,43 mm (Taquari - Antas). Os resultados referentes as análises agregadas com séries quinzenais estão resumidos na Tabela 4.

Comparando os resultados diários e quinzenais, observou-se que houve grande melhora das estatísticas, isto pode ser decorrente da compensação de erros oriundos da variabilidade temporal da precipitação. Os piores resultados, em termos de r e NS foram resultantes de bacias hidrográficas menores como a do rio Pardo, Lago Guaíba, Tramandaí e Gravataí.

Os resultados referentes às séries acumuladas em 30 dias (resumidos na Tabela 5), por sua vez, apresentaram resultados estatísticos ainda melhores do que os obtidos nos acumulados quinzenais, como já havia sido observado nas metodologias anteriores.

Tabela 4 – Área, r, EMA, EQM e NS das séries de acumulados de 15 dias das bacias hidrográficas estudadas

Região Hidrográfica	Bacia	Número de estações	Área (km <sup>2</sup> )	r	EMA (mm)	EQM (mm)	NS
Guaíba	Alto Jacuí	14	13069,23	0,91	12,72	17,37	0,68
	Baixo Jacuí	12	17415,25	0,94	10,03	14,35	0,73
	Caí	7	4966,83	0,91	3,18	4,73	0,66
	Gravataí	5	2012,81	0,89	3,89	5,71	0,56
	Lago Guaíba	4	2469,21	0,91	1,29	1,84	0,71
	Pardo	5	3640,16	0,92	4,59	6,57	0,68
	Taquari - Antas	36	26344,3	0,93	96,56	134,4	0,78
	Sinos	5	3687,07	0,91	1,40	2,13	0,63
	Vacacaí - Vacacaí Mirim	10	11127,3	0,91	10,29	14,23	0,62
	Litorânea	Camaquã	23	21564,26	0,94	109,2	152,4
Mampituba		1	715,9	0,83	1,81	2,83	0,41
Litoral Médio		5	6491,87	0,90	6,04	8,85	0,63
Mirim - São Gonçalo		20	25785,83	0,87	26,62	38,08	0,62
Tramandaí		4	2741,56	0,88	1,32	2,18	0,44
Uruguai	Apauê - Inhandava	17	14500,4	0,93	30,59	43,37	0,78
	Butuí - Icamaquã	5	8080,73	0,91	17,06	23,13	0,63
	Ibicuí	24	35271,78	0,92	49,87	68,36	0,70
	Ijuí	14	10741,01	0,91	5,97	8,21	0,65
	Piratinim	7	7689,75	0,90	8,36	11,29	0,60
	Negro	4	3016,99	0,85	2,48	3,39	0,53
	Passo Fundo	3	4852,15	0,90	10,16	14,78	0,68
	Quaraí	8	6689,22	0,87	13,87	19,20	0,57
	Santa Maria	13	15759,5	0,90	14,85	20,56	0,60
	Turvo - Santa Rosa - Santo Cristo	15	10855,44	0,90	11,08	15,22	0,65
Várzea	10	9516,22	0,91	9,25	13,20	0,72	

Tabela 5 – Área, r, EMA, EQM e NS das séries de acumulados de 30 dias das bacias hidrográficas estudadas

Região Hidrográfica	Bacia	Número de estações	Área (km <sup>2</sup> )	r	EMA (mm)	EQM (mm)	NS
Guaíba	Alto Jacuí	14	13069,23	0.95	18.84	23.95	0.73
	Baixo Jacuí	12	17415,25	0.97	15.30	19.78	0.79
	Caí	7	4966,83	0.94	4.78	6.65	0.73
	Gravataí	5	2012,81	0.93	5.43	7.57	0.67
	Lago Guaíba	4	2469,21	0.94	1.75	2.44	0.79
	Pardo	5	3640,16	0.96	6.85	9.04	0.75
	Taquari - Antas	36	26344,3	0.97	129.20	175.84	0.85
	Sinos	5	3687,07	0.94	1.99	2.83	0.73
	Vacacaí - Vacacaí Mirim	10	11127,3	0.94	16.15	21.12	0.63
Litorânea	Camaquã	23	21564,26	0.96	163.27	216.53	0.75
	Mampituba	1	715,9	0.89	2.57	3.81	0.57
	Litoral Médio	5	6491,87	0.94	8.57	12.07	0.72
	Mirim - São Gonçalo	20	25785,83	0.91	36.13	46.96	0.72
	Tramandaí	4	2741,56	0.93	1.93	2.93	0.59
Uruguai	Apauê - Inhandava	17	14500,4	0.96	42.30	57.02	0.85
	Butuí - Icamaquã	5	8080,73	0.92	26.07	34.64	0.61
	Ibicuí	24	35271,78	0.94	74.70	98.88	0.70
	Ijuí	14	10741,01	0.94	9.24	11.71	0.68
	Piratinim	7	7689,75	0.92	12.82	16.99	0.58
	Negro	4	3016,99	0.88	3.23	4.26	0.62
	Passo Fundo	3	4852,15	0.94	14.22	19.25	0.77
	Quaraí	8	6689,22	0.89	18.92	25.41	0.63
	Santa Maria	13	15759,5	0.92	22.65	29.63	0.59
	Turvo - Santa Rosa - Santo Cristo	15	10855,44	0.94	16.87	21.12	0.70
Várzea	10	9516,22	0.95	13.23	16.90	0.80	

Os melhores valores de r foram obtidos nas bacias do rio Pardo e Caí, onde os valores chegaram a 0,97, sendo todos os valores ficaram acima de 0,88, gerando média de 0,93. Já em

relação ao NS de 30 dias, que apresentou média de 0,70, os melhores resultados foram encontrados na bacia do Tramandaí e, novamente, na bacia do Caí.

Embora sejam bacias pequenas (Caí, Tramandaí e Pardo) em relação as demais, os resultados estatísticos obtidos com séries de acumulados de 30 dias foram os melhores, diferentemente da análise agregada diária, onde o tamanho da bacia hidrográfica tinha mais influência na compensação de erros do que na análise de 30 dias. O EMA variou de 6,62 mm (Lago Guaíba) a 18,84 mm (Alto Jacuí) com média de 13,17 mm. Já o EQM teve média de 17,57 mm, com variação de 9,23 mm (Lago Guaíba) a 23,95 mm (Alto Jacuí). Tanto as séries diárias, quanto as de acumulados de 30 dias geraram resultados semelhantes aos apresentados em Soares (2014), num trabalho que aplicou as mesmas estatísticas (com exceção do coeficiente de Nash-Sutcliffe), em bacias hidrográficas do estado do Paraíba.

#### **4.7 Precipitação com diferentes probabilidades**

Em relação à precipitação diária com tempo de retorno variando de 2, 5, 10 e 25 anos, os produtos TRMM superestimaram os valores observados em pluviômetros em 24,8% (em média) com um desvio padrão de 11,2% (Figura 69). Estes resultados são coincidentes com Gonçalves (2011) que, em uma análise mais ampla do Brasil, indicaram que as estimativas TRMM foram acima do observado somente na região Sul. Gonçalves (2011), também indica que as diferenças entre ambos conjuntos de dados mostraram mudanças regionais.

Por meio da análise conjunta dos  $C_{adj}$  das 12 localidades combinada com as informações contidas em Rossato (2011), CPRM (2013) e Britto et al. (2006) foi possível regionalizar o coeficiente em 5 regiões. Seguindo os autores mencionados, as cinco regiões foram caracterizadas com base no fato de que o Estado é influenciado por três massas de ar: Massa Tropical Atlântica (MTA), Massa Tropical Continental (MTC) e Massa Polar Atlântica (MPA). A MTA, que é quente e úmida, apresenta uma tendência a estabilidade e opera principalmente na região oriental. Nas regiões oeste e norte, o MTC (quente e seco) predomina. No entanto, na região noroeste ocorre um bloqueio da CTM devido à ação da MTA, favorecendo a contínua ocorrência de chuvas. A região Sul é fortemente influenciado pelo MPA (fria). Na região Central / Nordeste há grande influência da topografia, causando instabilidade nos movimentos de massas de ar que, por sua vez, promovem ocorrência de chuvas convectivas (Britto, 2006; Rossato, 2011).

A Figura 70, traz o mapa das regiões determinadas enquanto a Tabela 6 informa a respeito das estações que constituem cada região. Os  $C_{adj}$  regionais foram obtidos a partir da média entre os coeficientes das estações que compõem cada uma das regiões.

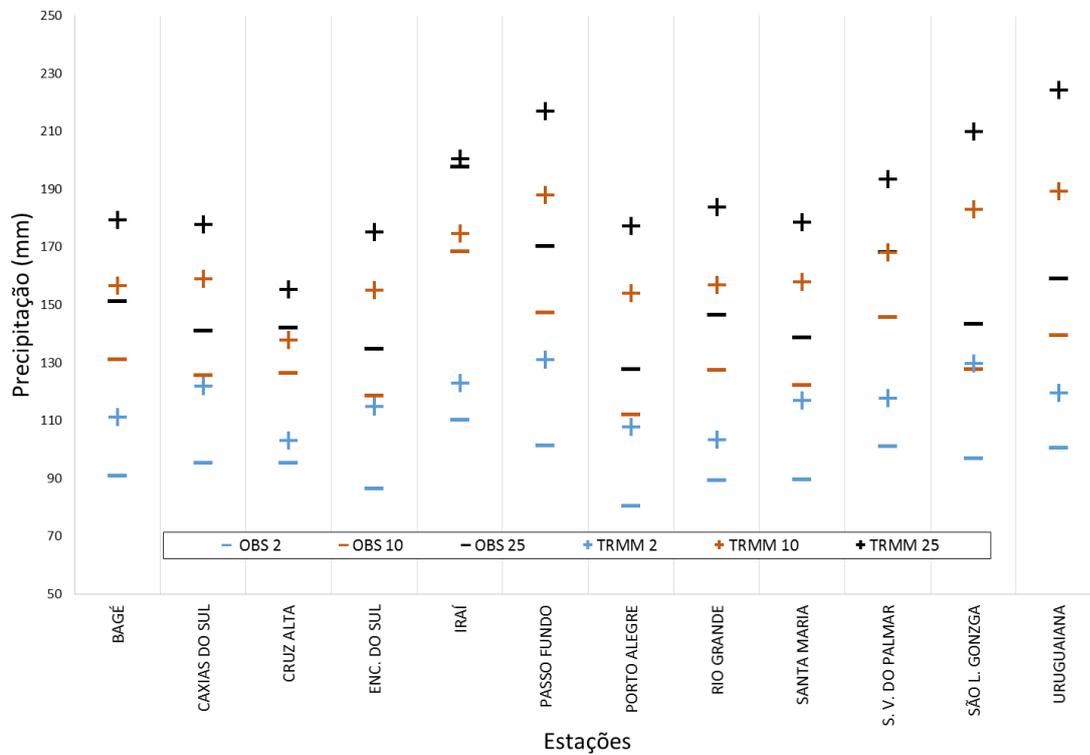


Figura 69 - Variações locais de precipitações diárias de estimativas TRMM e dados monitorados com tempo de retorno de 2, 10 e 25 anos

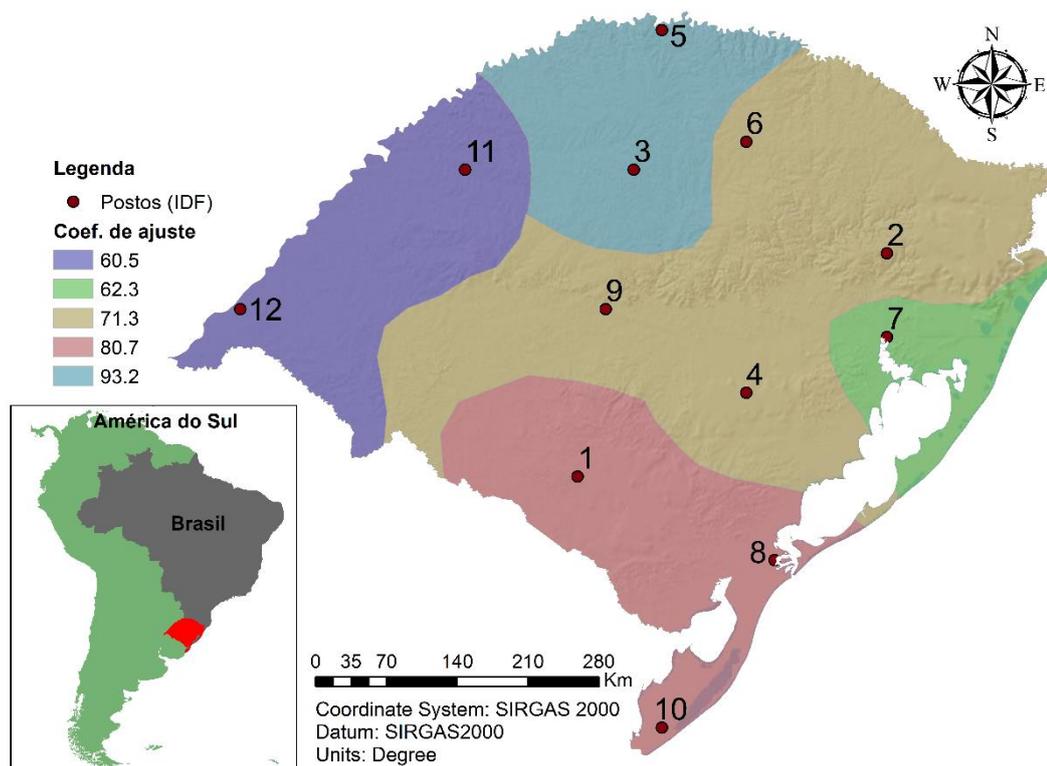


Figura 70 – Regiões de máximas precipitações e coeficientes de ajuste TRMM.

Tabela 6 – Nomes das localidades e respectivos códigos, coeficiente de ajuste e regiões.

Região	Localidade	Código da estação no mapa	Coeficiente de ajuste da estação
Região Oeste	São Luiz Gonzaga	11	56,67
	Uruguaiana	12	64,25
Região Leste	Porto Alegre	7	62,26
	Caxias do Sul	2	73,37
Região Centro/Noroeste	Encruzilhada do Sul	4	69,08
	Passo Fundo	6	72,22
	Santa Maria	9	70,59
Região Sul	Bagé	1	80,45
	Rio Grande	8	76,80
	Santa Vitoria do Palmar	10	84,70
Região Norte	Cruz Alta	3	90,91
	Iraí	5	96,29

#### 4.8 TRMM na determinação de precipitações intensas

A partir dos coeficiente de ajuste regionais, a equação de Bell (1969) foi adaptada na equação 9.

$$P_t^T = (0,21 \ln T + 0,52) \cdot (0,54 t^{0,25} - 0,50) \cdot (P_{TRMM}^{10} \cdot C_{adj} \cdot R_{1h24h}) \quad (8)$$

Sendo T é o tempo de retorno, t a duração,  $P_{6TRMM}^{10}$  é a precipitação diária com tempo de retorno de 10 anos dos produtos 3B42,  $C_{adj}$  é o coeficiente de ajuste regional e  $R_{1h24h}$  é a razão entre as precipitações de 1 hora e 24 horas.

Para uma primeira verificação, foi selecionada uma estação pertencente a cada uma das 5 regiões e então realizada uma comparação entre: (a) a equação original de Bell (1969) baseada nos dados monitorados (equação 8); (b) a relação IDF obtida de Denardin e Freitas (1982) ou Beltrame et al. (1991); (c) a equação de Bell (1969) tendo como entrada os dados TRMM 3B42; (d) a equação de Bell (1969) tendo como entrada os dados TRMM 3B42 ajustados pelo coeficiente regional ( $TRMM_{ajustado}$ )

A região do Norte foi a única região a apresentar grande semelhança entre as curvas oriundas da IDF, BELL, TRMM e  $TRMM_{ajustado}$ . Em todos os outros casos o TRMM superestimou as precipitações apresentando maiores distâncias das outras curvas. As curvas BELL e IDF só apresentaram comportamento similar nas regiões Norte e Leste (Figuras 71 e 72, respectivamente), o que pode sugerir que BELL representa melhor a precipitação influenciada pela MTA e claramente superestima precipitações quando a MTC e MPA predominam.

Estes resultados foram esperados com o método de Bell devido a falta de um parâmetro de localização (como já presente em Chen, 1983; Koutsoyiannis, 2004). O  $TRMM_{ajustado}$  foi capaz de representar a precipitação razoavelmente bem em todas as regiões, como se observa também nas Figuras 73 e 74, referentes as regiões Central/Noroeste e Oeste, respectivamente. No entanto, o mesmo não ocorre na região Sul (Figura 75), onde a ação MPA predomina. Considerando a escassez de dados, a região deve ser analisada mais detalhadamente e, talvez, subdividida.

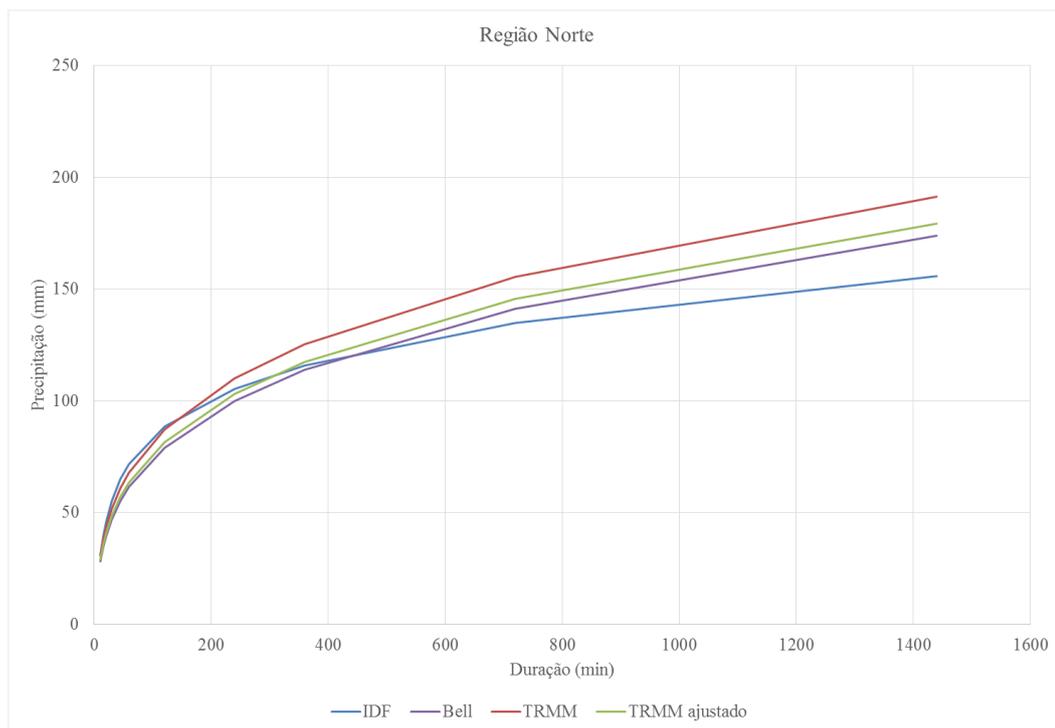


Figura 71 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM<sub>ajustado</sub> na Região Norte (localidade Cruz Alta).

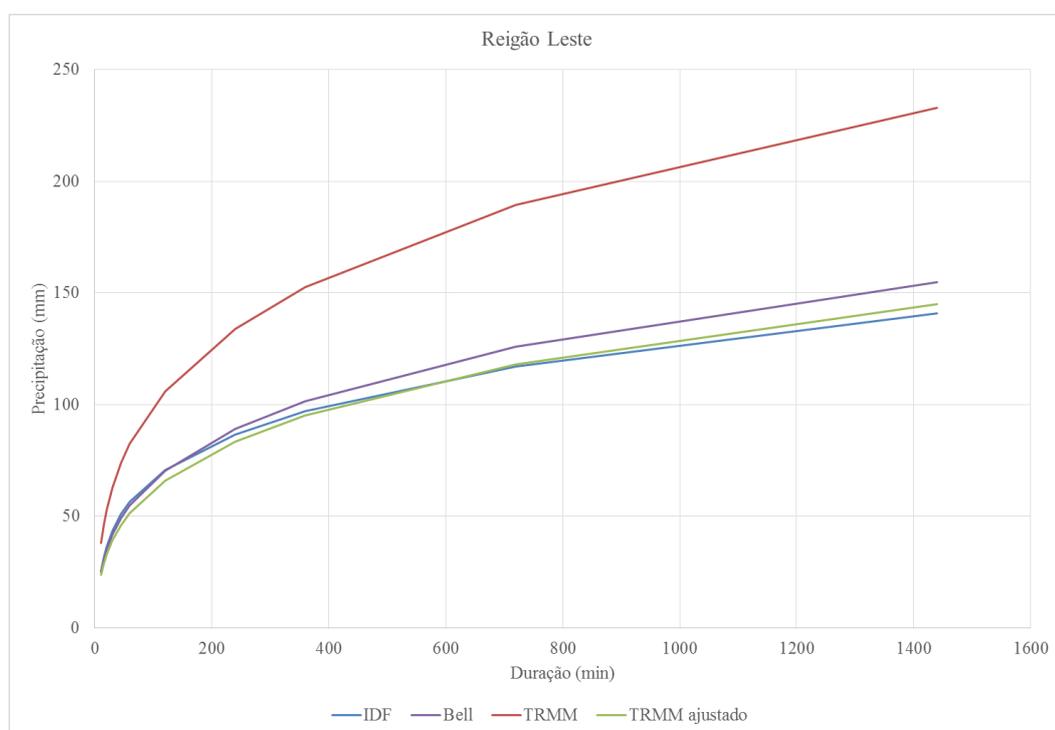


Figura 72 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM<sub>ajustado</sub> na Região Leste (localidade Porto Alegre).

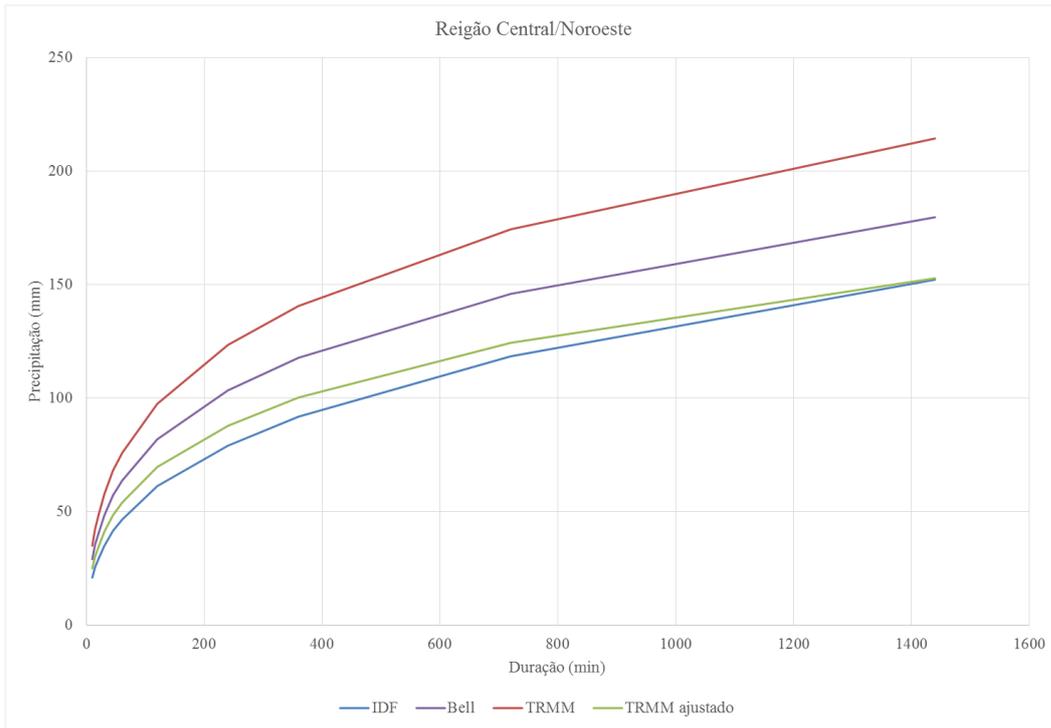


Figura 73 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM<sub>ajustado</sub> na Região Central/Noroeste (localidade Encruzilhada do Sul).

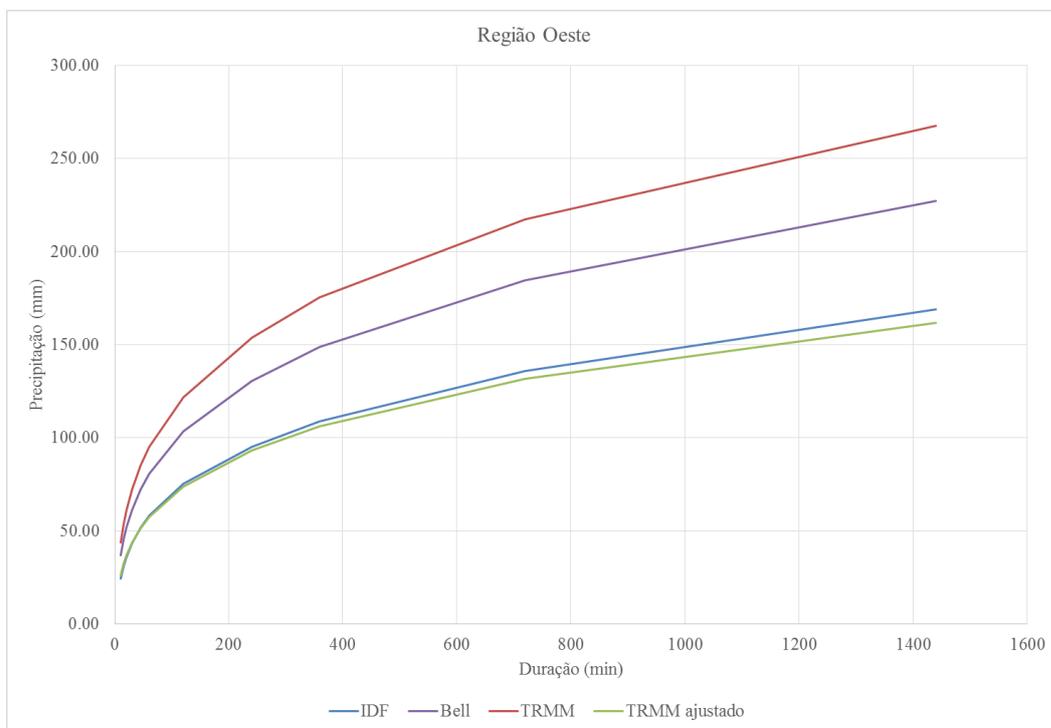


Figura 74 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM<sub>ajustado</sub> na Região Oeste (localidade Uruguaiana).

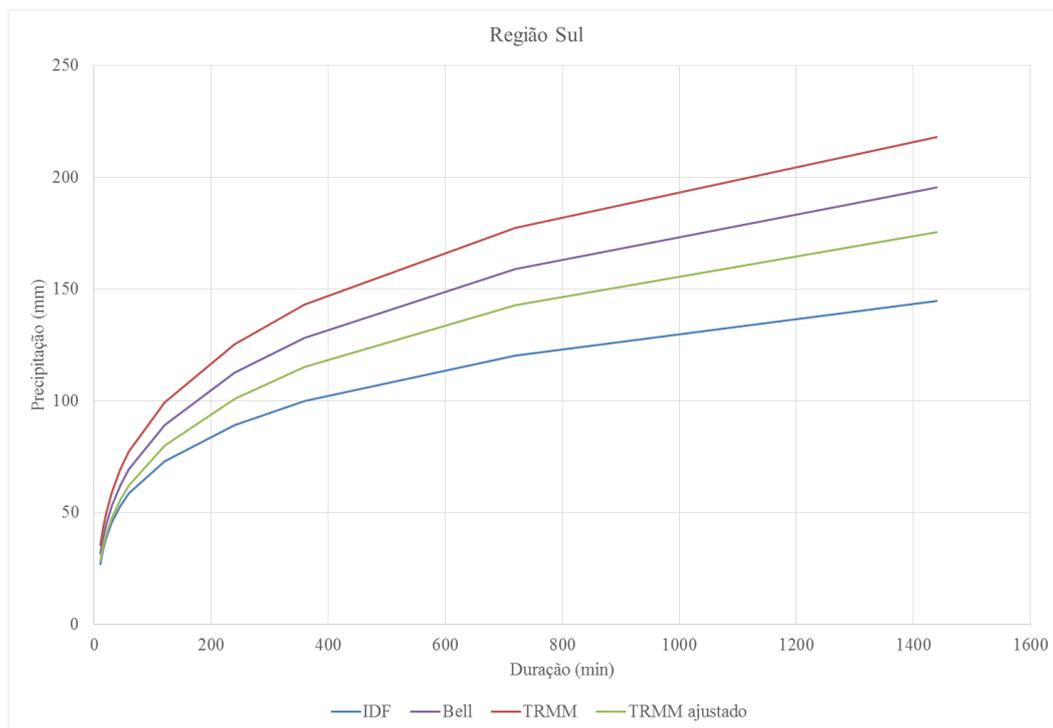


Figura 75 – Comportamento das curvas IDF, BELL, TRMM e TRMM<sub>ajustado</sub> na Região Sul (localidade Rio Grande).

O gráfico boxplot apresentado na Figura 76 permitiu verificar a variações de erro do TRMM<sub>ajustado</sub> comparado com a IDF em cada estação. O erro foi resultante da diferença entre os valores de lâminas d'água calculadas pelas equações das curvas do TRMM<sub>ajustado</sub> e das equações IDF em cada localidade.

Observou-se que Santa Maria e Caxias do Sul tiveram variações menores dos dados, que pode ter sido influenciado por um ajuste melhor do coeficiente na região Central. A variação de dados foi grande nas estações localizadas na região Sul (Bagé e Santa Vitória do Palmar), reforçando limitação de Bell quando se lida com as regiões mais afetadas por massas polares. A maioria dos locais mostraram pouca variação entre o primeiro e o terceiro quartil, o que indica que os desvios de resultados IDF são semelhantes para diferentes durações e tempos de retorno.

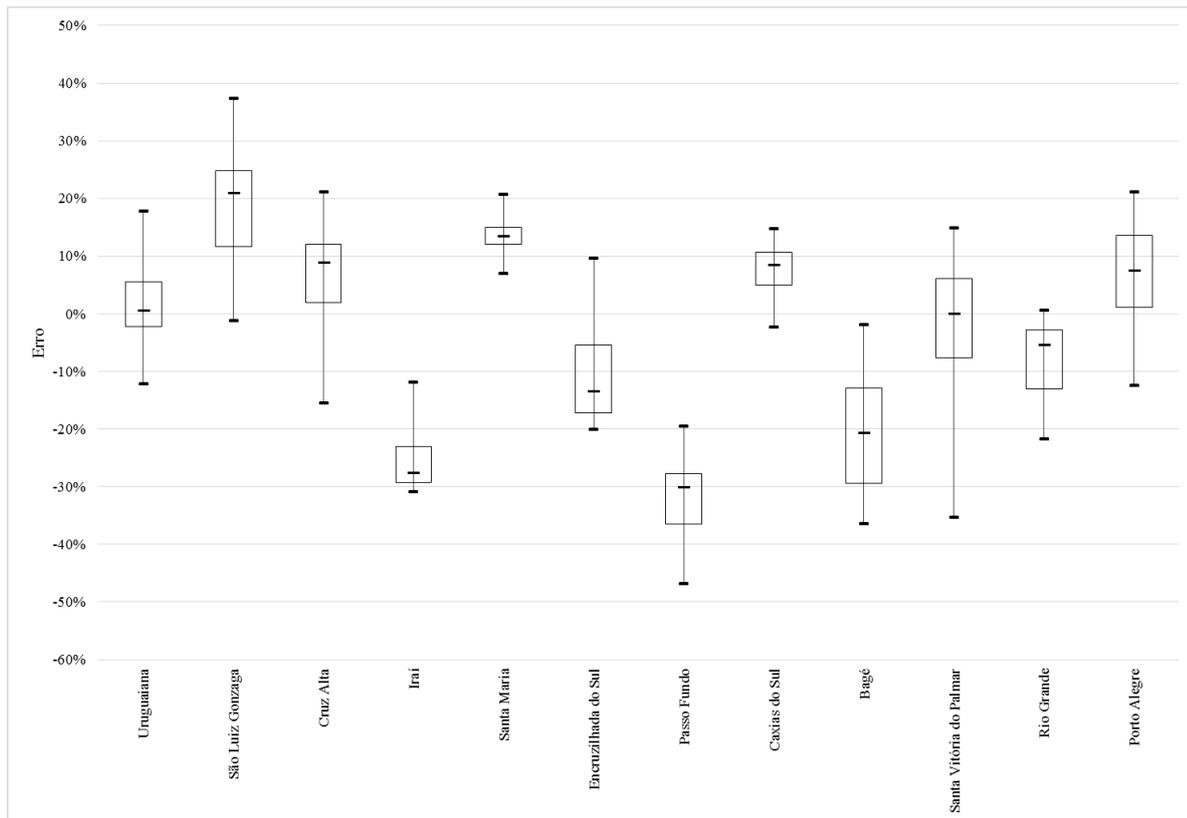


Figura 76 – Erros entre IDF e TRMM<sub>ajustado</sub> em cada localidade.

#### 4.9 Comparação entre os métodos aplicados

Como foi possível observar, os métodos de comparação entre estimativas 3B42 e dados observados em estações pluviométricas geraram resultados bastante parecidos, em relação aos cálculos estatísticos aplicados. Embora cada metodologia tenha sua particularidade, pode-se notar que os índices de desempenho médios atingidos são semelhantes, conforme traz a Tabela 7.

Os índices de desempenho resultantes das metodologias de análise espacial (Pixel a Pixel e Sub-pixels) que foram desenvolvidas com dados da ANA, apresentaram piores índices de desempenho, com exceção do falsos alertas (FAR e F) que foram menores do que os obtidos nas metodologias Pixel a Ponto e Ponto a Ponto.

Os índices resultantes do método Pixel a Ponto foram muito próximos dos obtidos na análise Ponto a Ponto, da mesma forma os resultados de Pixel a Pixel se assemelharam dos valores provenientes da comparação por Sub-pixels.

Um índice de desempenho a ser destacado é o falso alerta (F) que configura a capacidade das estimativas 3B42 em acertar em dias sem chuva. Considerando os quatro métodos da Tabela 7, o valor médio de F não foi sempre abaixo 0,10, indicando que somente em menos de 10% dos dias sem chuva há estimativas de precipitação.

Em relação a análise com séries diárias, o método de Análise Agregada apresentou a melhor performance, tendo em vista que atingiu os menores valores de EMA e EQM e o maior valor de 0,79. Entretanto, o valor de NS diário na Análise Agregada foi bem inferior aos obtidos nas metodologias Pixel a Ponto e Ponto a Ponto. Contudo, os dados observados utilizados nos primeiros dois métodos são provenientes do INMET, logo, passam por uma análise de consistência mais rigorosa e apresentam menor números de falhas nas séries.

Os valores médios das demais estatísticas (coeficiente de correlação, erro médio absoluto, erro médio quadrático, coeficiente de Nash-Sutcliffe e viés) estão apresentados na Tabela 9. Os dados apresentados na tabela compreendem as três escalas temporais estudadas (diárias, somatório de 15 dias e somatório de 30 dias).

Analisando os resultados médios obtidos com séries de acumulados de 15 dias, pode-se observar que os valores de NS não variou tanto entre os métodos, sendo que a Análise Agregada apresentou os melhores resultados em todas as estatísticas resumidas na Tabela 8. Em termos de NS 15, os métodos de análise pontual (Pixel a Ponto e Ponto a Ponto) atingiram valores superiores aos encontrados pelas metodologias de análise espacial por Pixel a Pixel e Sub-pixels.

Tabela 7. Valores médios, mínimos e máximos dos índices de desempenho PC, H, FAR, F, CSI, Bias, HSS e PSS obtidos nas metodologias estudadas.

Índice de desempenho	Método de comparação			
	Pixel a Ponto	Ponto a Ponto	Pixel a Pixel	Sub-pixels
PC	<b>0,87</b> (0,84 – 0,90)	<b>0,87</b> (0,83 – 0,90)	<b>0,79</b> (0,62 – 0,87)	<b>0,76</b> (0,63 – 0,86)
H	<b>0,74</b> (0,64 – 0,80)	<b>0,76</b> (0,66 – 0,83)	<b>0,57</b> (0,33 – 0,79)	<b>0,56</b> (0,33 – 0,71)
FAR	<b>0,22</b> (0,17 – 0,31)	<b>0,24</b> (0,18 – 0,41)	<b>0,12</b> (0,04 – 0,49)	<b>0,10</b> (0,04 – 0,45)
F	<b>0,08</b> (0,06 – 0,10)	<b>0,09</b> (0,07 – 0,14)	<b>0,05</b> (0,02 – 0,33)	<b>0,05</b> (0,02 – 0,33)
CSI	<b>0,61</b> (0,51 – 0,66)	<b>0,62</b> (0,48 – 0,68)	<b>0,51</b> (0,31 – 0,65)	<b>0,53</b> (0,31 – 0,64)
Bias	<b>0,95</b> (0,82 – 1,04)	<b>1,01</b> (0,89 – 1,19)	<b>0,65</b> (0,38 – 1,37)	<b>0,61</b> (0,38 – 1,04)
HSS	<b>0,66</b> (0,58 – 0,73)	<b>0,67</b> (0,53 – 0,74)	<b>0,53</b> (0,23 – 0,69)	<b>0,53</b> (0,23 – 0,69)
PSS	<b>0,65</b> (0,57 – 0,73)	<b>0,67</b> (0,57 – 0,75)	<b>0,51</b> (0,23 – 0,69)	<b>0,51</b> (0,23 – 0,69)

Em termos de r, EMA e EQM, os valores médios mensais foram ainda mais próximos entre as cinco metodologias aplicadas, sendo que novamente os valores obtidos Pixel a Pixel e Sub-pixels, foram ligeiramente piores. Em relação ao NS 30 que se deu a maior diferença entre os métodos, considerando a escala temporal de 30 dias.

Embora na análise dos valores máximos atingidos por cada metodologia os resultados de NS tenham sido mais próximos entre os cinco métodos, as metodologias Pixel a Pixel e por Sub-pixels apresentaram valores médios piores em relação aos demais métodos de comparação. Possivelmente esses valores (tanto dos índices de desempenho, quanto das demais metodologias) foram influenciados por regiões onde a densidade de postos pluviométricos era baixa, diminuindo a qualidade da comparação.

Outra questão a ser mencionada é a baixa qualidade de algumas estações da ANA, principalmente em relação ao número de falhas nas séries históricas, o que pode influenciar diretamente nos resultados das comparações. Contudo essa deficiência não tem tanta interferência na Análise Agregada, pois se trata de um procedimento metodológico que considera a média da precipitação pluviométrica (estimada e observada) em toda uma região, no caso em bacias hidrográficas.

Os valores de viés obtidos pelas cinco metodologias não variaram muito entre si, com exceção da Análise Agregada que apresentou viés quase 4% maior que nos métodos Pixel a Pixel e por Sub-pixels. Todavia essa diferença é pequena.

Tabela 8 – Valores médios, mínimos e máximos de r, EMA, EQM, NS e viés obtidos pelas metodologias estudadas nas três escalas temporais.

Escala temporal	Estatística aplicada	Método de comparação				
		Pixel a Ponto	Ponto a Ponto	Pixel a Pixel	Sub-pixels	Análise Agregada
Diário	r	<b>0,72</b> (0,62 – 0,79)	<b>0,74</b> (0,64 – 0,80)	<b>0,69</b> (0,40 – 0,78)	<b>0,71</b> (0,40 – 0,79)	<b>0,79</b> (0,62 – 0,86)
	EMA (mm)	<b>3,62</b> (3,01 – 3,37)	<b>3,49</b> (3,01 – 3,14)	<b>3,97</b> (3,20 – 5,62)	<b>3,88</b> (3,17 – 4,98)	<b>1,50</b> (0,83 – 2,11)
	EQM (mm)	<b>9,97</b> (9,19 – 11,99)	<b>9,91</b> (8,85 – 10,91)	<b>10,26</b> (8,13 – 14,65)	<b>9,97</b> (8,14 – 12,95)	<b>3,64</b> (2,27 – 4,89)
	NS	<b>0,30</b> (-0,13 – 0,52)	<b>0,37</b> (0,06 – 0,56)	<b>-0,25</b> (-2,27 – 0,34)	<b>-0,24</b> (-2,25 – 0,34)	<b>0,15</b> (-0,36 – 0,51)
15 dias	r	<b>0,82</b> (0,71 – 0,88)	<b>0,83</b> (0,71 – 0,89)	<b>0,83</b> (0,42 – 0,91)	<b>0,84</b> (0,42 – 0,91)	<b>0,90</b> (0,83 – 0,94)
	EMA (mm)	<b>24,53</b> (20,22 – 29,86)	<b>23,60</b> (19,95 – 28,39)	<b>24,85</b> (19,42 – 39,64)	<b>24,21</b> (19,42 – 39,33)	<b>9,04</b> (4,87 – 12,72)
	EQM (mm)	<b>35,33</b> (30,12 – 44,29)	<b>33,85</b> (28,77 – 40,77)	<b>34,97</b> (26,36 – 54,52)	<b>34,12</b> (26,55 – 54,14)	<b>12,81</b> (6,95 – 17,43)
	NS	<b>0,56</b> (0,32 – 0,71)	<b>0,60</b> (0,35 – 0,75)	<b>0,43</b> (-0,99 – 0,69)	<b>0,44</b> (-0,97 – 0,70)	<b>0,64</b> (0,41 – 0,78)
30 dias	r	<b>0,90</b> (0,82 – 0,95)	<b>0,91</b> (0,82 – 0,96)	<b>0,87</b> (0,42 – 0,94)	<b>0,88</b> (0,43 – 0,95)	<b>0,93</b> (0,88 – 0,97)
	EMA (mm)	<b>28,05</b> (21,64 – 40,13)	<b>27,34</b> (21,17 – 40,60)	<b>34,97</b> (24,54 – 58,25)	<b>33,96</b> (24,81 – 57,83)	<b>13,17</b> (6,62 – 18,84)
	EQM (mm)	<b>28,53</b> (29,08 – 51,06)	<b>37,29</b> (18,96 – 39,06)	<b>47,04</b> (34,85 – 79,89)	<b>45,78</b> (32,77 – 79,31)	<b>17,57</b> (9,23 – 23,95)
	NS	<b>0,76</b> (0,52 – 0,90)	<b>0,77</b> (0,55 – 0,92)	<b>0,52</b> (-0,94 – 0,81)	<b>0,53</b> (-0,93 – 0,84)	<b>0,70</b> (0,57 – 0,85)
	Viés (%)	<b>9,26</b> (0,20 – 22,67)	<b>9,34</b> (0,20 – 23,49)	<b>11,72</b> (-0,17 – 0,29)	<b>11,76</b> (-0,17 – 0,25)	<b>15,14</b> (5,96 – 20,72)

De modo geral, as cinco metodologias estudadas apresentaram resultados parecidos, permitindo inferir que, independentemente do método de avaliação, os produtos 3B42 apresentam o mesmo comportamento na região do Rio Grande do Sul. Assim, cabe ao usuário dessas estimativas definir qual o método que melhor se encaixa em sua atividade, tendo em vista que há casos em que se faz necessário o processamento prévio das estimativas (Ponto a Ponto) ou dos dados observados (Pixel a Pixel, Sub-pixels e Análise Agregada) e casos em que os dados são utilizados sem manipulação preliminar (Pixel a Ponto). Os resultados permitiram

indicar, também, que o uso das estimativas 3B42 em acumulados de 15 ou 30 dias as torna mais representativas, haja vista que as estatísticas melhoraram bastante ao comparar esses acumulados. Logo, as estimativas tem grande potencial de utilização, seja de maneira especializada ou pontual e podem ser consideradas como uma fonte de dados alternativa em casos de escassez de informações pluviométricas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estimativas de precipitação pluviométrica dos produtos 3B42 do TRMM comparadas com os dados observados da ANA e do INMET apresentaram bons resultados, principalmente nas análises envolvendo as séries de acumulados de 15 e 30 dias. Observaram-se as piores performances das estimativas 3B42 ocorrerem na região Litorânea do Estado, sobretudo no extremo Sul. Essa redução da qualidade das estimativas possivelmente pode estar associada aos da maritimidade que tem forte influência na região Leste do Estado. Os melhores valores foram obtidos na região Norte, onde a Massa Tropical Continental predomina

As avaliações pontuais (Pixel a Ponto e Ponto a Ponto) que foram desenvolvidas com os dados do INMET, apresentaram bons resultados com menores variações do que as avaliações espaciais (ou regionais). A análise pontual gerou bons resultados, o que permite a utilização das estimativas 3B42 sem necessidade de processamento prévio, como demonstrou a análise Pixel a Ponto.

Já a análise dos produtos 3B42 de forma regional, desenvolvida com os dados da ANA, gerou resultados um pouco abaixo dos obtidos nas análises pontuais, possivelmente em função da baixa densidade de estações em algumas áreas do Estado, principalmente no extremo Sul. Contudo, ao desconsiderar essas regiões, os resultados, tanto dos índices de desempenho, quanto das demais estatísticas, foram muito próximos das demais metodologias.

A Análise Agregada, embora esteja inserida na avaliação regional e tenha sido realizada com a mesma base de dados do que as avaliação Pixel a Pixel e por Sub-pixels, apresentou resultados melhores em virtude de que esta metodologia é desenvolvida por meio de médias de precipitação, o que gera compensação de erros associados a variabilidade espacial da precipitação pluviométrica.

As análises referentes à utilização dos produtos 3B42 para determinação de chuvas intensas mostraram o grande potencial que as estimativas de satélite, quando associadas a Bell (1969) têm em descrever a distribuição de eventos hidrológicos extremos envolvendo precipitações intensas no RS, o que é de grande importância para uma região com escassez de dados. No entanto, os resultados sugerem a necessidade de estudos mais detalhados na região do extremo sul, que apresentou piores resultados.

As estimativas 3B42 apresentam grande potencial como fonte alternativa de dados de precipitação pluviométrica, principalmente pela disponibilidade temporal e espacial desses dados, entretanto deve-se ter o conhecimento de que são medidas indiretas e podem conter erros. Assim para cada região e escala temporal deve-se ter alguns cuidados no momento de analisar a qualidade dos produtos de satélite, tendo em vista que a escassez de dados, mesmo que tenha motivado essa análise, ainda é um fator limitante na análise das mesmas. De modo geral, essas estimativas são mais representativas em grandes regiões e quando trabalhadas séries acumuladas a cada 15 ou 30 dias.

## 6 REFERÊNCIAS

ADLER, R. F.; HUFFMAN, G. J.; CHANG, A.; FERRARO, R.; XIE, P.; JANOWIAK, J.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U.; CURTIS, S.; BOLVIN, D.; GRUBER, A.; SUSSKIND, J.; ARKIN, P.; NELKIN, E. The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, n. 6, p. 1147-1167, 2003.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Especificações Técnicas: Plataforma de Coleta de Dados (PCDs)**. Superintendência De Gestão Da Rede Hidrometeorológica (SGH), Brasília - DF, julho de 2011

ALMEIDA, C. T.; DELGADO, R. C.; JUNIOR, J. F. O.; GOIS, G.; CAVALCANTI, A. S. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do Estado do Amazonas. **Floresta e Ambiente**, 279-286, 2015.

AS-SYAKUR, A. R., T. TANAKA, R. PRASETIA, I. K. SWARDIKA, AND I.W. KASA. Comparison of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) products and daily-monthly gauge data over Bali Island. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 31, n. 24. 2011, 8969-8982.

BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. 2 ed. 2 reimpressão. São Paulo: Atlas, 2009.

BELL, F. C. Generalized rainfall-duration-frequency relationships. **Journal of Hydrologic Engineering**. Div-ASCE, 95, 311-327, 1969.

BELTRAME, L. F. S.; LANNA, A. E. L.; LOUZADA, J. A. S. **Chuvvas Intensas**. Porto Alegre, 69 p, 1991.

BERLATO, M. A.; FARENZENA, H.; FONTANA, D. C. Associação entre El Niño Oscilação Sul e a produtividade de milho no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 5, p. 423-432, Brasília, 2005.

BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento Remoto e SIG avançados**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BRITTO, F. P.; BARLETTA, R.; MENDONÇA, M. Regionalização sazonal e mensal da precipitação pluvial máxima no estado do Rio Grande Do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, 2, p. 35-51, 2006.

BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; CLARKE, R. T.; MENDES, C. A. B. A comparison of Amazon rainfall characteristics derived from TRMM, CMORPH and the Brazilian national rain gauge network. **Journal of Geophysical Research**, vol. 116, D19105, 2011.

CAI, Y.; JIN, C.; WANG, A.; GUAN, D.; WU, J.; YUAN, F.; XU, L. Comprehensive precipitation evaluation of TRMM 3B42 with dense rain gauge networks in a mid-latitude basin, northeast, China. **Theoretical and Applied Climatology**. 1434-4483 DOI 10.1007/s00704-015-1598-4. 2015.

CAMPAROTTO, L. B.; BLAIN, G. C.; GIAROLLA, A.; ADAMI, M.; CAMARGO, M. B. P. Validação de dados termopluviométricos obtidos via sensoriamento remoto para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.6 p.665-671, 2013.

CHEN, S.; HONG, Y.; GOURLEY, J. J.; HUFFMAN, G. J.; TIAN, Y.; CAO, Q.; YONG, B.; KIRSTETTER, P.; HU, J.; HARDY, J.; LI, Z.; KHAN, S.; XUE, XIANWU. Evaluation of the successive V6 and V7 TRMM multisatellite precipitation analysis over the Continental United States. **Water Resources Research**, v. 49, p. 8174-8186, 2013.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 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. **Revista Brasileira de Cartografia**. Nº 59/01, Abril 2007.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2001.

CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil: Isoietas anuais de 1977 a 2006**. Serviço Geológico do Brasil.

DENARDIN, J.; FREITAS, P. L. Características fundamentais da chuva no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 17, p. 1409-1416, 1982.

DINKU, T.; CONNOR, S. J.; CECCATO, P. Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over mountainous regions of Africa and South America. In: GEBREMICHAEL, M.; HOSSAIN, F. (Ed.). **Satellite rainfall applications for surface hydrology**. Dordrecht: Springer. p. 193-204, 2010.

FARSUL (Federação da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul). **Relatório econômico 2012 e perspectivas para 2013**. Assessoria Econômica. Porto Alegre, RS. Dezembro de 2012.

FENSTERSEIFER, C. A. **Qualidade das Estimativas de Precipitações Derivadas de Satélites na Bacia do Alto Jacuí – RS**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

FENSTERSEIFER, C.; ALLASIA, D. A.; PAZ, A. R. Assessment of the TRMM 3B42 precipitation product in Southern Brazil. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 1-9. DOI: 10.1111/1752-1688.12398, 2016.

FISHER, B. L. Climatological Validation of TRMM TMI and PR Monthly Rain Products over Oklahoma. **Journal of Applied Meteorology**, 43, 519–535. 2004.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 101 p.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GONÇALVES, L. S. **Relações intensidade-frequência-duração com base em estimativas de precipitação por satélite**. 135 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

GRIMM, A. M. **Meteorologia básica**. Notas de aula. Universidade Federal do Paraná, 1999.

GRIMM, A. M. Clima da Região Sul do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e Clima no Brasil**. Oficina de Textos, São Paulo, 2009.

HOU, A. Y.; KAKAR, R. K.; NEECK, S.; AZARBARZIN, A. A.; KUMERROW, C. D.; KOJIMA, M.; OKI, R.; NAKAMURA, K.; IGUCHI, T. **The Global Precipitation Measurement Mission**. American Meteorological Society, 2014. 701-722 p.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. .The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, 8, 2007, 38–55.

JIMÉNEZ, K. Q.; COLLISCHONN, W. Método de combinação de dados de precipitação estimados por satellite e medidos em pluviômetros para a modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 20 Nº 1, 2015, pp. 202-217

JOYCE, R. J.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; XIE, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, n. 3, p. 487-503, 2004.

JÚNIOR, J. F. O.; DELGADO, R. C.; GOIS, G.; LANNES, A.; DIAS, F. O.; SOUZA, J. C.; SOUZA, M. Análise da precipitação e a sua relação com sistemas meteorológicos em Seropédica, Rio de Janeiro. *Floresta e Ambiente*, 140-149, 21(2), 2014.

KENAWY, A. M.; LOPEZ-MORENO, J. I.; McCABE, M. F.; VICENTE-SERRANO, S. M. Evaluation of the TMPA-3B42 precipitation product using a high-density rain gauge network over complex terrain in northeastern Iberia. **Global and Planetary Change**, v. 133, p. 188-200, 2015.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G.; KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K.: The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit, **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 39, p.1965-1982, 2000.

LIU, J.; DUAN, Z.; JIANG, J.; ZHU, A. Evaluation of three satellite precipitation products TRMM 3B42, CMORPH, and PERSIANN over a subtropical watershed in China. **Advances in Meteorology**, v. 15, 13 pages, 2015.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. *Sistemas e Ciência da Informação Geográfica*. 3 ed. 2012.

LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. **The Atmosphere: an introduction to meteorology**. 12th ed. 2012.

MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993.

MATZENAUER, E.; BARNI, N. A.; MALUF, J. R. T. Estimativa do consumo de água para cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, p. 1013-1019, Santa Maria, 2003.

McBRIDE, J. L.; EBERT, E. E. Verification of quantitative forecasts from operational numerical weather prediction models over Australia. **Weather and Forecasting**, v. 15, n. 1, p. 103-121, 2000.

MELO, D. C. D.; XAVIER, A. C.; BIANCHI, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; SCANLON, B. R.; LUCAS, M. C.; WENDLAND, E. Performance evaluation of rainfall estimates by TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis 3B42V6 and V7 over Brazil, **Journal of Geophysical Research: Atmosphere**, 120, 9426–9436, 2015.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1. ed. Brasília: CNPq, v. 1. 256 p. 2012.

MENKE, A. B.; JUNIOR, O. A. C.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N. Análise das mudanças do uso agrícola da terra a partir de dados de sensoriamento remoto multitemporal no município de Luis Eduardo Magalhães (BA – Brasil). **Sociedade & Natureza, Uberlândia** 21 (3): 315-326, dez. 2009.

NASDA. **TRMM Data Users Handbook**. National Space Development Agency of Japan, Earth Observation Center. 2001.

NASTOS, P. T.; KAPSOMENAKIS, J.; PHILANDRAS, K. M. Evaluation of the TRMM 3B43 gridded precipitation estimates over Greece. **Atmospheric Research**, v. 169, part B, p. 497-514, 2015.

NICHOLSON, S. E.; SOME, B.; MCCOLLUM, E.; NELKIN, E.; KLOTTER, D.; BERTE, Y.; DIALLO, B. M.; GAYE, I.; KPABEBA, G.; NDIAYE, O.; NOUKPOZOUNKOU, J. N.; TANU, M.; THIAM, A.; TOURE, A. A.; TRAORE, A. K. Validation of TRMM and Other Rainfall Estimates with a High-Density Gauge Dataset for West Africa, Part II: Validation of TRMM Rainfall Products. **Journal of Applied Meteorology**, 42, 1355–1368, 2003.

NIMER, E. Clima. In: IBGE. **Geografia do Brasil: Região Sul**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro, 420 p., 1990.

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

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

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OMM. **Guide to Hydrological Practices**, World Meteorological Organization, v.1, ed. 6., 2008.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G. Reduced precipitation over large water bodies in the Brazilian Amazon shown from TRMM data. **Geophysical Research Letters**, vol. 38, L04406, 2011.

PASSOW, M. J. TRMM — Tropical rainfall measuring mission: Bringing remote sensing of precipitation into your classroom. TRMM: Trazendo o sensoriamento remoto de precipitação para sua sala de aula. **Terra Didática**, 6(1):03- 08 <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>. 2010.

PAZ, A. Métodos de comparação entre estimativas de precipitação por sensores remotos orbitais e dados pluviométricos. **Comunicação pessoal**. 2016.

PEREIRA, G.; SILVA, M. E. S.; MORAES, E. C.; CARDOZO, F. S. Avaliação dos dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM para o Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 18 n. 13 Jul/Set de 2013 139-148.

PETTY, G. W.; KRAJEWSKI, W. F. Satellite estimation of precipitation over land. *Hydrological Sciences -Journal- des Sciences Hydrologiques*, 41 (4), 1996, 433-451 p.

PINTO, N. L.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J.A. **Hidrologia básica**. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 279 p.

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

POLLOCK, M.; DUTTON, M.; QUINN, P.; O'CONNELL, E.; WILKINSON, M.; COLLI, M. Accurate Rainfall Measurement: The Neglected Achilles Heel of Hydro-Meteorology. **WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods Of Observation**, Saint Petersburg, 2014.

POMBO, S.; OLIVEIRA, R. P. Evaluation of extreme precipitation estimates from TRMM in Angola. **Journal of Hydrology**, 663–679, 2015.

PRAKASH, S.; MITRA, A. K.; AGHAKOUCHAK, A.; PAI, D. S. Error characterization of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA-3B42) products over India for different seasons. **Journal of Hydrology**, 11 pages, 2015a.

PRAKASH, S.; MITRA, A. K.; MOMIM, I. M.; PAI, D. S. RAJAGOPAL, E. N.; BASU, S. Comparison of TMPA-3B42 Versions 6 and 7 Precipitation Products with Gauge-Based Data over India for the Southwest Monsoon Period. *Journal of Hydrometeorology*, v. 15, 2015b.

RINGARD, J.; BECKER, M.; SEYLER, F.; LINGUET, L. Temporal and spatial assessment of four satellite rainfall estimates over French Guiana and North Brazil. **Remote Sensing**, 7, 16441 – 16459, 2015.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n2, 185 – 204, 2010.

ROSSATO, M. S. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia, **Tese de Doutorado**, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 240 pp., 2011.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. **Weather and Forecasting**, 25, 885–894, 2010.

SARTORI, M. G. B. A dinâmica do clima do Rio Grande do Sul: indução empírica e conhecimento científico. **Terra Livre**, São Paulo, ano 19 vol. 1 n. 20, 27 – 49, 2003.

SATGÉ, F.; BONNET, M.-P.; GOSSET, M.; MOLINA, J.; LIMA, W. H. Y.; ZOLÁ, R. P.; TIMOUK, F.; GARNIER, J. Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. **Atmospheric Research**, 167, 1-14, 2016.

SILVA, C. M. S.; LÚCIO, P. S.; SPYRIDES, M. H. C. Distribuição espacial da precipitação sobre o Rio Grande do Norte: estimativas via satélites e medidas por pluviômetros. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 3, 337 – 346, 2012.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. & COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 12:258-265, 2008.

SOARES, A. S. D. **Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba**. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2014.

SOROOSH, S.; HSU, K.; GAO, X.; GUPTA, H. V.; IMAM, B.; BRAITHWAITE, T. Evaluation of PERSIANN System Satellite-Based Estimates of Tropical Rainfall. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 81, n. 9, p. 2035-2046, 2000.

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. **Journal of Hydrometeorology**, 9, p. 622–640, 2008.

TORRES, L. H.; Águas de maio: a enchente de 1941 em Rio Grande. **Historiæ**, v. 3, n. 3, p. 239-254, 2012.

TRMM. **Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)**: Senior Review Proposal, 2007.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da UFRGS: ABRH: EDUSP, 1993. 952 p.

VIANA, D. R. **Comportamento espaço-temporal da precipitação na Região Sul do Brasil utilizando dados TRMM e SRTM**. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

WAGNER, A. **Literature Study on the Correction of Precipitation Measurements**. FutMon C1-Met-29(BY), 2009.

WANIELISTA, M.; KERSTEN, R.; EAGLIN, R. **Hydrology: water quantity and quality control**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

WARD, A. D.; TRIMBLE, S. W. **Environmental Hydrology**. Segundo Edition. Boca Raton, Florida : CRC Presas, 2004. 475 p.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University. New York, 2006, 627 p.

WOLLMANN, C. A. Enchentes no Rio Grande do Sul do século XXI. **Mercator**, v. 13, n. 1, p. 79-91, Fortaleza, 2014.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, 2015.

YU, Z.; YU, H.; CHEN, P.; QIAN, C.; YUE, C. Verification of Tropical Cyclone-Related Satellite Precipitation Estimates in Mainland China. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, 2227 – 2241, 2009.

ZULKAFI, Z.; BUYTAERT, W.; ONOF, C.; MANZ, B.; TARNAVSKY, E.; LAVADO, W.; GUYOT, J. L. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean-Amazon river basins. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 2, p. 581 – 591, 2014.

## APÊNDICE A

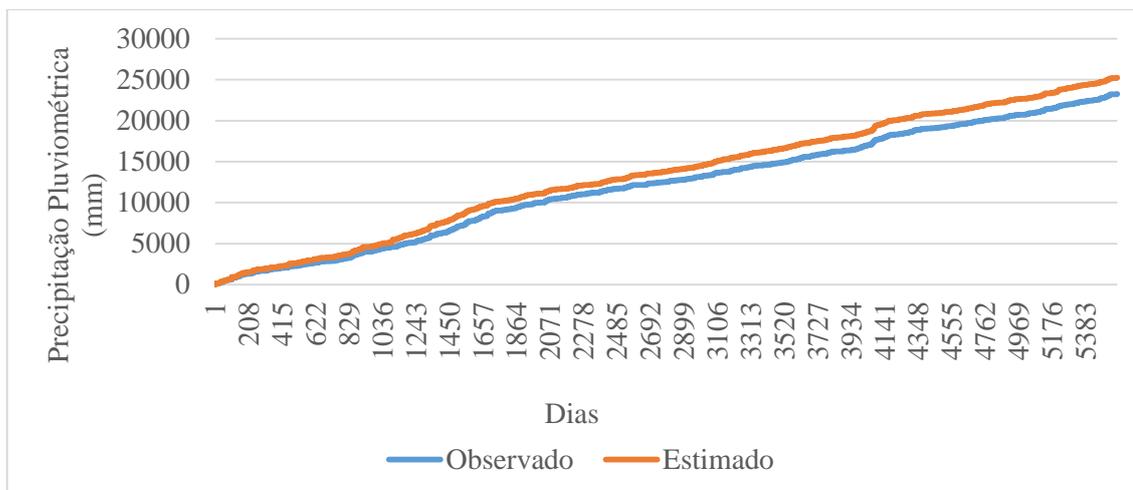


Figura 77 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Bagé.

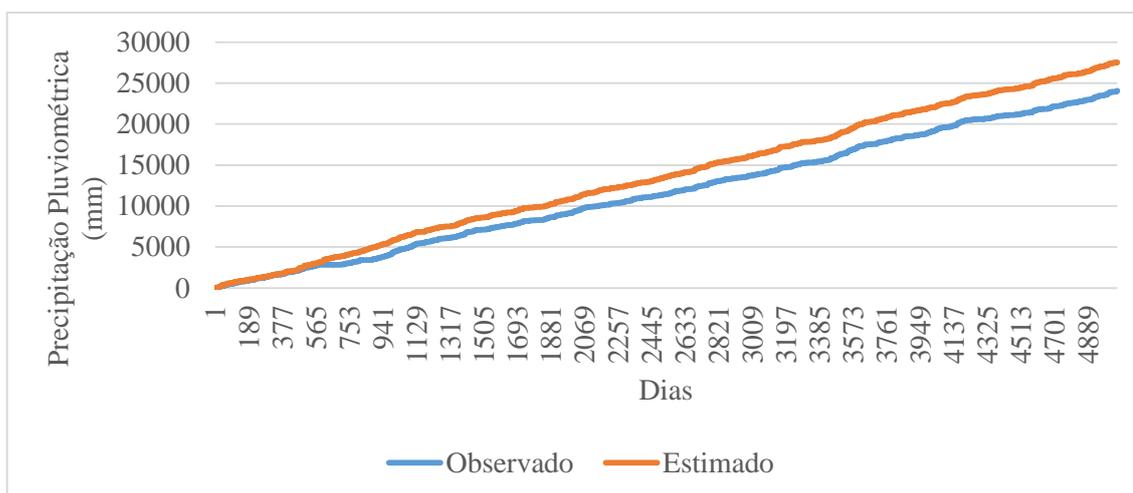


Figura 78 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Bento Gonçalves.

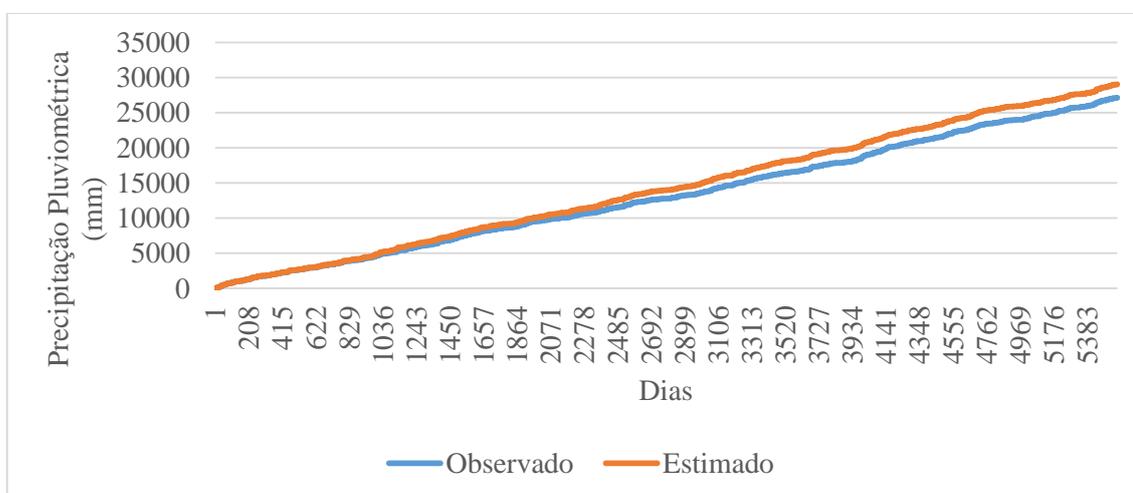


Figura 79 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Bom Jesus.

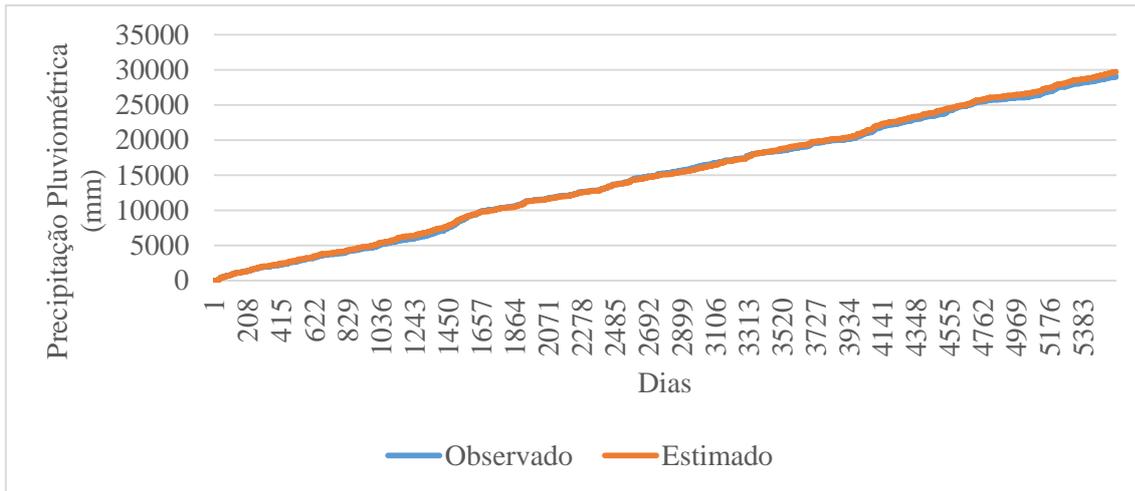


Figura 80 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Cruz Alta.

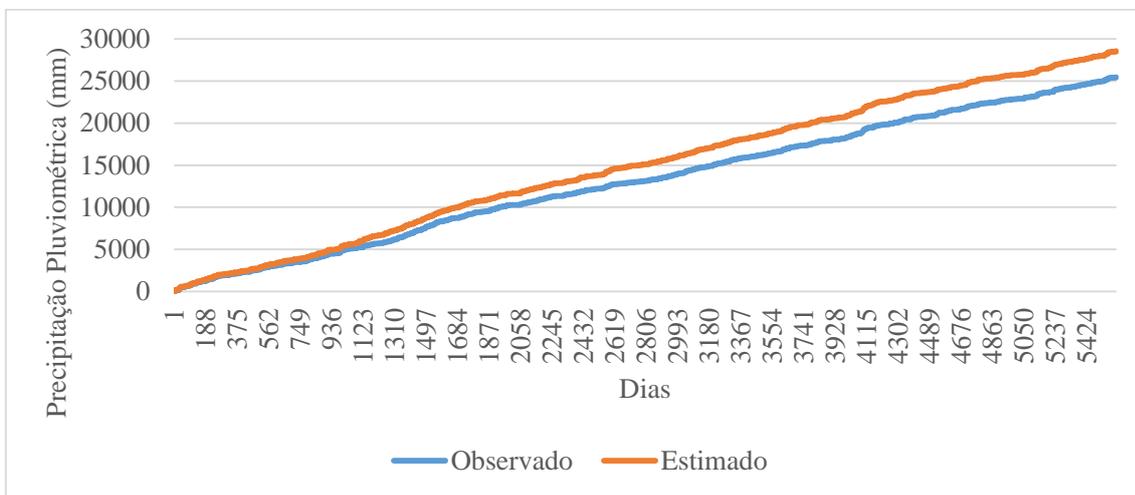


Figura 81 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Encruzilhada do Sul.

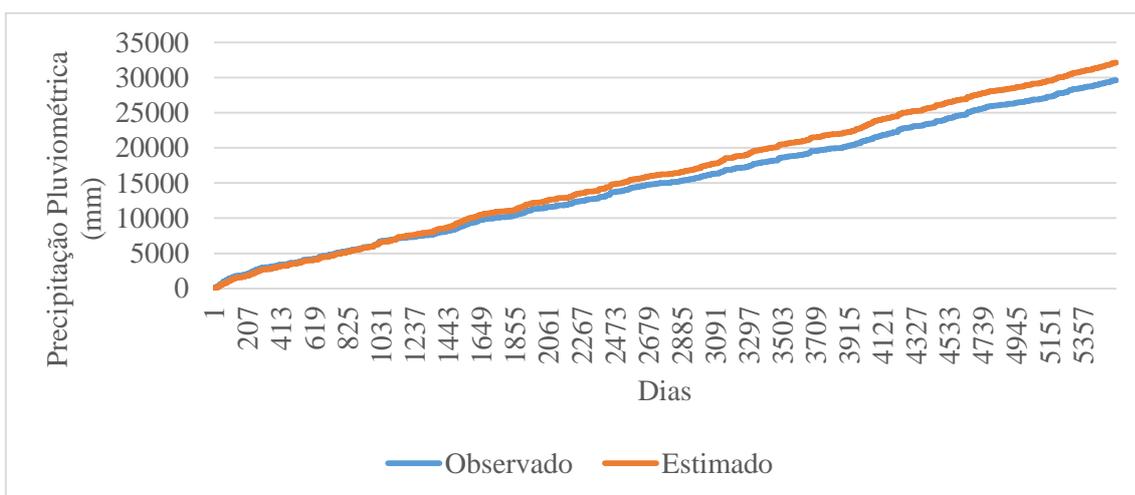


Figura 82 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Iraí.

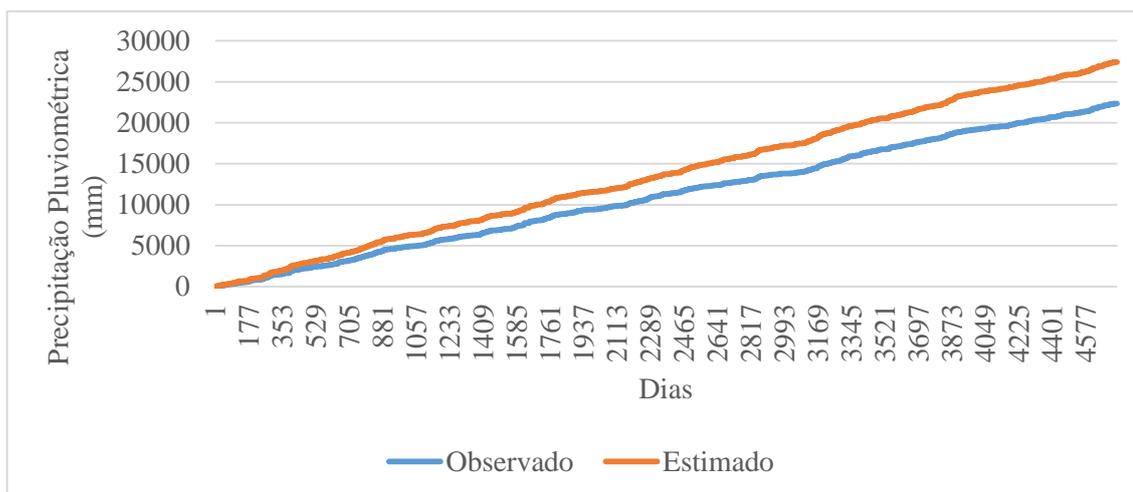


Figura 83 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Lagoa Vermelha.

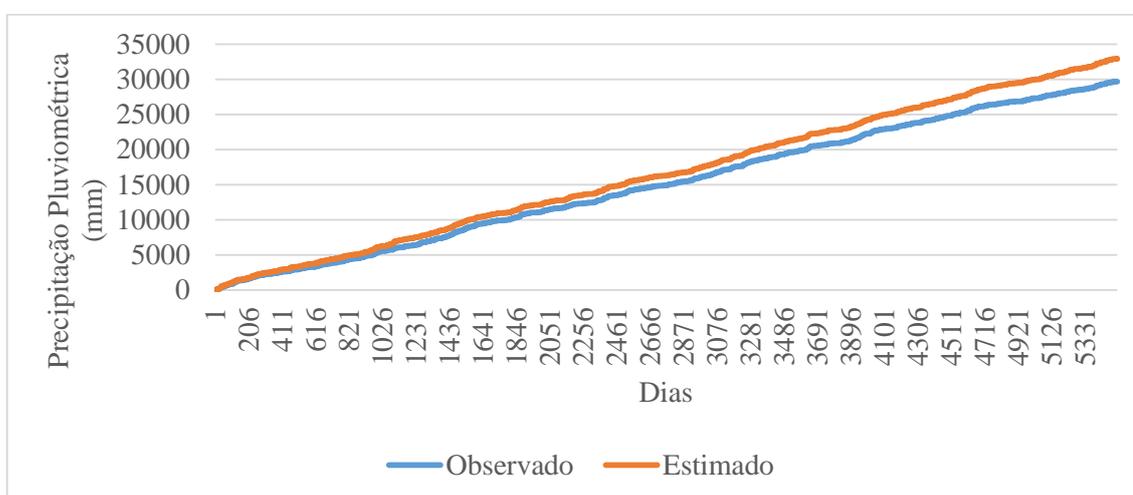


Figura 84 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Passo Fundo.

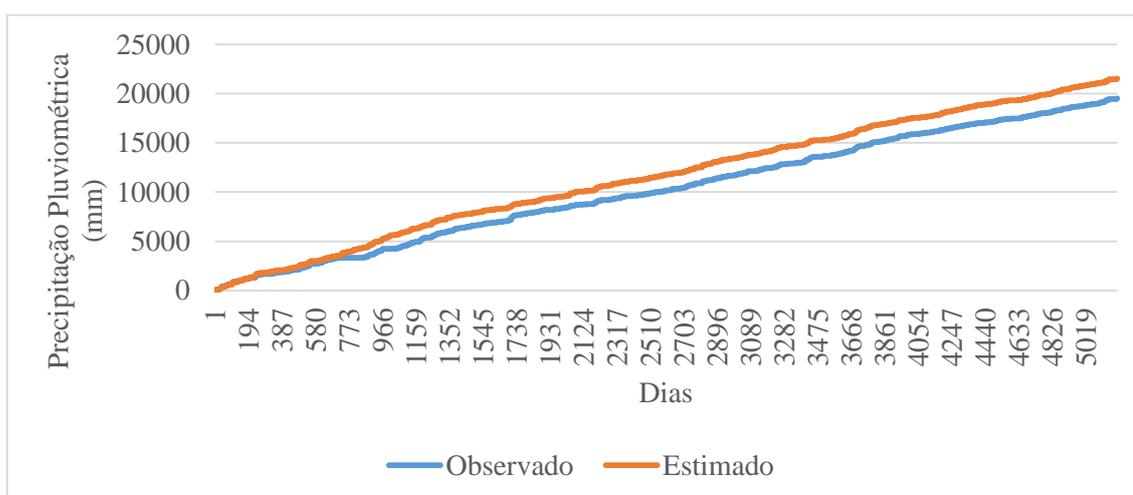


Figura 85 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Pelotas.

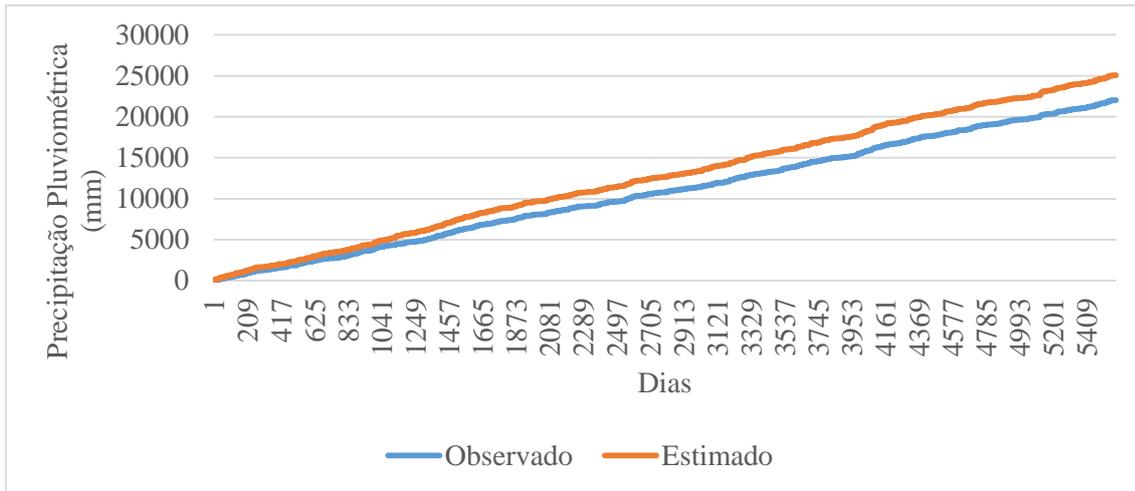


Figura 86 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Porto Alegre.

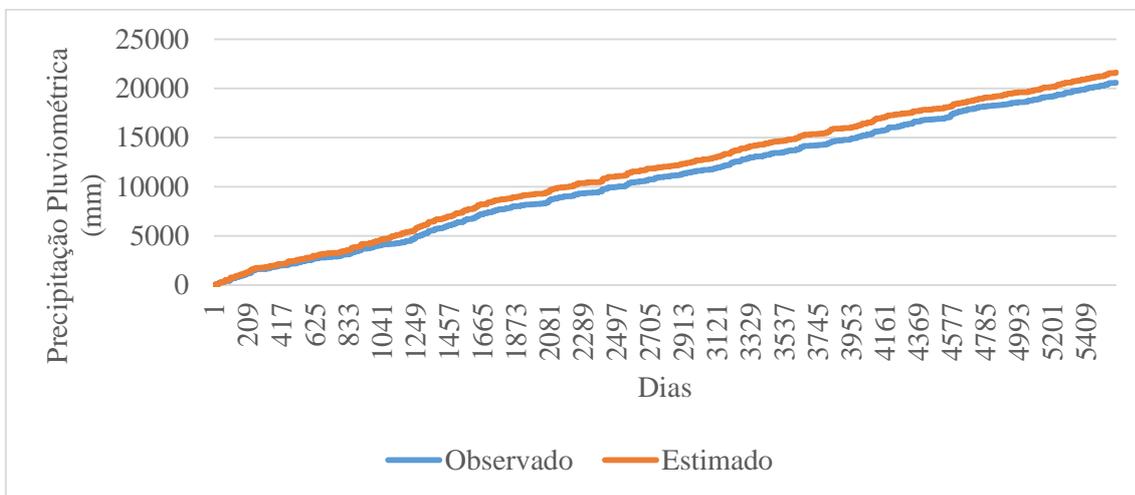


Figura 87 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Rio Grande.

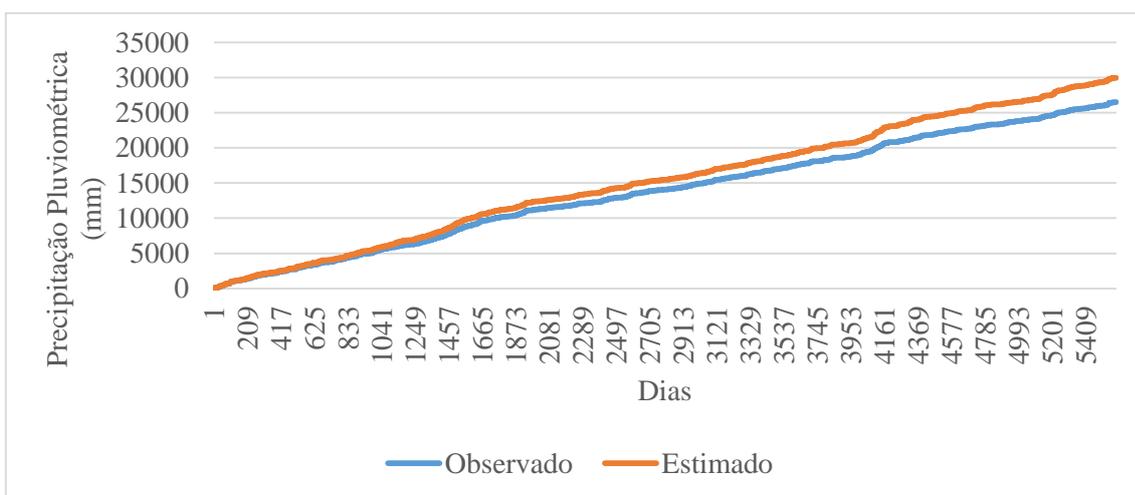


Figura 88 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Santa Maria.

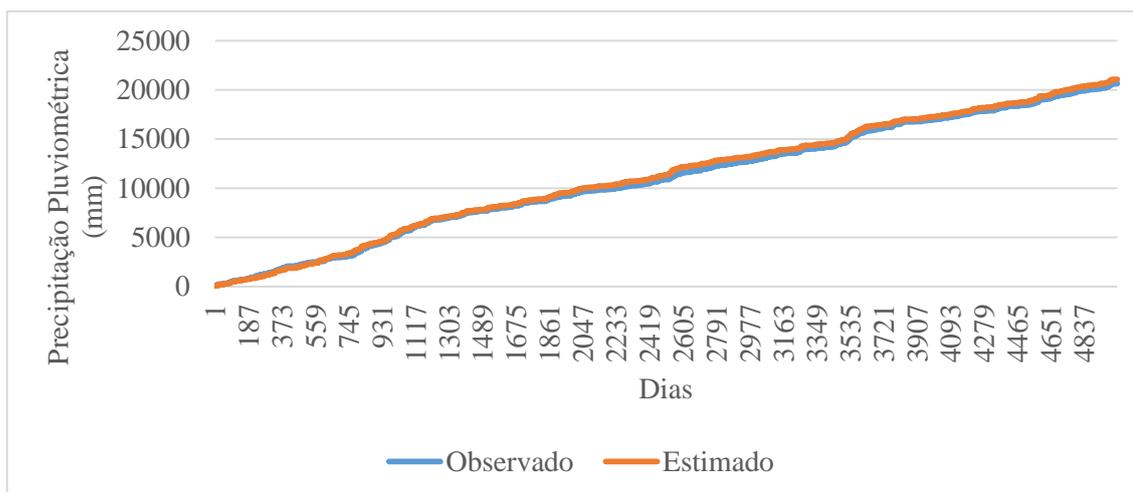


Figura 89 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Santana do Livramento.

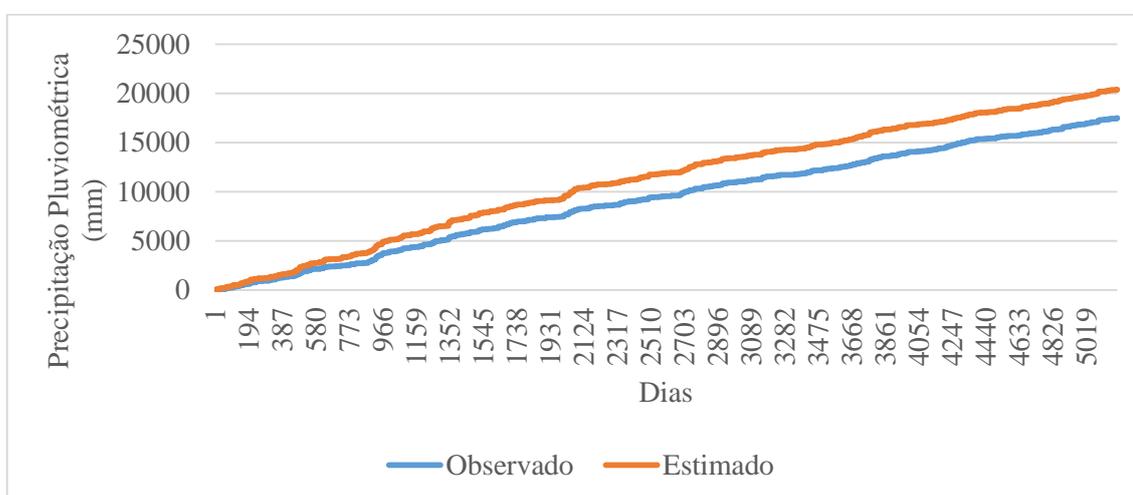


Figura 90 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Santa Vitória do Palmar.

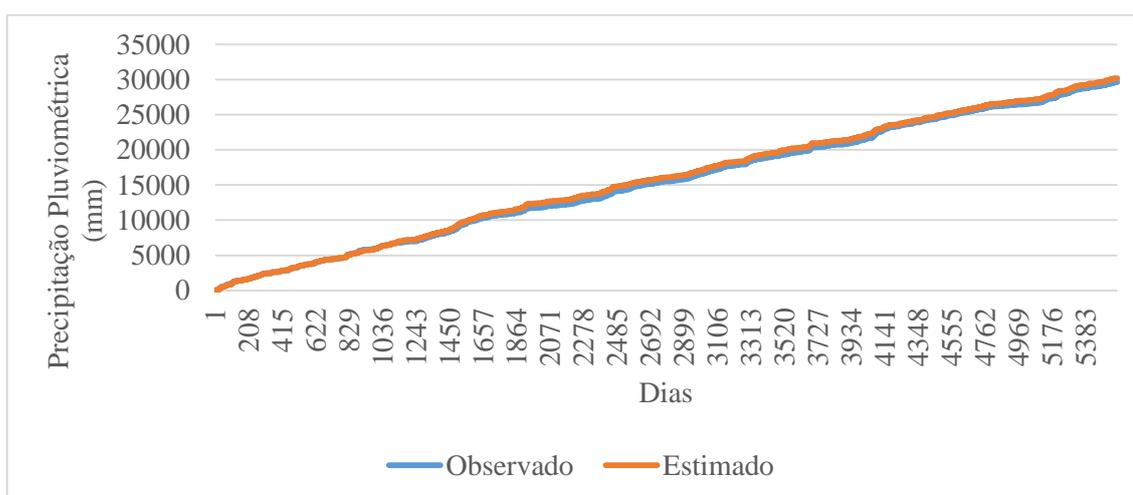


Figura 91 – Séries acumuladas (pixel e observada) em São Luiz Gonzaga.

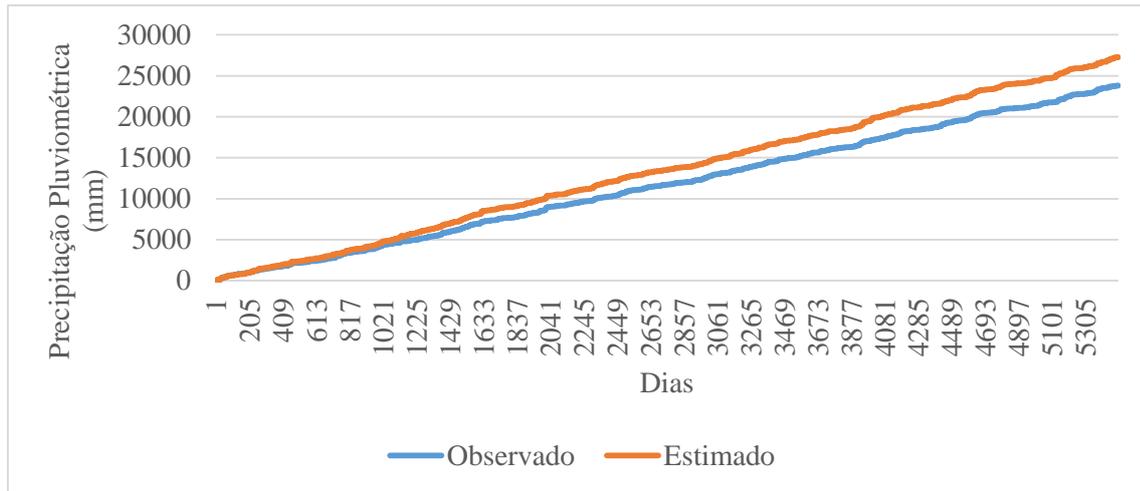


Figura 92 – Séries acumuladas (pixel e observada) em Torres.

## APÊNDICE B

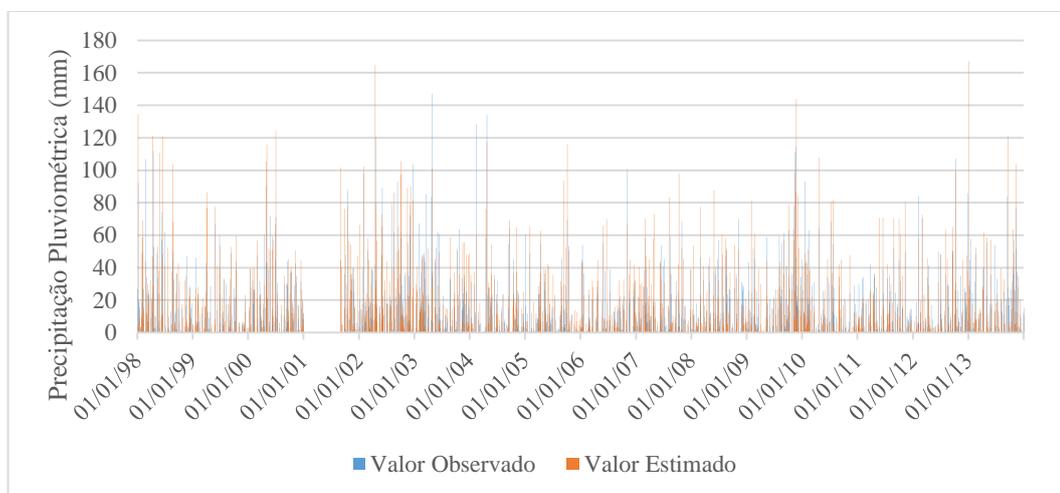


Figura 93 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Bagé

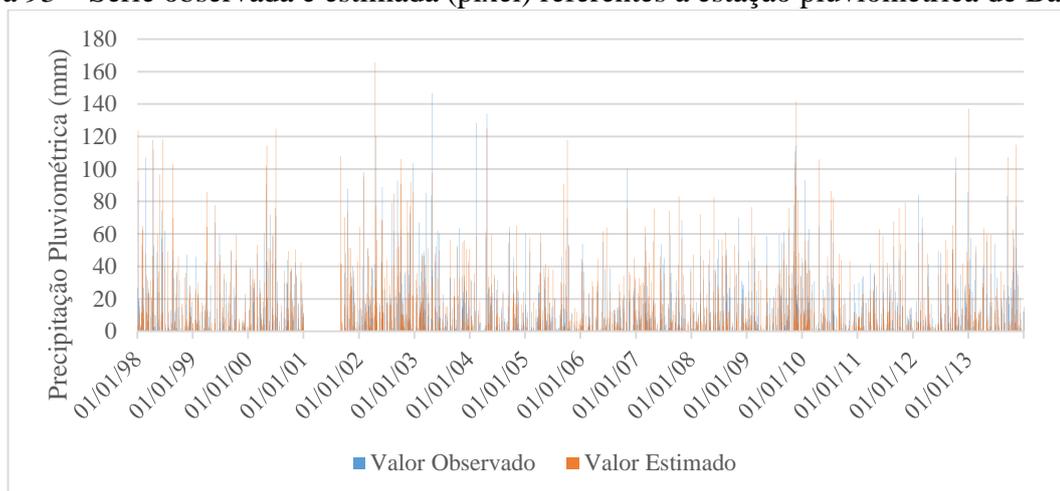


Figura 94 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Bagé.

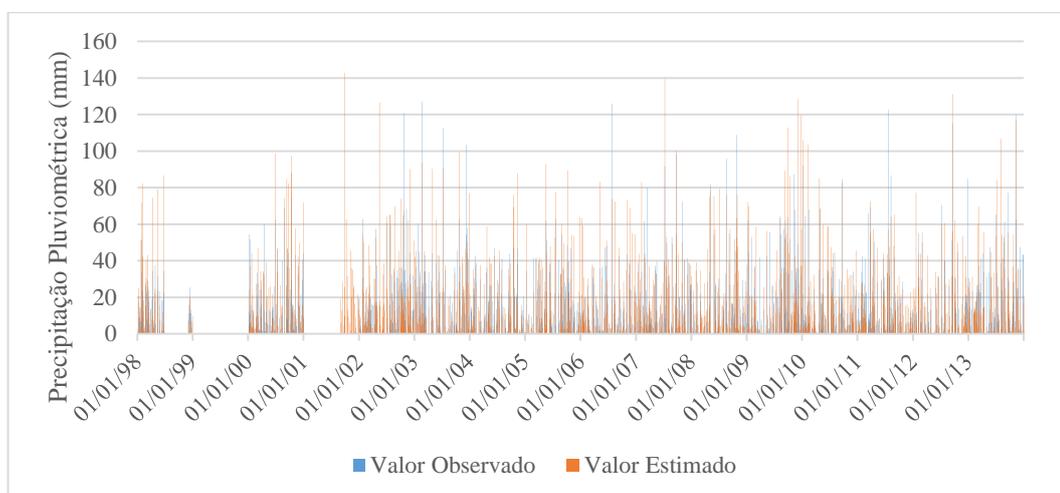


Figura 95 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Bento Gonçalves.

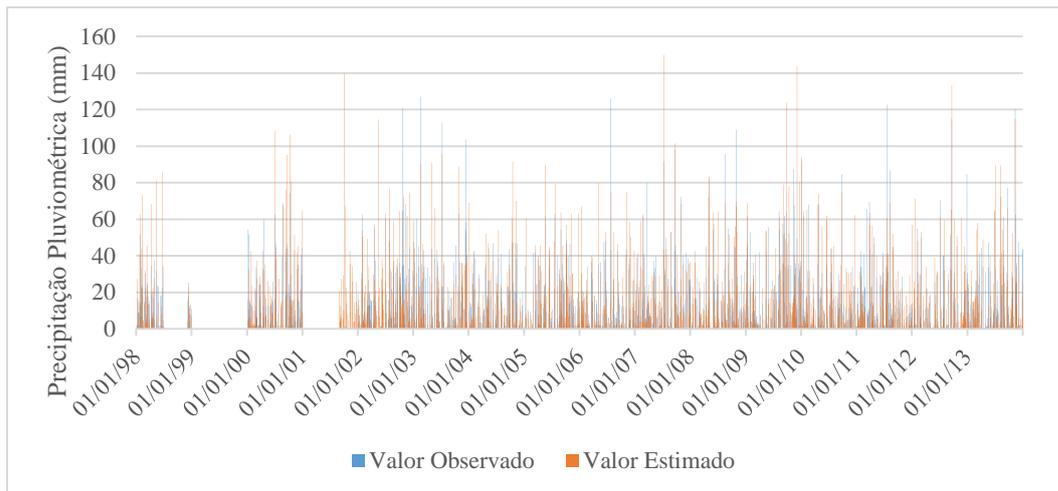


Figura 96 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Bento Gonçalves

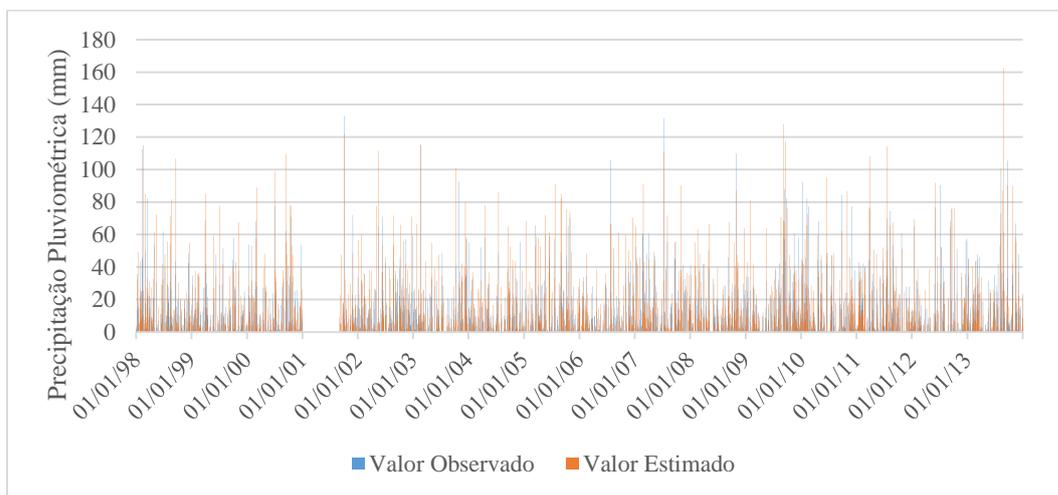


Figura 97 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Bom Jesus.

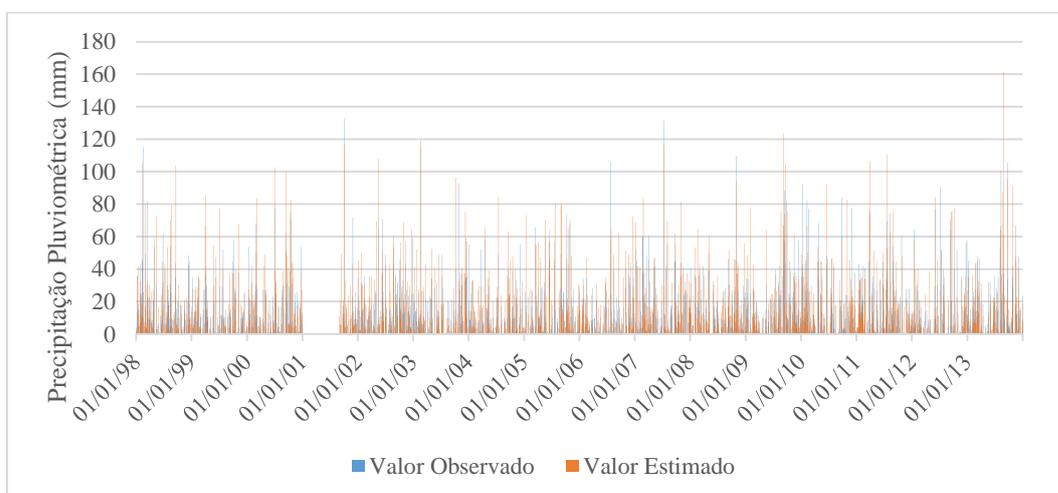


Figura 98 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Bom Jesus.

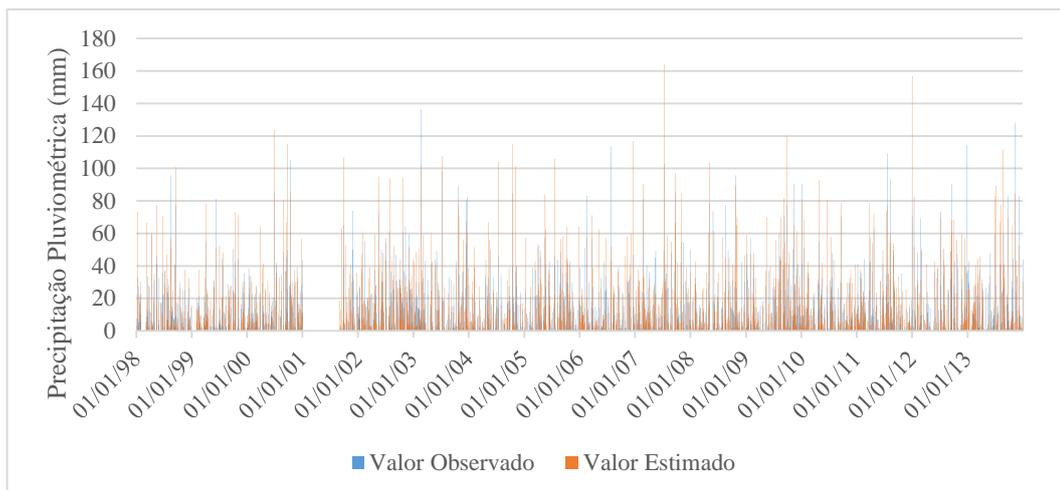


Figura 99 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Caxias do Sul.

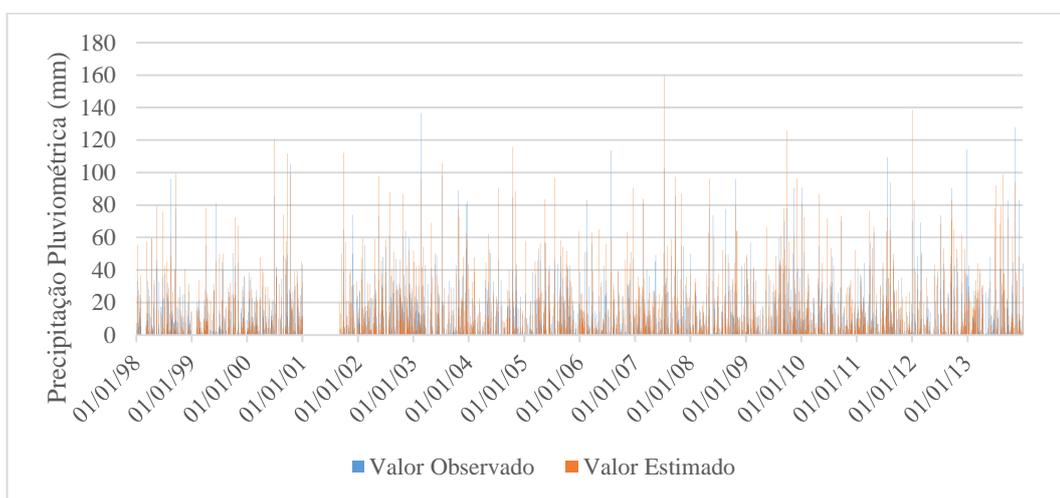


Figura 100 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Caxias do Sul.

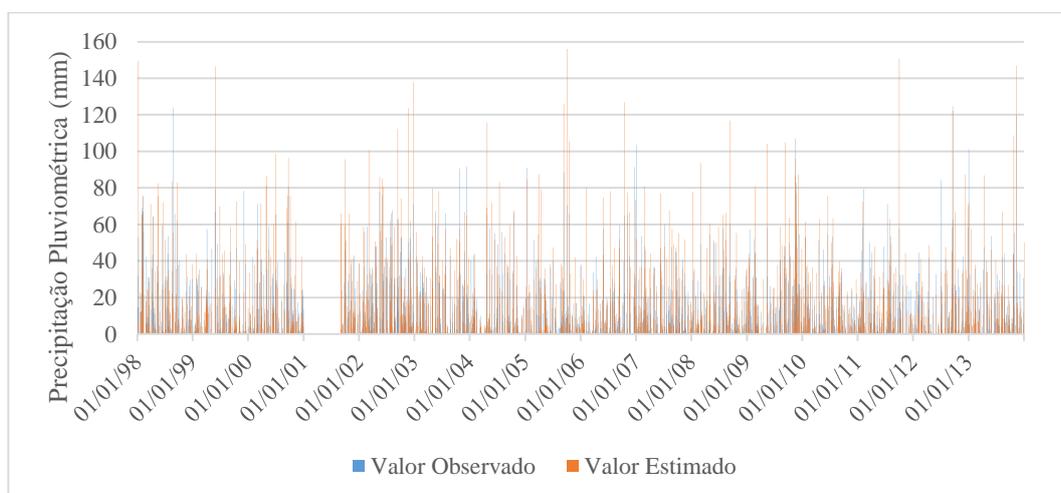


Figura 101 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Encruzilhada do Sul.

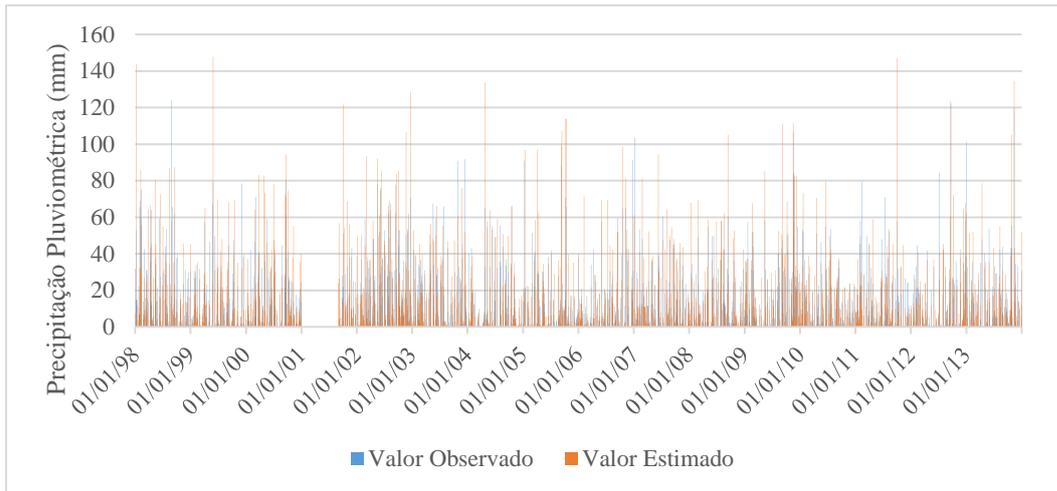


Figura 102 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Encruzilhada do Sul.

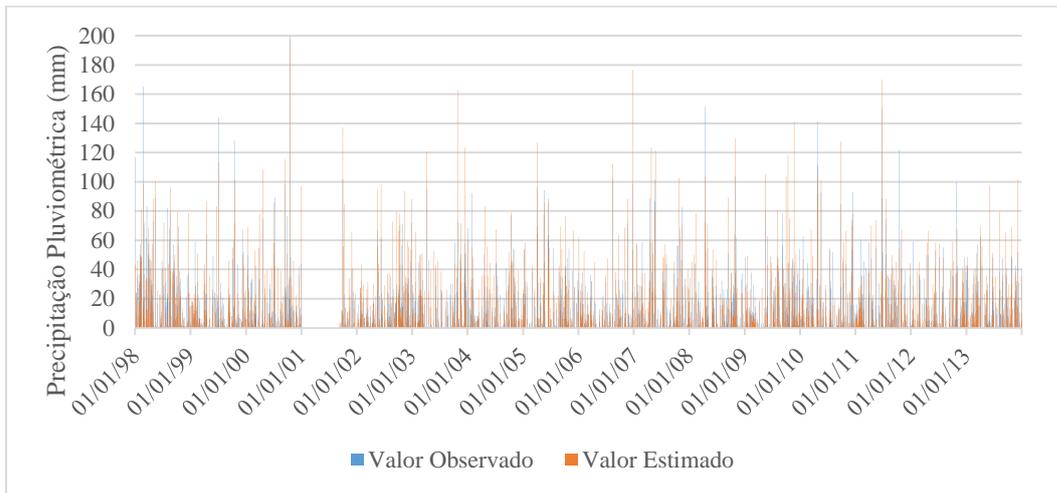


Figura 103 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Iraí.

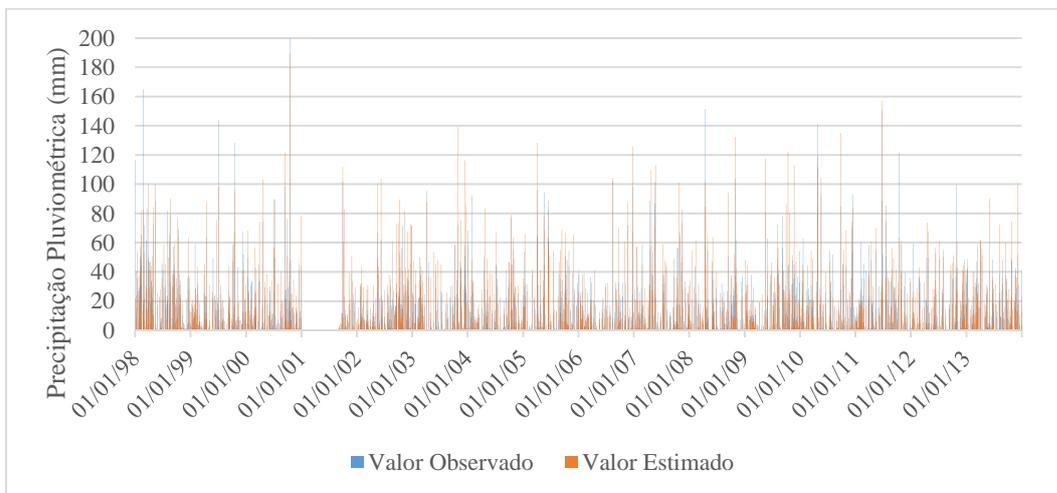


Figura 104 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Iraí.

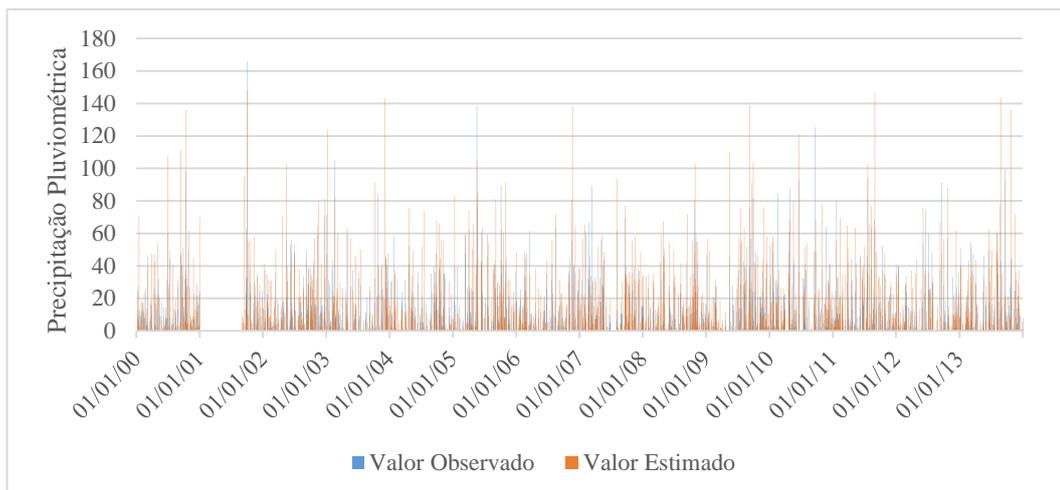


Figura 105 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Lagoa Vermelha.

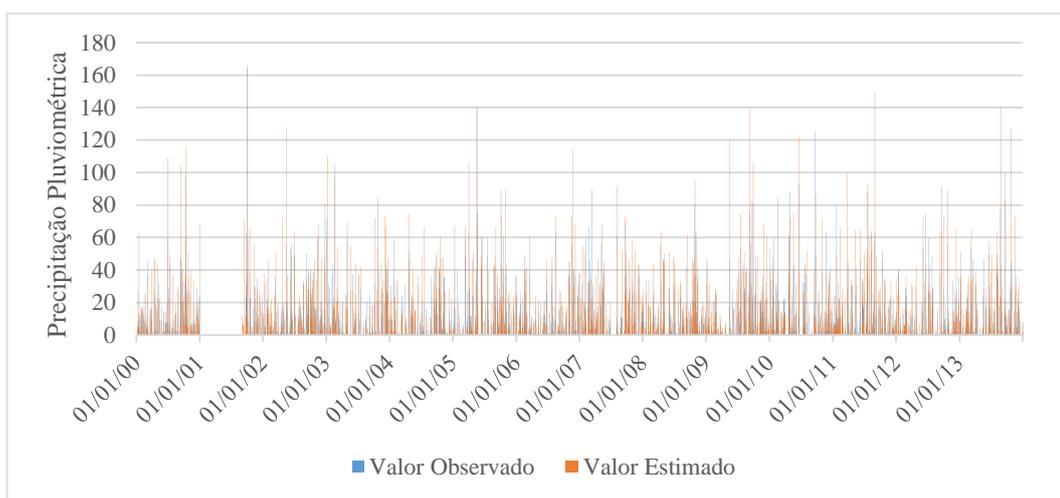


Figura 106 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Lagoa Vermelha.

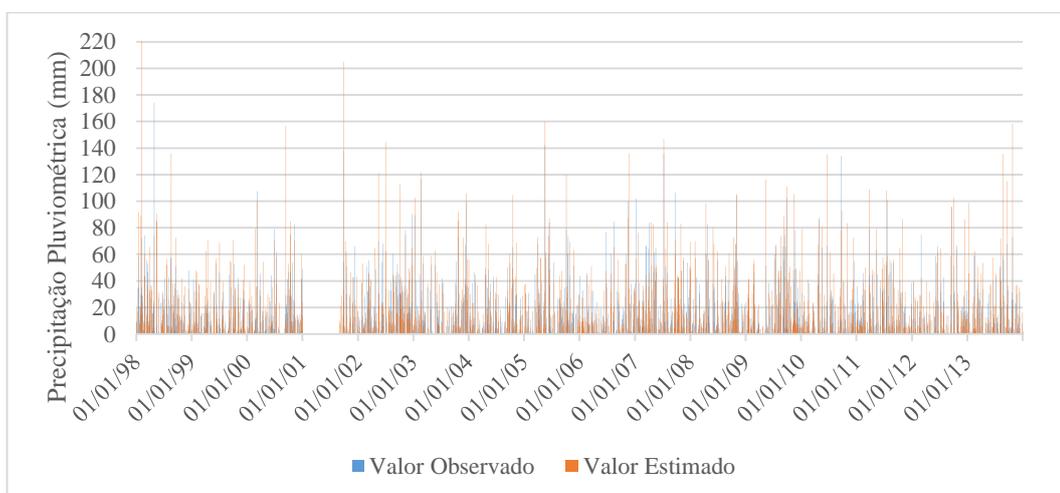


Figura 107 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Passo Fundo.

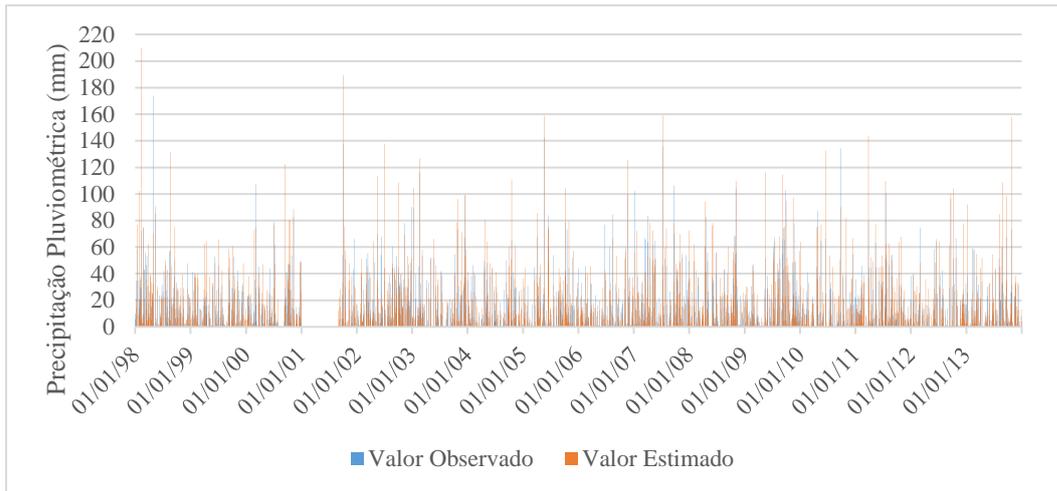


Figura 108 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Passo Fundo.

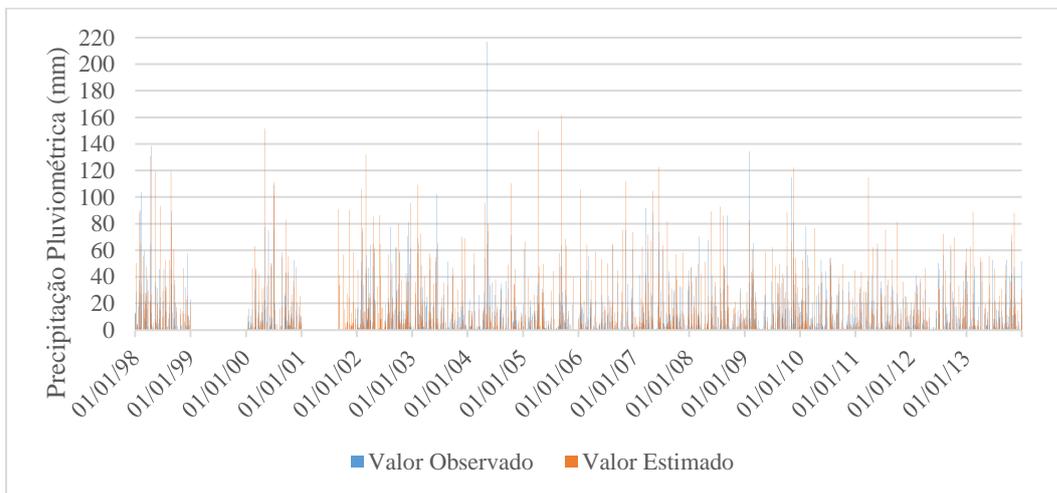


Figura 109 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Pelotas.

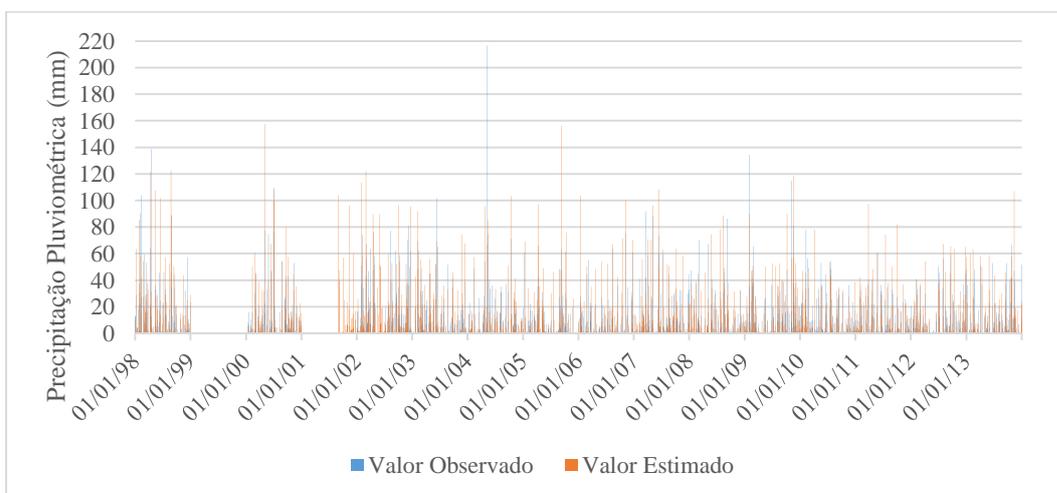


Figura 110 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Pelotas.

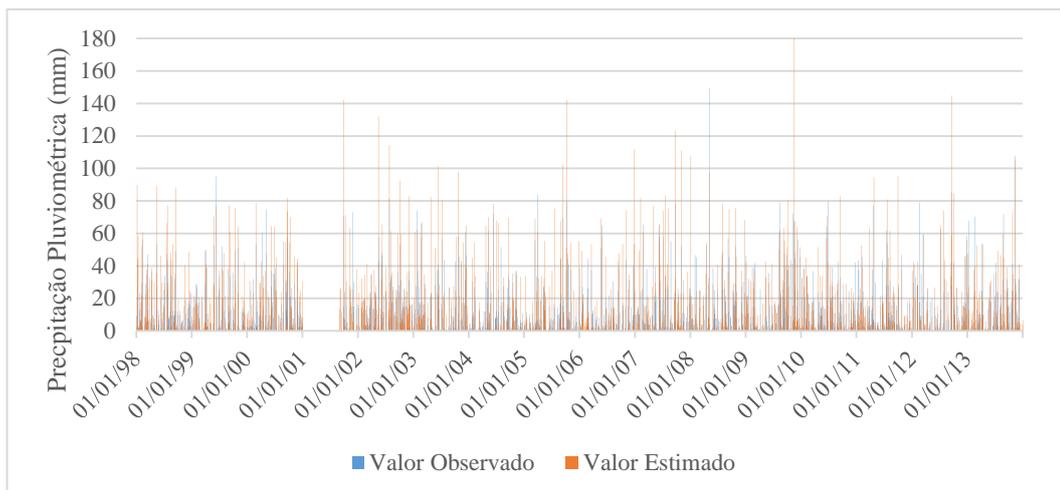


Figura 111 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Porto Alegre.

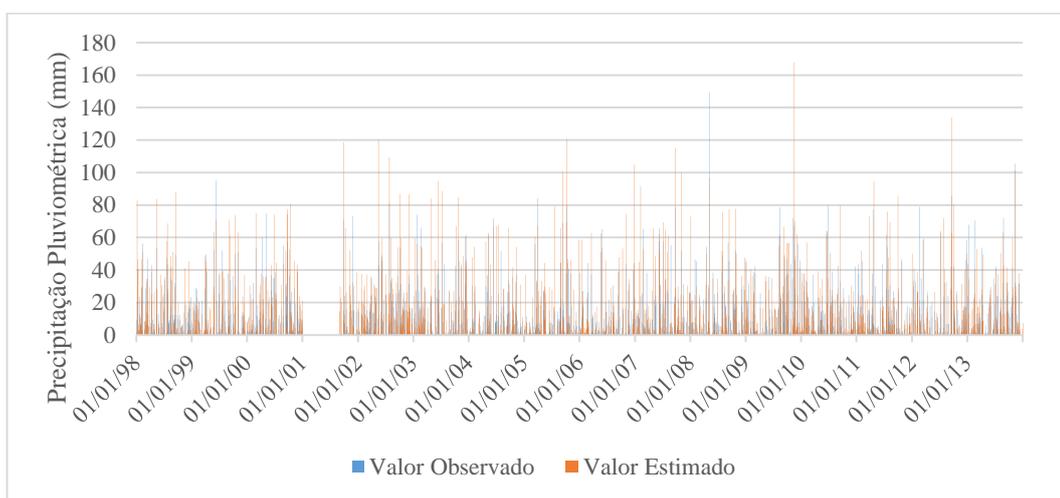


Figura 112 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Porto Alegre.

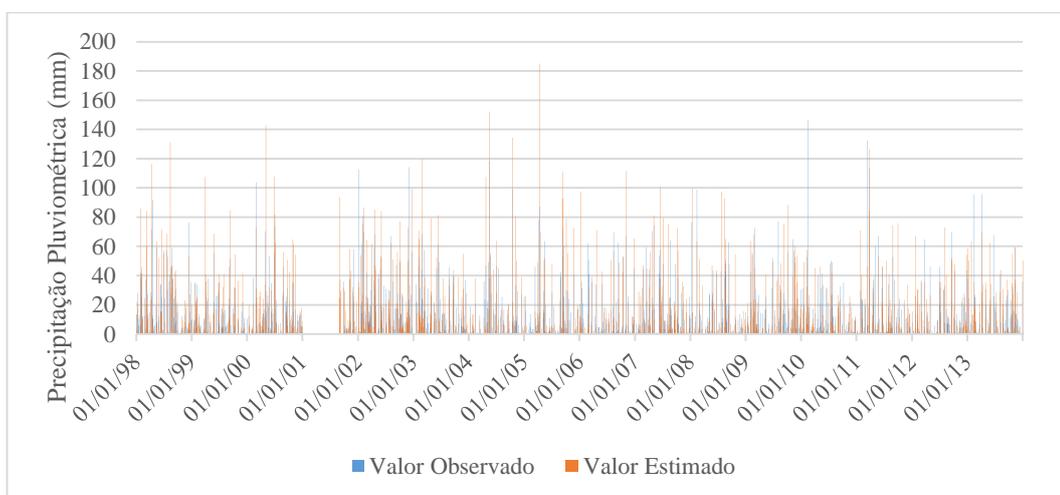


Figura 113 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Rio Grande.

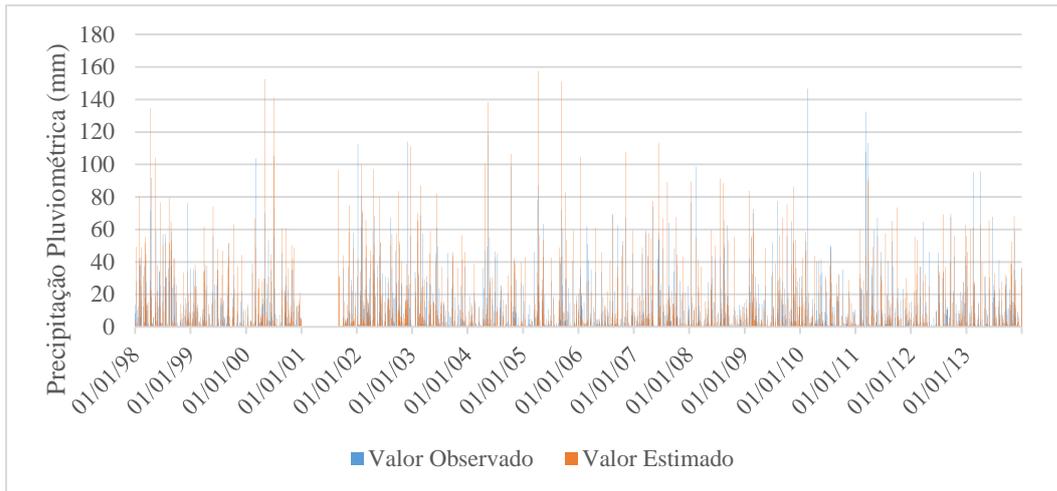


Figura 114 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Rio Grande.

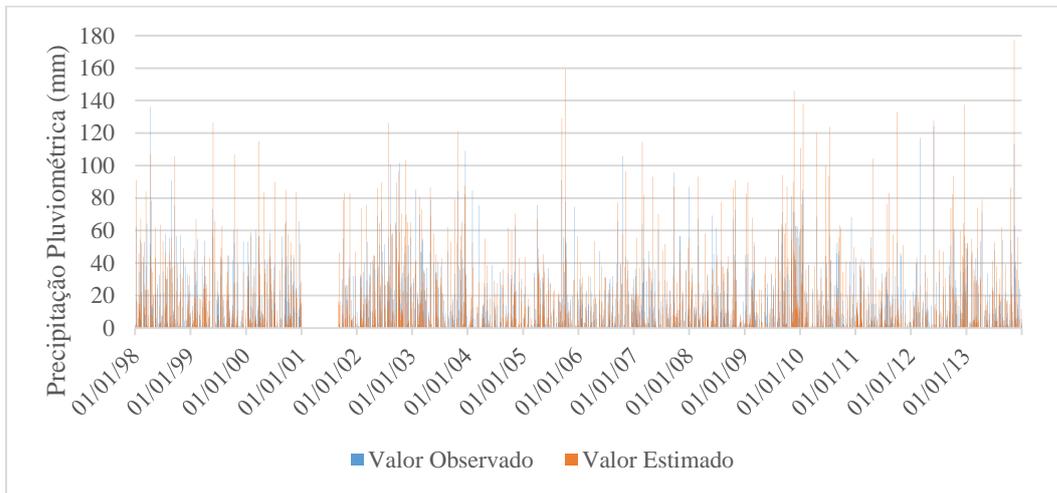


Figura 115 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Santa Maria.

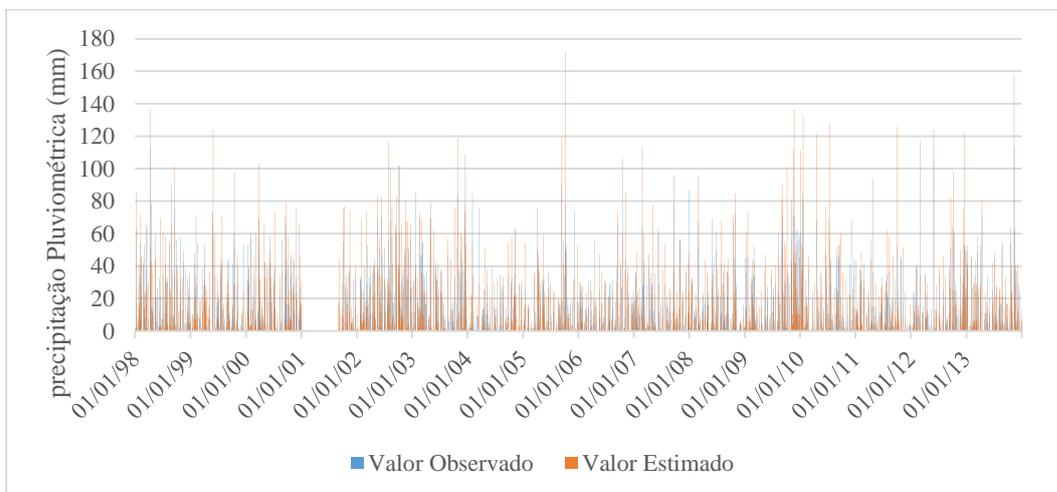


Figura 116 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Santa Maria.

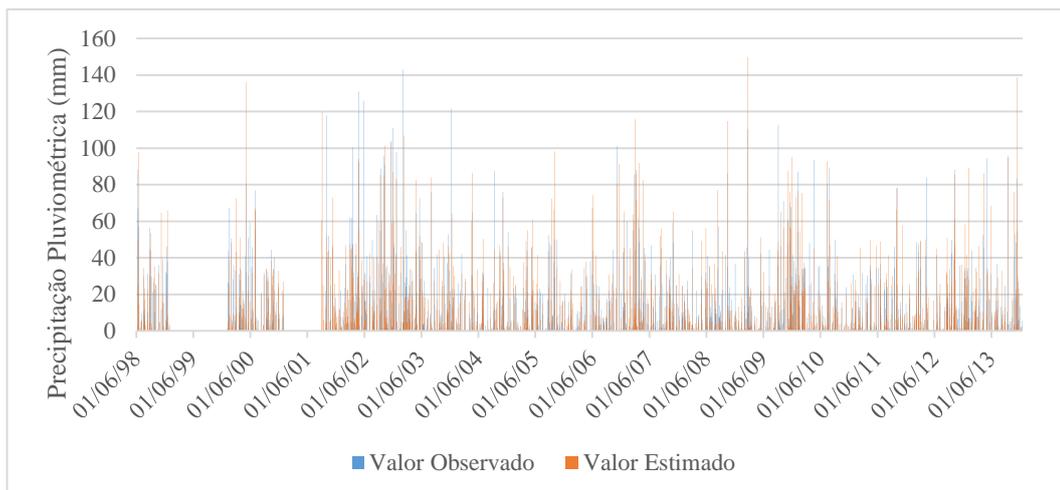


Figura 117 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Santana do Livramento.

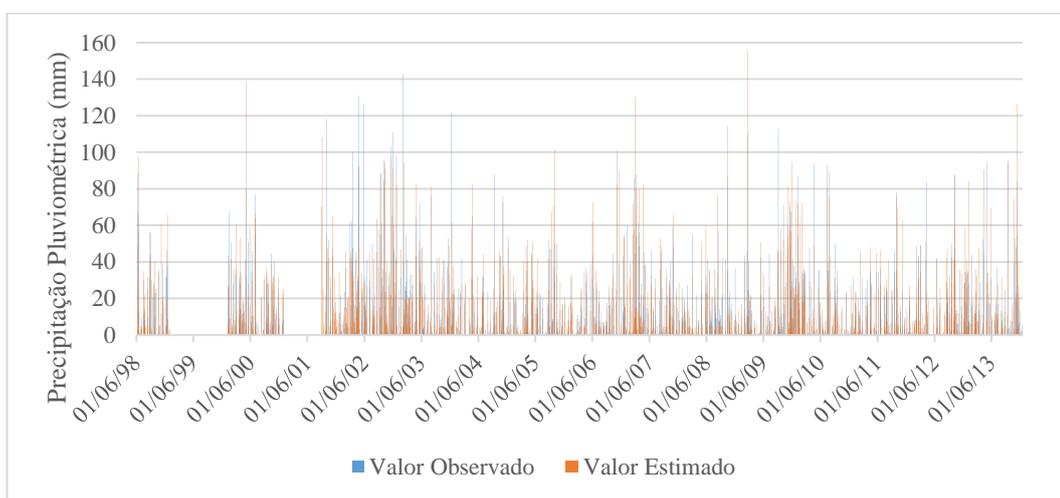


Figura 118 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Santana do Livramento.

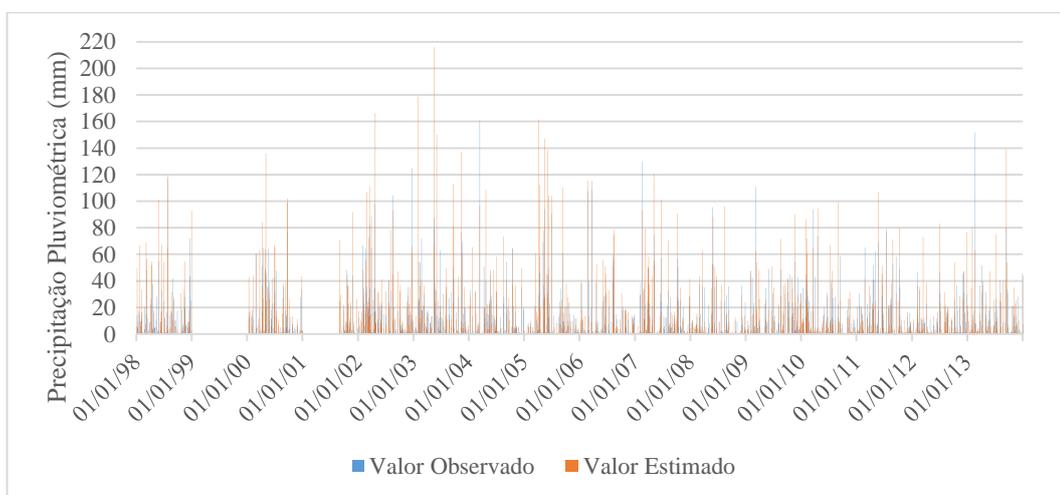


Figura 119 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Santa Vitória do Palmar

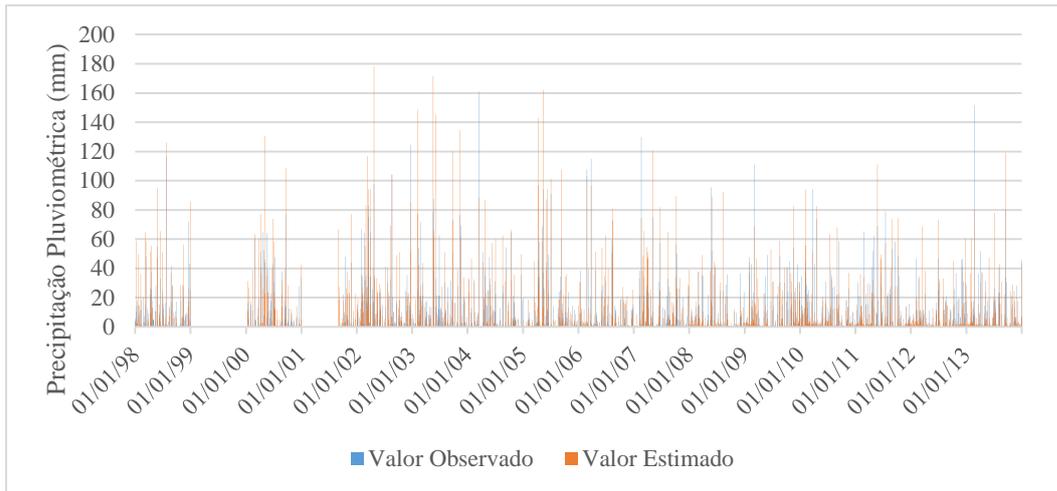


Figura 120 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Santa Vitória do Palmar.

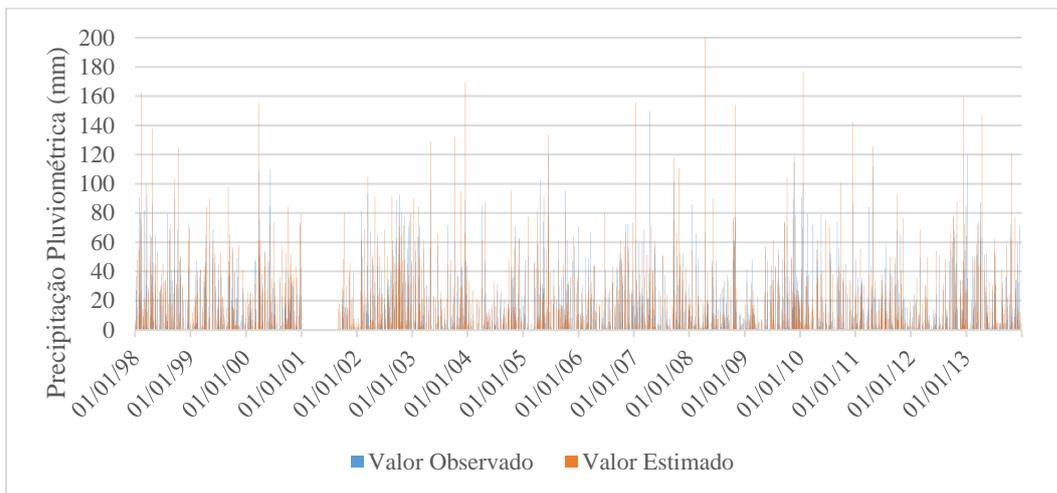


Figura 121 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de São Luiz Gonzaga.

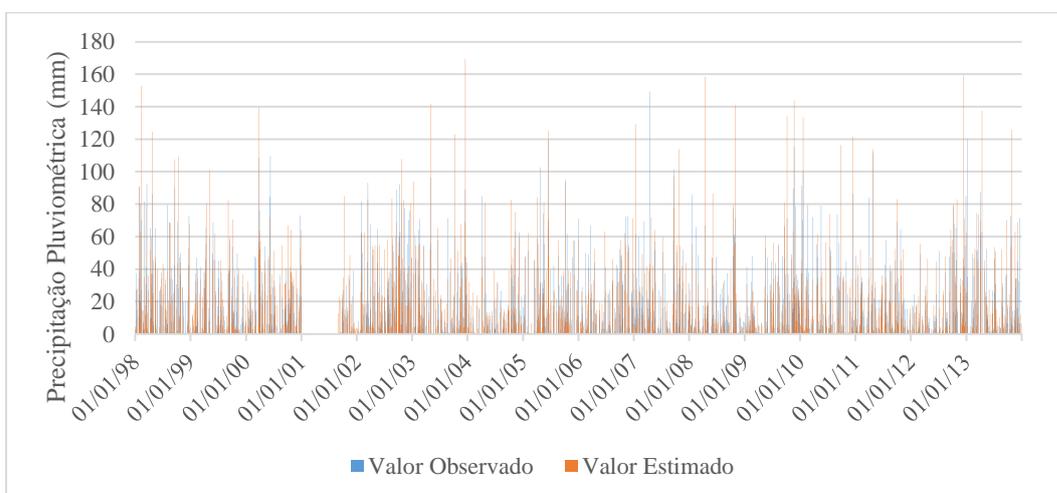


Figura 122 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de São Luiz Gonzaga.

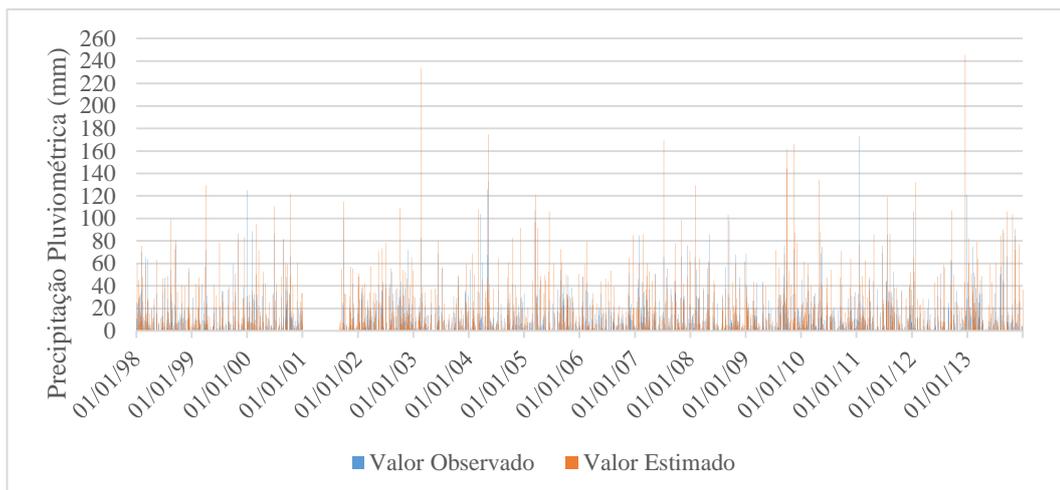


Figura 123 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Torres

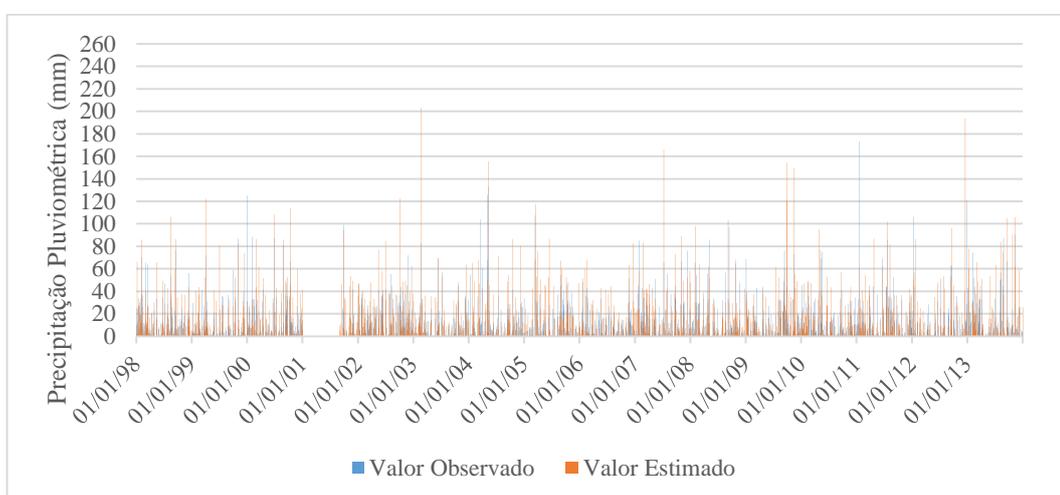


Figura 124 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Torres

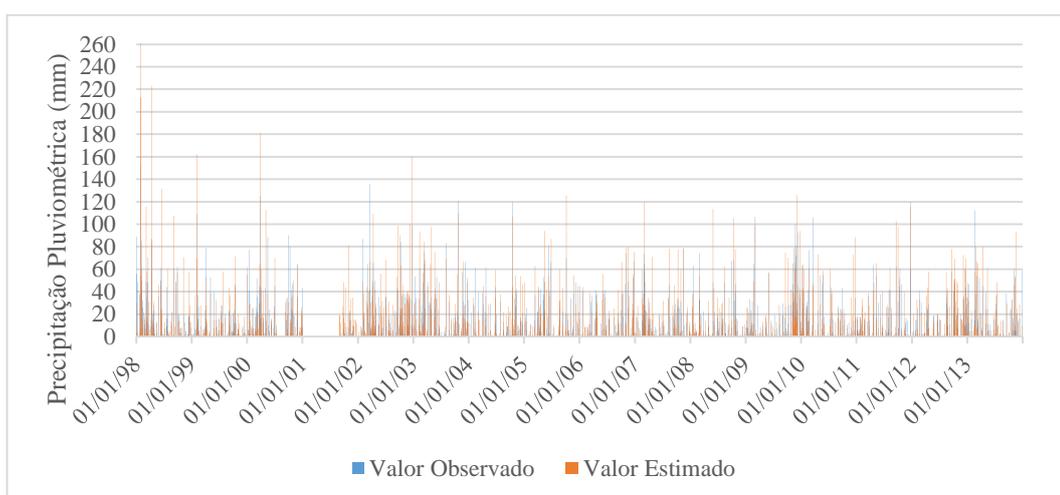


Figura 125 – Série observada e estimada (pixel) referentes a estação pluviométrica de Uruguiana

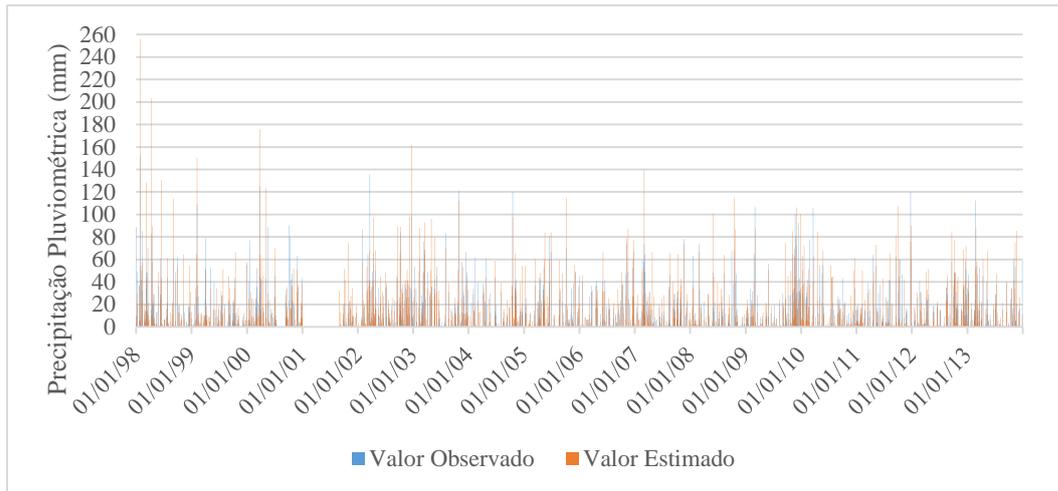


Figura 126 – Série observada e estimada (ponto) referentes a estação pluviométrica de Urugaiana.