



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL**

**RELAÇÕES INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA COM BASE EM  
ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE**

**LIDIANE SOUZA GONÇALVES**

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.*

**Orientador:** Carlos Eduardo Morelli Tucci

**Banca examinadora:**

Prof. Dra. Rita de Cássia Fraga Damé (UFPEL)

Prof. Dr. Carlos André Bulhões Mendes (IPH/UFRGS)

Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira (IPH/UFRGS)

Porto Alegre, junho de 2011.

O presente trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Morelli Tucci.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e seus funcionários, em particular ao pessoal da secretaria de pós-graduação e da biblioteca, sempre prontos a auxiliar.

Ao CNPq, pela bolsa de mestrado concedida.

Ao Prof. Vladimir Caramori, que ajudou a despertar meu interesse pela hidrologia.

Ao Prof. Tucci, não só pelos inestimáveis ensinamentos e pela orientação, mas, sobretudo, pela paciência e confiança em minha capacidade.

Aos professores Walter Collischonn, Beatriz Camaño, Carlos André Mendes, André Silveira, pelo conhecimento transmitido através das disciplinas cursadas, em especial ao Prof. Joel Goldenfum, pela atenção e paciência durante o período em que foi meu co-orientador, e aos demais professores do IPH com os quais tive contato e contribuíram de maneiras diversas para a minha formação.

Aos meus colegas do IPH, Fernando Bike, Regina, Eduardo, Othon, Néia, Christopher, Teresa, Juan Martin, Adalberto, Adriano e Ruberto, com os quais dividi, mais do que dúvidas e muitas horas de estudo, alegrias, conversas esclarecedoras e uma inestimável convivência.

Aos colegas na Concremat, Ailton Jr., Rafael Rabuske, Guaracy Klein, e ao Dr. Celso Queiroz, pelas oportunidades e pela confiança no meu trabalho, contribuições para o meu amadurecimento profissional com reflexos nesta dissertação.

Às amigas Maria Angélica e Patrícia, minhas colegas de apartamento, e Giovana, minha “irmã”, por compartilharem comigo suas vidas, por nossas conversas acalentadoras, pelas risadas, pelo apoio mútuo, sempre lembradas com carinho e saudade.

Aos queridos amigos Ruti e Daniel, pessoas a quem muito estimo, pelo suporte desde antes de meu ingresso no IPH, pela acolhida, pelo apoio, pelos conselhos e pelas ocasiões agradáveis que compartilhamos.

Ao meu grande amigo Ferdnando, companhia valiosa em todas as horas e amizade que continuarei a cultivar com muito carinho, e a sua esposa Candice, da qual o destino me aproximou nos últimos anos e fez crescer uma bela amizade.

A todos os meus familiares, em especial aos meus tios Renato e Maria Tereza, pela acolhida em Porto Alegre, carinho, atenção e maravilhosos almoços de domingo, e aos meus tios Sergio e Vania, pelo apoio e incentivo desde Rio Grande.

A minha segunda família, os Collischonn, pela torcida.

Aos meus pais, João Carlos e Ilca, pelos sacrifícios, pelo incentivo, pelo apoio e pelo amor incondicional em todos os momentos da minha vida, e às minhas amadas irmãs, Letícia e Louise, pelo carinho.

Ao Bruno, meu companheiro amado e idealizador do tema, pelo incentivo, entusiasmo, dedicação, compreensão, fé e amor, sem os quais esse trabalho não teria sido possível, e a quem eu o dedico.

A Deus, pela vida.

## **Acknowledgement\***

The data used in this study were acquired as part of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). The algorithms were developed by the TRMM Science Team. The data were processed by the TRMM Science Data and Information System (TSDIS) and the TRMM Office; they are archived and distributed by the Goddard Distributed Active Archive Center. TRMM is an international project jointly sponsored by the Japan National Space Development Agency (NASDA) and the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Office of Earth Sciences.

---

\*Este reconhecimento é solicitado pela NASA's Earth Science Enterprise (ESE) quando do uso de dados do TRMM.

## RESUMO

Atualmente existe uma forte demanda por planos e projetos de drenagem urbana, em vista do crescimento da urbanização e de novas exigências legais. Tais planos e projetos poderão esbarrar em uma ausência de relações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para a maioria das cidades brasileiras, em vista da inexistência de dados pluviográficos que possibilitem sua construção.

Neste trabalho, foram estimadas relações IDF para todas as sedes municipais brasileiras a partir de estimativas de precipitação do satélite TRMM, que faz medições com resolução temporal de 3 horas. As chuvas máximas com durações menores do que 3 horas foram obtidas através de relação entre durações. As curvas IDF geradas foram comparadas com relações IDF clássicas, estabelecidas com dados pluviográficos. Adicionalmente, foram comparadas com um método alternativo clássico de obtenção de relações IDF em locais sem dados pluviográficos, em que os totais pluviométricos diários são desagregados para durações menores.

Os resultados mostram que as curvas IDF geradas a partir do TRMM possuem incertezas, porém são uma alternativa tão eficiente quanto a utilização de chuvas desagregadas a partir de dados pluviométricos.

## **ABSTRACT**

Nowadays, there is a need for urban drainage projects and planning in Brazil, due to continuing urbanization and a new legal framework. Such plans and projects will demand Intensity-Duration-Frequency (IDF) relations, at least for cities larger than 100.000 inhabitants. Such relations, as well as the pluviographic data which is needed to build them, are often unavailable in Brazil.

In this research IDF relations were estimated based on 3-hourly TRMM precipitation estimates. They were then compared to standard IDF relations in sites with pluviographic data. In addition, TRMM IDF relations were compared with another alternative technique for places lacking pluviographic data.

Results showed that TRMM estimation of the rainfall still has important uncertainties, but are an alternative method for places without rainfall data.

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| LISTA DE TABELAS .....   | X         |
| LISTA DE FIGURAS .....   | XIII      |
| LISTA DE ANEXOS .....  | XVI       |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....   | XVII      |
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 ANTECEDENTES E JUSTIFICATIVA .....   | 1         |
| 1.2 OBJETIVOS.....   | 2         |
| 1.3 RESUMO DA PESQUISA.....  | 3         |
| <b>2. ESTIMATIVAS DE RELAÇÕES INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA E A HIDROLOGIA URBANA .....</b> | <b>5</b>  |
| 2.1 PRECIPITAÇÕES PLUVIAIS MÁXIMAS.....  | 5         |
| 2.2 DETERMINAÇÃO DAS RELAÇÕES IDF A PARTIR DE DADOS PLUVIOGRÁFICOS .....                     | 6         |
| 2.3 METODOLOGIAS DE ESTIMATIVAS DE RELAÇÕES IDF EM LOCAIS SEM DADOS PLUVIOGRÁFICOS .....     | 9         |
| 2.3.1 <i>Método de Bell (1969)</i> .....   | 10        |
| 2.3.2 <i>Método das relações entre durações</i> .....  | 10        |
| 2.3.3 <i>Método das Isozonas</i> .....   | 11        |
| 2.3.4 <i>Método de Robaina e Peiter</i> .....  | 13        |
| 2.3.5 <i>Metodologia proposta por Damé (2001)</i> .....                                      | 14        |
| <b>3. ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE .....</b>                                     | <b>15</b> |
| 3.1 TÉCNICAS .....   | 15        |
| 3.2 O PROJETO TRMM E O PRODUTO 3B42 .....  | 18        |
| 3.3 TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM EMPREGO DE ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO DO TRMM .....         | 22        |
| <b>4. METODOLOGIA DE PESQUISA.....</b>   | <b>24</b> |
| 4.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA .....   | 24        |
| 4.2 ESTIMATIVAS DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS A PARTIR DE DADOS DO TRMM.....                     | 24        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.3       | ANÁLISE COMPARATIVA DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ESTIMADAS PELA IDF DE BRASÍLIA ESTABELECIDAS COM DADOS HISTÓRICOS EM PERÍODO COINCIDENTE COM A DISPONIBILIDADE DE DADOS DO SATÉLITE TRMM ..... | 26         |
| 4.4       | COMPARAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS OBTIDAS A PARTIR DO TRMM COM PRECIPITAÇÕES ESTIMADAS POR IDF EXISTENTES .....   | 27         |
| 4.5       | GERAÇÃO DO MAPA DE PARÂMETROS <i>A, B, C</i> E <i>D</i> DAS RELAÇÕES IDF PARA O BRASIL .....   | 29         |
| 4.6       | COMPARAÇÃO DO USO DAS CURVAS IDF GERADAS A PARTIR DOS DADOS DO TRMM COM AS CURVAS IDF ESTABELECIDAS COM DADOS DE PLUVIÔMETRO .....   | 32         |
| 4.6.1     | <i>Estabelecimento de relações IDF a partir de dados de pluviômetro .....</i>  | <i>32</i>  |
| 4.6.2     | <i>Avaliação do impacto das diferenças de precipitação na vazão .....</i>  | <i>33</i>  |
| 4.6.3     | <i>Indicadores propostos para avaliação da qualidade das relações IDF.....</i>   | <i>35</i>  |
| 4.7       | ESTIMATIVA DE COEFICIENTES DE DESAGREGAÇÃO ESPACIALIZADOS.....   | 35         |
| <b>5.</b> | <b>RESULTADOS .....</b>  | <b>37</b>  |
| 5.1       | AVALIAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS OBTIDAS A PARTIR DOS DIFERENTES MÉTODOS .....  | 37         |
| 5.2       | COMPARAÇÃO ENTRE AS PRECIPITAÇÕES OBTIDAS DAS RELAÇÕES IDF.....  | 45         |
| 5.3       | MAPA DE PARÂMETROS <i>A, B, C, E D</i> DAS CURVAS IDF GERADAS COM DADOS DO TRMM .....  | 80         |
| 5.4       | COMPARAÇÃO DO USO DA IDF DE TRMM COM O USO DE IDF PLUVIÔMETRO.....   | 81         |
| 5.5       | ESTIMATIVA DE COEFICIENTES DE DESAGREGAÇÃO ESPACIALIZADOS.....   | 93         |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>  | <b>98</b>  |
| 6.1       | ESTABELECEM CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA A PARTIR DE ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE SOBRE ÁREAS URBANAS BRASILEIRAS .....  | 98         |
| 6.2       | AVALIAR A ADEQUAÇÃO DAS CURVAS GERADAS EM COMPARAÇÃO COM CURVAS IDF EXISTENTES.....  | 99         |
| 6.3       | AVALIAR A ADEQUAÇÃO DAS CURVAS GERADAS EM COMPARAÇÃO COM OUTRA METODOLOGIA DE ESTIMATIVA DAS RELAÇÕES IDF UTILIZADA EM LOCAIS SEM DADOS PLUVIOGRÁFICOS.....                                  | 101        |
| 6.4       | VERIFICAR A APLICABILIDADE DE ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE NA DETERMINAÇÃO DAS RELAÇÕES IDF EM LOCAIS COM DADOS DE PRECIPITAÇÃO PRECÁRIOS OU INEXISTENTES.....                   | 103        |
| <b>7.</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>104</b> |
| <b>8.</b> | <b>ANEXOS.....</b>   | <b>111</b> |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1. Estações pluviográficas cadastrados no SNIRH: quantidade por bacia hidrográfica (Fonte: SNIRH/ANA, 2010).....                       | 8  |
| Tabela 2.2. Coeficientes de intensidade associados às isozonas (TORRICO, 1974). ....  | 12 |
| Tabela 4.1. Parâmetros das relações IDF existentes empregadas. ....   | 28 |
| Tabela 4.2. Coeficientes de desagregação do Brasil (DAEE/CETESB, 1980). ....  | 31 |
| Tabela 4.3. Postos pluviométricos empregados na desagregação para geração da relação $IDF_{plu}$ . ....   | 32 |
| Tabela 5.1. Precipitações estimadas pela IDF parcial de Brasília e as determinadas pelo TRMM, período de 1998 a 2008. ....                      | 38 |
| Tabela 5.2. Precipitações estimadas pela IDF parcial de Brasília e as determinadas IDF de pluviômetro desagregado, período de 1998 a 2008. .... | 39 |
| Tabela 5.3. Resultado do teste de hipótese para médias e variâncias, considerando os dois períodos do pluviógrafo (1962-1997 e 1998-2008).....  | 40 |
| Tabela 5.4. Precipitações máximas anuais do pluviógrafo de Brasília (em mm) para as durações de 3, 6, 12 e 24h.....                             | 41 |
| Tabela 5.5. Precipitações máximas anuais do TRMM sobre Brasília (em mm) para as durações de 3, 6, 12 e 24h.....                                 | 42 |
| Tabela 5.6. Resultado do teste de hipótese para médias e variâncias, considerando todo o período de dados do pluviógrafo. ....                  | 43 |
| Tabela 5.7. Resultado do teste de hipótese para médias e variâncias, considerando o período coincidente (1998-2008). ....                       | 44 |
| Tabela 5.8. Precipitações estimadas pela IDF de Porto Alegre (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....                         | 46 |
| Tabela 5.9. Precipitações estimadas pela IDF de Porto Alegre (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....                         | 48 |
| Tabela 5.10. Precipitações estimadas pela IDF do Aeroporto (BEMFICA <i>et al.</i> , 2000) e as ajustadas com dados do TRMM. ....                | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela 5.11. Precipitações estimadas pela IDF de Curitiba (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....           | 52 |
| Tabela 5.12. Precipitações estimadas pela IDF de Florianópolis (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....      | 54 |
| Tabela 5.13. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Florianópolis.....               | 54 |
| Tabela 5.14. Precipitações estimadas pela IDF de Cruz Alta (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....          | 55 |
| Tabela 5.15. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Cruz Alta.....                   | 56 |
| Tabela 5.16. Precipitações estimadas pela IDF de São Paulo (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do TRMM.....      | 57 |
| Tabela 5.17. Precipitações estimadas pela IDF de Rio de Janeiro (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do TRMM..... | 59 |
| Tabela 5.18. Precipitações estimadas pela IDF de Lins (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....               | 60 |
| Tabela 5.19. Precipitações estimadas pela IDF de Formosa (BRAVO <i>et al.</i> , 2008) e as ajustadas com dados do TRMM.....   | 62 |
| Tabela 5.20. Precipitações estimadas pela IDF de Brasília (DISTRITO FEDERAL, 2009) e as ajustadas com dados do TRMM.....      | 63 |
| Tabela 5.21. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Brasília.....                    | 64 |
| Tabela 5.22. Precipitações estimadas pela IDF de Aracaju (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....            | 65 |
| Tabela 5.23. Precipitações estimadas pela IDF de Fortaleza (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....          | 67 |
| Tabela 5.24. Precipitações estimadas pela IDF de São Luiz (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....           | 68 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 5.25. Precipitações estimadas pela IDF de Teresina (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....    | 70 |
| Tabela 5.26. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Teresina.....             | 70 |
| Tabela 5.27. Precipitações estimadas pela IDF de Belém (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....       | 72 |
| Tabela 5.28. Precipitações estimadas pela IDF de Manaus (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....      | 74 |
| Tabela 5.29. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Manaus.....               | 75 |
| Tabela 5.30. Precipitações estimadas pela IDF de Porto Velho (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM..... | 76 |
| Tabela 5.31. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Porto Velho. ....         | 77 |
| Tabela 5.32. Precipitações estimadas pela IDF de Rio Branco (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.....  | 78 |
| Tabela 5.33. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Rio Branco. ....          | 79 |
| Tabela 5.34. Resultados das simulações realizadas para Brasília.....   | 83 |
| Tabela 5.35. Resultados das simulações realizadas para Cruz Alta.....  | 85 |
| Tabela 5.36. Resultados das simulações realizadas para Florianópolis.....  | 86 |
| Tabela 5.37. Resultados das simulações realizadas para Belo Horizonte. ....  | 89 |
| Tabela 5.38. Resultados das simulações realizadas para Teresina.....   | 89 |
| Tabela 5.39. Resultados das simulações realizadas para Belém. ....   | 91 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1. Exemplo de pluviogramas disponibilizados pelo INMET para consulta por ocasião da realização do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2009). ..  | 8  |
| Figura 2.2. Mapa de isozonas (TORRICO, 1974). .....   | 13 |
| Figura 3.1. Representação esquemática da aquisição de dados pelo sensor de micro-ondas (TMI, varredura verde), radiômetro (VIRS, varredura amarela) e radar meteorológico (PR, varredura vermelha) do satélite TRMM (Adaptado de <a href="http://daac.gsfc.nasa.gov/">http://daac.gsfc.nasa.gov/</a> ). ..... | 19 |
| Figura 3.2. Precipitação estimada pelo TRMM sobre o Distrito Federal no período de 16h30 a 19h30 do dia 18/10/2010. ....  | 20 |
| Figura 4.1. Representação vetorial ( <i>shapefile</i> ) das 5561 sedes municipais brasileiras (ANA, 2000).  | 30 |
| Figura 5.1. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF parcial de Brasília e as determinadas pelo TRMM, período de 1998 a 2008. ....  | 37 |
| Figura 5.2. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de pluviômetro desagregado de Brasília e as determinadas pela IDF de Brasília com dados de pluviógrafo, período de 1998 a 2008. ....   | 39 |
| Figura 5.3. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Porto Alegre (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....   | 46 |
| Figura 5.4. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF do 8º Distrito de Meteorologia – DISME (BEMFICA <i>et al.</i> , 2000) e as ajustadas com dados do TRMM, em Porto Alegre - RS. ....   | 47 |
| Figura 5.5. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF do Aeroporto (BEMFICA <i>et al.</i> , 2000) e as ajustadas com dados do TRMM, em Porto Alegre - RS. ....   | 49 |
| Figura 5.6. Precipitações máximas diárias em Porto Alegre e ajuste linear. ....   | 50 |
| Figura 5.7. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Curitiba (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....   | 52 |
| Figura 5.8. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Florianópolis (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....  | 53 |
| Figura 5.9. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Cruz Alta (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....  | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.10. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de São Paulo (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do TRMM. ....      | 57 |
| Figura 5.11. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF do Rio de Janeiro (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do TRMM. .... | 58 |
| Figura 5.12. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Lins (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....               | 60 |
| Figura 5.13. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Formosa (BRAVO <i>et al.</i> , 2008) e as ajustadas com dados do TRMM. ....   | 61 |
| Figura 5.14. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Brasília (DISTRITO FEDERAL, 2009) e as ajustadas com dados do TRMM. ....      | 63 |
| Figura 5.15. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Aracaju (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....            | 65 |
| Figura 5.16. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Fortaleza (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....          | 66 |
| Figura 5.17. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de São Luiz (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....           | 68 |
| Figura 5.18. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Teresina (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....           | 69 |
| Figura 5.19. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Belém (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....              | 71 |
| Figura 5.20. Ajuste linear às precipitações máximas diárias em Belém, de 1949 a 1998. ....   | 73 |
| Figura 5.21. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Manaus (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....             | 74 |
| Figura 5.22. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Porto Velho (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....        | 76 |
| Figura 5.23. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Rio Branco (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM. ....         | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.24. Precipitações máximas adimensionais com duração de 3, 6, 12 e 24h de Brasília (DF).<br>.....       | 80 |
| Figura 5.25. Hidrograma de projeto para a cidade de Brasília no cenário de bacia 1.....                         | 82 |
| Figura 5.26. Hidrograma de projeto para a cidade de Brasília no cenário de bacia 2.....                         | 82 |
| Figura 5.27. Hidrograma de projeto para a cidade de Cruz Alta no cenário de bacia 1.....                        | 84 |
| Figura 5.28. Hidrograma de projeto para a cidade de Cruz Alta no cenário de bacia 2.....                        | 84 |
| Figura 5.29. Hidrograma de projeto para a cidade de Florianópolis no cenário de bacia 1. ....                   | 86 |
| Figura 5.30. Hidrograma de projeto para a cidade de Florianópolis no cenário de bacia 2. ....                   | 87 |
| Figura 5.31. Hidrograma de projeto para a cidade de Belo Horizonte no cenário de bacia 1. ....                  | 88 |
| Figura 5.32. Hidrograma de projeto para a cidade de Belo Horizonte no cenário de bacia 2. ....                  | 88 |
| Figura 5.33. Hidrograma de projeto para a cidade de Teresina no cenário de bacia 1.....                         | 90 |
| Figura 5.34. Hidrograma de projeto para a cidade de Teresina no cenário de bacia 2.....                         | 90 |
| Figura 5.35. Hidrograma de projeto para a cidade de Belém no cenário de bacia 1. ....                           | 92 |
| Figura 5.36. Hidrograma de projeto para a cidade de Belém no cenário de bacia 2. ....                           | 92 |
| Figura 5.37. Comparação entre o coeficiente de intensidade de 3h/24h, TR= 5 anos e as isozonas de Torrico. .... | 94 |
| Figura 5.38. Relação entre as precipitações máximas de 3 horas e de 12 horas, para TR = 5 anos.                 | 95 |
| Figura 5.39. Relação entre as precipitações de 3h e de 24h, para TR = 100 anos. ....                            | 96 |
| Figura 5.40. Relação entre as precipitações máximas de 3 horas e de 12 horas, para TR = 100 anos.<br>.....      | 97 |

## LISTA DE ANEXOS

|   |     |
|---|-----|
| Anexo 1. Parâmetros a, b, c e d das curvas IDF geradas com dados do TRMM para os municípios brasileiros com mais de 100.000 habitantes..... | 112 |
| Anexo 2. Anexo Digital.....   | 117 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|               |  |
|---------------|--|
| ANA           | Agência Nacional de Águas  |
| CCD           | <i>Cold Cloud Duration</i>   |
| CERES         | Sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens                  |
| CETESB        | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental                                  |
| DAEE          | Departamento de Águas e Energia Elétrica   |
| DEP           | Departamento de Esgotos Pluviais de Porto Alegre                                 |
| DISME         | Distrito de Meteorologia   |
| EUMETSAT      | <i>European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellite</i>    |
| GOES          | <i>Geostationary Operational Environmental System</i>                            |
| GPCC          | <i>Global Precipitation Climatology Centre</i>                                   |
| GPCP          | <i>Global Precipitation Climatology Project</i>                                  |
| GPM           | <i>Global Precipitation Measurement</i>  |
| GV            | <i>Ground Validation</i>   |
| IBGE          | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                                  |
| IDF           | Intensidade-duração-frequência   |
| $indQ_{plu}$  | Indicador de diferença relativa de vazão máxima na simulação usando $P_{plu}$    |
| $indQ_{TRMM}$ | Indicador de diferença relativa de vazão máxima na simulação usando $P_{TRMM}$   |
| $indV_{plu}$  | Indicador de diferença relativa de volume escoado na simulação usando $P_{plu}$  |
| $indV_{TRMM}$ | Indicador de diferença relativa de volume escoado na simulação usando $P_{TRMM}$ |
| $P_{TRMM}$    |  |
| INMET         | Instituto Nacional de Meteorologia   |
| JAXA          | <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>  |
| LIS           | Sensor para imageamento de relâmpagos  |
| MW            | Micro-ondas  |

|            |  |
|------------|--|
| NASA       | <i>North-American Aerospace Agency</i>                                       |
| $P_{pfaf}$ | Precipitação estimada com base na IDF de Pfafstetter                         |
| $P_{plu}$  | Precipitação máxima obtida de uma série de máximas diárias de um pluviômetro |
| $P_{TRMM}$ | Precipitação estimada com base na IDF do TRMM                                |
| PR         | radar de precipitação  |
| $Q_{pfaf}$ | Vazão máxima gerada com $P_{pfaf}$   |
| $Q_{plu}$  | Vazão máxima gerada com $P_{plu}$  |
| $Q_{TRMM}$ | Vazão máxima gerada com $P_{TRMM}$   |
| RT         | <i>Realtime</i>  |
| SNIRH      | Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos                      |
| TMI        | Imageador de micro-ondas   |
| TRMM       | <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>                                   |
| VIRS       | Radiômetro no visível e no infravermelho                                     |
| $V_{pfaf}$ | Volume escoado gerado com $P_{pfaf}$   |
| $V_{plu}$  | Volume escoado gerado com $P_{plu}$  |
| $V_{TRMM}$ | Volume escoado gerado com $P_{TRMM}$   |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Antecedentes e justificativa

Em 2007, a promulgação da Política Nacional de Saneamento (Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007) estabeleceu um novo marco legal para o saneamento, destacando a drenagem urbana como um de seus componentes, permitindo a delegação e regulação dos serviços de saneamento, por parte de seus titulares. Além disso, estabeleceu a obrigatoriedade da elaboração de Planos Municipais de Saneamento, os quais são necessários para a celebração de contratos de delegação dos serviços.

Assim, na prática, o repasse de recursos de saneamento para os municípios ficou vinculado à elaboração do Plano Municipal de Saneamento. Inicialmente, o prazo dado para a elaboração dos Planos foi até 31 de dezembro de 2010. Em junho de 2010, o Ministério das Cidades anunciou a ampliação do prazo para o ano de 2014, em vista da perspectiva de não atingimento do cumprimento da meta inicial em grande parte dos municípios.

Desta forma, constata-se uma grande demanda pela elaboração de Planos de Drenagem Urbana, um dos componentes do Plano Municipal de Saneamento. Após a elaboração dos planos, deverá ocorrer uma demanda intensa pela elaboração de projetos de drenagem urbana. Estas demandas esbarrarão na ausência de relações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para a maior parte dos municípios. Além disso, existe carência de dados pluviográficos para a determinação das relações IDF utilizadas em planos e projetos de drenagem urbana, uma vez que, no país, existem muitos pluviômetros, mas poucos pluviógrafos. Mesmo quando existentes, as séries registradas não são suficientemente longas.

A coleta e o armazenamento de dados pluviográficos no Brasil encontram-se dispersos em um grande número de instituições, como INMET, ANA, órgãos municipais e institutos de pesquisa. Não existe um esforço em nível nacional de compilação e disponibilização destas informações. A ANA, apesar da sua política de consolidação e disponibilização gratuita de dados hidrológicos de forma geral, não tem atribuições formais sobre drenagem urbana, de forma que gerencia os dados de poucas estações pluviográficas, estando mais focada no monitoramento pluviométrico (em

escala diária). Boa parte dos pluviógrafos instalados em meados do século XX, que deram origem a trabalhos clássicos como Pfafstetter (1957) e Wilken (1978), não estão mais operantes ou, pelo menos, não há disponibilidade dos dados coletados.

Por outro lado, uma massa cada vez maior de dados de sensoriamento remoto vem sendo disponibilizada em resoluções temporais e espaciais cada vez mais refinadas. As estimativas de precipitação por satélite podem constituir-se em subsídio importante na estimativa de relações IDF. Embora ainda não existam estimativas de precipitação por satélite com duração da ordem de minutos, alguns satélites já disponibilizam dados com duração de algumas horas. De fato, Collischonn (2006) já sinalizava para a possibilidade de utilização de dados do satélite TRMM em escala temporal mais refinada.

Sendo assim, o presente estudo se justifica na medida em que há um grande número de cidades no país que não contam com relações IDF determinadas, ou séries históricas de pluviógrafos/pluviômetros disponíveis, onde fontes alternativas de dados pluviográficos podem ser úteis.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é verificar a aplicabilidade de estimativas de precipitação por satélite na determinação das relações IDF em locais com dados de precipitação precários ou inexistentes.

Para atingir o objetivo principal, foram traçados os seguintes objetivos específicos, a saber:

- Avaliar a adequação das curvas IDF geradas comparativamente às curvas IDF disponíveis, consideradas representativas de uma síntese estatística da pluviografia local;
- Estabelecer curvas IDF a partir de estimativas de precipitação pluvial por satélite para todas as sedes municipais brasileiras;
- Avaliar a adequação das curvas geradas comparativamente a outras metodologia de estimativa das relações IDF utilizada em locais sem disponibilidade de dados pluviográficos.

### 1.3 Resumo da pesquisa

No capítulo a seguir é apresentada uma revisão das principais metodologias empregadas na determinação de relações IDF, tanto aquela usada quando há disponibilidade de dados pluviográficos, método mais indicado e representativo, quanto as metodologias alternativas usadas quando não há disponibilidade de dados pluviográficos.

No capítulo 3 é apresentado o conhecimento relacionado às estimativas de precipitação pluvial por satélites, recurso a ser empregado neste trabalho para subsidiar o estabelecimento de relações IDF como alternativa aos dados pluviográficos e pluviométricos.

O capítulo 4 consiste na estrutura metodológica seguida nesta pesquisa a fim de atingir os objetivos traçados. Descreve os procedimentos empregados no estabelecimento de curvas IDF a partir de estimativas de precipitação por satélite e na avaliação da adequabilidade das relações estabelecidas com dados do TRMM através de comparação com curvas IDF existentes, e com outras metodologias existentes para estimativas de relações IDF em locais sem dados pluviográficos, a fim de validar os resultados encontrados.

O capítulo 5 apresenta os resultados de comparação entre as precipitações máximas obtidas com dados do TRMM e de pluviógrafo para a cidade de Brasília, para um período coincidente de medição (1998-2008). É também apresentado o resultado da verificação da influência dos períodos distintos de dados considerados neste trabalho para a cidade de Brasília, DF. Adicionalmente, foi realizada uma análise comparativa direta entre as precipitações estimadas pelo satélite TRMM e precipitações estimadas a partir de equações IDF clássicas, estabelecidas para diversas cidades brasileiras.

No mesmo capítulo 5 é mostrado o mapa dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  das relações IDF estabelecidas com dados de precipitação do TRMM para todas as sedes municipais do Brasil. Como fechamento deste capítulo de resultados, os dois últimos itens demonstram os resultados das verificações de validação da metodologia empregada na determinação de relações IDF a partir de dados de precipitação estimada pelo satélite TRMM, quando comparadas com metodologias de estimativa de IDF com base em dados de pluviômetro (desagregação de chuva diária). Duas avaliações foram realizadas: uma delas comparando o reflexo da utilização de precipitações geradas pela IDF estabelecida com TRMM e geradas pelo Método das Relações (precipitação de pluviômetro desagregado) no hidrograma de projeto de bacias hipotéticas, no item 5.4, e outra

comparando os coeficiente de relação entre as durações determinados com base nos dados do TRMM e os estabelecidos para as isozonas do Brasil por Torrico (1974), no item 5.5.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos e as recomendações para próximos trabalhos no mesmo contexto da presente pesquisa.

## 2. ESTIMATIVAS DE RELAÇÕES INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA E A HIDROLOGIA URBANA

### 2.1 Precipitações pluviiais máximas

A avaliação da precipitação pluvial máxima para uma área urbana é necessária para identificar as condições de risco e impacto sobre a drenagem da referida área. A partir da distribuição temporal e espacial da precipitação máxima, bem como das características da bacia hidrográfica, é possível determinar o hidrograma correspondente, característico do escoamento ao longo do tempo em uma determinada seção do rio, através do ajuste dos parâmetros de modelos hidrológicos de escoamento superficial, que permitem obter o hidrograma de projeto. Com base neste hidrograma é possível conhecer o risco de vazões máximas e volumes. Esta análise é realizada quando não existe série representativa de vazões ou a série existente não é estacionária.

Segundo Gontijo (2007), o hidrograma de projeto para um determinado local pode ser estabelecido por meio de métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos consistem na utilização exclusivamente de registros fluviométricos ajustados por distribuições estatísticas. Obviamente o emprego de métodos diretos requer a existência de dados históricos de vazão e que não tenha havido alteração expressiva das condições da bacia hidrográfica, o que raramente se encontra em bacias urbanas.

Os métodos indiretos por sua vez, são empregados em caso de escassez ou inexistência de registros de vazões observadas, situação constatada em praticamente a totalidade das bacias de drenagem urbanas, salvo raras exceções. Esses métodos consistem basicamente na transformação da precipitação pluvial ocorrente sobre uma bacia urbana em vazão, quer através de modelos puramente *empíricos*, no qual as relações matemáticas não possuem relação com o comportamento físico dos processos, quer *conceituais* ou *físicos* (TUCCI, 2005).

Assim, visto que a precipitação pluvial constitui-se na causa direta do hidrograma de projeto, a maioria dos projetos de drenagem urbana recorre aos dados de chuva intensa para, a partir destes, gerar as vazões de projeto a serem utilizadas no dimensionamento das estruturas do

sistema de drenagem urbana. Desta forma, a determinação da precipitação pluvial de projeto torna-se uma etapa básica na estimativa do hidrograma de projeto.

## **2.2 Determinação das relações IDF a partir de dados pluviográficos**

A precipitação pluvial de projeto caracteriza a variabilidade temporal das chuvas intensas, associada a uma determinada probabilidade de ocorrência. Normalmente, quanto mais intensas, mais raras são as chuvas. As precipitações de alta intensidade e de curta duração são o tipo que mais contribui para a formação de vazões significativas em uma bacia de drenagem urbana, geralmente pequena.

Uma ferramenta fundamental para a determinação da chuva de projeto são as relações IDF. Estas são obtidas de forma confiável a partir da análise estatística de séries de dados pluviográficos (BERTONI e TUCCI, 1993), ou seja, com base em eventos ocorridos no passado, e permitem que se estime a intensidade máxima de uma chuva, para uma determinada duração e certo tempo de retorno.

Na análise estatística das séries de chuva podem ser seguidos dois enfoques: o uso de séries anuais ou séries de duração parcial, dependendo do tamanho da série e do objetivo do estudo. As séries de duração parcial são utilizadas se a extensão da série disponível consiste em poucos anos (menor que 12 anos) e para tempos de retorno inferiores a 5 anos (WILKEN, 1978). Já a utilização das séries anuais está baseada na seleção das maiores precipitações anuais para uma determinada duração. A depender da discretização temporal das medidas do aparelho, em geral são escolhidas as seguintes durações: 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, bem como 1, 2, 4, 6, 12, 18 e 24 horas.

A metodologia consiste nos seguintes passos:

- a) Para cada duração são selecionadas as precipitações máximas anuais nos dados do pluviógrafo;
- b) para cada série de valores máximos ajusta-se uma distribuição teórica de probabilidade. Conforme apontado por LANNA (1993), as distribuições do tipo normal, log-normal, Gumbel e log Pearson tipo III, são as que melhor se ajustam aos processos hidrológicos;

- c) a razão entre a precipitação e sua duração determina a intensidade;
- d) as curvas resultantes são a relação IDF, que podem ser expressas por equações do tipo:

$$I = \frac{a \cdot TR^b}{(t + c)^d} \quad \text{(Eq. 1)}$$

onde  $TR$  é o tempo de retorno em anos;  $I$  é a intensidade da precipitação em  $\text{mm.h}^{-1}$ ;  $t$  é a duração em minutos;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são parâmetros ajustados para cada localidade ou estação de medição.

No Brasil, a dificuldade da geração das equações matemáticas que descrevem as curvas IDF reside na baixa densidade da rede de pluviógrafos, que medem os totais precipitados em diferentes tempos (por exemplo, 5, 10, 15, 30 minutos e 1, 2 horas), nos períodos curtos de observação disponível, na escassez e obstáculos na obtenção dos registros pluviográficos (SILVA *et al.*, 1999a, 1999b, 2002; MARTINEZ JÚNIOR, 1999; COSTA e BRITO, 1999).

Mesmo quando estes dados de monitoramento de pluviógrafos existem, nem sempre se encontram disponíveis ao público. Além disso, a metodologia para obtenção das equações de chuvas intensas exige um exaustivo trabalho de tabulação, análise e interpretação de grande quantidade de pluviogramas (CECÍLIO e PRUSKI, 2003), muitas vezes armazenados em forma de gráficos em papel, ou seja, não digitalizados, e disponíveis apenas para consulta presencial no órgão responsável pela guarda dos dados (DISTRITO FEDERAL, 2009), conforme ilustrado na Figura 2.1.

O principal esforço realizado no sentido de unificar e disponibilizar ao público as séries de dados pluviográficos existentes é o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas. Ao todo, estão armazenados dados de 372 pluviógrafos espalhados por todo o território nacional (Tabela 2.1). No entanto, este número total de estações pluviográficas representa apenas 6,7% do número de sedes municipais (5.565 em 2008, segundo o IBGE<sup>1</sup>). Além disso, a maioria dos pluviógrafos apresentam séries curtas e com muitas falhas.

---

<sup>1</sup><http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/default.shtm>

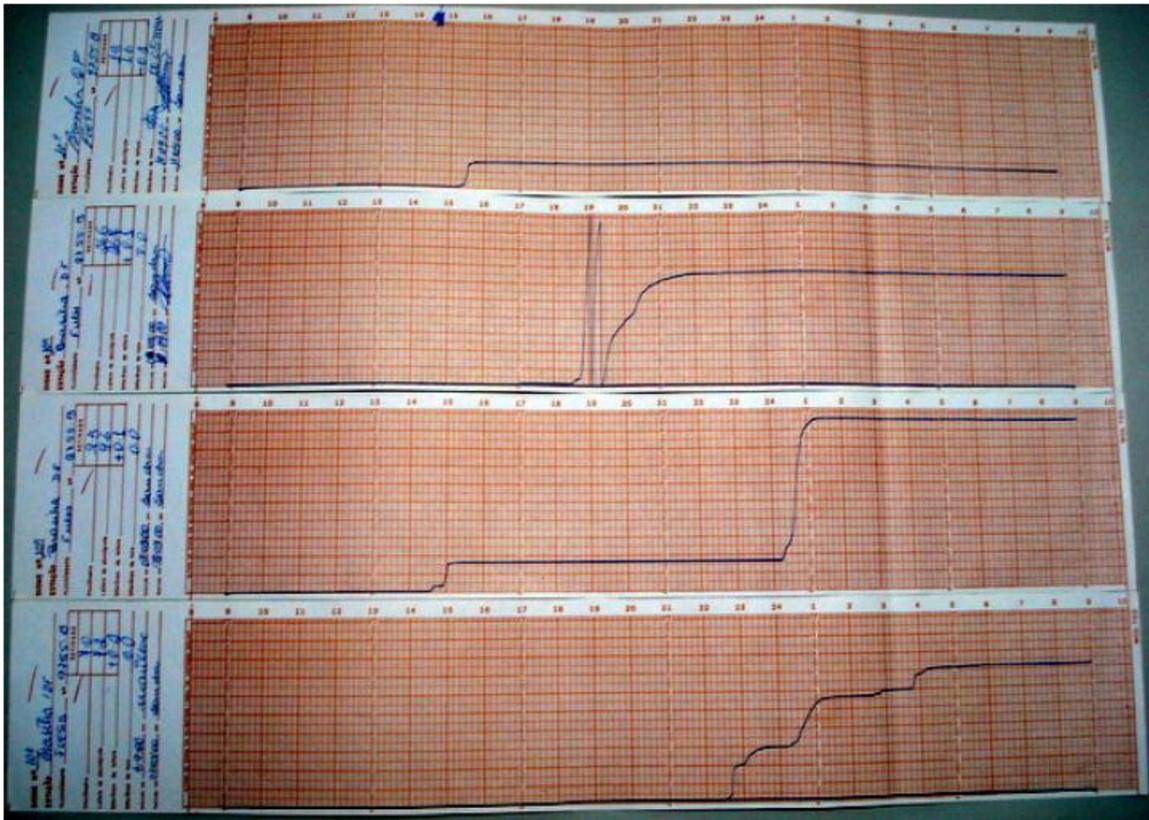


Figura 2.1. Exemplo de pluviogramas disponibilizados pelo INMET para consulta por ocasião da realização do Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2009).

Tabela 2.1. Estações pluviográficas cadastrados no SNIRH: quantidade por bacia hidrográfica (Fonte: SNIRH/ANA, 2010).

| Cód.         | Bacia Hidrográfica                | Estações Pluviográficas |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1            | Rio Amazonas                      | 53                      |
| 2            | Rio Tocantins                     | 28                      |
| 3            | Atlântico - Trecho Norte/Nordeste | 25                      |
| 4            | Rio São Francisco                 | 83                      |
| 5            | Atlântico - Trecho Leste          | 72                      |
| 6            | Rio Paraná                        | 59                      |
| 7            | Rio Uruguai                       | 37                      |
| 8            | Atlântico - Trecho Sudeste        | 15                      |
| <b>Total</b> |                                   | <b>372</b>              |

### 2.3 Metodologias de estimativas de relações IDF em locais sem dados pluviográficos

Se inexistem relações IDF estabelecidas para o local desejado, seja para a realização de estudos de planejamento, seja para o projeto de uma estrutura de drenagem, o problema pode ser contornado com o emprego da equação IDF obtida com dados do pluviógrafo mais próximo, caso esteja situado em região climática homogênea, ou utilizando métodos de desagregação de chuvas diárias (chuva acumulada no período diário) medidas por pluviômetros (DAMÉ, 2001) na área em estudo.

A adoção de dados de pluviômetro se justifica na medida em que existe uma vasta rede pluviométrica instalada, principalmente para atender ao setor de geração de energia elétrica (OLIVEIRA *et al.*, 2005). No entanto, nos dados pluviométricos os totais precipitados são acumulados diariamente, não sendo registrados em menores intervalos de tempo, justamente em que ocorrem as chuvas de grande intensidade.

Algumas metodologias que viabilizam a utilização de dados de pluviômetro para estabelecimento da relação IDF empregam coeficientes para transformar a chuva diária em chuvas de menor duração. Dentre elas destaca-se o Método das Isozonas, proposto por Torrico (1974), e o método das relações entre durações (DAEE/CETESB, 1980). Na forma analítica, encontra-se o trabalho de Robaina e Peiter (1992 *apud* Damé *et al.* 2008), cujo objetivo foi testar o desempenho de um modelo de desagregação de chuvas intensas com a finalidade de gerar precipitações máximas médias em durações inferiores a 24 horas. Ainda há outras metodologias que envolvem a simulação da precipitação em duração horária ou sub-horária, e a associação da série simulada a modelos estocásticos de desagregação (RODRIGUEZ-ITURBE *et al.*, 1987; KOUTSOYIANNIS e XANTHOPOULOS, 1990; GLASBEY *et al.*, 1995; DAMÉ, 2001), possibilitando a obtenção das curvas IDF. O método de Bell (1969 *apud* BERTONI e TUCCI, 1993) também permite que se estabeleça relações IDF com base em séries diárias de precipitação.

A seguir são descritas as principais metodologias que empregam dados de pluviômetro no estabelecimento de relações IDF.

### 2.3.1 Método de Bell (1969)

Outra metodologia consiste na aplicação da equação desenvolvida por Bell (1969) para determinar chuvas de duração entre 5 minutos e 2 horas, para tempos de retorno entre 2 e 100 anos, com base no conhecimento da chuva de 1 hora de duração e 2 anos de tempo de recorrência de determinado local. Utilizando dados de vários continentes, que segundo Back (2009) consistiram em dados de séries parciais de chuva observada nos EUA, Austrália, URSS, Porto Rico, Alasca, África do Sul e Havaí, a equação ajustada por Bell é:

$$P_T^t = (0,35 \ln Tr + 0,76) \cdot (0,54 t^{0,25} - 0,50) P_2^{60} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde  $t$  é a duração da chuva, em minutos, e  $Tr$  é o tempo de retorno, em anos. A validade da equação restringe-se a  $5 \leq t \leq 120$  minutos e  $2 \leq Tr \leq 100$  anos. Bell estabeleceu uma relação para a precipitação  $P_2^{60}$ , a seguir:

$$P_2^{60} = 6,69 \cdot 10^{-3} \cdot M \cdot n^{0,33}, \text{ para } 0 \leq M \leq 50,8 \text{ e } 1 \leq n \leq 80; \quad (\text{Eq. 3})$$

$$P_2^{60} = 8,27 \cdot 10^{-3} \cdot M^{0,67} \cdot n^{0,33}, \text{ para } 50,8 \leq M \leq 114,3 \text{ e } 1 \leq n \leq 80; \quad (\text{Eq. 4})$$

onde  $M$  é a média das precipitações máximas anuais com duração diária, em mm, e  $n$  é o número médio de dias de tormentas.

Com base nas equações 2, 3 e 4 é possível estimar a relação IDF para locais que disponha apenas dados de pluviômetro. Além de serem relações estabelecidas de forma empírica, a subjetividade na determinação do que seria um “dia de tormenta” pode ser considerada uma fragilidade desta metodologia.

### 2.3.2 Método das relações entre durações

Segundo Bertoni e Tucci (1993), o método das relações entre durações baseia-se em duas características observadas nas relações IDF correspondentes a postos localizados em diversas partes do mundo:

a) existe a tendência das curvas de probabilidade de diferentes durações manterem-se paralelas entre si; e,

b) para diferentes locais, existe uma acentuada similaridade nas relações entre precipitações médias máximas de diferentes durações.

Assim, o método consiste em encontrar as relações entre chuvas de durações diferentes sempre tomando uma delas como base (neste caso, a precipitação máxima diária). As relações entre durações são obtidas segundo a expressão:

$$r_{t1/t2} = \frac{\text{precipitação de duração } t1}{\text{precipitação de duração } t2} \quad (\text{Eq. 5})$$

Os valores médios destas relações entre precipitações no Brasil, também chamados coeficientes de desagregação, foram obtidos a partir do estudo de chuvas intensas de Pfafstetter (1957) e calculados por DAEE/CETESB (1980). Mais recentemente, Silveira (2000) apresentou uma equação analítica obtida empiricamente com base nestes 11 coeficientes de desagregação tabelados, com validade para durações entre 5 minutos e 24 horas. A síntese dos coeficientes na forma de uma equação facilita o manuseio destes em calculadoras programáveis, planilhas de cálculo e códigos de programação, proporcionando agilidade e automatização no cálculo de chuvas de projeto para locais que dispõem somente de dados diários (SILVEIRA, 2000; NEGRI *et al.*, 2003). A equação é:

$$C24(d) = e^{1,5 \ln(\ln d / 7,3)} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde  $d$  é a duração (em min) a que se refere o coeficiente de desagregação  $C24$ .

### **2.3.3 Método das Isozonas**

O método da Isozonas utiliza dados de chuvas diárias e, através de um processo de desagregação, transforma para cada período de retorno, a chuva de 24 horas de duração em chuvas de duração de 6 minutos e 1 hora.

Ao plotar no papel de probabilidade de Hershfield e Wilson as alturas de chuva de 24 horas e de 1 hora para diferentes estações pluviográficas brasileiras, Torrico (1974) constatou que ao prolongar as respectivas semirretas de alturas de chuva *versus* duração, elas tendiam a cortar o eixo das ordenadas em um mesmo ponto, “para determinadas áreas geográficas”. Desta forma, propôs a divisão do mapa do Brasil em oito zonas homólogas (A, B, C, D, E, F, G e H), nas quais as relações entre as alturas de chuva de 1 hora e 24 horas e 6 minutos e 24 horas são constantes para um dado período de retorno.

As isozonas são mostradas na Figura 2.2. A cada isozona, estão associados coeficientes de intensidade ou desagregação, conforme mostrados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2. Coeficientes de intensidade associados às isozonas (TORRICO, 1974).**

| ZONA | PERÍODOS DE RETORNO EM ANOS |      |      |      |      |      |      |      |      |       |            |      |
|------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------------|------|
|      | 1 h/24 h Chuva              |      |      |      |      |      |      |      |      |       | 6 min/24 h |      |
|      | 5                           | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 50   | 100  | 1000 | 10000 | 5 - 50     | 100  |
| A    | 36,2                        | 35,8 | 35,6 | 35,5 | 35,4 | 35,3 | 35,0 | 34,7 | 33,6 | 32,5  | 7,0        | 6,3  |
| B    | 38,1                        | 37,8 | 37,5 | 37,4 | 37,3 | 37,2 | 36,9 | 36,4 | 37,2 | 36,0  | 8,4        | 7,5  |
| C    | 40,1                        | 39,7 | 39,5 | 39,3 | 39,2 | 39,1 | 38,8 | 38,4 | 37,2 | 36,0  | 9,8        | 8,8  |
| D    | 42,0                        | 41,6 | 41,4 | 41,2 | 41,1 | 41,0 | 40,7 | 40,3 | 39,0 | 37,8  | 11,2       | 10,0 |
| E    | 44,0                        | 43,6 | 43,3 | 43,2 | 43,0 | 42,9 | 42,6 | 42,2 | 40,9 | 39,6  | 12,6       | 11,2 |
| F    | 46,0                        | 45,5 | 45,3 | 45,1 | 44,9 | 44,8 | 44,5 | 44,1 | 42,7 | 41,3  | 13,9       | 12,4 |
| G    | 47,9                        | 47,4 | 47,2 | 47,0 | 46,8 | 46,7 | 46,4 | 45,9 | 44,5 | 43,1  | 15,4       | 13,7 |
| H    | 49,9                        | 49,4 | 49,1 | 48,9 | 48,8 | 48,6 | 48,3 | 47,8 | 46,3 | 44,8  | 16,7       | 14,9 |

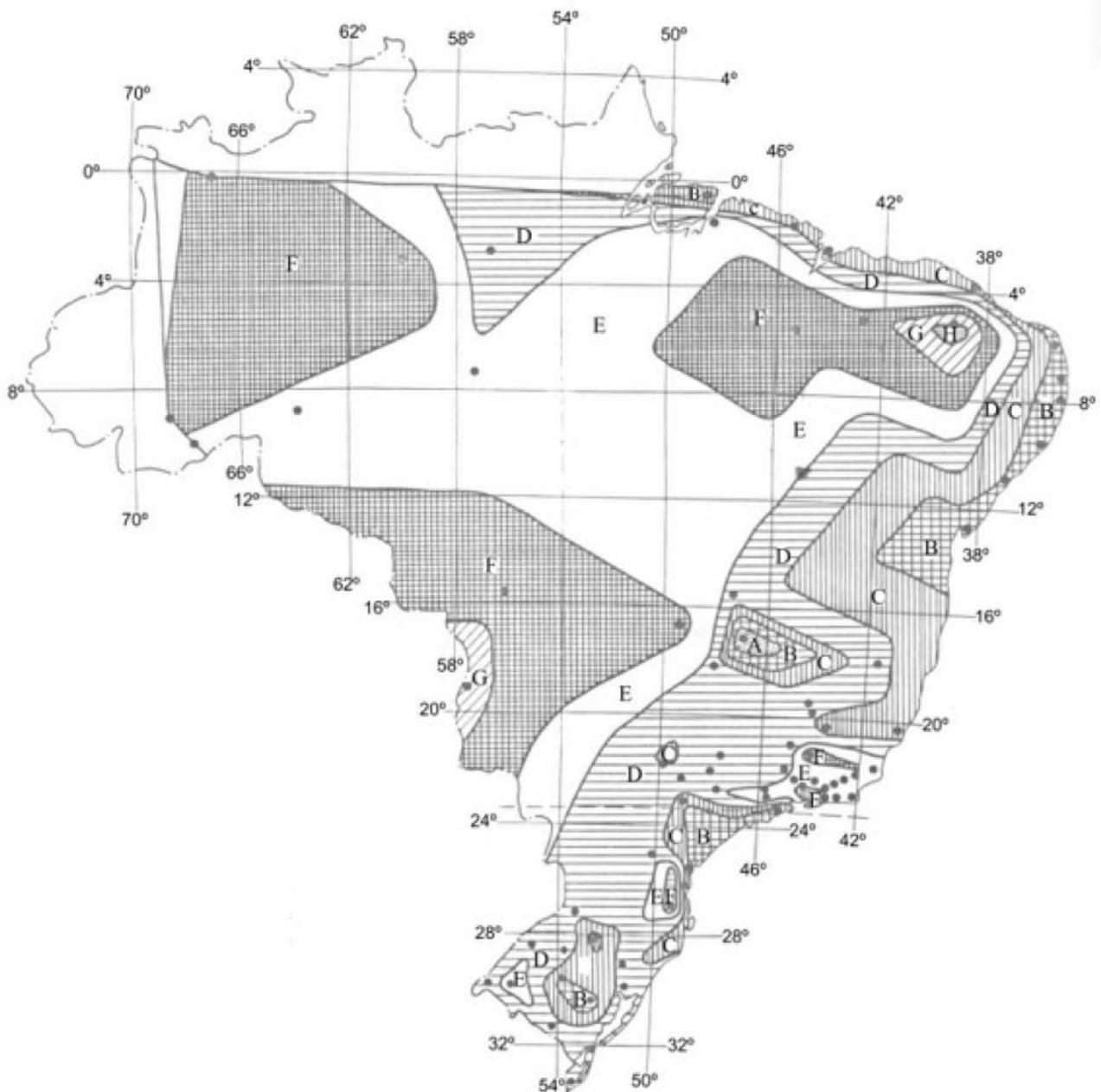


Figura 2.2. Mapa de isozonas (TORRICO, 1974).

### 2.3.4 Método de Robaina e Peiter

O método proposto por Robaina e Peiter (1992 *apud* Damé *et al.*, 2008) supõe a existência de uma expressão que defina matematicamente a relação entre o total precipitado em um tempo de duração qualquer e o total precipitado no período de 24 horas. Esta expressão matemática é dada por:

$$P(t, Tr) = P(24) \cdot F(t) \cdot F(Tr) \quad (\text{Eq. 7})$$

Na qual  $P(t, Tr)$  é a lâmina total precipitada de duração e período de retorno preestabelecidos,  $P(24)$  é a lâmina precipitada média com duração de 24 horas,  $F(t)$  é a função de desagregação, e  $F(Tr)$  é a função do período de retorno.

As funções  $F(t)$  e  $F(Tr)$  são dadas pelas seguintes equações:

$$F(t) = 0,0000768 \cdot t + 0,1396 \ln(1 + 0,3333 \cdot t) \quad (\text{Eq. 8})$$

onde o tempo de duração  $t$  é expresso em minutos, e

$$F(Tr) = 0,4297^m \cdot Tr^m \quad (\text{Eq. 9})$$

onde o expoente  $m$  é função da duração da precipitação, calculado por:

$$m = \frac{0,2086 \cdot t}{(t + 4,5969)} \quad (\text{Eq. 10})$$

Os autores não mencionam o tamanho da amostra usada na determinação da equação, nem seus limites de validade.

### **2.3.5 Metodologia proposta por Damé (2001)**

Essa metodologia consiste na utilização de séries sintéticas de precipitação para a estimativa das relações IDF e foi empregada por Damé (2001), em cujo trabalho foram ajustados os parâmetros do modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (BLPRM) (RODRIGUEZ-ITURBE, 1987; BACK *et al.*, 1999). A modelagem estocástica da precipitação permite que, conhecendo-se as características estatísticas de uma série de precipitação, seja possível ajustar os parâmetros de um modelo escolhido e com isto se simule “n” séries com as mesmas características estatísticas, obtendo uma maior compreensão do processo (DAMÉ *et al.*, 2007). A partir da resposta do modelo BLPRM, as séries de precipitação na duração de 15 minutos foram agregadas à duração de 24 horas e usadas no modelo de desagregação proposto por Glasbey *et al.* (1995).

Em locais onde essa metodologia mais complexa foi empregada em comparação com outros métodos de desagregação de precipitações de pluviômetros, não foram constatados ganhos significativos de informação em termos de curvas IDF para os períodos de retorno considerados (DAMÉ, 2001; DAMÉ *et al.*, 2006, 2008).

### **3. ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE**

#### **3.1 Técnicas**

Os primeiros métodos de estimativa de precipitação por satélite baseavam-se em imagens em bandas no infravermelho (IR) e no visível (VIS). Mais recentemente, começaram a surgir metodologias usando imagens de sensores de micro-ondas (LEVIZZANI, 1998). Atualmente, técnicas híbridas vêm sendo propostas, as quais se propõem a extrair as vantagens e minimizar as desvantagens de cada uma.

O princípio da estimativa de precipitação de chuva através de sensoriamento em bandas no visível é o fato de que o brilho da luz do sol refletida por nuvens pode ser uma indicação razoável de sua espessura e conseqüentemente do volume de água em seu interior (Petty, 1995).

Da mesma forma, temperaturas de topo de nuvem baixas estão associadas a um maior desenvolvimento vertical de uma nuvem e conseqüentemente a uma taxa de precipitação maior. A temperatura do topo de nuvem pode ser obtida a partir de medições de reflectância em bandas de infravermelho. As hipóteses contidas neste parágrafo e no anterior foram a base das primeiras tentativas de estimar precipitação a partir do espaço.

As técnicas baseadas em bandas no VIS e no IR são inerentemente indiretas, ou seja, os parâmetros diretamente observados do espaço são dependentes da ocorrência de chuva na nuvem por intermédio apenas de uma correlação estatística. Um marco na estimativa de precipitação por satélite foi o emprego de sensores de micro-ondas (MW) que respondem de forma razoavelmente física à presença de água e/ou cristais de gelo dentro das nuvens, e não apenas na sua superfície. A correspondência entre a reflectância de micro-ondas e a taxa de precipitação é dada pela lei de Planck.

A principal desvantagem de estimativas MW é o longo período entre duas passagens subsequentes do satélite sobre um mesmo ponto na superfície terrestre, devido à órbita oblíqua típica de satélites portando sensores de MW. Esse período pode ser de até dois dias, dependendo do satélite e da latitude, sendo tanto menor quanto mais próximo da linha do Equador se encontre o ponto considerado. Essa taxa de amostragem é demasiadamente baixa e não permite que seja possível uma integração correta dos totais precipitados sobre períodos mais longos e/ou

áreas maiores, como alerta Petty (1995). A baixa resolução espacial de sensores MW (não superior a 6 km), mesmo a despeito de sua baixa altitude, é outra desvantagem frente às estimativas VIS/IR.

Apesar de a convecção ser a responsável pela maior parte da geração da precipitação nos trópicos, chuvas estratiformes também representam um volume considerável. Schumacher e Houze Jr. (2004), baseados em informações do satélite TRMM, afirmam que os cristais de gelo, embora amplamente presentes e envolvidos na formação de precipitação estratiforme, provavelmente são menores e/ou menos numerosos do que em fenômenos convectivos, de forma a reduzir a dispersão de MW. Assim, a estimativa por satélite de precipitação frontal tem maior incerteza associada.

Por fim, destaca-se a incapacidade dos sensores de MW discriminarem precipitação orográfica. A colisão-coalescência de moléculas de vapor em terrenos em auge é um tipo de formação de precipitação importante em determinadas regiões e que produz pouca ou nenhuma partícula de gelo, impossibilitando sua estimativa pela técnica descrita acima. Infelizmente, tampouco as técnicas baseadas em sensores de infravermelho são apropriadas para identificar precipitação orográfica, uma vez que as nuvens associadas são em geral muito mais quentes do que a temperatura limite usada para delineamento de precipitação (PETTY, 1995).

De forma geral, as estimativas baseadas em imagens de micro-ondas são mais precisas do que as obtidas com base em imagens no infravermelho (RAMAGE *et al.*, 2003). No entanto, a alta resolução temporal e espacial de estimativas VIS/IR é uma vantagem considerável destas técnicas. Assim, diversas técnicas híbridas vêm sendo desenvolvidas para explorar as vantagens de cada uma das bandas, ou seja, a alta resolução espacial das estimativas IR e o caráter global das estimativas MW.

Poucos trabalhos que estimam chuva a partir de imagens de satélite foram encontrados em países desenvolvidos. Isto se deve provavelmente ao fato de que estes países possuem uma maior rede de observação convencional e radares meteorológicos, os quais fornecem melhores representações da distribuição espacial das chuvas. Porém, o mesmo não vale para países em desenvolvimento, que em geral possuem esparsa rede de pluviômetros/pluviógrafos e dificuldades de toda ordem de acesso aos dados. Não parece ser por acaso, portanto, o número razoável de trabalhos encontrados que estimam precipitação via satélite sobre países da África. Destacam-se os trabalhos de Nicholson (2005), onde dados de precipitação do satélite TRMM

foram usados para estender séries históricas de precipitação, estabelecendo importantes conclusões sobre a variabilidade de longo prazo da precipitação na região desértica do Sahel.

O trabalho de Bwanali (2001) correlacionou precipitação sobre o Zimbábue com temperatura no topo de nuvens estimada a partir de imagens METEOSAT do EUMETSAT (*European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*). Esse satélite possui alta resolução temporal de imageamento (cerca de 30 minutos), o que permite uma boa representação da variabilidade tanto temporal quanto espacial da precipitação. O autor observa que o potencial do uso de sensoriamento remoto para estimativas espaciais da precipitação é alto, porém salienta que em grandes áreas, seu uso deve ser corrigido por meio de medições pontuais no solo.

Testfatsion e Dinku (2003) correlacionaram precipitação com o índice CCD (*Cold Cloud Duration*), o qual mede o tempo durante o qual o topo de uma nuvem esteve abaixo de uma temperatura limite, estimando precipitação para a Etiópia. Os autores, entretanto, estabeleceram relações lineares entre CCD e precipitação, de forma que o modelo é muito simplificado para a explanação de um fenômeno tão complexo. Os resultados obtidos contribuíram apenas em termos de médias interanuais de precipitação.

Ramage *et al.* (2003) compararam dados de satélites TRMM, GPCP (*Global Precipitation Climatology Project*) e METEOSAT com medições em terra. Os autores compararam precipitação acumulada de 1, 5 e 10 dias sobre o oeste da África. Para o acumulado de um dia, os resultados não foram satisfatórios, melhorando, no entanto, com o aumento do período de acumulação. O TRMM e o GPCP superestimaram sistematicamente em 6% a 17% a precipitação, enquanto o METEOSAT a subestimou em 15% a 25%.

Com relação às estimativas de precipitação baseadas em correlações com temperatura de topo de nuvem, Barrera (2005) alerta que essas estimativas são mais confiáveis para o caso de chuvas de origem convectiva. Assim, é de se esperar que essas estimativas produzam resultados melhores em latitudes mais baixas, onde predomina a ocorrência de precipitação convectiva. Essa é provavelmente a razão para os maus resultados das estimativas feitas por Struzik (2003), que correlacionou taxa de precipitação com temperatura de topo de nuvem de forma a estimar precipitação espacial sobre a Polônia, país onde as chuvas provavelmente são predominantemente frontais.

No caso do Brasil, há trabalhos pontuais com o objetivo de estimar precipitação por satélite. Um dos pioneiros é o trabalho de Conti (2002), bastante completo e abrangente, que realizou ainda um estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul, obtendo resultados satisfatórios. Infelizmente, as técnicas de estimativa por micro-ondas ainda não se encontravam devidamente consolidadas, razão pela qual o autor usou apenas dados de imagens no VIS e IR. Destaca-se, também, o trabalho de Araújo e Guetter (2005), que comparou estimativas de satélites de órbita baixa com medições de solo em pequenas e médias bacias do estado do Paraná, concluindo que há boa aderência das estimativas.

O satélite TRMM fornece estimativas mais precisas do que as técnicas indiretas baseadas em imagens de outros satélites (BARRERA, 2005), sendo usado inclusive para validação dessas técnicas. Nicholson (2005) afirma que o projeto TRMM resultou em medidas consideravelmente mais confiáveis do que as estimativas feitas até então. Em vista disso, e também do fato de que as séries disponíveis estimadas a partir desse satélite são mais longas, usar-se-ão exclusivamente dados de precipitação estimados pelo TRMM neste trabalho.

### **3.2 O projeto TRMM e o produto 3B42**

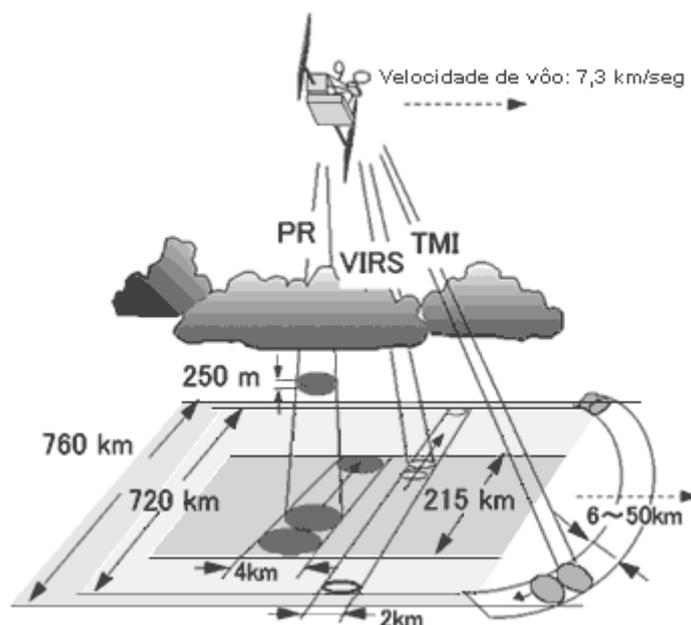
O satélite TRMM é um projeto em parceria entre a NASA e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA) e foi lançado em 27 de novembro de 1997, com o objetivo específico de monitorar e estudar a precipitação nos trópicos, além de verificar como a mesma influencia o clima global (KUMMEROW *et al.*, 2000).

O satélite possui órbita oblíqua não-heliossíncrona bastante baixa (inicialmente 350 km, desde 2001 aproximadamente 403 km), de forma que o período de translação é bastante curto (91 minutos), permitindo resoluções espacial e temporal comparativamente altas.

Os instrumentos a bordo do TRMM são: imageador de micro-ondas (TMI), radar de precipitação (PR), radiômetro no visível e no infravermelho (VIRS), sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens (CERES), e sensor para imageamento de relâmpagos (LIS).

O sensor de micro-ondas (TMI) é o principal instrumento na medição de precipitação. Para refinar as estimativas, afetadas pelas diferentes formações de nuvens, faz-se uso do radar de precipitação (PR), que é o primeiro radar meteorológico a ser lançado a bordo de um satélite,

permitindo produzir mapas tridimensionais de estruturas precipitantes. Esse radar é capaz de detectar taxas de precipitação muito baixas, da ordem de menos de  $0.7\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  (KAWANISHI *et al.*,2000). A Figura 3.1 mostra uma representação esquemática do processo de aquisição de dados do TRMM.



**Figura 3.1. Representação esquemática da aquisição de dados pelo sensor de micro-ondas (TMI, varredura verde), radiômetro (VIRS, varredura amarela) e radar meteorológico (PR, varredura vermelha) do satélite TRMM (Adaptado de <http://daac.gsfc.nasa.gov/>).**

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

Para refinar as medições, existe um programa de validação em campo (*Ground Validation* ou GV), contando com radares meteorológicos em diversas estações ao longo da faixa intertropical.

O projeto TRMM gera diversos produtos (estimativas) de acordo com a combinação de instrumentos usada no algoritmo de cálculo. O produto 3B42 *research*, que será usado neste trabalho, usa estimativas de precipitação por micro-ondas do TMI, corrigidas através de informações sobre a estrutura vertical das nuvens, obtidas do PR. O projeto TRMM possui ainda um programa de validação em campo, para minimização das diferenças entre estimativas por

satélite e medições no solo. Deve-se ressaltar que essa calibração com dados de campo é feita de forma bastante global e generalizada, podendo gerar estimativas locais pouco precisas. As estimativas são então convertidas para acumulados mensais por meio de interpolação para preencher as lacunas na continuidade temporal, decorrentes da baixa frequência de passagem, gerando o produto 3B31. Esse produto tem alta resolução espacial, de 0,25°, porém resolução temporal inadequada para a utilização em projetos de drenagem urbana. Os acumulados mensais são então usados para corrigir estimativas baseadas em imagens do infravermelho de satélites da série GOES, os quais possuem resolução temporal de 3 horas. Consegue-se, deste modo, um produto que combina resoluções temporal e espacial altas, chamado 3B42 *realtime*, ou RT. Finalmente, o produto 3B42 *research* é obtido ajustando os valores de 3 horas do RT de forma a que os valores de precipitação acumulados mensais coincidam com uma grade, de resolução de 1°, de precipitação medida por pluviômetros do GPCC (HUFFMAN *et al.*, 2007). Devido a este ajuste, o produto 3B42 *research* é disponibilizado com um atraso de 10 a 15 dias.

A Figura 3.2 mostra o campo de estimativas do produto 3B42 do TRMM sobre o Distrito Federal. A escala de cores representa a lâmina média precipitada em cada *pixel*, de forma que cores mais quentes correspondem a precipitações mais intensas.

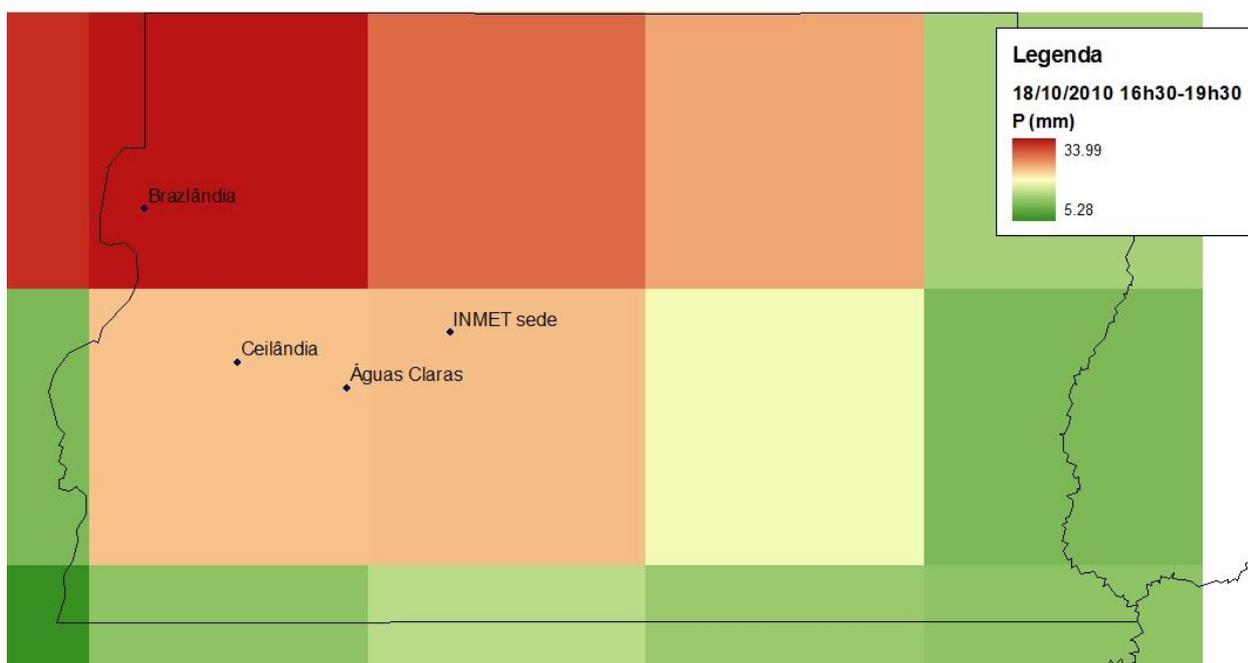


Figura 3.2. Precipitação estimada pelo TRMM sobre o Distrito Federal no período de 16h30 a 19h30 do dia 18/10/2010<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> O pluviógrafo na sede do INMET em Brasília registrou 18,4mm entre as 17h e as 20h deste dia, enquanto a chuva estimada pelo TRMM no pixel foi de 23,5mm. Este trabalho não teve acesso aos dados de outros pluviógrafos no DF

A grande vantagem deste produto em especial é sua resolução temporal, de 3 horas, e espacial, de 0.25°, na faixa entre 50° S e 50° N. Por outro lado, a desvantagem é a complexidade do algoritmo e o número de dados necessários para gerar o produto, de forma que os dados não são distribuídos de forma imediata.

Com relação à vida útil do satélite TRMM, cabe ressaltar que, inicialmente, o satélite estava previsto para fornecer dados até março de 2004 (KUMMEROW *et al.*, 2000). Porém, com a manobra de elevação de altitude, realizada em agosto de 2001, o satélite teve sua vida útil estendida, devido à economia no consumo de energia (embora com uma leve redução na resolução espacial dos instrumentos). Por duas vezes, a Agência anunciou o adiamento do fim do programa. Por fim, em junho de 2005, foi atingida a reserva de combustível necessária para a reentrada controlada do satélite na atmosfera, procedimento que assegura a queda do satélite no oceano. A Agência decidiu então abrir mão da reentrada controlada, considerando que o benefício advindo da extensão das medições supera o risco de que eventuais peças que não tenham se desintegrado no choque com a atmosfera provoquem danos materiais ou físicos em terra, risco que é avaliado em 1 em 10.000. Com a renúncia ao procedimento, o combustível restante era suficiente para estender a operação do TRMM, no mínimo, até o ano de 2010. No entanto, em até o presente momento (junho/2011), o satélite continua em operação. O adiamento do fim da operação evidencia a satisfação com os resultados obtidos pelo programa, satisfação atestada por vários autores, como Flaming (2004), Hiroshima (1999) e Kummerow *et al.* (2000).

Devido a esse relativo sucesso, a NASA preparou um programa para suceder o TRMM, chamado de GPM (*Global Precipitation Measurement*), prevendo para 2013 o lançamento de múltiplos satélites, equipados com sensores e radares similares ao anterior, porém com maior resolução (FLAMING, 2004). Em vista disso, há esperança de que o volume e a qualidade dos dados de chuva disponíveis sofram incrementos significativos, favorecendo a utilização em projetos de drenagem urbana em todo o Brasil.

---

na mesma data, porém o jornal “Correio Braziliense” do dia seguinte afirmou: “Os moradores de Taguatinga Norte, Águas Claras, Colônia Agrícola Samambaia e Vicente Pires, além da área rural de Ceilândia e Brazlândia ficaram por mais de uma hora sem luz durante o temporal” (CORREIO BRAZILIENSE, 2010), indicando que precipitações mais intensas ocorreram no oeste-noroeste do DF, o que é corroborado pelas estimativas do TRMM.

### 3.3 Trabalhos desenvolvidos com emprego de estimativas de precipitação do TRMM

Este item apresenta, de forma sucinta, alguns trabalhos publicados cuja realização envolveu a aplicação de dados de precipitação estimada pelo satélite TRMM.

Destaca-se o trabalho de Shepherd *et al* (2002), que empregaram dados de precipitação estimada pelo TRMM para identificar a influência de áreas urbanizadas nos EUA (regiões de Houston – Texas e Atlanta - Geórgia) na precipitação, conjuntamente com dados de outras fontes (medições em solo), e constataram que as estimativas de satélite conseguiram captar os efeitos da urbanização nas chuvas.

Posteriormente, Shepherd e Burian (2003) realizaram uma análise estatística e quantitativa das taxas de precipitação estimadas pelo satélite TRMM e apontaram que anomalias pluviais em Houston (Texas, EUA) podem ter sido causadas pela interação uso do solo urbano (ilhas de calor) com processos atmosféricos. O estudo também apresentou evidências de que as anomalias pluviais em Houston estão ligadas à região urbanizada e não exclusivamente à circulação dos ventos do mar.

Ainda, Shepherd (2006) procurou detectar a influência de áreas urbanas nas anomalias da precipitação em regiões áridas nos EUA (Phoenix, Arizona) e Arábia Saudita (Riad), com emprego de precipitação medida no solo auxiliada por estimativas do satélite TRMM.

Mori *et al.* (2004) empregaram dados de satélite TRMM (3G68) aliados a outros tipos de dados de precipitação para analisar a migração terra-mar dos picos de chuva ao longo do dia na ilha de Sumatra (Indonésia). Trabalhos semelhantes a este foram realizados com a utilização de dados do TRMM em outras partes do globo (TAKAYABU, 2002; SOROOSHIAN *et al.*, 2002; NESBITT e ZIPSER, 2003).

Collischonn (2006) avaliou em que medida as estimativas de precipitação obtidas a partir do satélite TRMM podem ser úteis quando usadas como dado de entrada em modelo hidrológico distribuído (MGB-IPH), sozinhas ou associadas com os dados da rede pluviométrica. Os resultados foram analisados em termos de vazão simulada, considerando que esta representa a integração de todos os fenômenos hidrológicos na bacia. Foram feitos estudos de caso na bacia do rio São Francisco até a UHE Três Marias, que conta com boa rede pluviométrica para aferir as estimativas, e na bacia do rio Tapajós, com baixa densidade de postos pluviométricos. O modelo alternativo, usado com estimativas de satélite, teve desempenho pouco inferior ou mesmo similar ao modelo

convencional, usado com dados de pluviômetros. Além disso, Collischonn (2006) constatou que os campos de precipitação obtidos por satélite são potenciais ferramentas para consistência de dados pluviométricos em escala de bacia hidrográfica e estimativa da precipitação em áreas com deficiente rede pluviométrica, considerando que os resultados obtidos pela rede e por satélites mostraram valores próximos.

Collischonn *et al.* (2006) analisaram os campos de precipitação e as precipitações médias obtidas do satélite TRMM em comparação com os obtidos por pluviômetros sobre a bacia do Alto Paraguai até Fazenda Descalvados, no território brasileiro. Os resultados foram considerados satisfatórios pelos autores, apontando para o TRMM como uma fonte alternativa de dados em situações de escassez de informação.

Um trabalho similar ao que está sendo proposto na presente pesquisa foi realizado por Endreny e Imbeah (2009), que geraram relações IDF híbridas a partir de dados do TRMM e dados pluviométricos em Gana que, a exemplo do Brasil, é um país com monitoramento pluviográfico incipiente, de forma que a busca por fontes alternativas de dados se impõe.

## **4. METODOLOGIA DE PESQUISA**

### **4.1 Estrutura metodológica**

Inicialmente foi analisada a qualidade das estimativas do TRMM em relação aos dados observados de pluviógrafo de Brasília, onde foi possível obter uma IDF ajustada com dados de mesmo período. A metodologia de ajuste da IDF aos dados do TRMM é apresentada no item 4.2, enquanto que no item 4.3 é apresentada a metodologia de ajuste aos dados observados.

Tendo em vista que se teve acesso a poucos pluviógrafos no período coincidente com o TRMM, foram feitas também comparações das precipitações máximas obtidas dos dados do TRMM com aquelas estimadas por relações IDF existentes, consideradas a representação disponível mais próxima das chuvas máximas em cada localidade no presente estudo, descritas no item 4.4. Eventuais diferenças encontradas entre as precipitações máximas foram investigadas através de testes estatísticos.

O item 4.5 detalha o procedimento para a geração dos parâmetros de curvas IDF para todas as sedes municipais brasileiras, a partir de dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM.

No item 4.6 são mostradas as etapas do trabalho para a comparação das curvas IDF geradas a partir dos dados do TRMM com as curvas IDF estabelecidas com dados de pluviômetro, definindo a metodologia selecionada para obtenção da IDF a partir de dados de pluviômetro, os cenários de simulação das bacia urbanas hipotéticas empregados e os indicadores propostos para avaliação da qualidade das relações IDF.

Finalmente, no item 4.7 é apresentado o procedimento de estimativa dos coeficientes de desagregação espacializados a partir dos dados do TRMM, para validação em comparação com método existente de coeficientes de desagregação espacializados, proposto por Torrico (1974).

### **4.2 Estimativas das precipitações máximas a partir de dados do TRMM**

Conforme mencionado, o produto 3B42 *research* do TRMM disponibiliza dados de 3h em 3h, com resolução espacial de 0,25°x0,25°. A partir do sítio

<http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/> foram obtidas as séries desde janeiro de 1998 até dezembro de 2009 nos *pixels* que englobam as seguintes localidades: Porto Alegre (RS) - Aeroporto, Porto Alegre (RS) - DISME, Porto Alegre (RS), Cruz Alta (RS), Florianópolis (SC), Curitiba (PR), São Paulo (SP), Lins (SP), Rio de Janeiro (RJ), Formosa (GO), Brasília (DF), Aracaju (SE), Fortaleza (CE), Teresina (PI), São Luiz (MA), Belém (PA), Manaus (AM), Porto Velho (RO) e Rio Branco (AC). Quando a coordenada do posto pluviográfico utilizado na obtenção da relação IDF utilizada para análise comparativa era conhecida, esta era considerada para escolha do *pixel* envolvente. Nos demais casos foram consideradas as coordenadas da respectiva sede municipal, conforme consta no banco de dados do IBGE do ano de 2000, obtido em ANA (2000).

Foram constituídas séries anuais de precipitação máxima estimada pelo satélite TRMM, visto que, segundo Wilken (1978), quando o número de anos com dados da série disponível é pequeno (menor que 12 anos), deve ser utilizada a metodologia de análise de séries parciais para a determinação dos máximos. Assim, a extensão das séries do TRMM (12 anos) já permite o uso de séries de máximos anuais para geração de relações IDF, não sendo necessária a adoção de séries parciais.

Para cada localidade, foram identificados os máximos anuais de 3, 6, 9, 12 e 24h, e, à série de cada duração, foi ajustada uma distribuição estatística. Sendo a precipitação máxima teoricamente ilimitada na direção positiva, optou-se por uma distribuição assintótica dos extremos, no caso a distribuição de Gumbel, cuja Função Cumulativa de Probabilidades (FCP) para a série de máximos é dada por (LANNA, 1993):

$$P[Y \leq y] = e^{-e^{-\alpha(y-\mu)}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\mu$  obtidos pelo método dos momentos, são dados por:

$$\alpha = 1,2826/s \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\mu = \bar{x} - 0,451 \cdot s \quad (\text{Eq. 13})$$

onde  $s$  é o desvio padrão amostral e  $\bar{x}$  é a média amostral.

A escolha da distribuição estatística de Gumbel se deu pelo fato de esta distribuição ser amplamente utilizada na literatura e em projetos. Diversos trabalhos no Brasil concluíram que esta distribuição apresentou melhores resultados no ajuste de chuvas intensas, como Silva *et al.* (2003), Rodrigues *et al.* (2008) e Back (2001). Além disso, a necessidade de ajustar em um grande número

de locais tornaria o ajuste de outras distribuições para cada um destes locais excessivamente custoso computacionalmente.

#### **4.3 Análise comparativa das precipitações máximas estimadas pela IDF de Brasília estabelecida com dados históricos em período coincidente com a disponibilidade de dados do satélite TRMM**

A fim de verificar possíveis influências relativas ao período de medição dos dados no ajuste das relações IDF a partir de dados de precipitação estimada pelo satélite TRMM, foi realizada uma comparação das alturas precipitadas estimadas com base nos dados de satélite com as precipitações obtidas a partir dos dados de pluviógrafo medidos em período coincidente com o período de dados de satélite disponíveis, ou seja, com dados entre 1998-2008.

Em vista da indisponibilidade de dados atuais (1998-2009) de pluviógrafo no *Hidroweb*, e das dificuldades apontadas anteriormente neste trabalho sobre o acesso aos registros em pluviogramas nos órgãos detentores da informação, essa comparação foi realizada apenas para a cidade de Brasília.

Desta forma, os dados de pluviógrafos da estação do INMET em Brasília, medidos entre 1998-2008, foram tratados e ajustados através da distribuição de Gumbel. A seguir, as precipitações com durações de 3, 6, 9, 12 e 24 h para os tempos de retorno 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos ajustadas foram plotadas contra as precipitações, para as mesmas durações e tempos de retorno, ajustadas pela distribuição de Gumbel com base nos dados estimados pelo satélite TRMM, permitindo visualizar graficamente as diferenças de comportamento das precipitações.

Em seguida, foi realizado um teste estatístico para avaliar se há diferença na tendência das precipitações medidas pelo pluviógrafo de Brasília entre os períodos anterior ao TRMM e coincidente com a disponibilidade de dados do TRMM. A série de dados de pluviógrafo de Brasília foi dividida em dois períodos: de 1962-1997, anterior ao TRMM, e de 1998-2008, coincidente com o TRMM e foi verificado se os dois períodos são equivalentes estatisticamente quanto a média e variância, aplicando os testes t de Student para a média e f de Fischer para a variância (TUCCI, 2002), comparando as máximas anuais com durações de 3, 6, 12 e 24h.

Além disso, foi feita uma análise estatística buscando verificar se as máximas anuais do TRMM e do pluviógrafo provêm de distribuições com médias e variâncias iguais. Foram realizados os mesmos testes t de Student para a média e f de Fischer para a variância (TUCCI, 2002), comparando as máximas anuais com durações de 3, 6, 12 e 24h.

#### **4.4 Comparação das precipitações máximas obtidas a partir do TRMM com precipitações estimadas por IDF existentes**

Em cada localidade, as precipitações máximas geradas (altura precipitada em mm) foram comparadas com as precipitações máximas obtidas a partir de curvas IDF obtidas de dados amostrais de diferentes períodos disponíveis, para a mesma duração e tempo de retorno. As curvas IDF são basicamente as curvas derivadas do trabalho de Pfafstetter (1957), sintetizadas em trabalhos posteriores, como Bertoni e Tucci (1993), Frago Jr. (2004) e Bravo *et al.* (2008). Adicionalmente, as precipitações das curvas IDF estabelecidas para dois postos pluviográficos de Porto Alegre por Bemfica *et al.* (2000) e para São Paulo e Rio de Janeiro por Wilken (1978 *apud* BERTONI e TUCCI, 1993) foram comparadas com dados do TRMM, bem como as precipitações da equação IDF atualizada para Brasília durante a elaboração de seu Plano Diretor de Drenagem Urbana (DISTRITO FEDERAL, 2009).

As relações IDF podem ser representadas através da seguinte forma:

$$I = \frac{a \cdot TR^b}{(t + c)^d} \quad \text{(Eq. 14)}$$

onde  $TR$  é o tempo de retorno em anos;  $I$  é a intensidade da precipitação em  $\text{mm.h}^{-1}$ ;  $t$  é a duração em minutos;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são parâmetros ajustados para cada localidade ou estação de medição.

Portanto, para os fins do presente trabalho, as curvas IDF de Pfafstetter replicadas em trabalhos posteriores e demais relações IDF estabelecidas e publicadas, apresentadas na Tabela 4.1, foram consideradas a representação mais próxima das chuvas máximas em cada localidade. Esta premissa não necessariamente é verdadeira, dados o período relativamente curto e antigo de obtenção de dados de Pfafstetter, a utilização de dados mistos de pluviômetro e pluviógrafo, a possibilidade de mudanças climáticas que aumentem ou diminuam a intensidade de chuvas

máximas no período recente e o desenvolvimento de novas técnicas de medição pluviográfica. No entanto, se aceita esta premissa pelo fato de o trabalho de Pfafstetter ter partido de uma base relativamente sólida de dados, obtidos e processados de forma padronizada, e, nos casos das demais relações IDF consideradas, pela aceitação e utilização na prática de projetos em drenagem urbana (WILKEN, 1978 *apud* BERTONI e TUCCI, 1993; PORTO ALEGRE, 2005; CE-DEP, 2005; DISTRITO FEDERAL, 2009).

**Tabela 4.1. Parâmetros das relações IDF existentes empregadas.**

| LOCALIDADE               | <i>a</i>             | <i>b</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | R2       | FONTE |
|--------------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Porto Alegre (RS)        | 816,598              | 0,167    | 12       | 0,760    | 0,99911  | (1)   |
| Porto Alegre – 8º DISME  | 1297,900             | 0,171    | 11,619   | 0,850    | -        | (2)   |
| Porto Alegre – Aeroporto | 826,806              | 0,143    | 13,326   | 0,793    | -        | (2)   |
| Cruz Alta (RS)           | 1419,000             | 0,190    | 12       | 0,800    | -        | (1)   |
| Florianópolis (SC)       | 1754,242             | 0,187    | 36       | 0,823    | 0,99869  | (1)   |
| Curitiba (PR)            | 998,280              | 0,178    | 9        | 0,784    | 0,99942  | (1)   |
| São Paulo (SP)           | 29,130 <sup>#</sup>  | 0,181    | 15       | 0,890    | -        | (3)   |
| Lins (SP)                | 430,500              | 0,300    | 12       | 0,740    | -        | (1)   |
| Rio de Janeiro (RJ)      | 1239,000             | 0,150    | 20       | 0,740    | -        | (3)   |
| Formosa (GO)             | 14,6625 <sup>#</sup> | 0,164    | 8        | 0,748    | 0,999476 | (4)   |
| Brasília (DF)            | 1574,700             | 0,207    | 8        | 0,884    | 0,99800  | (5)   |
| Aracajú (SE)             | 834,205              | 0,179    | 15       | 0,726    | 0,99551  | (1)   |
| Fortaleza (CE)           | 1408,613             | 0,167    | 12       | 0,778    | 0,99869  | (1)   |
| Teresina (PI)            | 1248,856             | 0,177    | 10       | 0,769    | 0,99861  | (1)   |
| São Luiz (MA)            | 1519,371             | 0,161    | 28       | 0,777    | 0,99764  | (1)   |
| Belém (PA)               | 1085,508             | 0,156    | 12       | 0,758    | 0,99551  | (1)   |
| Manaus (AM)              | 1136,504             | 0,158    | 10       | 0,764    | 0,99819  | (1)   |
| Porto Velho (RO)         | 1182,378             | 0,159    | 11       | 0,757    | 0,99664  | (1)   |
| Rio Branco (AC)          | 1419,345             | 0,162    | 18       | 0,795    | 0,99779  | (1)   |

**Fonte:** (1) Fragoso Jr., 2004; (2) Bemfica *et al.*, 2000; (3) Bertoni e Tucci, 1993; (4) Bravo *et al.*, 2008; (5) Distrito Federal, 2009. **Nota:** <sup>#</sup>em mm/min.

Para cada localidade e diferentes tempos de retorno, sendo considerados 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos de tempo de recorrência, foram, portanto, comparadas as precipitações máximas do TRMM, obtidas neste trabalho, e de Pfafstetter, para as seguintes durações: 3, 6, 9, 12 e 24 h. Neste primeiro momento, as comparações foram gráficas, procurando-se verificar se há tendência do TRMM em sub ou superestimar as precipitações máximas.

Nos casos em que foi constatada uma diferença graficamente significativa entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela equação IDF clássica, e que haviam dados medidos por pluviômetro disponíveis, foi realizada uma análise da série de pluviômetro com vistas a detectar tendência de aumento ou decréscimo das precipitações ao longo do tempo.

Para isso, foi ajustada uma linha de tendência do tipo linear à série histórica de dados pluviométricos e aplicado o teste estatístico *t* de Student para avaliar a significância da inclinação da reta ajustada. A hipótese nula consiste em afirmar que a declividade da reta pode ser tomada como igual a zero e, dessa maneira, ao se rejeitar a hipótese nula pode-se afirmar que há tendência na série analisada, a um dado nível de significância, de aumento de precipitações quando a declividade for positiva, ou de decréscimo das precipitações máximas diárias se a declividade for negativa.

#### **4.5 Geração do mapa de parâmetros *a*, *b*, *c* e *d* das relações IDF para o Brasil**

Como subsídio final deste trabalho, procedeu-se a geração dos parâmetros de curvas IDF para todas as sedes municipais brasileiras, a partir de dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM.

A Figura 4.1 ilustra uma representação vetorial (*shapefile*) das sedes municipais brasileiras, no ano de 2000, totalizando 5.561 sedes.



**Figura 4.1. Representação vetorial (*shapefile*) das 5561 sedes municipais brasileiras (ANA, 2000).**

Para automatização da geração de curvas IDF para as sedes municipais, foi implementado um programa em linguagem MATLAB 2008®, que realiza, de forma iterativa para todas as sedes municipais, as seguintes etapas:

- 1- Leitura das coordenadas da sede municipal;
- 2- Identificação do *pixel* de 0,25° do TRMM envolvente à coordenada da sede;
- 3- *Download* da série de precipitações de 3h do TRMM no *pixel*, de janeiro de 1998 a dezembro de 2009;
- 4- Identificação dos máximos anuais de 3, 6, 9, 12 e 24h;
- 5- Ajuste da distribuição de Gumbel aos máximos de cada duração, e estimativa das lâminas precipitadas e intensidades para tempos de recorrência de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos;
- 6- Ajuste de uma equação do tipo:

$$I(mm/h) = \frac{a \cdot Tr^b}{(Td+c)^d}; \quad (\text{Eq. 15})$$

- 7- Escrita dos resultados em arquivos de saída.

Para implementação da etapa 6, a equação geral da curva IDF foi linearizada com o uso de logaritmos, da seguinte forma:

$$\log(I) = \log(a) + b \cdot \log(Tr) - d \cdot \log(Td + c) \quad (\text{Eq. 16})$$

Denominando-se  $Y=\log(I)$ ,  $X1=\log(Tr)$ ,  $X2=\log(Td+c)$ , e  $A=\log(a)$ , tem-se:

$$Y=A+b.X1+d.X2 \quad (\text{Eq. 17})$$

que é uma equação linear de duas variáveis, cujos parâmetros  $A$ ,  $b$  e  $d$  podem ser obtidos por regressão múltipla.

Já o parâmetro  $c$  não pode ser explicitado no logaritmo, de forma que sua obtenção foi feita de forma iterativa: uma vez que os valores característicos deste parâmetro situam-se entre 0 e 30, o programa realiza 600 ajustes, variando o valor de  $c$  entre -30 e +30, com passo de 0,1. O valor final de  $c$  é aquele que resulta no maior valor do coeficiente de determinação  $R^2$ .

Usando-se apenas os máximos com durações de 3 a 24 horas, o ajuste dos parâmetros não é satisfatório, levando a valores muito altos para o parâmetro  $c$ . Isto ocorre provavelmente porque as intensidades com mais de 3 horas são relativamente baixas, de forma que o ajuste estatístico não incorpora valores mais extremos. Para contornar este problema, foi gerada uma precipitação máxima sintética com 5 minutos de duração, a qual foi incorporada no ajuste dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ . Esta precipitação foi gerada com base nos coeficientes de desagregação da CETESB (DAEE/CETESB, 1980) a partir da chuva máxima de 6h.

**Tabela 4.2. Coeficientes de desagregação do Brasil (DAEE/CETESB, 1980).**

| RELAÇÃO ENTRE DURAÇÕES | FATOR |
|------------------------|-------|
| 1h/24h                 | 0,42  |
| 6h/24h                 | 0,72  |
| 30min/1h               | 0,74  |
| 5min/30min             | 0,34  |

A partir das duas primeiras linhas da Tabela 4.2, se infere que a relação entre a chuva de 1 hora e de 6 horas é de 0,583. Multiplicando-se este fator pelos dois fatores seguintes, obtém-se o fator de 0,1467, que é uma estimativa da conversão entre a altura precipitada de 6 horas e de 5

minutos. Assim foi possível gerar uma precipitação máxima sintética, de curta duração, a partir dos dados do TRMM, para incorporação na etapa de ajuste dos parâmetros.

## 4.6 Comparação do uso das curvas IDF geradas a partir dos dados do TRMM com as curvas IDF estabelecidas com dados de pluviômetro

### 4.6.1 Estabelecimento de relações IDF a partir de dados de pluviômetro

Quando em certa área em estudo se dispõe somente de dados pluviométricos, para encontrar as alturas de chuva nas diversas durações lança-se mão de uma metodologia que emprega coeficientes para a desagregação de chuvas, conhecido como método das relações entre durações (BERTONI e TUCCI, 1993). Conforme já destacado, esse método baseia-se em duas características observadas nas relações IDF correspondentes a postos localizados em diversas partes do mundo: existência de tendência das curvas de probabilidade de diferentes durações manterem-se paralelas entre si e na existência de uma grande similaridade nas relações entre precipitações médias máximas de diferentes durações para diferentes locais.

A Tabela 4.3 a seguir apresenta informações sobre os postos pluviométricos cujos dados estavam disponíveis no Hidroweb e foram selecionados para utilização na desagregação e estabelecimento da relação IDF.

**Tabela 4.3. Postos pluviométricos empregados na desagregação para geração da relação IDF<sub>plu</sub>.**

| LOCALIDADE          | CÓDIGO   | COORDENADAS |            | EXTENSÃO DA SÉRIE |
|---------------------|----------|-------------|------------|-------------------|
| Brasília (DF)       | 01547004 | 15°47'24"S  | 47°55'22"W | 1998-2008         |
| Cruz Alta (RS)      | 02853005 | 28°37'28"S  | 53°36'42"W | 1939-1998         |
| Florianópolis (SC)  | 02748006 | 27°36'02"S  | 48°37'12"W | 1949-1998         |
| Belo Horizonte (MG) | 01943022 | 19°56'42"S  | 43°54'45"W | 1941-2009         |
| Teresina (PI)       | 00542012 | 05°05'16"S  | 42°47'57"W | 1914-2009         |
| Belém (PA)          | 00148002 | 01°26'06"S  | 48°26'16"W | 1949-1998         |

As séries de dados foram verificadas e os anos com falhas foram excluídos da seleção das chuvas máximas diárias anuais empregadas no ajuste de Gumbel realizado para determinação das precipitações correspondentes aos tempos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

A seguir, as precipitações diárias estimadas através do ajuste, para os tempos de retorno indicados, foram desagregadas para durações menores (5 min, 1h, 6h, 12h e 24h) com o emprego dos coeficientes de desagregação. A estes valores desagregados foram ajustados os valores dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  da equação IDF, com o emprego de regressão linear múltipla, seguindo o procedimento de linearização da equação IDF com o uso de logaritmos, explicado anteriormente no item 4.5.

#### **4.6.2 Avaliação do impacto das diferenças de precipitação na vazão**

Como mencionado, as comparações até aqui entre as precipitações máximas do TRMM e as estimadas por IDF estabelecidas por Pfafstetter e outros foram realizadas em termos gráficos. Em alguns casos, no entanto, as diferenças podem ser demasiadamente sutis para serem percebidas desta forma, razão pela qual uma expressão numérica das diferenças se faz necessária.

Para tanto, foram propostos dois indicadores de qualidade das relações IDF geradas: indicador de diferenças em termos de volume  $indV$  e indicador de diferenças em termos de vazão máxima  $indQ$ , os quais são detalhados no item 4.6.3 na sequência deste capítulo.

No entanto, para a concepção dos indicadores, foram idealizadas duas bacias urbanas hipotéticas, cada uma procurando representar uma escala da drenagem urbana:

- *Cenário de bacia 1* (escala de microdrenagem): área de drenagem de  $1 \text{ km}^2$ , comprimento do rio principal de 700 m e desnível de 1 m, o que corresponde a um tempo de concentração calculado por Kirpich de 37 minutos. O coeficiente CN é de 85 e o tempo de retorno representativo para esta bacia é de 5 anos.
- *Cenário de bacia 2* (escala de macrodrenagem): área de drenagem de  $10 \text{ km}^2$ , comprimento do rio principal de 5 km e desnível de 5m, o que corresponde a um tempo de concentração calculado por Kirpich de 198 minutos. O coeficiente CN é de 85 e o tempo de retorno representativo para esta bacia é de 10 anos.

Estes parâmetros procuram representar de forma média a realidade de bacias urbanas brasileiras, bem como os tempos de retorno usualmente adotados em projetos de micro e macrodrenagem (DAEE/CETESB, 1980; PORTO ALEGRE, 2005; BAPTISTA *et al.*, 2005).

Em cada localidade, as bacias hipotéticas foram simuladas no ambiente IPHS1 (TUCCI *et al.*, 1989). O IPHS1 para *Windows* consiste em um sistema computacional modulado que permite que o usuário determine o hidrograma de projeto através da escolha da combinação de alguns algoritmos existentes na literatura, compondo, desta maneira, seu próprio modelo (VILLANUEVA *et al.*, 2005).

Neste trabalho, as simulações realizadas utilizaram o método de relações funcionais ou da curva número (SCS, 1986; DAVIS e McCUEN, 2005) para a separação do escoamento e determinação da precipitação efetiva, e o escoamento superficial resultante foi representado pelo modelo do hidrograma unitário triangular do SCS (SCS, 1957 *apud* TUCCI, 1993).

As simulações foram realizadas considerando três cenários de precipitações de projeto:

- Precipitação de Pfafstetter -  $P_{pfaf}$ . A vazão máxima gerada neste cenário é denominada  $Q_{pfaf}$  e o volume escoado é denominado  $V_{pfaf}$ ;
- Precipitação do TRMM -  $P_{TRMM}$ . A vazão máxima é denominada  $Q_{TRMM}$  e o volume escoado é denominado  $V_{TRMM}$ ;
- Precipitação máxima obtida de uma série de máximas diárias de um pluviômetro próximo, desagregada através dos coeficientes de desagregação do DAEE/CETESB (1980) -  $P_{plu}$ . A vazão máxima é denominada  $Q_{plu}$  e o volume escoado é denominado  $V_{plu}$ .

No caso de Brasília, a precipitação  $P_{pfaf}$  foi estimada a partir da IDF estabelecida com dados de pluviógrafo disponíveis no período entre 1998-2008. No entanto, foi mantida a mesma nomenclatura que a empregada para os demais locais, nos quais foi empregada a IDF estabelecida por Pfafstetter.

O terceiro cenário de precipitação mencionado acima corresponde a uma metodologia alternativa para determinação de chuvas de projeto, quando não existem pluviógrafos nas proximidades. De fato, este procedimento tem sido largamente usado em projetos de drenagem no país em face da existência de grande número de pluviômetros com séries longas por praticamente todo o território nacional (BERTONI e TUCCI, 1993).

A transformação chuva-vazão para um total de seis cenários (dois cenários de bacia e três cenários de precipitação) foi realizada para seis localidades escolhidas em função da

disponibilidade de séries de dados pluviométricos próximos com extensão adequada e da existência de relações IDF estabelecidas.

#### **4.6.3 Indicadores propostos para avaliação da qualidade das relações IDF**

Os indicadores propostos são dados pela diferença relativa entre os volumes escoados e vazões máximas nas metodologias alternativas (TRMM e pluviômetro desagregado), e o volume escoado e a vazão máxima no cenário da IDF clássica existente, ou seja:

$$indV_{TRMM} = \frac{(V_{TRMM} - V_{pfaff})}{V_{pfaff}} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 18})$$

onde  $indV_{TRMM}$  é denominado indicador de diferença relativa de volume escoado na simulação usando IDF do TRMM.

Similarmente, o mesmo indicador pode ser calculado usando IDF de pluviômetros desagregados:

$$indV_{plu} = \frac{(V_{plu} - V_{pfaff})}{V_{pfaff}} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 19})$$

Um indicador similar é proposto para a diferença entre a vazão máxima em cada cenário:

$$indQ_{TRMM} = \frac{(Q_{TRMM} - Q_{pfaff})}{Q_{pfaff}} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 20})$$

$$indQ_{plu} = \frac{(Q_{plu} - Q_{pfaff})}{Q_{pfaff}} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 21})$$

Quanto menor o valor do indicador em módulo, para cada bacia hipotética, melhor pode ser considerada a metodologia alternativa de geração de relações IDF. Assim, as relações IDF do TRMM, geradas neste trabalho, podem ser comparadas em termos de uma metodologia alternativa largamente usada em locais sem dados pluviográficos, permitindo sua validação.

#### **4.7 Estimativa de coeficientes de desagregação especializados**

Uma vez calculadas as precipitações máximas para diferentes durações e tempos de retorno em várias regiões do país, foi possível calcular os coeficientes de intensidade ou coeficientes de duração.

Estes coeficientes representam a porcentagem da chuva com alta intensidade que ocorre em um período relativamente curto. Por exemplo, em regiões de chuva convectiva mais intensa, estes coeficientes tendem a ser mais altos, visto que grandes volumes de chuva estão concentrados em intervalos de tempo curtos. Já em regiões subtropicais, a precipitação máxima diária é mais distribuída. Estes coeficientes são importantes para a geração de chuvas de curta duração em locais sem dados.

Um trabalho clássico que buscou realizar uma espacialização destes coeficientes no território brasileiro é o de Torrico (1974), que o dividiu em regiões geográficas homogêneas denominadas isozonas, conforme ilustrado na Figura 2.2 (item 2.3.3), nas quais as relações entre as alturas precipitadas são constantes para um determinado período de retorno. A cada isozona estão associados coeficientes de intensidade ou desagregação.

Como se pode observar com base na Figura 2.2 (item 2.3.3) e nos valores apresentados na Tabela 2.2 (item 2.3.3), os valores mais altos dos coeficientes de desagregação são observados no semiárido setentrional, na bacia Amazônica e no Pantanal Mato-grossense, visto que são regiões em que ocorrem chuvas convectivas.

Neste trabalho, foram calculadas as relações ou coeficientes entre durações das precipitações nas localidades para as quais foram determinadas as chuvas máximas a partir dos dados do TRMM. Foram calculadas as relações entre a chuva de 3 h e de 24 h e entre a chuva de 3 h e a chuva de 12 h, para os tempos de retorno de 5 e 100 anos.

A partir da espacialização dos coeficientes, foi feita uma interpolação pelo método da Krigagem (MENDES e CIRILO, 2001) sobre a área de todo o país, de forma a identificar regiões homogêneas e compará-las com o mapa clássico de isozonas de Torrico.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Avaliação das precipitações máximas obtidas a partir dos diferentes métodos

A Figura 5.1 mostra a comparação gráfica entre as precipitações máximas do TRMM e do pluviógrafo de Brasília, no período de 1998-2008. Vale salientar que o pluviógrafo de Brasília possui dados desde a década de 1960, porém, para esta análise foram considerados apenas os máximos anuais de 1998 em diante, para consistência com os dados do TRMM.

Para cada tempo de retorno, existem 5 pontos no gráfico, indicando as durações de 3, 6, 9, 12 e 24h. A reta apresentada no gráfico caracteriza diferenças nulas entre ambas as estimativas. Pontos situados abaixo desta reta indicam que o TRMM subestima a precipitação máxima, e vice-versa.

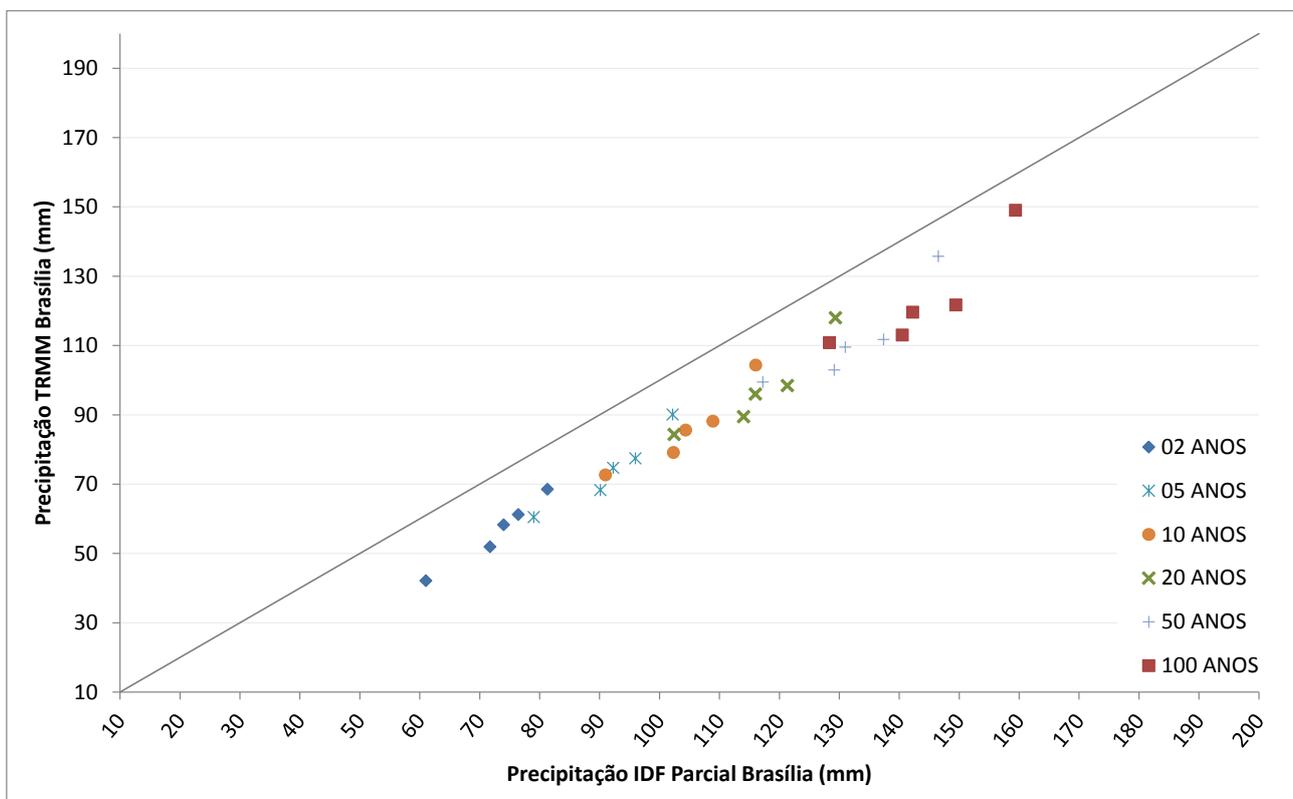


Figura 5.1. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF parcial de Brasília e as determinadas pelo TRMM, período de 1998 a 2008.

Os valores correspondentes ao gráfico da Figura 5.1 são mostrados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1. Precipitações estimadas pela IDF parcial de Brasília e as determinadas pelo TRMM, período de 1998 a 2008.**

| <b>IDF PARCIAL - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                           | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                                    | 61        | 72        | 74        | 76         | 81         |
| <b>5</b>                                    | 79        | 90        | 92        | 96         | 102        |
| <b>10</b>                                   | 91        | 102       | 104       | 109        | 116        |
| <b>20</b>                                   | 102       | 114       | 116       | 121        | 129        |
| <b>50</b>                                   | 117       | 129       | 131       | 137        | 147        |
| <b>100</b>                                  | 128       | 141       | 142       | 149        | 159        |

| <b>TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                    | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                             | 42        | 52        | 58        | 61         | 68         |
| <b>5</b>                             | 60        | 68        | 75        | 77         | 90         |
| <b>10</b>                            | 73        | 79        | 86        | 88         | 104        |
| <b>20</b>                            | 84        | 89        | 96        | 98         | 118        |
| <b>50</b>                            | 99        | 103       | 109       | 112        | 136        |
| <b>100</b>                           | 111       | 113       | 120       | 122        | 149        |

O gráfico da Figura 5.1 e os valores da Tabela 5.1 indicam que, pelo menos no caso de Brasília, o TRMM subestima as precipitações máximas, para todos os tempos de retorno e durações.

Na Figura 5.2 a seguir, o gráfico representa a comparação das precipitações da IDF de Brasília com as precipitações obtidas da IDF estabelecida com emprego da desagregação de dados de pluviômetro através de coeficientes de desagregação estabelecido pela CETESB (1980), para o mesmo período de 1998 a 2008, mostradas na Tabela 5.2. Os resultados apontam para estimativas bastante próximas, com tendência de subestimativa do pluviômetro desagregado em relação aos dados de pluviógrafo para as durações menores, em geral.

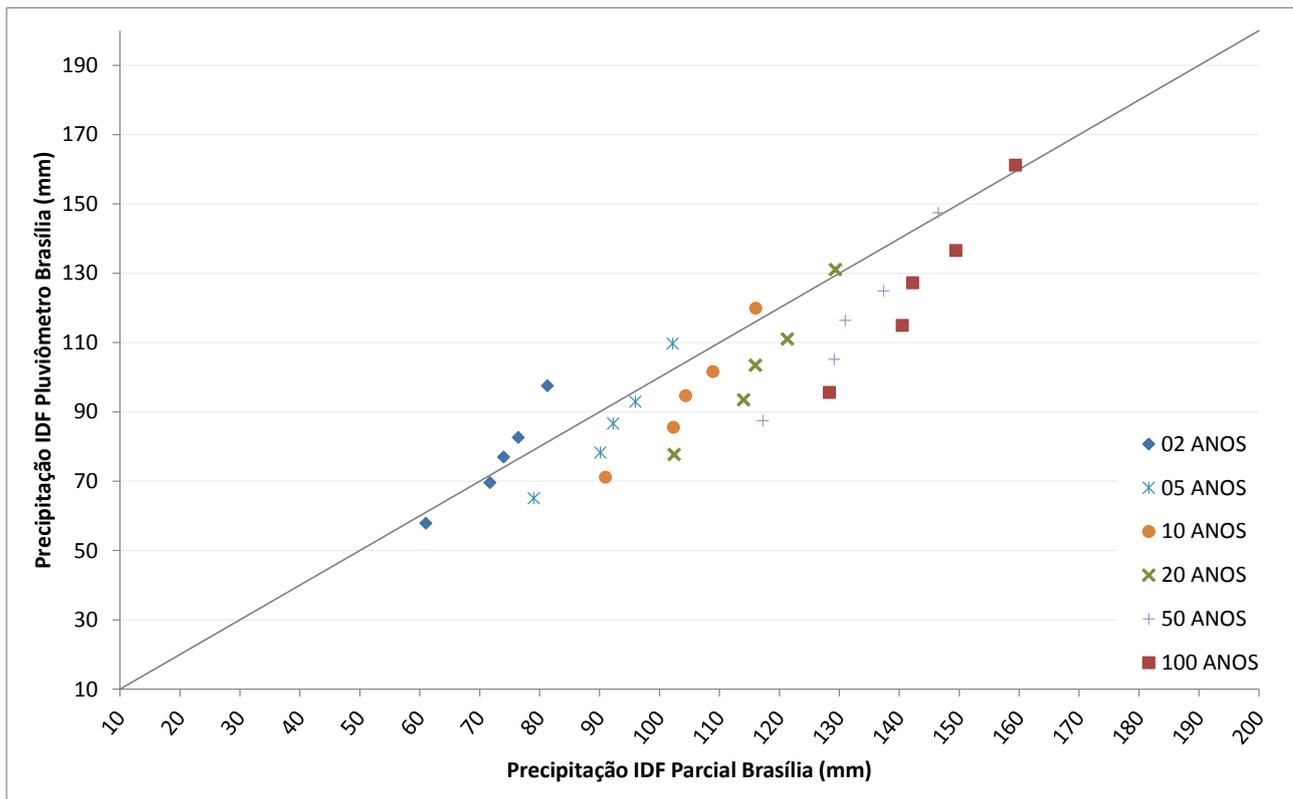


Figura 5.2. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de pluviômetro desagregado de Brasília e as determinadas pela IDF de Brasília com dados de pluviógrafo, período de 1998 a 2008.

Tabela 5.2. Precipitações estimadas pela IDF parcial de Brasília e as determinadas IDF de pluviômetro desagregado, período de 1998 a 2008.

| IDF PARCIAL PLUVIÓGRAFO - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                                       | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2  | 61  | 72  | 74  | 76  | 81  |
| 5  | 79  | 90  | 92  | 96  | 102 |
| 10   | 91  | 102 | 104 | 109 | 116 |
| 20   | 102 | 114 | 116 | 121 | 129 |
| 50   | 117 | 129 | 131 | 137 | 147 |
| 100  | 128 | 141 | 142 | 149 | 159 |

| IDF PLUVIÔMETRO DESAGREGADO - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |    |    |    |     |     |
|--|----|----|----|-----|-----|
| TR\duração   | 3h | 6h | 9h | 12h | 24h |
| 2  | 58 | 70 | 77 | 83  | 97  |
| 5  | 65 | 78 | 87 | 93  | 110 |
| 10   | 71 | 86 | 95 | 102 | 120 |

|            |    |     |     |     |     |
|------------|----|-----|-----|-----|-----|
| <b>20</b>  | 78 | 93  | 103 | 111 | 131 |
| <b>50</b>  | 87 | 105 | 116 | 125 | 147 |
| <b>100</b> | 96 | 115 | 127 | 137 | 161 |

Tendo em vista que não foi possível obter dados pluviográficos recentes para outras localidades brasileiras, foi feita uma análise estatística, buscando verificar se, no caso de Brasília, o período de 1998 em diante pode ser representativo da pluviografia local. Para tanto, foram realizados testes t de Student e para a média e f de Fischer para a variância.

Foi feita uma análise comparando os dados do pluviógrafo de Brasília em dois períodos: o primeiro anterior à entrada em operação do TRMM (1962-1997) e o segundo coincidente com a operação do satélite (1998-2008). O objetivo desta comparação foi verificar se existe alguma tendência de aumento ou diminuição nas precipitações máximas em Brasília, o que poderia explicar diferenças do TRMM nesta e em outras localidades. A Tabela 5.3 mostra o resultado do teste, em que a hipótese nula é de que as médias e variâncias dos dois períodos provêm do mesmo universo.

**Tabela 5.3. Resultado do teste de hipótese para médias e variâncias, considerando os dois períodos do pluviógrafo (1962-1997 e 1998-2008)**

|              | MÉDIA DAS MÁXIMAS<br>(MM) |           | RESULTADO DO TESTE |             |
|--------------|---------------------------|-----------|--------------------|-------------|
|              | 1962-1997                 | 1998-2008 | Média              | Variância   |
| <b>10min</b> | 17                        | 21        | não rejeita        | não rejeita |
| <b>1h</b>    | 45                        | 49        | não rejeita        | não rejeita |
| <b>3h</b>    | 55                        | 69        | não rejeita        | não rejeita |
| <b>6h</b>    | 59                        | 75        | Rejeita            | não rejeita |
| <b>12h</b>   | 63                        | 80        | Rejeita            | não rejeita |

Como se observa, o período mais recente apresenta precipitações máximas médias maiores para todas as durações. No entanto, apenas para durações maiores a diferença pode ser considerada significativa, uma vez que a hipótese nula foi rejeitada a 5% para as durações de 6 e 12h.

Assim, embora o TRMM subestime as precipitações máximas de forma geral, a Tabela 5.1 mostra que os eventos na última década foram mais intensos, visto que neste período, para todas as durações, as precipitações médias foram superiores às médias do período anterior.

Os resultados mostrados sugerem que, no caso de Brasília, as diferenças observadas entre o TRMM e o pluviógrafo decorrem das limitações de cada estimativa, em especial das incertezas relacionadas à estimativa de precipitação por satélite, e não de possíveis não-estacionariedades na precipitação máxima. Adicionalmente, foi feita uma análise estatística, buscando verificar se as precipitações máximas anuais do TRMM e do pluviógrafo provêm de distribuições com médias e variâncias iguais. Foram realizados testes t de Student para a média e f de Fischer para a variância (TUCCI, 2002), comparando as máximas anuais com durações de 3, 6, 12 e 24h. A Tabela 5.4 e a Tabela 5.5 mostram as precipitações máximas anuais sobre Brasília, provenientes dos dados do pluviógrafo e do TRMM, respectivamente.

**Tabela 5.4. Precipitações máximas anuais do pluviógrafo de Brasília (em mm) para as durações de 3, 6, 12 e 24h.**

| ANO  | DURAÇÃO |    |     |     |
|------|---------|----|-----|-----|
|      | 3h      | 6h | 12h | 24h |
| 1962 | 29      | 33 | 39  | 43  |
| 1963 | 45      | 56 | 58  | 58  |
| 1964 | 55      | 63 | 72  | 72  |
| 1967 | 23      | 24 | 26  | 44  |
| 1968 | 64      | 65 | 65  | 68  |
| 1969 | 63      | 64 | 69  | 85  |
| 1970 | 76      | 82 | 85  | 85  |
| 1971 | 76      | 86 | 90  | 91  |
| 1972 | 76      | 76 | 76  | 81  |
| 1974 | 79      | 79 | 79  | 79  |
| 1975 | 42      | 48 | 50  | 63  |
| 1976 | 89      | 92 | 93  | 93  |
| 1977 | 43      | 47 | 59  | 59  |
| 1978 | 47      | 48 | 72  | 75  |
| 1979 | 78      | 78 | 78  | 78  |

| ANO              | DURAÇÃO |     |     |     |
|------------------|---------|-----|-----|-----|
|                  | 3h      | 6h  | 12h | 24h |
| 1981             | 52      | 53  | 60  | 62  |
| 1982             | 44      | 51  | 52  | 58  |
| 1984             | 37      | 37  | 41  | 58  |
| 1985             | 57      | 58  | 58  | 64  |
| 1986             | 31      | 36  | 39  | 39  |
| 1987             | 63      | 64  | 65  | 83  |
| 1997             | 51      | 54  | 56  | 56  |
| 1998             | 62      | 69  | 69  | 69  |
| 1999             | 54      | 64  | 66  | 66  |
| 2000             | 111     | 113 | 114 | 114 |
| 2001             | 50      | 66  | 95  | 96  |
| 2002             | 91      | 92  | 92  | 111 |
| 2003             | 71      | 75  | 75  | 87  |
| 2004             | 86      | 99  | 109 | 109 |
| 2005             | 55      | 59  | 63  | 64  |
| 2006             | 83      | 84  | 85  | 104 |
| 2007             | 37      | 37  | 37  | 42  |
| 2008             | 63      | 69  | 76  | 76  |
| <b>Média</b>     | 60      | 64  | 69  | 74  |
| <b>Variância</b> | 406     | 415 | 422 | 402 |

Tabela 5.5. Precipitações máximas anuais do TRMM sobre Brasília (em mm) para as durações de 3, 6, 12 e 24h.

| ANO  | DURAÇÃO |    |     |     |
|------|---------|----|-----|-----|
|      | 3h      | 6h | 12h | 24h |
| 1998 | 51      | 54 | 72  | 72  |
| 1999 | 47      | 65 | 79  | 91  |
| 2000 | 33      | 51 | 55  | 55  |
| 2001 | 37      | 40 | 45  | 51  |
| 2002 | 29      | 38 | 40  | 46  |
| 2003 | 32      | 46 | 54  | 58  |

| ANO              | DURAÇÃO |     |     |     |
|------------------|---------|-----|-----|-----|
|                  | 3h      | 6h  | 12h | 24h |
| 2004             | 107     | 107 | 107 | 126 |
| 2005             | 38      | 61  | 80  | 106 |
| 2006             | 41      | 52  | 68  | 79  |
| 2007             | 50      | 52  | 57  | 58  |
| 2008             | 34      | 38  | 58  | 72  |
| 2009             | 48      | 55  | 56  | 56  |
| <b>Média</b>     | 46      | 55  | 64  | 73  |
| <b>Variância</b> | 433     | 342 | 335 | 595 |

Às séries de precipitações máximas foi aplicado o teste de hipótese. A hipótese nula é de que as máximas do pluviógrafo e do TRMM têm a mesma média e variância, a um nível de significância de 5%. A Tabela 5.6 mostra os resultados.

**Tabela 5.6. Resultado do teste de hipótese para médias e variâncias, considerando todo o período de dados do pluviógrafo.**

| DURAÇÃO | MÉDIA       | VARIÂNCIA   |
|---------|-------------|-------------|
| 3h      | rejeita     | não rejeita |
| 6h      | não rejeita | não rejeita |
| 12h     | não rejeita | não rejeita |
| 24h     | não rejeita | não rejeita |

Como se vê, as médias das máximas com duração de 3h não podem ser consideradas como provenientes do mesmo universo, por terem médias significativamente diferentes. Para as demais durações, a hipótese nula não pôde ser rejeitada. No teste de variâncias, a hipótese nula não pôde ser rejeitada para nenhuma das durações.

A mesma análise foi realizada considerando apenas o período coincidente de medições, de forma a identificar se as diferenças podem ser relacionadas à variabilidade nas chuvas intensas em anos recentes. A Tabela 5.7 mostra o resultado deste teste.

**Tabela 5.7. Resultado do teste de hipótese para médias e variâncias, considerando o período coincidente (1998-2008).**

| <b>DURAÇÃO</b> | <b>MÉDIA</b> | <b>VARIÂNCIA</b> |
|----------------|--------------|------------------|
| <b>3h</b>      | rejeita      | não rejeita      |
| <b>6h</b>      | rejeita      | não rejeita      |
| <b>12h</b>     | não rejeita  | não rejeita      |
| <b>24h</b>     | não rejeita  | não rejeita      |

Nota-se que permaneceu a diferença significativa entre as precipitações máximas com durações mais baixas. Inclusive, observou-se diferença significativa nas médias das precipitações máximas com 6h de duração. Estes resultados mostram que as diferenças observadas entre a IDF do TRMM e a IDF existente de pluviógrafo não podem ser atribuídas ao período de medição no caso de Brasília. Provavelmente, estas diferenças estão mais relacionadas à própria incerteza da estimativa de precipitação por satélite.

Vale ressaltar que foi realizado um teste de aderência (teste de normalidade de Lilliefors, CONOVER, 1980) para determinar se as séries de máximas seguem uma distribuição normal, o que é um requisito para a aplicação dos testes paramétricos de média e variância. A um nível de significância de 5%, a hipótese nula, de que as médias do pluviógrafo seguem a normal, não pôde ser rejeitada, porém o mesmo teste rejeitou a hipótese nula para as máximas do TRMM. A mesma tentativa foi feita sobre os logaritmos das precipitações máximas, no intuito de normalizar as séries, porém o teste de normalidade permaneceu sendo rejeitado. Isto mostra que esta análise estatística ainda tem caráter muito preliminar, devido à extensão da série do TRMM ainda não ser satisfatória.

De forma geral, a análise realizada para apenas um local é pouco conclusiva, em especial porque no caso de Brasília as diferenças entre as relações IDF não foram tão marcantes, como ocorre na comparação em outras localidades, conforme será apresentado no item 5.2.

Cabe ressaltar que não foi possível repetir esta análise para os demais locais considerados neste trabalho, uma vez que não se teve acesso às séries pluviográficas que deram origem às relações IDF clássicas utilizadas para comparação.

## 5.2 Comparação entre as precipitações obtidas das relações IDF

Como visto, na maior parte das localidades, não foi possível fazer comparações diretas entre precipitações de períodos coincidentes. Sendo assim, o presente item apresenta uma comparação direta entre os valores de altura das precipitações (em mm) extraídas da relação IDF existente e os valores estimados a partir das relações IDF ajustadas com dados de precipitação medida pelo satélite TRMM, para dezenove locais dotados de relações IDF, situados em dezessete municípios distintos.

A despeito desta limitação, entende-se que a relação IDF corresponde a uma síntese estatística da pluviografia de um local, e, como tal, tem validade independentemente do período de monitoramento, desde que as séries utilizadas para sua determinação sejam suficientemente extensas e possuam estacionariedade.

A comparação para as cidades localizadas na região sul do Brasil, a saber, Porto Alegre (RS), Curitiba (PR), Florianópolis (SC) e Cruz Alta (RS) aponta para tendência à superestimativa das precipitações estimadas pelo TRMM quando comparadas às estimadas com base nas relações IDF existentes para os referidos locais, embora menos acentuada nos casos dos dois últimos municípios, conforme detalham os parágrafos a seguir.

Na Figura 5.3, é possível observar a comparação entre as precipitações estimadas pelo TRMM, no retângulo envolvente (*pixel* de resolução dos dados do satélite) definido pelas coordenadas 30,0° e 30,25° S, 51,25° e 51,0° W, e aquelas chuvas geradas a partir da relação IDF estabelecida para Porto Alegre (FRAGOSO JR., 2004). Os valores são mostrados na Tabela 5.8.

Nota-se clara superestimativa dos valores de precipitação do TRMM em comparação aos determinados pela IDF existente para a cidade de Porto Alegre, conforme indica a localização de todos os pontos acima da reta que caracteriza diferenças nulas entre ambas as estimativas. Em termos percentuais médios, a superestimativa foi de 57%.

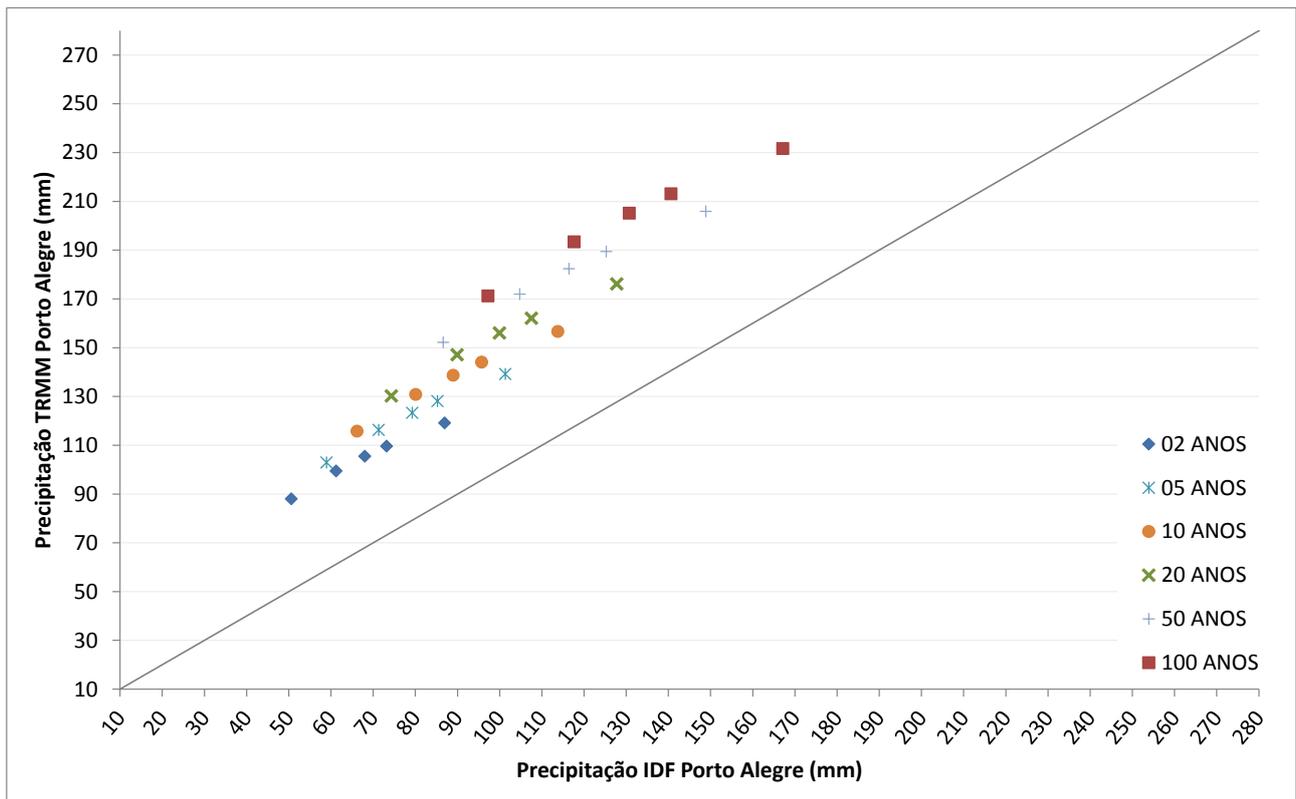


Figura 5.3. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Porto Alegre (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.8. Precipitações estimadas pela IDF de Porto Alegre (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF PORTO ALEGRE - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |    |     |     |     |     |
|---|----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                                | 3h | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2   | 51 | 61  | 68  | 73  | 87  |
| 5   | 59 | 71  | 79  | 85  | 101 |
| 10  | 66 | 80  | 89  | 96  | 114 |
| 20  | 74 | 90  | 100 | 108 | 128 |
| 50  | 87 | 105 | 116 | 125 | 149 |
| 100                                       | 97 | 118 | 131 | 141 | 167 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 88  | 99  | 105 | 110 | 119 |
| 5                             | 103 | 116 | 123 | 128 | 139 |
| 10                            | 116 | 131 | 139 | 144 | 157 |
| 20                            | 130 | 147 | 156 | 162 | 176 |

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 50  | 152 | 172 | 182 | 189 | 206 |
| 100 | 171 | 193 | 205 | 213 | 232 |

A Figura 5.4 apresenta a comparação entre as lâminas máximas precipitadas, determinadas a partir de dados registrados pelo 8º Distrito de Meteorologia – DISME (BEMFICA *et al.*, 2000), localizado na cidade de Porto Alegre, e aquelas ajustadas com dados do TRMM a partir dos valores constantes no pixel que compreende a coordenada do posto do 8º DISME. Os valores correspondentes ao gráfico são apresentados na Tabela 5.9.

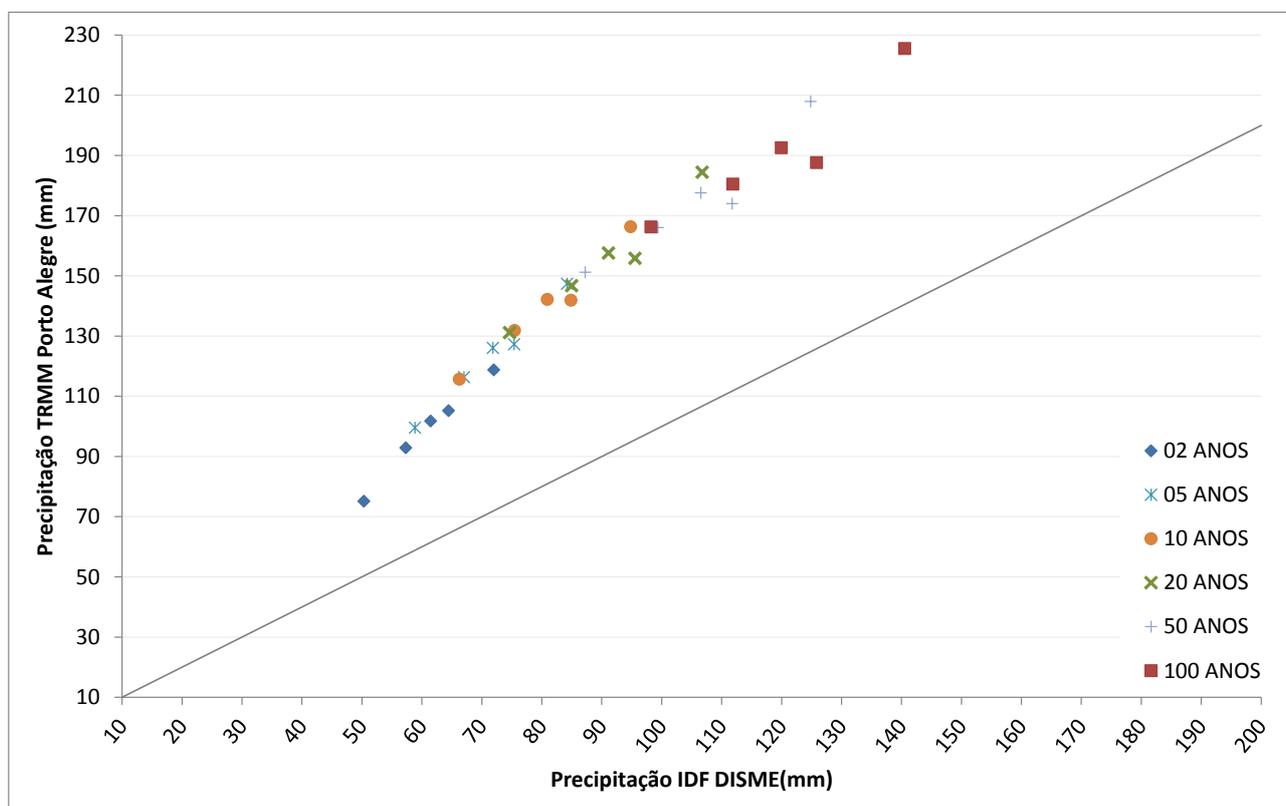


Figura 5.4. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF do 8º Distrito de Meteorologia – DISME (BEMFICA *et al.*, 2000) e as ajustadas com dados do TRMM, em Porto Alegre - RS.

**Tabela 5.9. Precipitações estimadas pela IDF de Porto Alegre (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.**

| <b>IDF PORTO ALEGRE 8º DISME- LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>  | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>   | 50        | 57        | 61        | 64         | 72         |
| <b>5</b>   | 59        | 67        | 72        | 75         | 84         |
| <b>10</b>  | 66        | 75        | 81        | 85         | 95         |
| <b>20</b>  | 75        | 85        | 91        | 96         | 107        |
| <b>50</b>  | 87        | 99        | 107       | 112        | 125        |
| <b>100</b>   | 98        | 112       | 120       | 126        | 141        |

| <b>TRMM SOBRE 8º DISME - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                                   | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>  | 75        | 93        | 102       | 105        | 119        |
| <b>5</b>  | 100       | 116       | 126       | 127        | 147        |
| <b>10</b>   | 116       | 132       | 142       | 142        | 166        |
| <b>20</b>   | 131       | 147       | 158       | 156        | 184        |
| <b>50</b>   | 151       | 166       | 178       | 174        | 208        |
| <b>100</b>  | 166       | 180       | 193       | 188        | 226        |

A exemplo do ocorrido na análise realizada com a IDF de Porto Alegre (FRAGOSO JR., 2004) percebe-se que, para todos os tempos de retorno considerados, houve superestimação das precipitações estimadas com dados do satélite TRMM em comparação com aquelas determinadas pela relação IDF do 8º DISME, indicada pelo afastamento dos pontos plotados em relação à reta inclinada, para a parte superior do gráfico da Figura 5.4. Neste caso, em média, os valores foram superestimados em 67%.

Comportamento similar é apresentado na Figura 5.5, a qual ilustra as precipitações obtidas pela IDF do Aeroporto (BEMFICA *et al.*, 2000), também em Porto Alegre, e as ajustadas com dados do TRMM no retângulo envolvente compreendido entre as coordenadas 29,75° e 30,0° S, 51,25° e 51,0° W. Os valores do gráfico encontram-se na Tabela 5.10.

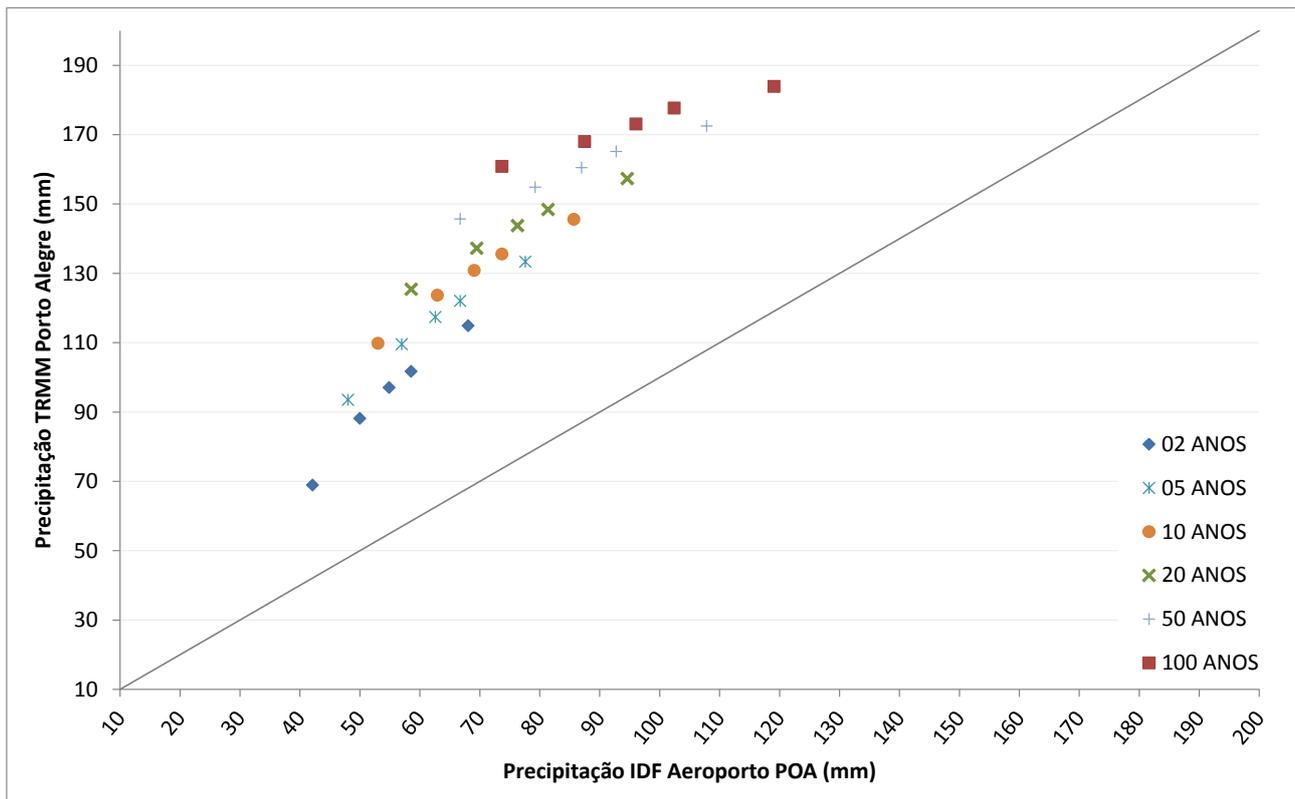


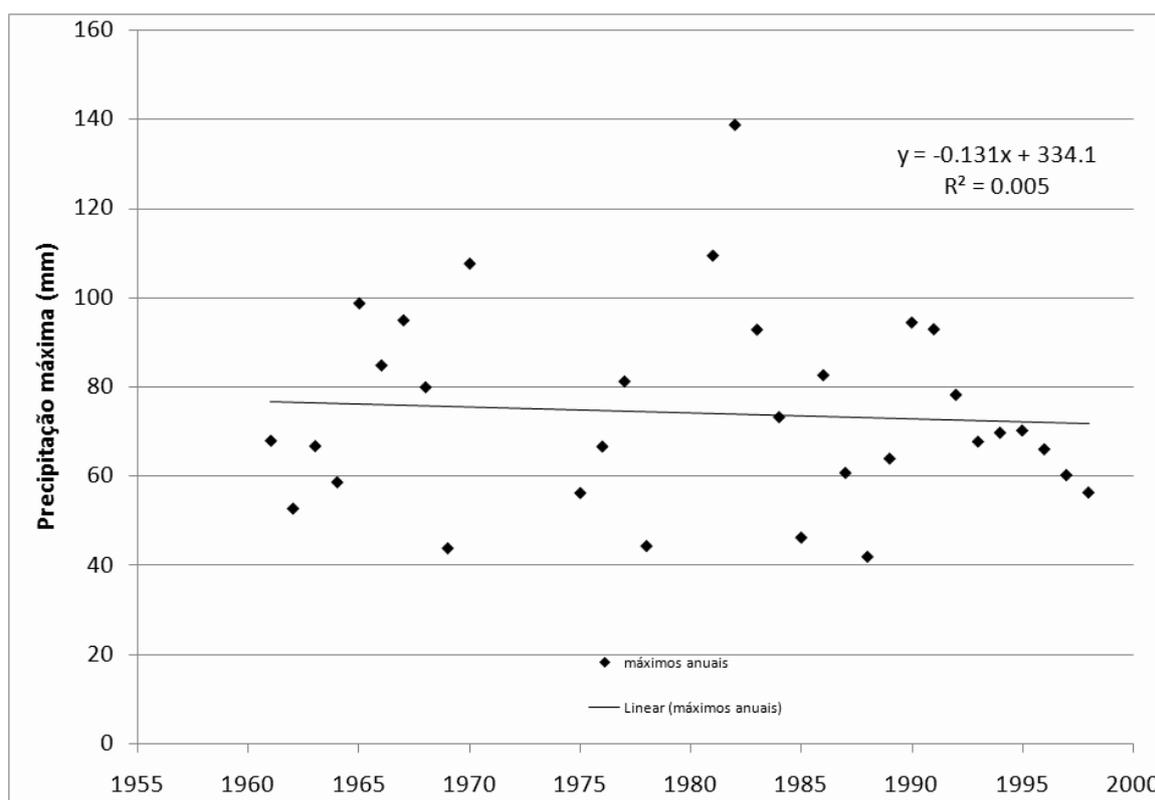
Figura 5.5. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF do Aeroporto (BEMFICA *et al.*, 2000) e as ajustadas com dados do TRMM, em Porto Alegre - RS.

Tabela 5.10. Precipitações estimadas pela IDF do Aeroporto (BEMFICA *et al.*, 2000) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF PORTO ALEGRE AEROPORTO - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração  | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2   | 42  | 50  | 55  | 59  | 68  |
| 5   | 48  | 57  | 63  | 67  | 78  |
| 10  | 53  | 63  | 69  | 74  | 86  |
| 20  | 59  | 69  | 76  | 81  | 95  |
| 50  | 67  | 79  | 87  | 93  | 108 |
| 100   | 74  | 87  | 96  | 102 | 119 |
| TRMM SOBRE AEROPORTO - LÂMINA PRECIPITADA(mm)       |     |     |     |     |     |
| TR\duração  | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2   | 69  | 88  | 97  | 102 | 115 |
| 5   | 94  | 110 | 117 | 122 | 133 |
| 10  | 110 | 124 | 131 | 136 | 146 |

|            |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>20</b>  | 125 | 137 | 144 | 148 | 157 |
| <b>50</b>  | 146 | 155 | 161 | 165 | 172 |
| <b>100</b> | 161 | 168 | 173 | 178 | 184 |

Como se vê, em todas as IDF existentes em Porto Alegre o TRMM superestimou muito as precipitações máximas. Foi feita uma tentativa de investigar se, no caso desta localidade, existe alguma não-estacionariedade que faça com que as precipitações em anos recentes sejam significativamente maiores. Para tanto, foram obtidos os dados de totais pluviométricos diários da estação 3051011 do INMET de 1961 a 1998, a partir do sítio *Hidroweb* da ANA, conforme mostrado na Figura 5.6.



**Figura 5.6. Precipitações máximas diárias em Porto Alegre e ajuste linear.**

Infelizmente, a série de dados se encerra no ano de 1998, de forma que a análise fica bastante prejudicada. No entanto, não foram encontrados dados pluviométricos mais recentes no município de Porto Alegre.

Como se vê, a plotagem das máximas diárias de Porto Alegre apresentou uma tendência à diminuição, expressa no coeficiente angular negativo da reta ajustada.

Foi feito um teste de Student para verificar a significância da declividade da reta ajustada, de forma a observar se a tendência é significativa. A um nível de significância de 5%, a hipótese nula, de que a declividade é igual a zero, não pôde ser rejeitada, mostrando que provavelmente não há tendência significativa.

O simples fato de a declividade da reta ajustada ser negativa, por si só, já sugere que as diferenças mostradas nos gráficos anteriores não se devam a não-estacionariedade, uma vez que o TRMM apresentou uma superestimativa, contrária à tendência encontrada. Deste ponto de vista, nem seria necessária a realização de teste de hipótese para tendência.

Possivelmente as diferenças encontradas estejam mais relacionadas com a incerteza associada à estimativa de precipitação por satélite, que é mais pronunciada em regiões de maior latitude como Porto Alegre, conforme sinalizado por Collischonn (2006).

Semelhantemente superestimadas estão as precipitações determinadas com dados do TRMM, no retângulo envolvente compreendido entre as coordenadas 25,25° e 25,50° S, 49,50° e 49,25° W, em relação às obtidas da IDF de Curitiba (BERTONI e TUCCI, 1993), conforme pode ser visto na Figura 5.7 e na Tabela 5.11.

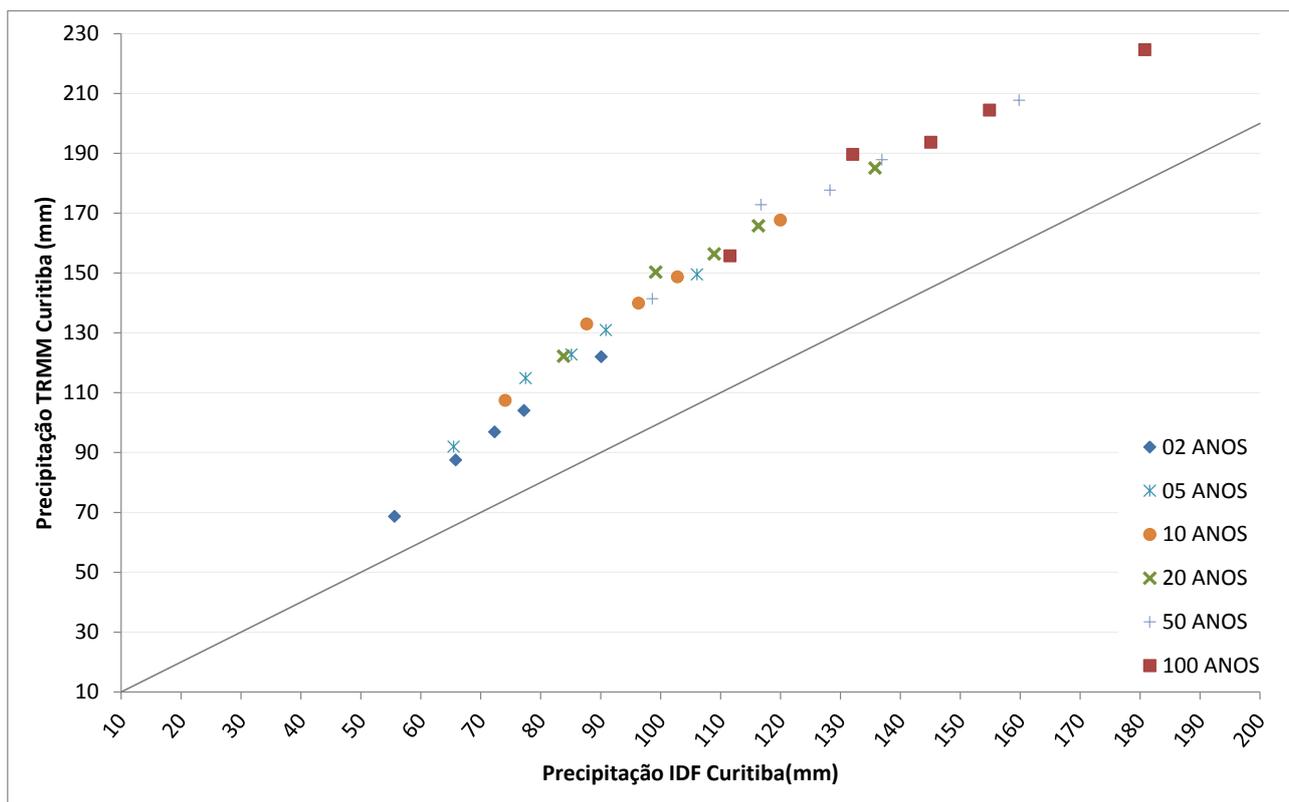


Figura 5.7. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Curitiba (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.11. Precipitações estimadas pela IDF de Curitiba (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF CURITIBA - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                            | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                     | 56  | 66  | 72  | 77  | 90  |
| 5                                     | 65  | 77  | 85  | 91  | 106 |
| 10                                    | 74  | 88  | 96  | 103 | 120 |
| 20                                    | 84  | 99  | 109 | 116 | 136 |
| 50                                    | 99  | 117 | 128 | 137 | 160 |
| 100                                   | 112 | 132 | 145 | 155 | 181 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 69  | 87  | 97  | 104 | 122 |
| 5                             | 92  | 115 | 123 | 131 | 149 |
| 10                            | 107 | 133 | 140 | 149 | 168 |
| 20                            | 122 | 150 | 156 | 166 | 185 |

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 50  | 141 | 173 | 178 | 188 | 208 |
| 100 | 156 | 190 | 194 | 204 | 225 |

Também no caso de Curitiba, não há dados pluviométricos ou pluviográficos recentes disponíveis ao público que permitam uma investigação mais minuciosa em busca de explicações para as diferenças encontradas.

No caso das precipitações estimadas a partir dos dados do TRMM nas coordenadas 27,50° e 27,75° S, 48,75° e 48,50° W, onde se localiza a cidade de Florianópolis, a Figura 5.8 ilustra que estas apresentaram valores bastante aproximados (Tabela 5.12) daqueles obtidos através da IDF de Florianópolis ajustada por Fragoso Jr. (2004) com base no estudo de Pfafstetter (1957), com tendência a superestimativa do TRMM em relação às precipitações geradas pela IDF.

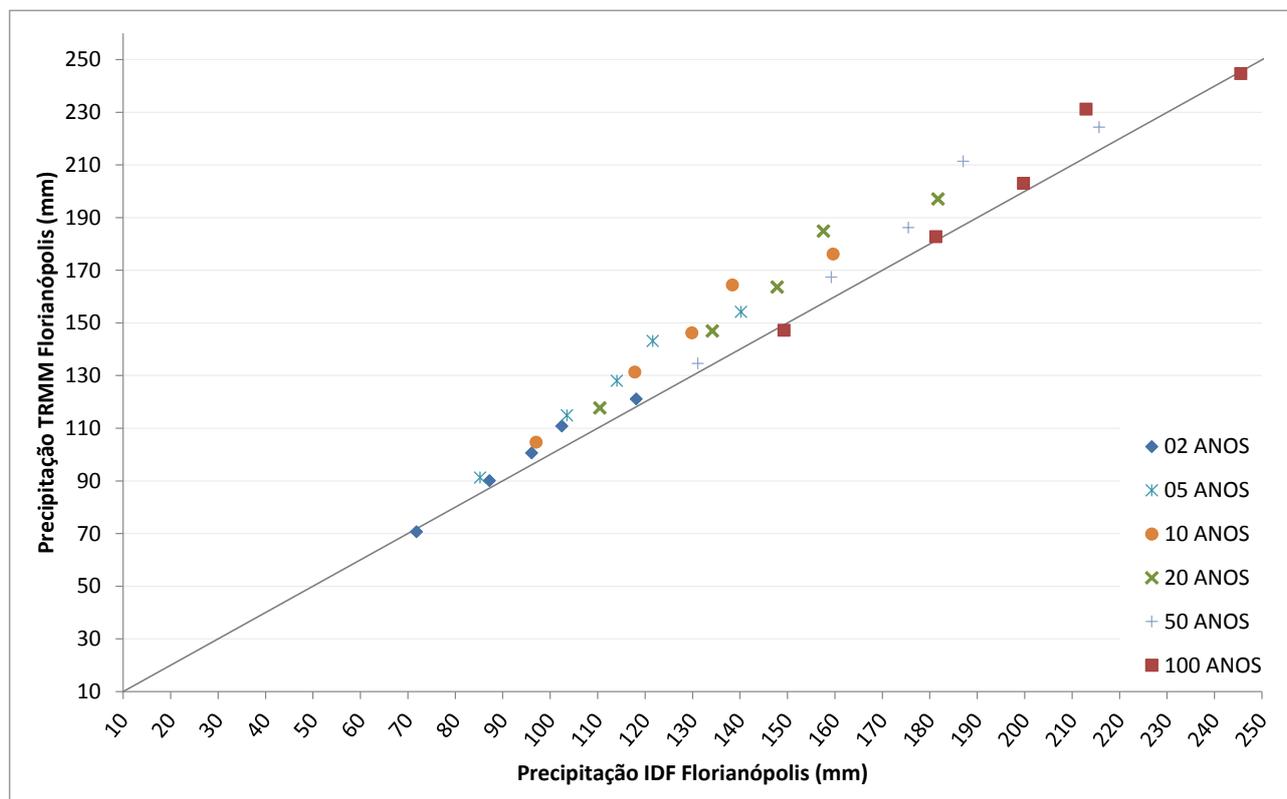


Figura 5.8. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Florianópolis (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

**Tabela 5.12. Precipitações estimadas pela IDF de Florianópolis (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.**

| <b>IDF FLORIANÓPOLIS - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                                 | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>  | 72        | 87        | 96        | 102        | 118        |
| <b>5</b>  | 85        | 104       | 114       | 122        | 140        |
| <b>10</b>   | 97        | 118       | 130       | 138        | 160        |
| <b>20</b>   | 110       | 134       | 148       | 158        | 182        |
| <b>50</b>   | 131       | 159       | 175       | 187        | 216        |
| <b>100</b>  | 149       | 181       | 200       | 213        | 246        |

| <b>TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                    | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                             | 71        | 90        | 101       | 111        | 121        |
| <b>5</b>                             | 91        | 115       | 128       | 143        | 154        |
| <b>10</b>                            | 105       | 131       | 146       | 164        | 176        |
| <b>20</b>                            | 118       | 147       | 164       | 185        | 197        |
| <b>50</b>                            | 135       | 167       | 186       | 211        | 224        |
| <b>100</b>                           | 147       | 183       | 203       | 231        | 245        |

Para melhor observação das diferenças detectadas no caso de Florianópolis, os valores das diferenças (precipitação do TRMM menos a precipitação da IDF) percentuais são apresentados na Tabela 5.13 abaixo.

**Tabela 5.13. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Florianópolis.**

| <b>TR\Duração</b> | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>2 anos</b>     | -1,6%     | 3,3%      | 4,7%      | 8,1%       | 2,5%       |
| <b>5 anos</b>     | 7,0%      | 11,0%     | 12,2%     | 17,7%      | 10,0%      |
| <b>10 anos</b>    | 7,9%      | 11,4%     | 12,6%     | 18,8%      | 10,3%      |
| <b>20 anos</b>    | 6,5%      | 9,6%      | 10,7%     | 17,3%      | 8,5%       |
| <b>50 anos</b>    | 2,7%      | 5,1%      | 6,1%      | 13,0%      | 4,0%       |
| <b>100 anos</b>   | -1,4%     | 0,8%      | 1,6%      | 8,6%       | -0,3%      |

Comportamento similar é apresentado na Figura 5.9 (e Tabela 5.14), que ilustra a comparação entre as precipitações estimadas a partir de dados do TRMM obtidos para as coordenadas 28,50° e 28,75° S, 53,75° e 53,50° W, onde está localizada a cidade de Cruz Alta, e as precipitações geradas a partir da IDF de Cruz Alta ajustada por Frago Jr. (2004) com base nos estudos de Pfafstetter (1957).

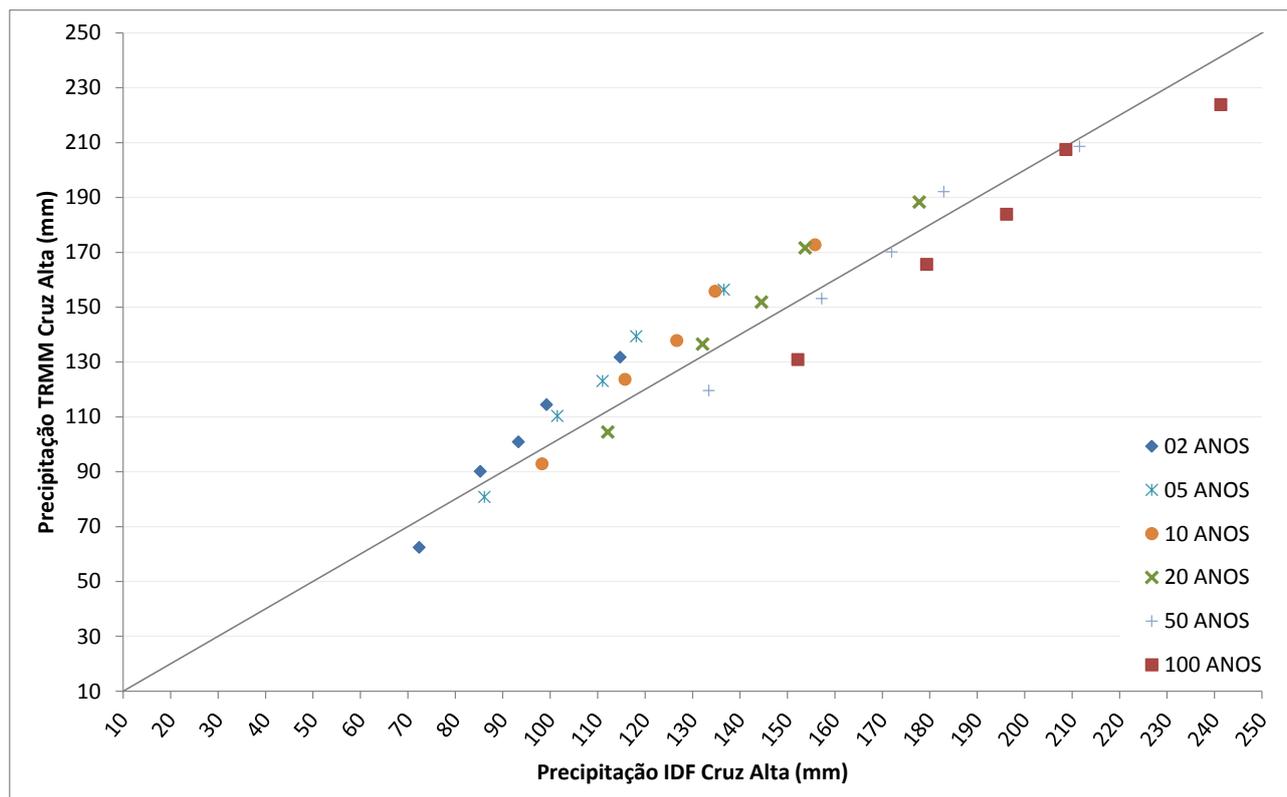


Figura 5.9. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Cruz Alta (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.14. Precipitações estimadas pela IDF de Cruz Alta (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF CRUZ ALTA - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                             | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                      | 72  | 85  | 93  | 99  | 115 |
| 5                                      | 86  | 102 | 111 | 118 | 137 |
| 10                                     | 98  | 116 | 127 | 135 | 156 |
| 20                                     | 112 | 132 | 145 | 154 | 178 |
| 50                                     | 133 | 157 | 172 | 183 | 212 |
| 100                                    | 152 | 179 | 196 | 209 | 241 |

| <b>TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                    | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                             | 62        | 90        | 101       | 114        | 132        |
| <b>5</b>                             | 81        | 110       | 123       | 139        | 156        |
| <b>10</b>                            | 93        | 124       | 138       | 156        | 173        |
| <b>20</b>                            | 105       | 137       | 152       | 172        | 188        |
| <b>50</b>                            | 120       | 153       | 170       | 192        | 209        |
| <b>100</b>                           | 131       | 166       | 184       | 207        | 224        |

Embora as precipitações de duração igual a 3h tenham sido subestimadas pelo TRMM, assim como as precipitações de todas as durações estimadas para o tempo de retorno de 100 anos e quase todas para TR igual a 50 anos (com exceção da chuva de 12h de duração), percebe-se que os demais valores sofreram superestimativa que chegou a, no máximo, 17,9%. As diferenças percentuais de todas as precipitações consideradas podem ser vistas na Tabela 5.15.

**Tabela 5.15. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Cruz Alta.**

| <b>TR\Duração</b> | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>2 anos</b>     | -13,8%    | 5,7%      | 8,1%      | 15,3%      | 14,8%      |
| <b>5 anos</b>     | -6,3%     | 8,7%      | 10,8%     | 17,9%      | 14,5%      |
| <b>10 anos</b>    | -5,5%     | 6,8%      | 8,8%      | 15,6%      | 10,8%      |
| <b>20 anos</b>    | -6,8%     | 3,3%      | 5,1%      | 11,6%      | 6,0%       |
| <b>50 anos</b>    | -10,4%    | -2,6%     | -1,0%     | 5,0%       | -1,4%      |
| <b>100 anos</b>   | -14,0%    | -7,7%     | -6,3%     | -0,6%      | -7,3%      |

No caso das cidades situadas na região sudeste do país, não foi possível identificar uma tendência única no comportamento das precipitações estimadas pelo TRMM em comparação as equações IDF empregadas na análise, conforme pode ser observado das comparações realizadas para as cidades de São Paulo (SP), Lins (SP) e Rio de Janeiro (RJ), destacadas a seguir.

O comportamento da comparação das precipitações estimadas pelas relações IDF de São Paulo (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do satélite TRMM, obtidos para as

coordenadas 23,50° e 23,75° S, 46,75° e 46,50° W, é apresentado na Figura 5.10 e os valores na Tabela 5.16. Observa-se uma tendência de superestimação das precipitações do TRMM, semelhante ao que ocorreu nos casos de Porto Alegre e Curitiba, na região sul do Brasil.

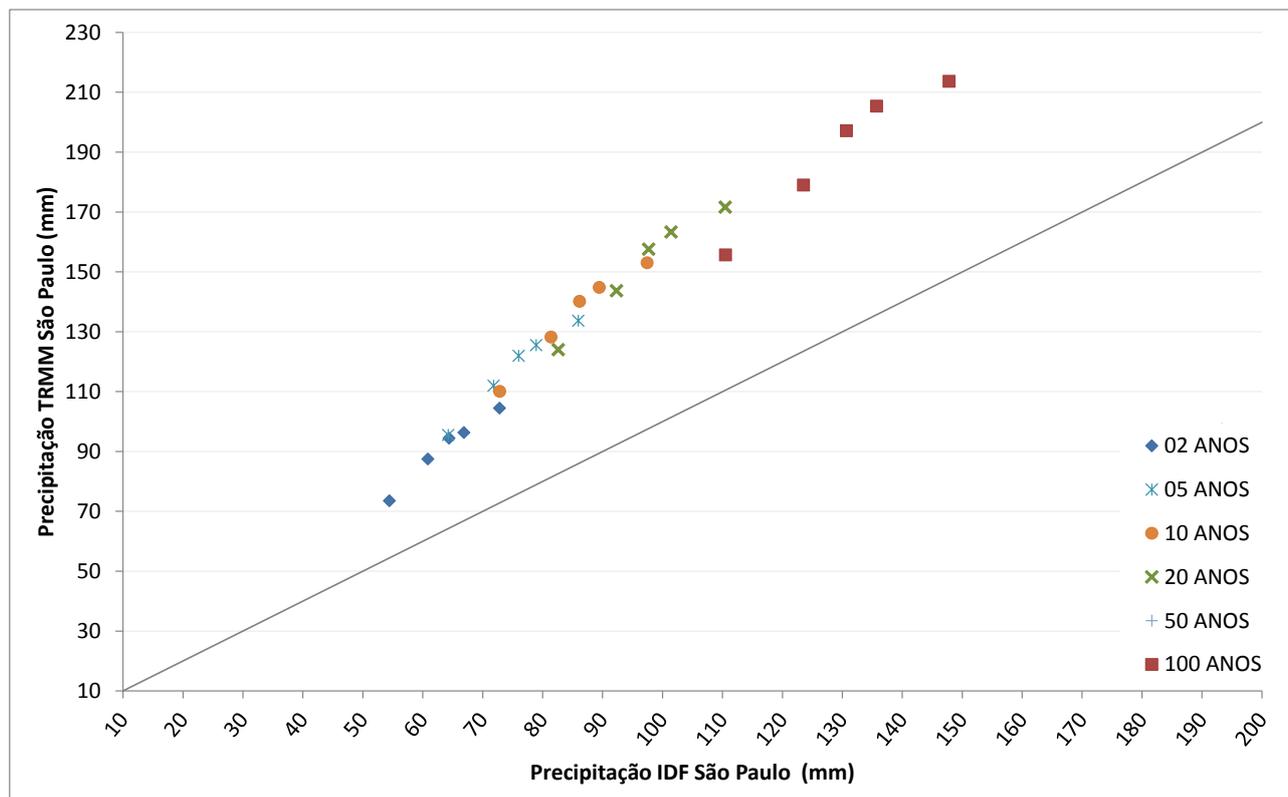


Figura 5.10. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de São Paulo (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.16. Precipitações estimadas pela IDF de São Paulo (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF SÃO PAULO - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                             | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                      | 54  | 61  | 64  | 67  | 73  |
| 5                                      | 64  | 72  | 76  | 79  | 86  |
| 10                                     | 73  | 81  | 86  | 89  | 97  |
| 20                                     | 83  | 92  | 98  | 101 | 110 |
| 50                                     | 97  | 109 | 115 | 120 | 130 |
| 100                                    | 111 | 124 | 131 | 136 | 148 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 74  | 87  | 94  | 96  | 104 |
| 5                             | 96  | 112 | 122 | 125 | 134 |
| 10                            | 110 | 128 | 140 | 145 | 153 |
| 20                            | 124 | 144 | 158 | 163 | 172 |
| 50                            | 142 | 164 | 180 | 187 | 196 |
| 100                           | 156 | 179 | 197 | 205 | 214 |

No caso das precipitações do TRMM no Rio de Janeiro, obtidas nas coordenadas 22,75° e 23,0° S, 43,25° e 43,0° W, percebe-se na Figura 5.11 tendências à subestimação em comparação com as precipitações geradas pela IDF existente (BERTONI e TUCCI, 1993). Além disso, é possível notar que as diferenças vão aumentando para chuvas de durações maiores, conforme valores mostrados na Tabela 5.17.

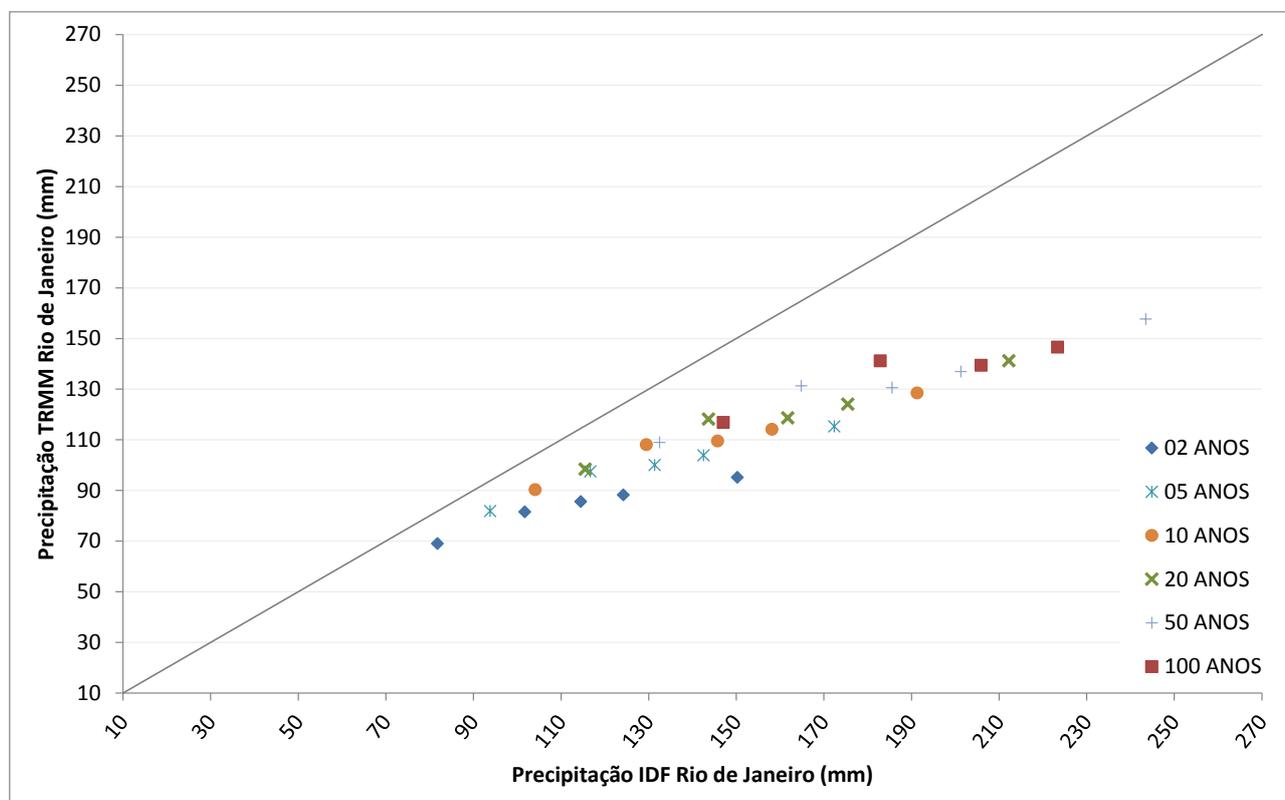


Figura 5.11. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF do Rio de Janeiro (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do TRMM.

**Tabela 5.17. Precipitações estimadas pela IDF de Rio de Janeiro (BERTONI e TUCCI, 1993) e as ajustadas com dados do TRMM.**

| <b>IDF RIO DE JANEIRO - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                                  | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>   | 82        | 102       | 115       | 124        | 150        |
| <b>5</b>   | 94        | 117       | 131       | 143        | 172        |
| <b>10</b>  | 104       | 129       | 146       | 158        | 191        |
| <b>20</b>  | 116       | 144       | 162       | 175        | 212        |
| <b>50</b>  | 133       | 165       | 186       | 201        | 244        |
| <b>100</b>   | 147       | 183       | 206       | 223        | 270        |

| <b>TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                    | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                             | 69        | 82        | 86        | 88         | 95         |
| <b>5</b>                             | 82        | 97        | 100       | 104        | 115        |
| <b>10</b>                            | 90        | 108       | 110       | 114        | 128        |
| <b>20</b>                            | 98        | 118       | 119       | 124        | 141        |
| <b>50</b>                            | 109       | 131       | 131       | 137        | 158        |
| <b>100</b>                           | 117       | 141       | 139       | 147        | 170        |

No caso da cidade de Lins, localizada no interior do estado de São Paulo, as precipitações geradas pela IDF de Lins ajustada por Fragoso Jr. (2004) com base nos estudo de Pfafstetter (1957) apresentaram um comportamento irregular, com maior superestimativa para o TR de 2 anos, que por sua vez foi decrescendo a medida que os tempos de retorno aumentavam até TR igual a 20 anos, e subestimativa crescente com os tempos de retorno para as precipitações com TR de 50 e 100 anos, conforme mostrado na Figura 5.12 e na Tabela 5.18.

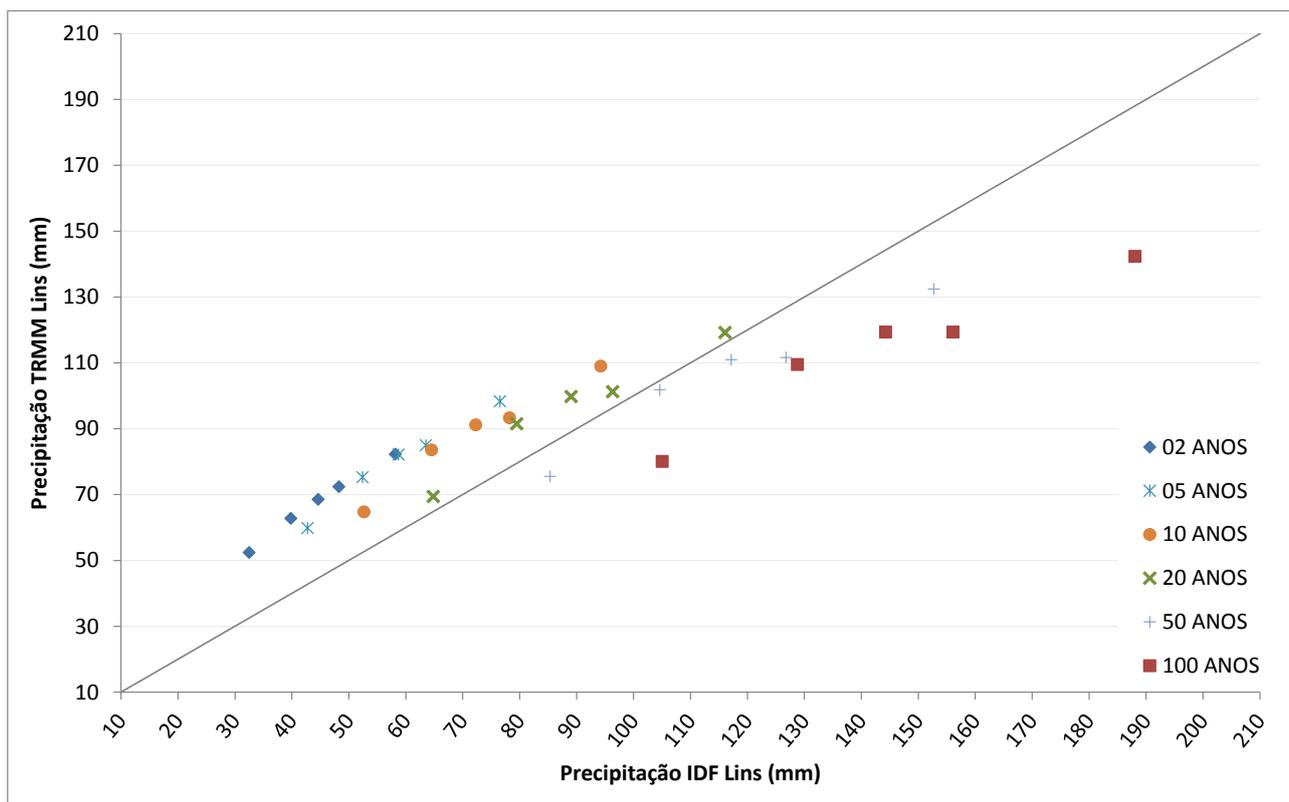


Figura 5.12. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Lins (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.18. Precipitações estimadas pela IDF de Lins (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF LINS - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                        | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                 | 32  | 40  | 45  | 48  | 58  |
| 5                                 | 43  | 52  | 59  | 64  | 77  |
| 10                                | 53  | 65  | 72  | 78  | 94  |
| 20                                | 65  | 79  | 89  | 96  | 116 |
| 50                                | 85  | 105 | 117 | 127 | 153 |
| 100                               | 105 | 129 | 144 | 156 | 188 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |    |    |     |     |     |
|-------------------------------|----|----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h | 6h | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 52 | 63 | 69  | 72  | 82  |
| 5                             | 60 | 75 | 82  | 85  | 98  |
| 10                            | 65 | 84 | 91  | 93  | 109 |
| 20                            | 69 | 92 | 100 | 101 | 119 |

|     |    |     |     |     |     |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|
| 50  | 75 | 102 | 111 | 112 | 132 |
| 100 | 80 | 109 | 119 | 119 | 142 |

Na porção centro-oeste do país foram analisadas duas localidades: Formosa (GO) e Brasília (DF). Apesar de serem cidades bem próximas, distando cerca de 75 km, apresentaram comportamentos distintos na comparação entre as precipitações geradas a partir das equações IDF estabelecidas e as estimadas pelo TRMM, conforme mostrado a seguir.

O comportamento identificado nos valores de precipitação estimados pelo TRMM para a cidade de Formosa, inserida entre as coordenadas 15,50° e 15,75° S, 47,5° e 47,25° W, quando comparados aos estimados pela IDF estabelecida (BRAVO *et al.*, 2008), foi semelhante ao constatado no caso do Rio de Janeiro, conforme pode ser observado na Figura 5.13. As diferenças entre as precipitações aumentam para as chuvas de maiores durações, em todos os tempos de retorno considerados na análise, conforme mostra a Tabela 5.19.

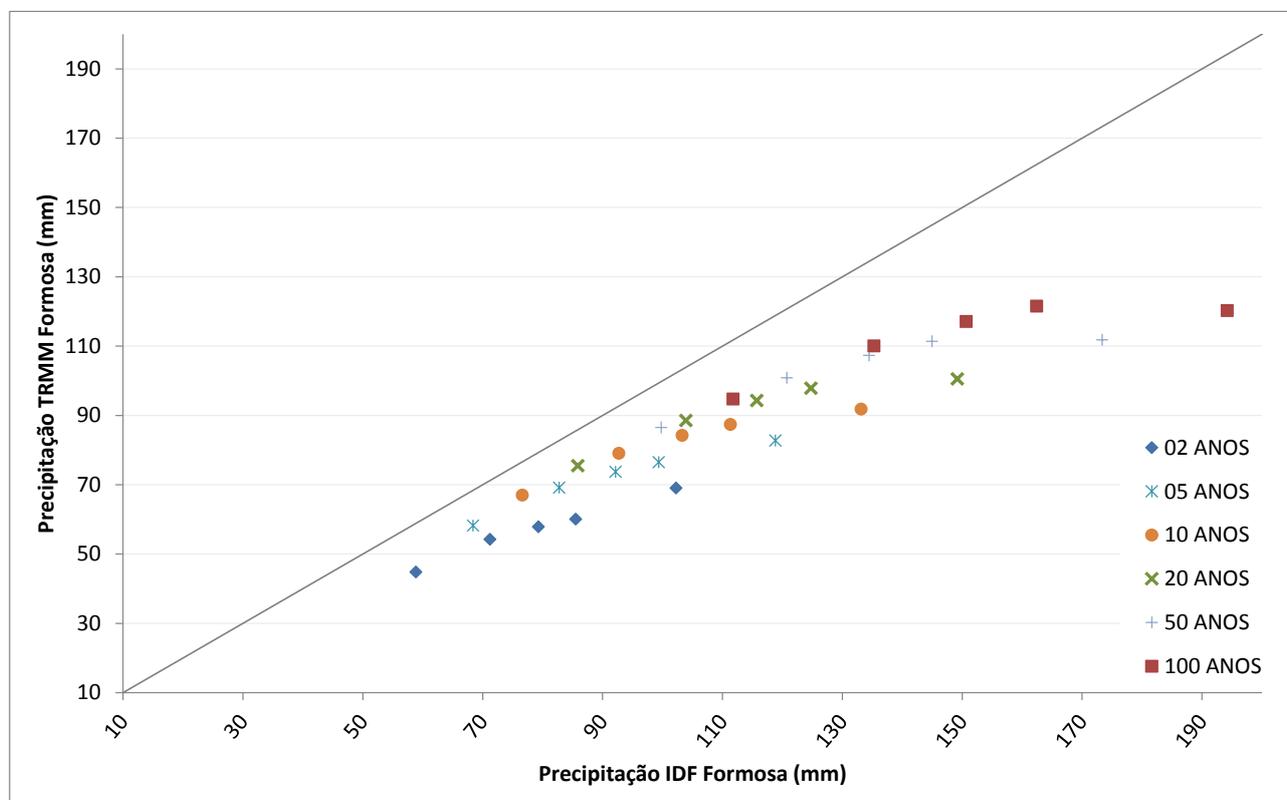


Figura 5.13. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Formosa (BRAVO *et al.*, 2008) e as ajustadas com dados do TRMM.

**Tabela 5.19. Precipitações estimadas pela IDF de Formosa (BRAVO *et al.*, 2008) e as ajustadas com dados do TRMM.**

| <b>IDF FORMOSA - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                           | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                                    | 59        | 71        | 79        | 86         | 102        |
| <b>5</b>                                    | 68        | 83        | 92        | 99         | 119        |
| <b>10</b>                                   | 77        | 93        | 103       | 111        | 133        |
| <b>20</b>                                   | 86        | 104       | 116       | 125        | 149        |
| <b>50</b>                                   | 100       | 121       | 134       | 145        | 173        |
| <b>100</b>                                  | 112       | 135       | 151       | 162        | 194        |

| <b>TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                    | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                             | 45        | 54        | 58        | 60         | 69         |
| <b>5</b>                             | 58        | 69        | 74        | 77         | 83         |
| <b>10</b>                            | 67        | 79        | 84        | 87         | 92         |
| <b>20</b>                            | 76        | 89        | 94        | 98         | 101        |
| <b>50</b>                            | 86        | 101       | 107       | 111        | 112        |
| <b>100</b>                           | 95        | 110       | 117       | 122        | 120        |

A comparação das precipitações geradas pela IDF de Brasília (DISTRITO FEDERAL, 2009) ajustada com dados de pluviógrafo do período entre 1962 a 2008, com as estimadas pelo TRMM, no *pixel* que contém a coordenada do posto do INMET em Brasília, cujos dados foram utilizados no ajuste da equação IDF, é apresentada na Figura 5.14 e na Tabela 5.20. Neste caso, percebe-se certa aproximação entre os valores de precipitação, conforme indicado pelas diferenças percentuais mostradas na Tabela 5.21, prevalecendo leve tendência de subestimativa do TRMM em relação às precipitações geradas pela IDF.

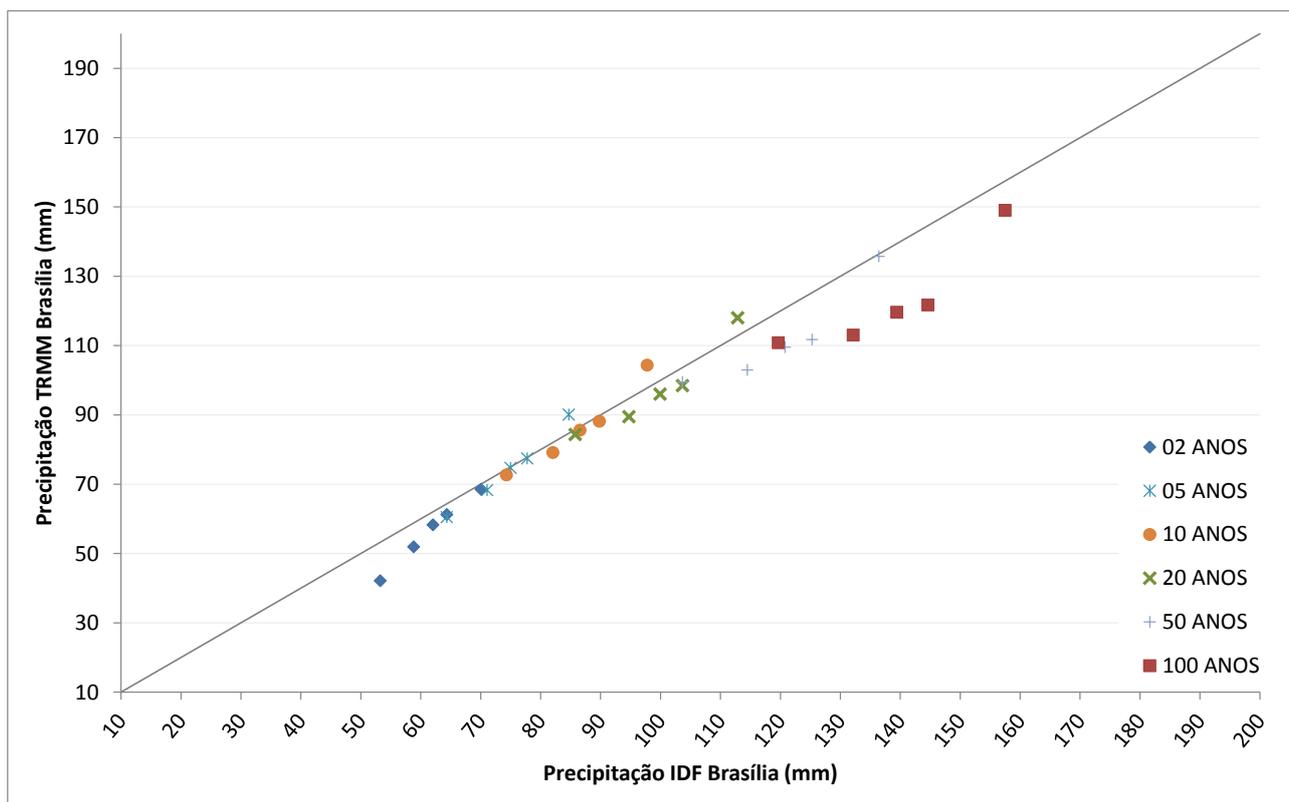


Figura 5.14. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Brasília (DISTRITO FEDERAL, 2009) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.20. Precipitações estimadas pela IDF de Brasília (DISTRITO FEDERAL, 2009) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF BRASÍLIA - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                            | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                     | 53  | 59  | 62  | 64  | 70  |
| 5                                     | 64  | 71  | 75  | 78  | 85  |
| 10                                    | 74  | 82  | 87  | 90  | 98  |
| 20                                    | 86  | 95  | 100 | 104 | 113 |
| 50                                    | 104 | 115 | 121 | 125 | 136 |
| 100                                   | 120 | 132 | 139 | 145 | 158 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |    |    |    |     |     |
|-------------------------------|----|----|----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h | 6h | 9h | 12h | 24h |
| 2                             | 42 | 52 | 58 | 61  | 68  |
| 5                             | 60 | 68 | 75 | 77  | 90  |
| 10                            | 73 | 79 | 86 | 88  | 104 |
| 20                            | 84 | 89 | 96 | 98  | 118 |

|            |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>50</b>  | 99  | 103 | 109 | 112 | 136 |
| <b>100</b> | 111 | 113 | 120 | 122 | 149 |

**Tabela 5.21. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Brasília.**

| <b>TR\Duração</b> | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>2 anos</b>     | -20,9%    | -11,7%    | -6,1%     | -4,8%      | -2,3%      |
| <b>5 anos</b>     | -6,0%     | -4,0%     | -0,4%     | -0,5%      | 6,3%       |
| <b>10 anos</b>    | -2,2%     | -3,6%     | -1,2%     | -1,8%      | 6,7%       |
| <b>20 anos</b>    | -1,7%     | -5,5%     | -3,9%     | -5,0%      | 4,5%       |
| <b>50 anos</b>    | -4,1%     | -10,1%    | -9,4%     | -10,8%     | -0,5%      |
| <b>100 anos</b>   | -7,4%     | -14,5%    | -14,2%    | -15,8%     | -5,4%      |

Na análise das cidades localizadas na região nordeste do Brasil, percebe-se mais uma vez tendências de superestimativa dos dados do TRMM em relação às precipitações determinadas pelas relações IDF existentes, sobretudo em Fortaleza e São Luiz. No entanto, na cidade de Teresina, os valores encontrados para as precipitações foram bastante próximos, não tendo sido possível detectar tendências de super ou subestimativa.

Na Figura 5.15 e Tabela 5.22 a seguir, pode-se visualizar o comportamento das precipitações geradas pela relação IDF estabelecida para Aracaju (FRAGOSO JR., 2004) e as precipitações estimadas pelo TRMM para a área compreendida entre as coordenadas 10,75° e 11,0° S, 37,25° e 37,0° W. Neste caso, houve subestimativa do TRMM em relação à IDF das precipitações para todas as durações com TR igual a 2 anos, bem como para as chuvas de 24 horas de duração para qualquer dos tempos de retorno considerados, cujas diferenças variaram entre -2 e -14%. Os demais valores de precipitação foram superestimados pelo TRMM, variando entre 8 e 25% a diferença entre as precipitações do TRMM e geradas pela IDF. Percebe-se, assim, uma leve tendência a superestimativa das precipitações ajustadas pelo TRMM, embora diversos pontos tenham ficado bastante próximos da reta que representa diferença zero.

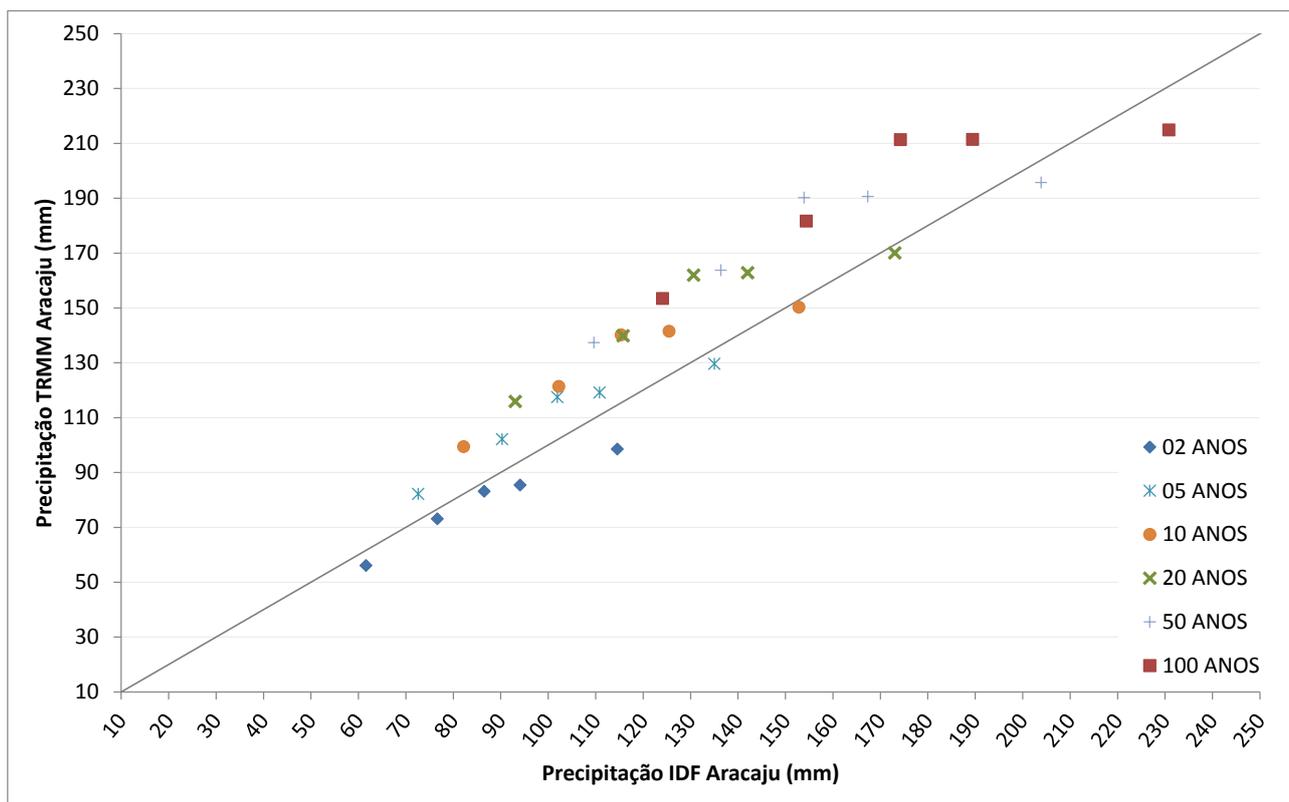


Figura 5.15. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Aracaju (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.22. Precipitações estimadas pela IDF de Aracaju (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF ARACAJU - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                           | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                    | 62  | 77  | 87  | 94  | 115 |
| 5                                    | 73  | 90  | 102 | 111 | 135 |
| 10                                   | 82  | 102 | 115 | 125 | 153 |
| 20                                   | 93  | 116 | 131 | 142 | 173 |
| 50                                   | 110 | 136 | 154 | 167 | 204 |
| 100                                  | 124 | 154 | 174 | 189 | 231 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 56  | 73  | 83  | 85  | 98  |
| 5                             | 82  | 102 | 117 | 119 | 130 |
| 10                            | 99  | 121 | 140 | 141 | 150 |
| 20                            | 116 | 140 | 162 | 163 | 170 |

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 50  | 137 | 164 | 190 | 191 | 196 |
| 100 | 153 | 182 | 211 | 211 | 215 |

No caso de Fortaleza, onde as precipitações estimadas pelo TRMM nas coordenadas 3,50° e 3,75° S, 38,75° e 38,50° W foram comparadas às estimadas pela IDF ajustada por Fragoso Jr. (2004) com base no estudo de Pfafstetter (1957), e são apresentadas no gráfico da Figura 5.16 e na Tabela 5.23, percebe-se clara tendência a superestimativa do TRMM, com exceção da precipitação de 24h e TR igual a 2 anos, ponto que aparece abaixo da reta de diferença zero, configurando um valor subestimado pelo TRMM em comparação com a precipitação derivada da IDF.

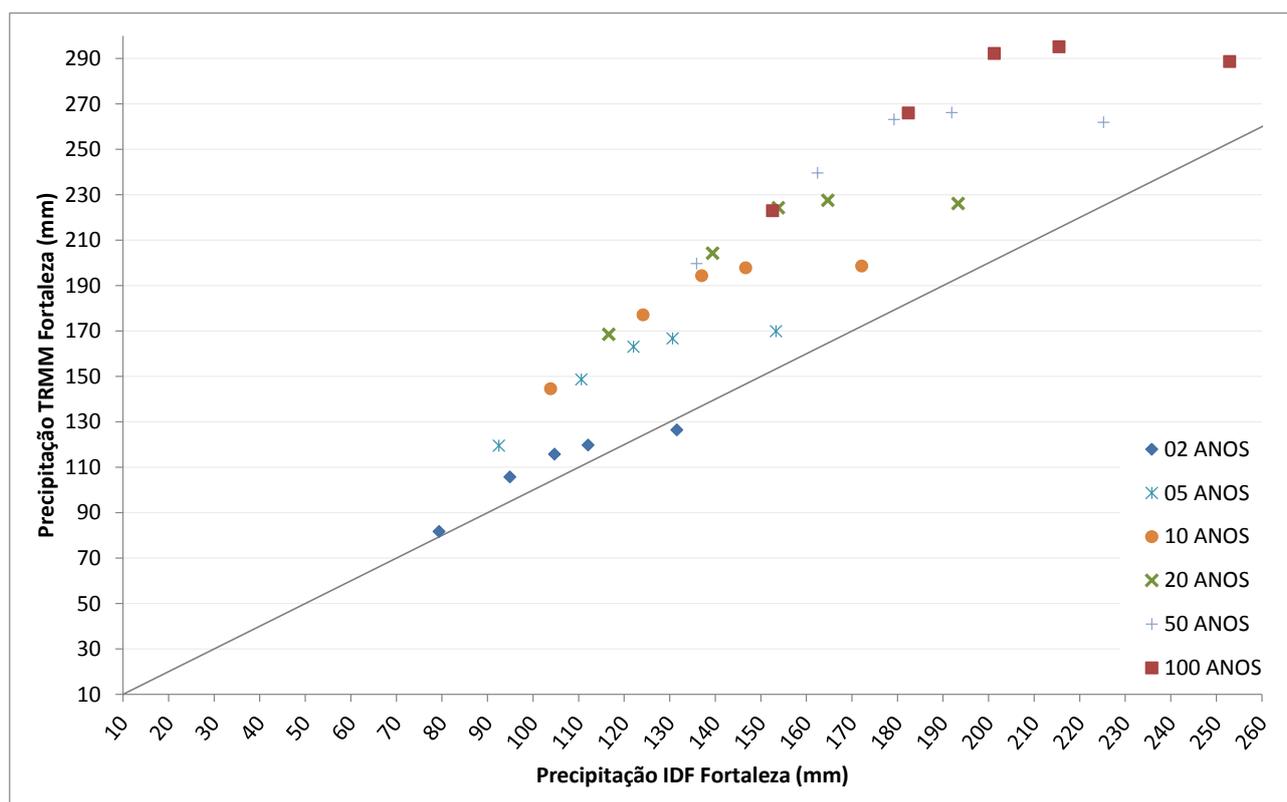


Figura 5.16. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Fortaleza (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

**Tabela 5.23. Precipitações estimadas pela IDF de Fortaleza (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.**

| <b>IDF FORTALEZA - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                             | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                                      | 79        | 95        | 105       | 112        | 132        |
| <b>5</b>                                      | 93        | 111       | 122       | 131        | 153        |
| <b>10</b>                                     | 104       | 124       | 137       | 147        | 172        |
| <b>20</b>                                     | 117       | 139       | 154       | 165        | 193        |
| <b>50</b>                                     | 136       | 162       | 179       | 192        | 225        |
| <b>100</b>                                    | 153       | 182       | 201       | 215        | 253        |

| <b>TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                    | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                             | 82        | 106       | 116       | 120        | 126        |
| <b>5</b>                             | 120       | 149       | 163       | 167        | 170        |
| <b>10</b>                            | 145       | 177       | 194       | 198        | 199        |
| <b>20</b>                            | 169       | 204       | 224       | 228        | 226        |
| <b>50</b>                            | 200       | 240       | 263       | 266        | 262        |
| <b>100</b>                           | 223       | 266       | 292       | 295        | 289        |

Comportamento bastante similar ao apresentado pelas precipitações de Fortaleza pode ser observado em São Luiz, conforme mostrado na Figura 5.17 e Tabela 5.24. Neste caso, as precipitações estimadas pelo TRMM na área abrangida pelas coordenadas 2,50° e 2,75° S, 44,50° e 44,25° W, foram comparadas às precipitações geradas a partir da IDF de São Luiz ajustada por Fragoso Jr. (2004).

Apesar da tendência de superestimativa do TRMM em comparação com a IDF de Pfafstetter, as diferenças apresentadas em São Luiz foram menores que as detectadas para a localidade de Fortaleza, e, neste caso, quatro valores foram subestimados pelo TRMM, todos associados ao tempo de retorno de 2 anos.

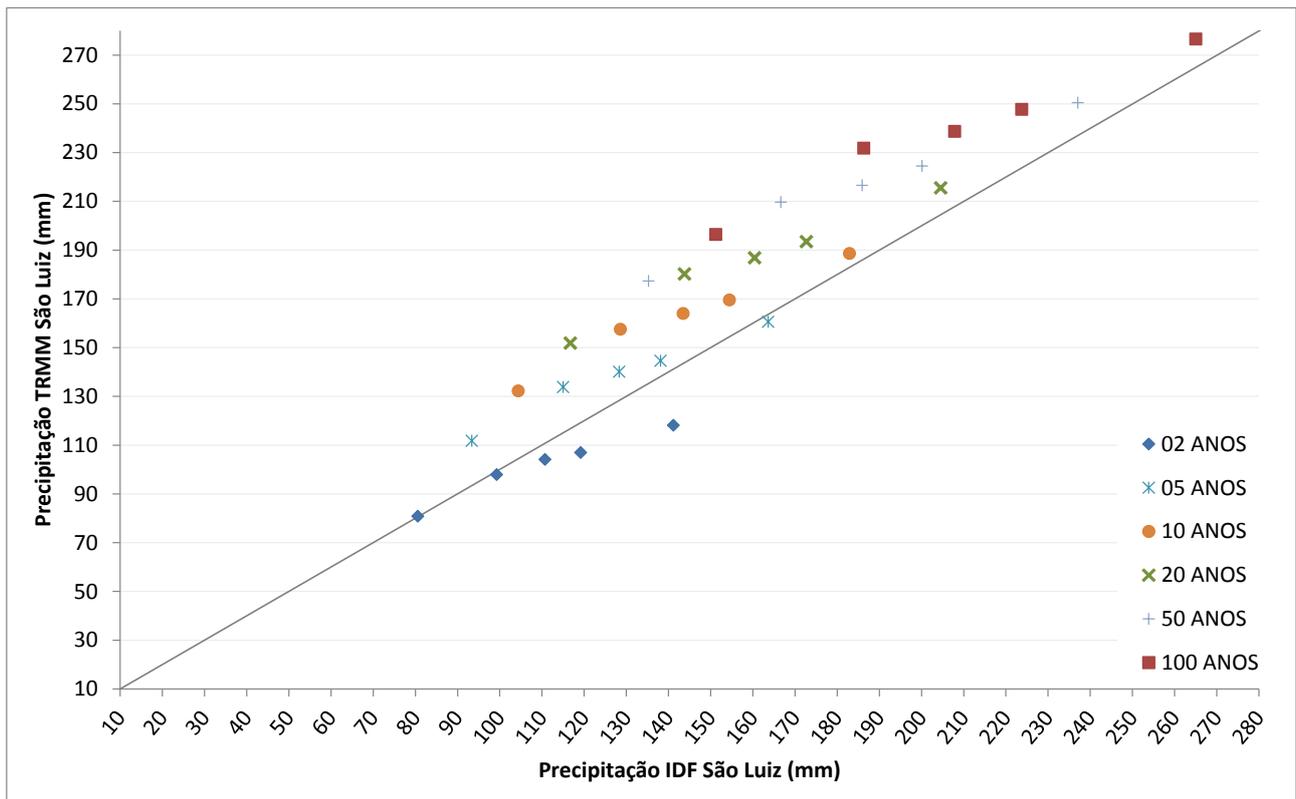


Figura 5.17. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de São Luiz (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.24. Precipitações estimadas pela IDF de São Luiz (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF SÃO LUIZ - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                            | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                     | 81  | 99  | 111 | 119 | 141 |
| 5                                     | 93  | 115 | 128 | 138 | 164 |
| 10                                    | 104 | 129 | 143 | 154 | 183 |
| 20                                    | 117 | 144 | 160 | 173 | 205 |
| 50                                    | 135 | 167 | 186 | 200 | 237 |
| 100                                   | 151 | 186 | 208 | 224 | 265 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 81  | 98  | 104 | 107 | 118 |
| 5                             | 112 | 134 | 140 | 145 | 161 |
| 10                            | 132 | 157 | 164 | 170 | 189 |
| 20                            | 152 | 180 | 187 | 193 | 216 |

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 50  | 177 | 210 | 217 | 224 | 250 |
| 100 | 196 | 232 | 239 | 248 | 277 |

Em Teresina, as precipitações geradas pela IDF de Pfafstetter (1957) ajustadas por Fragoso Jr. (2004) foram comparadas às estimativas do TRMM para a área descrita pelas coordenadas 5,0° e 5,25° S, 43,00° e 42,75° W, conforme ilustrado na Figura 5.18 e na Tabela 5.25. Nota-se que a nuvem de pontos encontra-se bastante próxima da reta que representa diferenças nulas entre as precipitações do TRMM e da IDF, de modo que as diferenças variam entre -27,4 e 25,4%, conforme indicam os valores apresentados na Tabela 5.26.

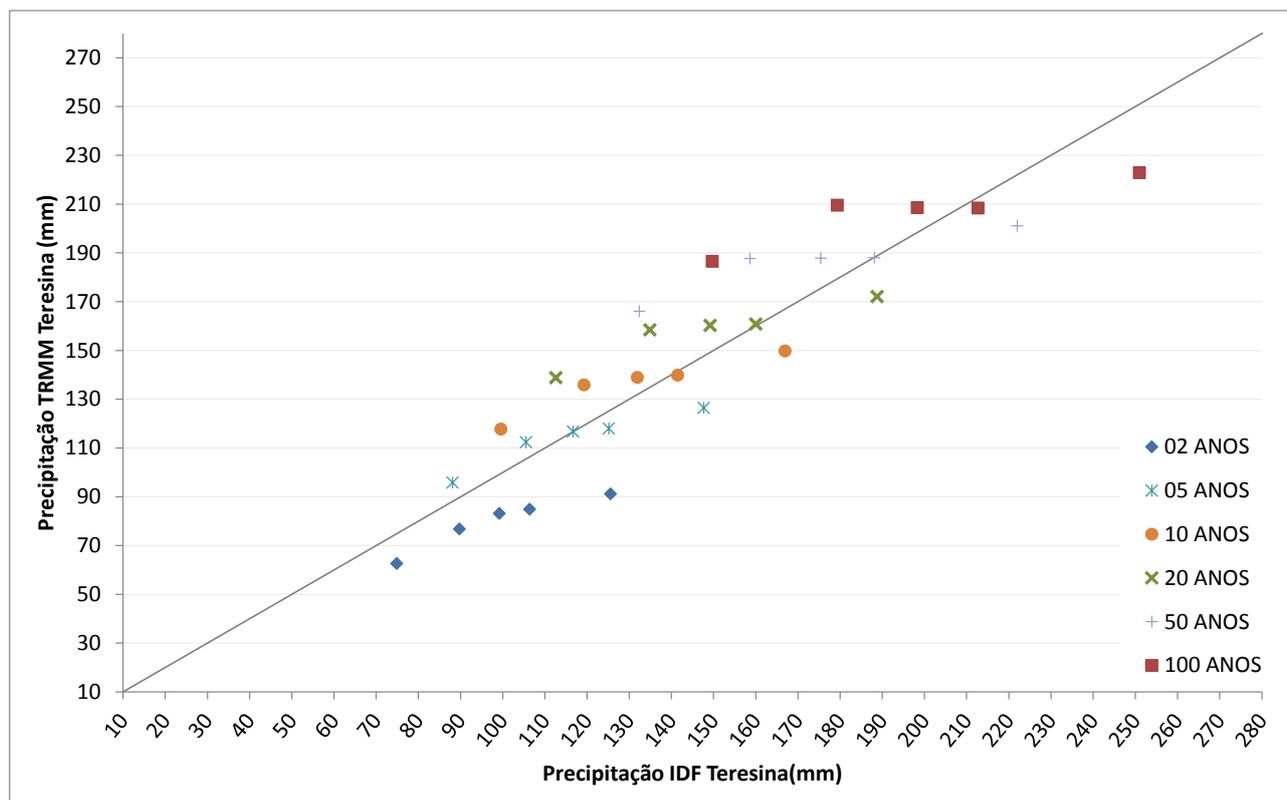


Figura 5.18. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Teresina (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

**Tabela 5.25. Precipitações estimadas pela IDF de Teresina (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.**

| <b>IDF TERESINA - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                            | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                                     | 75        | 90        | 99        | 106        | 126        |
| <b>5</b>                                     | 88        | 106       | 117       | 125        | 148        |
| <b>10</b>                                    | 100       | 119       | 132       | 142        | 167        |
| <b>20</b>                                    | 113       | 135       | 149       | 160        | 189        |
| <b>50</b>                                    | 132       | 159       | 175       | 188        | 222        |
| <b>100</b>                                   | 150       | 179       | 198       | 213        | 251        |

| <b>TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                    | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                             | 63        | 77        | 83        | 85         | 91         |
| <b>5</b>                             | 96        | 112       | 117       | 118        | 126        |
| <b>10</b>                            | 118       | 136       | 139       | 140        | 150        |
| <b>20</b>                            | 139       | 158       | 160       | 161        | 172        |
| <b>50</b>                            | 166       | 188       | 188       | 188        | 201        |
| <b>100</b>                           | 186       | 210       | 209       | 208        | 223        |

**Tabela 5.26. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Teresina.**

| <b>TR\Duração</b> | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>2 anos</b>     | -16,4%    | -14,4%    | -16,2%    | -20,2%     | -27,4%     |
| <b>5 anos</b>     | 8,7%      | 6,4%      | 0,0%      | -5,8%      | -14,4%     |
| <b>10 anos</b>    | 18,2%     | 13,9%     | 5,3%      | -1,2%      | -10,3%     |
| <b>20 anos</b>    | 23,3%     | 17,4%     | 7,4%      | 0,5%       | -8,8%      |
| <b>50 anos</b>    | 25,4%     | 18,3%     | 7,1%      | -0,1%      | -9,4%      |
| <b>100 anos</b>   | 24,6%     | 16,8%     | 5,1%      | -2,0%      | -11,2%     |

As análises nas cidades localizadas na região norte do país não permitiram definir um padrão de tendência, visto que duas delas, Belém (PA) e Manaus (AM) dão indícios de superestimativa por parte do TRMM enquanto que as outras duas cidades, Rio Branco (AC) e Porto

Velho (RO), indicam justamente o contrário. Maiores detalhes são apresentados nos parágrafos que seguem.

A Figura 5.19 apresenta a comparação entre as alturas precipitadas geradas pela IDF de Belém descrita em Fragoso Jr. (2004) e as estimadas nas coordenadas 1,25° e 1,50° S, 48,75° e 48,50° W pelos sensores do TRMM. Percebe-se clara superestimativa do TRMM em comparação com os valores de precipitação gerados pela IDF de Belém, conforme ilustram os valores da Tabela 5.27. A diferença percentual média dos valores analisados é de 64%.

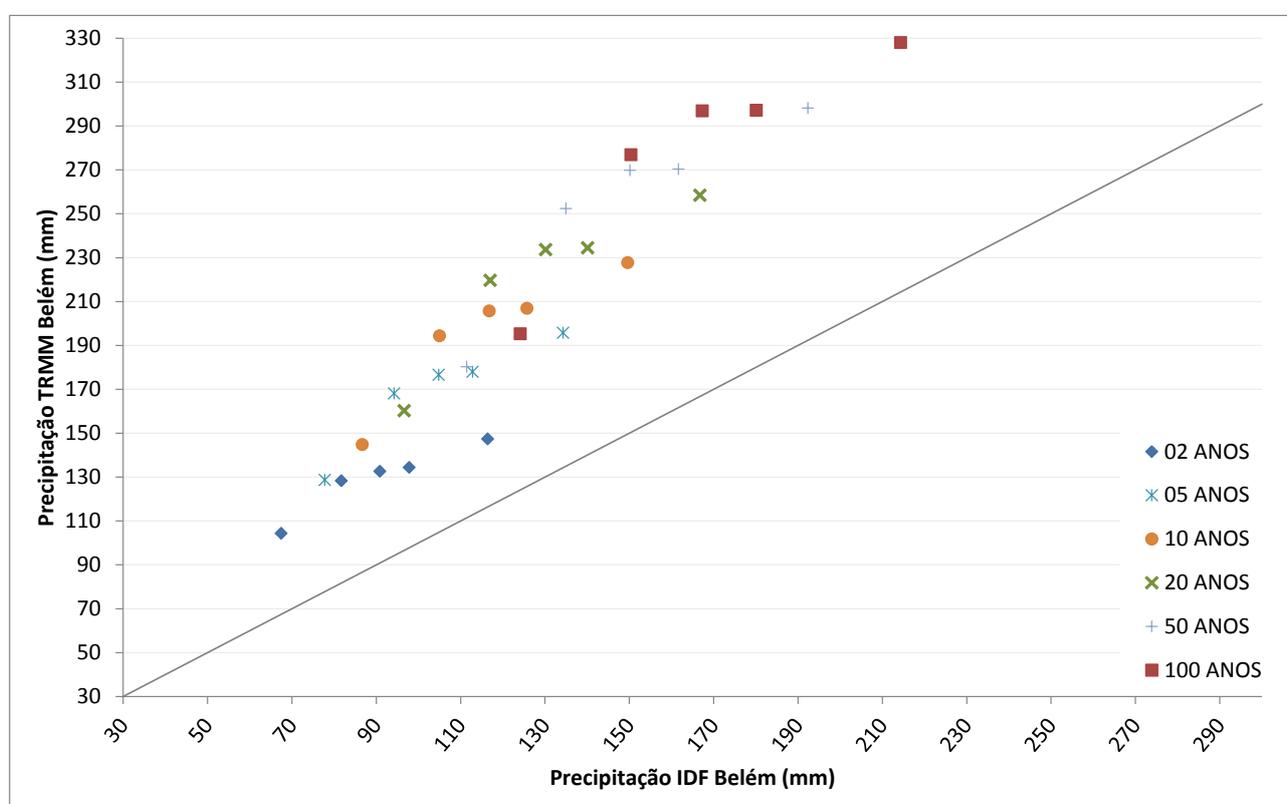


Figura 5.19. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Belém (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

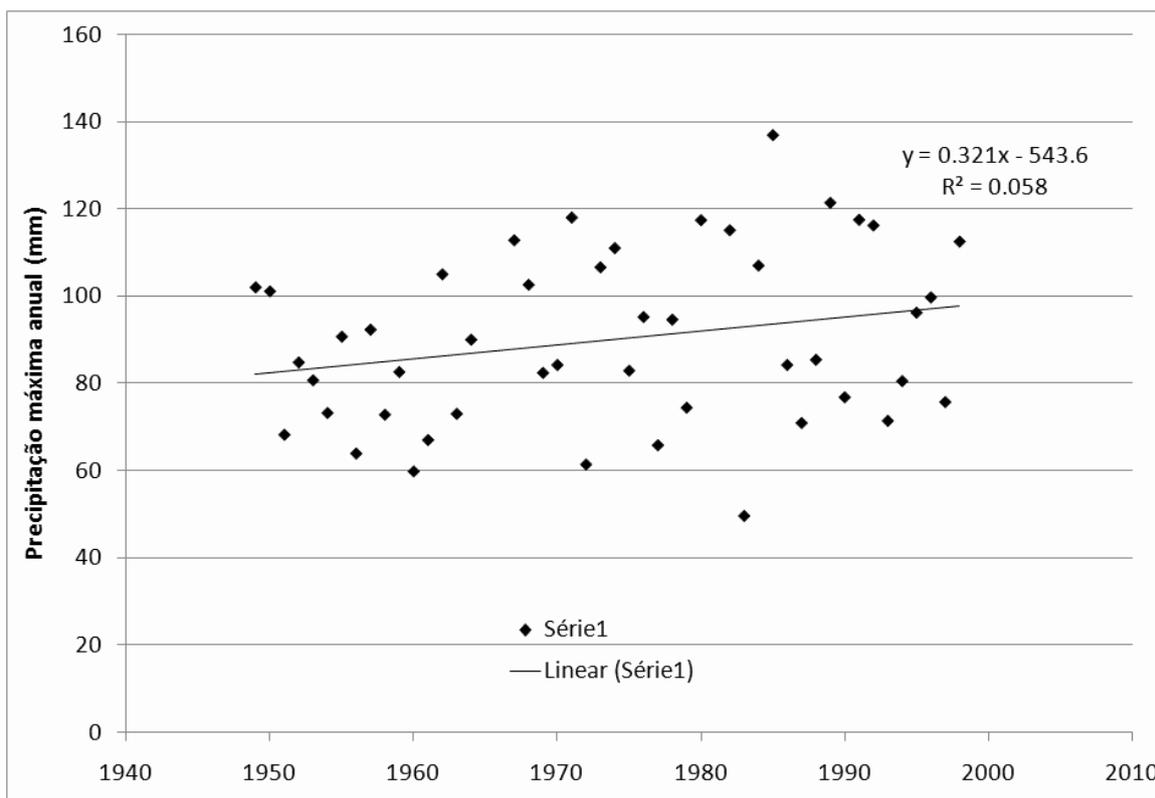
**Tabela 5.27. Precipitações estimadas pela IDF de Belém (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.**

| <b>IDF BELÉM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                         | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                                  | 67        | 82        | 91        | 98         | 116        |
| <b>5</b>                                  | 78        | 94        | 105       | 113        | 134        |
| <b>10</b>                                 | 87        | 105       | 117       | 126        | 150        |
| <b>20</b>                                 | 97        | 117       | 130       | 140        | 167        |
| <b>50</b>                                 | 111       | 135       | 150       | 162        | 192        |
| <b>100</b>                                | 124       | 150       | 167       | 180        | 214        |

| <b>TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm)</b> |           |           |           |            |            |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>TR\duração</b>                    | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
| <b>2</b>                             | 104       | 128       | 133       | 134        | 147        |
| <b>5</b>                             | 129       | 168       | 177       | 178        | 196        |
| <b>10</b>                            | 145       | 194       | 206       | 207        | 228        |
| <b>20</b>                            | 160       | 220       | 234       | 235        | 258        |
| <b>50</b>                            | 180       | 252       | 270       | 270        | 298        |
| <b>100</b>                           | 195       | 277       | 297       | 297        | 328        |

No caso de Belém, também foi feita uma análise de tendência nas precipitações máximas anuais do pluviômetro do INMET, conforme ilustra a Figura 5.20.



**Figura 5.20. Ajuste linear às precipitações máximas diárias em Belém, de 1949 a 1998.**

Como se observa, no caso de Belém, a declividade positiva da reta de ajuste coincide com a superestimativa observada do TRMM. No entanto, ao realizar o teste de hipótese, não foi possível rejeitar a hipótese de que a declividade é nula, a um nível de 5% de significância. Realizando o mesmo teste a 10%, a hipótese nula é rejeitada, de forma que há uma possibilidade que, nesta localidade, a superestimativa do TRMM seja devida a uma maior incidência de eventos intensos de precipitação em anos recentes.

No caso de Manaus, cuja comparação entre as precipitações geradas pela IDF descrita em Fragoso Jr. (2004) e as estimadas pelo TRMM nas coordenadas 3,00° e 3,25° S, 60,25° e 60,00° W é apresentada na Figura 5.21 e os valores na Tabela 5.28, embora se perceba uma maior aproximação dos valores em torno da reta de diferenças nulas quando comparado ao caso de Belém, por exemplo, ainda nota-se uma clara superestimativa do TRMM em relação às precipitações calculadas pela IDF.

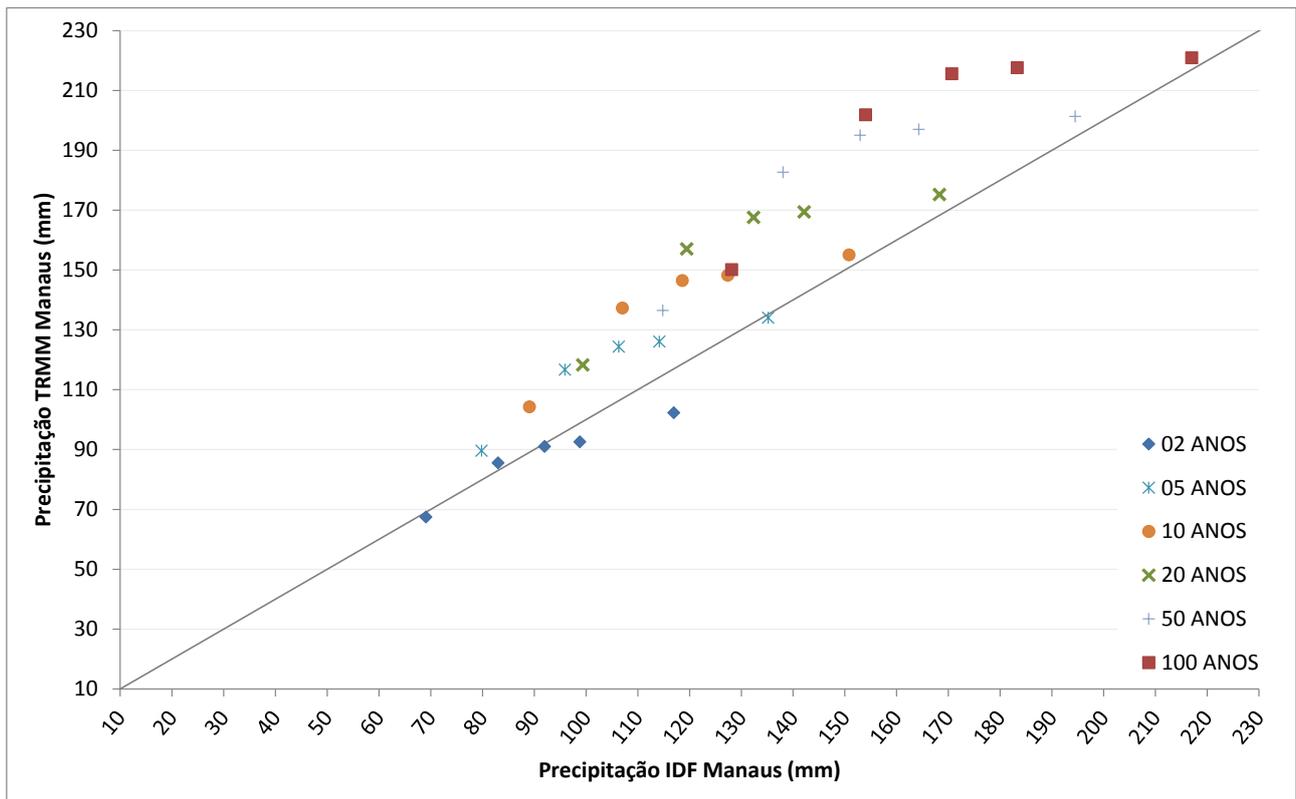


Figura 5.21. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Manaus (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.28. Precipitações estimadas pela IDF de Manaus (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF MANAUS - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                          | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                   | 69  | 83  | 92  | 99  | 117 |
| 5                                   | 80  | 96  | 106 | 114 | 135 |
| 10                                  | 89  | 107 | 119 | 127 | 151 |
| 20                                  | 99  | 119 | 132 | 142 | 168 |
| 50                                  | 115 | 138 | 153 | 164 | 195 |
| 100                                 | 128 | 154 | 171 | 183 | 217 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 67  | 86  | 91  | 93  | 102 |
| 5                             | 90  | 117 | 124 | 126 | 134 |
| 10                            | 104 | 137 | 146 | 148 | 155 |
| 20                            | 118 | 157 | 168 | 169 | 175 |

|            |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>50</b>  | 136 | 183 | 195 | 197 | 201 |
| <b>100</b> | 150 | 202 | 216 | 218 | 221 |

As diferenças percentuais de todas as precipitações consideradas para Manaus podem ser vistas na Tabela 5.29.

**Tabela 5.29. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Manaus.**

| <b>TR\Duração</b> | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>2 anos</b>     | -2,3%     | 3,0%      | -1,1%     | -6,3%      | -12,5%     |
| <b>5 anos</b>     | 12,2%     | 21,6%     | 17,0%     | 10,4%      | -0,8%      |
| <b>10 anos</b>    | 17,0%     | 28,3%     | 23,4%     | 16,3%      | 2,8%       |
| <b>20 anos</b>    | 19,0%     | 31,5%     | 26,6%     | 19,2%      | 4,1%       |
| <b>50 anos</b>    | 18,8%     | 32,3%     | 27,5%     | 19,9%      | 3,5%       |
| <b>100 anos</b>   | 17,1%     | 31,1%     | 26,3%     | 18,7%      | 1,8%       |

No caso de Porto Velho, cuja comparação entre as precipitações estimadas pelo TRMM no *pixel* que envolve as coordenadas da sede municipal e as calculadas pela IDF de Pfafstetter ajustada por Fragoso Jr. (2004) pode ser vista na Figura 5.22 e na Tabela 5.30, percebe-se que os valores estão bem próximos à reta que indica inexistência de diferenças entre os valores de precipitação das duas fontes.

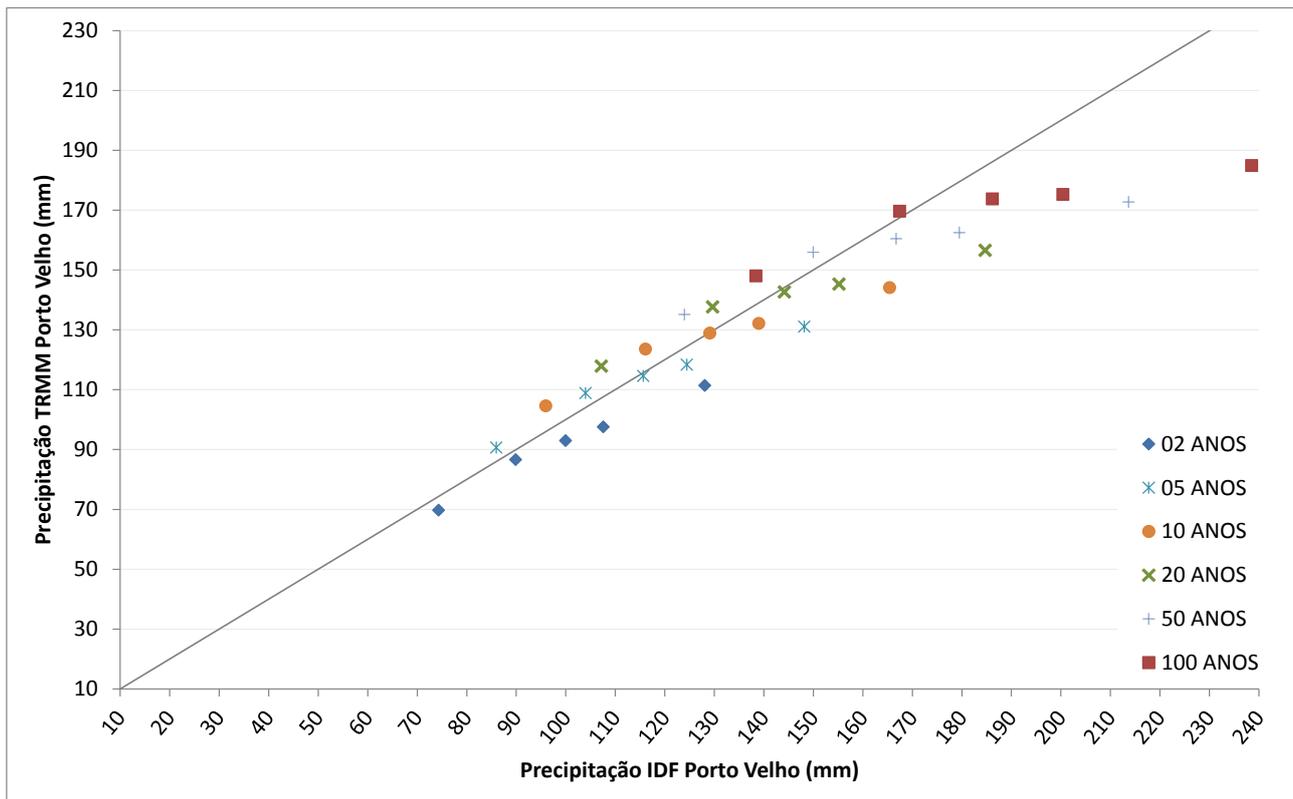


Figura 5.22. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Porto Velho (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.30. Precipitações estimadas pela IDF de Porto Velho (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF PORTO VELHO - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                               | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2  | 74  | 90  | 100 | 108 | 128 |
| 5  | 86  | 104 | 116 | 124 | 148 |
| 10                                       | 96  | 116 | 129 | 139 | 165 |
| 20                                       | 107 | 130 | 144 | 155 | 185 |
| 50                                       | 124 | 150 | 167 | 180 | 214 |
| 100                                      | 138 | 167 | 186 | 200 | 239 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 70  | 87  | 93  | 98  | 111 |
| 5                             | 91  | 109 | 115 | 118 | 131 |
| 10                            | 105 | 124 | 129 | 132 | 144 |
| 20                            | 118 | 138 | 143 | 145 | 157 |

|            |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>50</b>  | 135 | 156 | 160 | 162 | 173 |
| <b>100</b> | 148 | 170 | 174 | 175 | 185 |

No entanto, sobretudo para as precipitações de durações maiores (12 e 24 h), verifica-se uma tendência a subestimação do TRMM em comparação às precipitações da IDF, conforme se observa na análise das diferenças percentuais apresentadas na Tabela 5.31.

**Tabela 5.31. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Porto Velho.**

| <b>TR\Duração</b> | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>2 anos</b>     | -6,2%     | -3,7%     | -7,0%     | -9,4%      | -13,0%     |
| <b>5 anos</b>     | 5,5%      | 4,6%      | -0,9%     | -4,9%      | -11,5%     |
| <b>10 anos</b>    | 9,0%      | 6,4%      | -0,1%     | -4,9%      | -12,9%     |
| <b>20 anos</b>    | 10,0%     | 6,2%      | -1,0%     | -6,3%      | -15,2%     |
| <b>50 anos</b>    | 9,0%      | 4,0%      | -3,8%     | -9,5%      | -19,1%     |
| <b>100 anos</b>   | 6,9%      | 1,3%      | -6,7%     | -12,6%     | -22,5%     |

Comportamento bastante semelhante ao de Porto Velho foi apresentado pela comparação realizada entre as precipitações geradas pela IDF de Pfafstetter (1957) para Rio Branco, ajustada por Fragoso Jr. (2004), e as estimativas do TRMM para a área descrita pelas coordenadas 9,75° e 10,0° S, 68,00° e 67,75° W, conforme ilustrado na Figura 5.23 e Tabela 5.32.

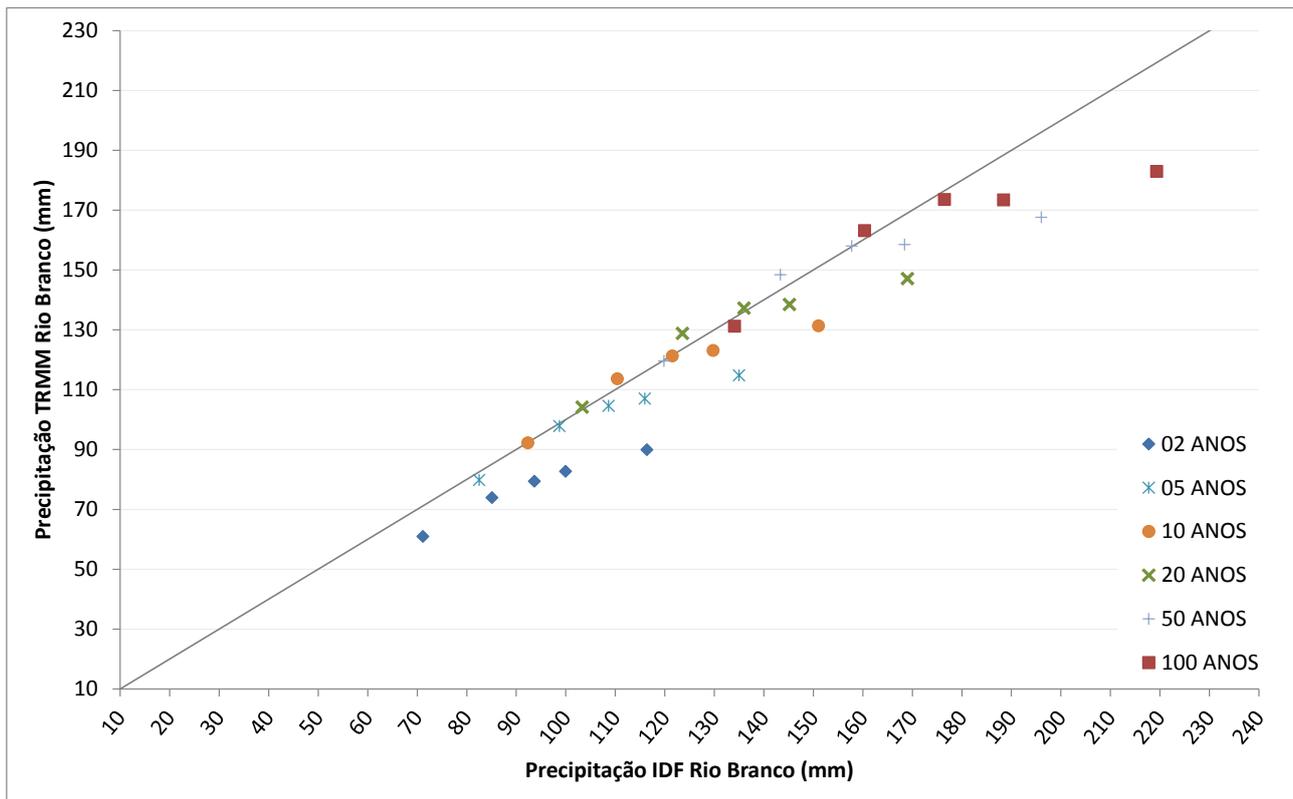


Figura 5.23. Comparação entre as precipitações estimadas pela IDF de Rio Branco (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

Tabela 5.32. Precipitações estimadas pela IDF de Rio Branco (FRAGOSO JR., 2004) e as ajustadas com dados do TRMM.

| IDF RIO BRANCO - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                              | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                                       | 71  | 85  | 94  | 100 | 116 |
| 5                                       | 83  | 99  | 109 | 116 | 135 |
| 10                                      | 92  | 110 | 122 | 130 | 151 |
| 20                                      | 103 | 124 | 136 | 145 | 169 |
| 50                                      | 120 | 143 | 158 | 168 | 196 |
| 100                                     | 134 | 160 | 177 | 188 | 219 |

| TRMM - LÂMINA PRECIPITADA(mm) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TR\duração                    | 3h  | 6h  | 9h  | 12h | 24h |
| 2                             | 61  | 74  | 79  | 83  | 90  |
| 5                             | 80  | 98  | 105 | 107 | 115 |
| 10                            | 92  | 114 | 121 | 123 | 131 |
| 20                            | 104 | 129 | 137 | 139 | 147 |

|            |     |     |     |     |     |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>50</b>  | 120 | 148 | 158 | 158 | 168 |
| <b>100</b> | 131 | 163 | 174 | 173 | 183 |

Os pontos plotados encontram-se bastante próximos da reta de diferenças nulas, embora seja percebida uma leve tendência a subestimativa por parte do TRMM em comparação às precipitações geradas pela IDF, conforme pode ser visto na Tabela 5.33, que apresenta as diferenças percentuais neste caso.

**Tabela 5.33. Diferenças percentuais entre as precipitações estimadas pelo TRMM e pela IDF de Rio Branco.**

| <b>TR\Duração</b> | <b>3h</b> | <b>6h</b> | <b>9h</b> | <b>12h</b> | <b>24h</b> |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| <b>2 anos</b>     | -14,3%    | -13,1%    | -15,2%    | -17,3%     | -22,7%     |
| <b>5 anos</b>     | -3,3%     | -0,9%     | -3,7%     | -7,7%      | -14,9%     |
| <b>10 anos</b>    | -0,1%     | 2,9%      | -0,2%     | -5,1%      | -13,1%     |
| <b>20 anos</b>    | 0,8%      | 4,2%      | 1,0%      | -4,6%      | -12,9%     |
| <b>50 anos</b>    | -0,2%     | 3,6%      | 0,2%      | -5,9%      | -14,5%     |
| <b>100 anos</b>   | -2,2%     | 1,7%      | -1,7%     | -8,0%      | -16,6%     |

Em virtude da utilização de períodos não coincidentes de dados para o estabelecimento das relações IDF comparadas neste estudo, destaca-se que a análise apresentada não possibilita uma comparação definitiva, uma vez que a comparação de períodos diferentes pode resultar em diferenças superiores àquelas que seriam devidas apenas aos resultados dos diferentes métodos de monitoramento, ou seja, pluviógrafo e satélite TRMM.

Uma questão importante ainda sobre as séries é que, como a análise foi feita para períodos diferentes, existe uma combinação de incertezas, que são:

- Erros de estimativa do satélite TRMM em um determinado local;
- Diferenças de períodos. Na Figura 5.24 abaixo é possível perceber que o período em que o TRMM possui dados (1998-2008) apresenta valores de precipitação medidos em pluviógrafo sistematicamente acima da média, se comparado ao período anterior. Observa-se que a última década foi a mais quente já observada e isso pode ter sido a causa de aumento da pluviosidade.

Desta forma, estes dois fatores podem produzir as diferenças observadas em cada local com dados.

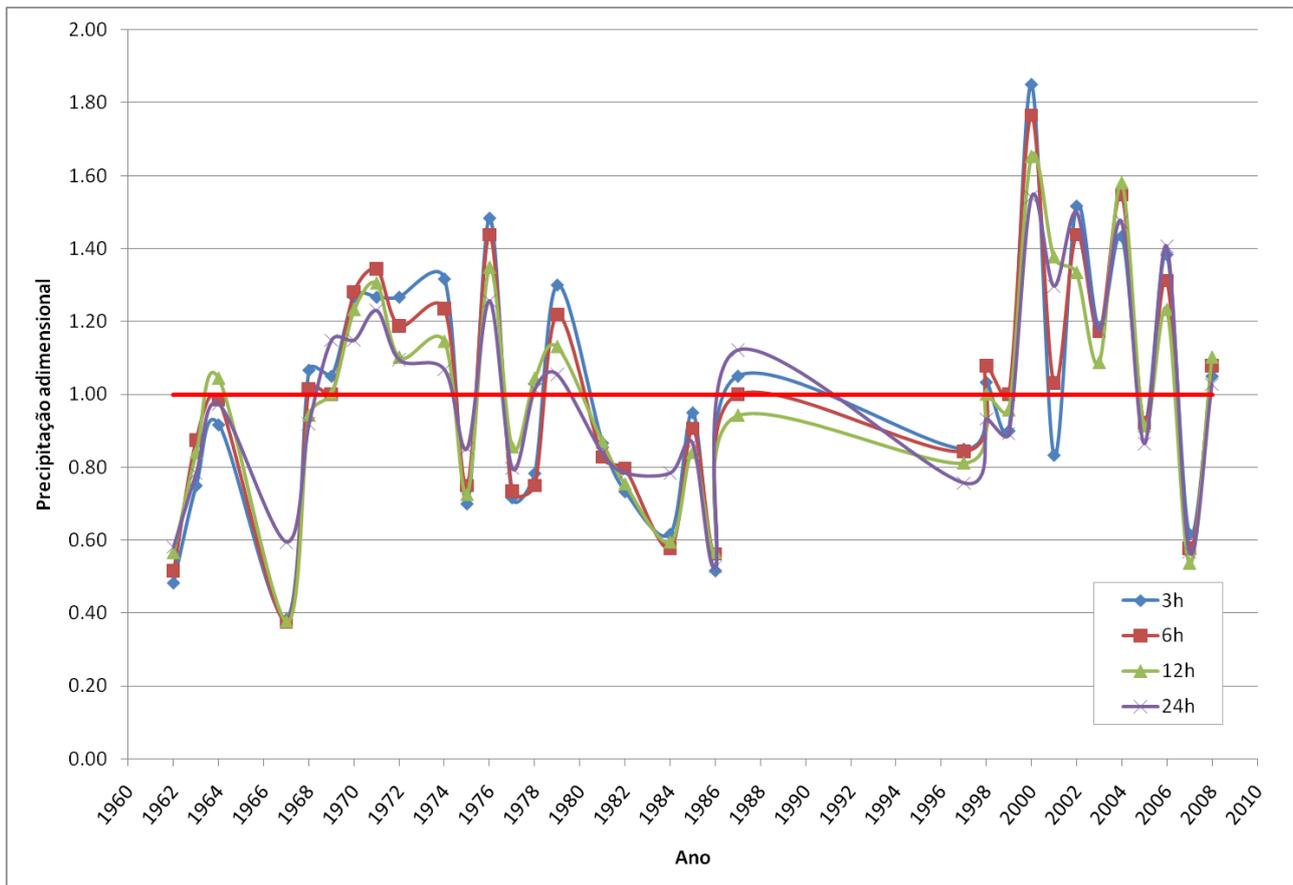


Figura 5.24. Precipitações máximas adimensionais com duração de 3, 6, 12 e 24h de Brasília (DF).

### 5.3 Mapa de parâmetros $\alpha$ , $b$ , $c$ , e $d$ das curvas IDF geradas com dados do TRMM

O programa descrito no item 4.5 foi implementado em MATLAB e sua execução tomou cerca de 12 minutos por sede municipal, em um computador dotado de processador INTEL Core 2 Duo 2,2GHz e 4GB de memória RAM. Para todas as 5561 sedes municipais, isto representaria um tempo de quase 47 dias, se a execução fosse feita de uma única vez. Mais de 90% do tempo de processamento foi consumido na etapa de *download* dos dados, para uma conexão de internet banda larga com velocidade de 3 Mbps.

No Anexo 1 podem ser encontrados, em formato de tabela, os parâmetros  $\alpha$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  das equações IDF geradas para aqueles municípios cuja população é superior a 100.000 habitantes.

No entanto, o arquivo em formato *shapefile* com os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  das equações IDF geradas para todos os municípios brasileiros encontra-se em CD anexo a este trabalho (Anexo 2), e está também disponível no sítio *web* <http://www.ufsm.br/ecotecnologias>.

#### **5.4 Comparação do uso da IDF de TRMM com o uso de IDF pluviômetro**

Para a realização desta análise comparativa entre as precipitações estimadas a partir de uma IDF estabelecida com dados obtidos do TRMM e aquelas derivadas de uma IDF ajustada com base em dados de pluviômetro (precipitações diárias) desagregados, foram estabelecidos indicadores de qualidade, cuja formulação foi apresentada no item 4.6.3. A aplicação destes indicadores foi realizada para seis localidades onde havia disponibilidade de dados de pluviômetro com séries de extensão suficiente para a realização do ajuste, a saber: Brasília (DF), Cruz Alta (RS), Florianópolis (SC), Belo Horizonte (MG), Teresina (PI) e Belém (PA).

Foram considerados dois cenários de bacia, com áreas de drenagem de 1 e 10 km<sup>2</sup>, e as precipitações foram estimadas para os tempos de retorno de 5 e 10 anos, respectivamente. Assim, foram realizadas seis simulações precipitação-vazão para cada localidade, considerando os dois tamanhos de bacia e tempos de retorno e as três relações IDF utilizadas para geração da chuva de projeto: Pfafstetter (com exceção de Brasília, onde foi utilizada a IDF estabelecida com dados de pluviógrafo disponíveis no período entre 1998-2008), TRMM e pluviômetro desagregado.

Para a cidade de Brasília, conforme ilustram a Figura 5.25 e a Figura 5.26, em ambos os cenários de bacia considerados, o reflexo no hidrograma resultante das diferentes precipitações de projeto empregadas ( $P_{plu}$  e  $P_{TRMM}$ ) em comparação com a precipitação estimada com base na IDF estabelecida com dados de pluviógrafo de 1998-2008,  $P_{pfaf}$ , em termos de vazão máxima, é de alta superestimativa. Os resultados das simulações, em termos de vazão máxima e volume escoado, bem como os indicadores de qualidade, são apresentados na Tabela 5.34.

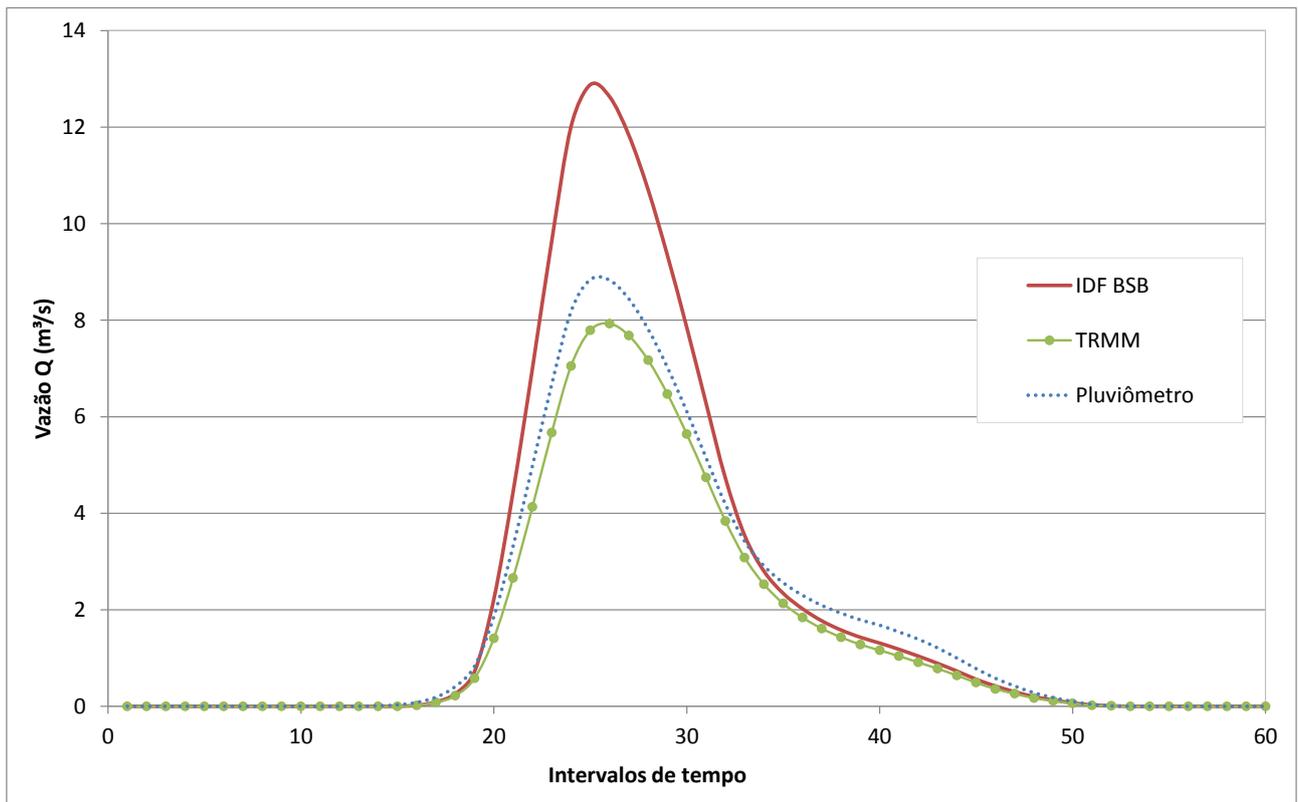


Figura 5.25. Hidrograma de projeto para a cidade de Brasília no cenário de bacia 1.

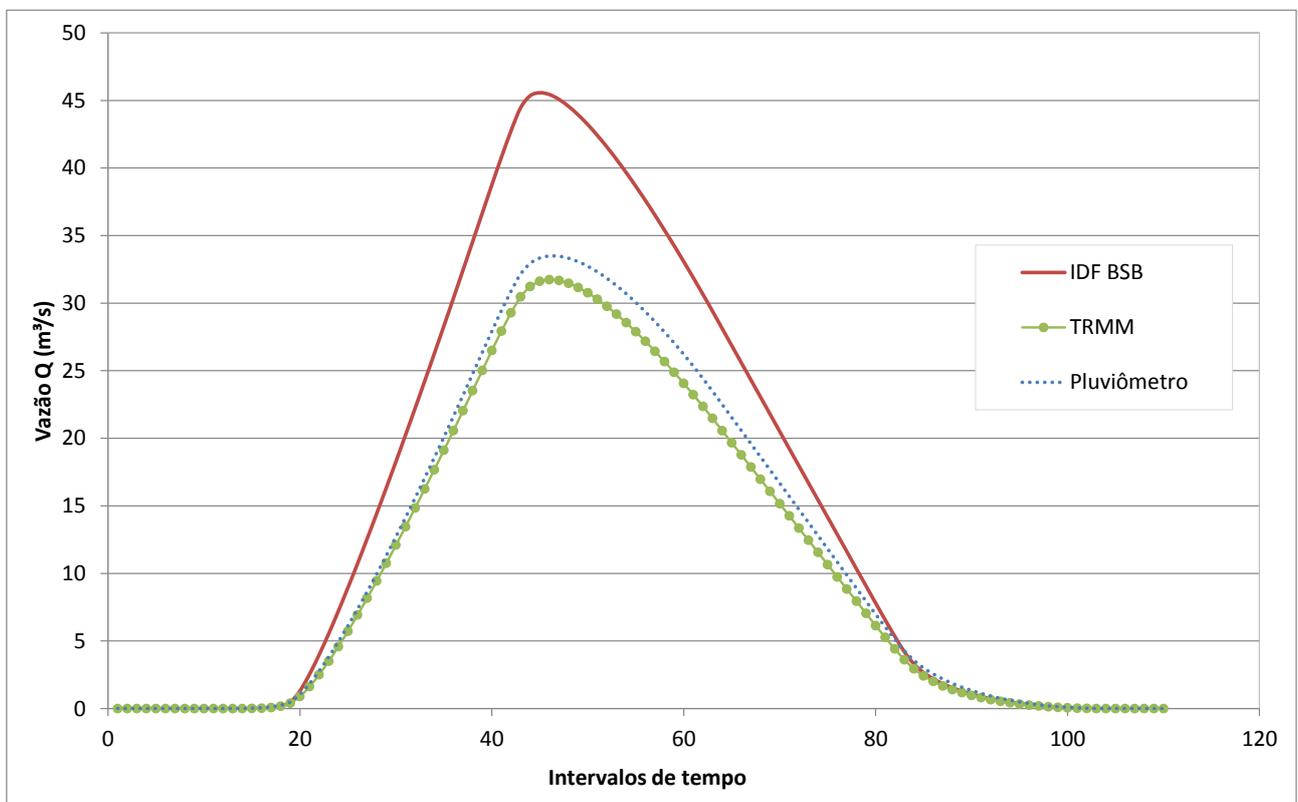


Figura 5.26. Hidrograma de projeto para a cidade de Brasília no cenário de bacia 2.

**Tabela 5.34. Resultados das simulações realizadas para Brasília.**

| CENÁRIO BACIA                  |               |                |
|--------------------------------|---------------|----------------|
|                                | 1 – TR 5 anos | 2 – TR 10 anos |
| $V_{pfa}$ (mm)                 | 40,5          | 49,5           |
| $V_{plu}$ (mm)                 | 32,7          | 37,9           |
| $V_{TRMM}$ (mm)                | 27,9          | 35,1           |
| $indV_{plu}$                   | -19%          | -24%           |
| $indV_{TRMM}$                  | -31%          | -29%           |
| $Q_{pfa}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 12,9          | 45,6           |
| $Q_{plu}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 8,8           | 33,5           |
| $Q_{TRMM}$ (m <sup>3</sup> /s) | 7,9           | 31,7           |
| $indQ_{plu}$                   | -31%          | -27%           |
| $indQ_{TRMM}$                  | -38%          | -30%           |

Percebe-se que os hidrograma gerados com as metodologias alternativas à utilização de chuvas de IDF estabelecida com base em pluviógrafos subestimaram tanto o volume escoado quanto a vazão de pico, apresentando valores bastante próximos entre elas.

No caso das simulações realizadas com as chuvas de Cruz Alta, o comportamento apresentado nos hidrograma é de leve subestimativa. A Figura 5.27 mostra o hidrograma do cenário de bacia 1 e a Figura 5.28 para o cenário de bacia 2, ambos em Cruz Alta.

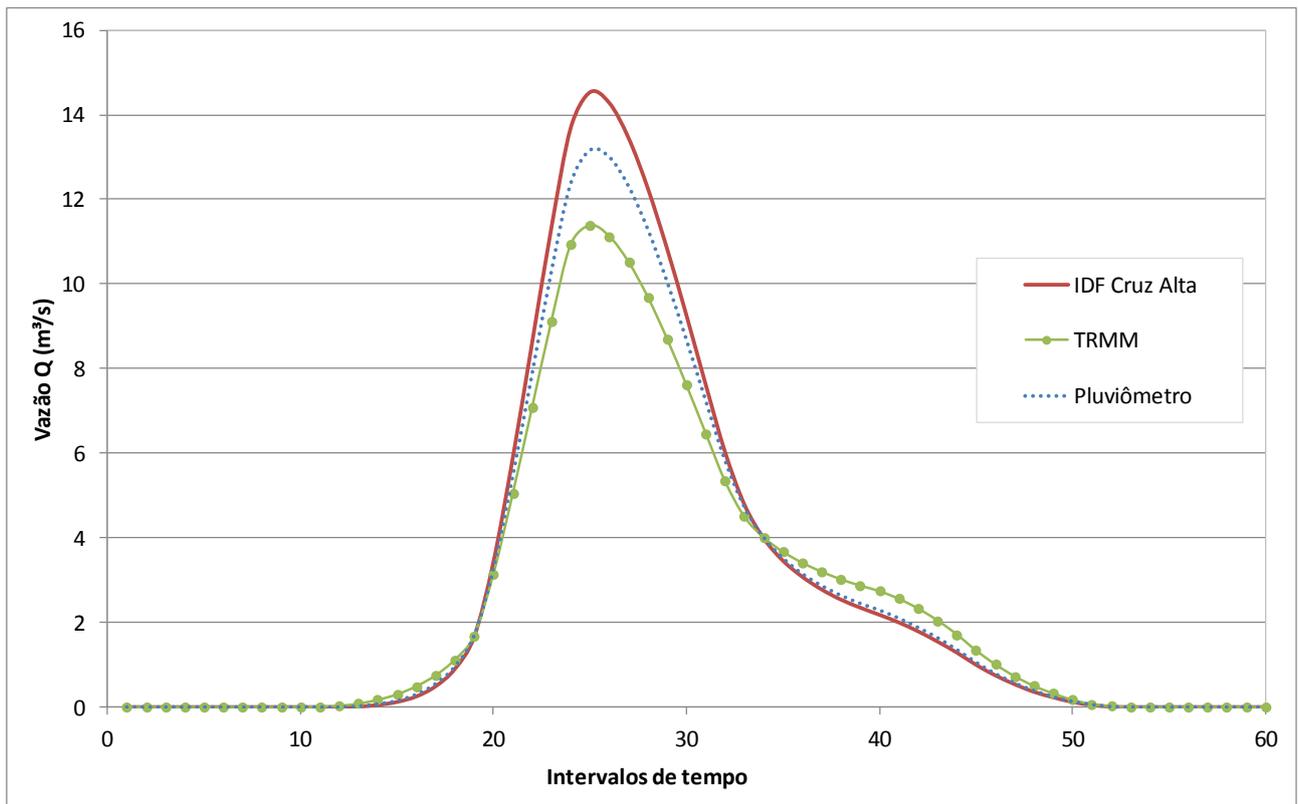


Figura 5.27. Hidrograma de projeto para a cidade de Cruz Alta no cenário de bacia 1.

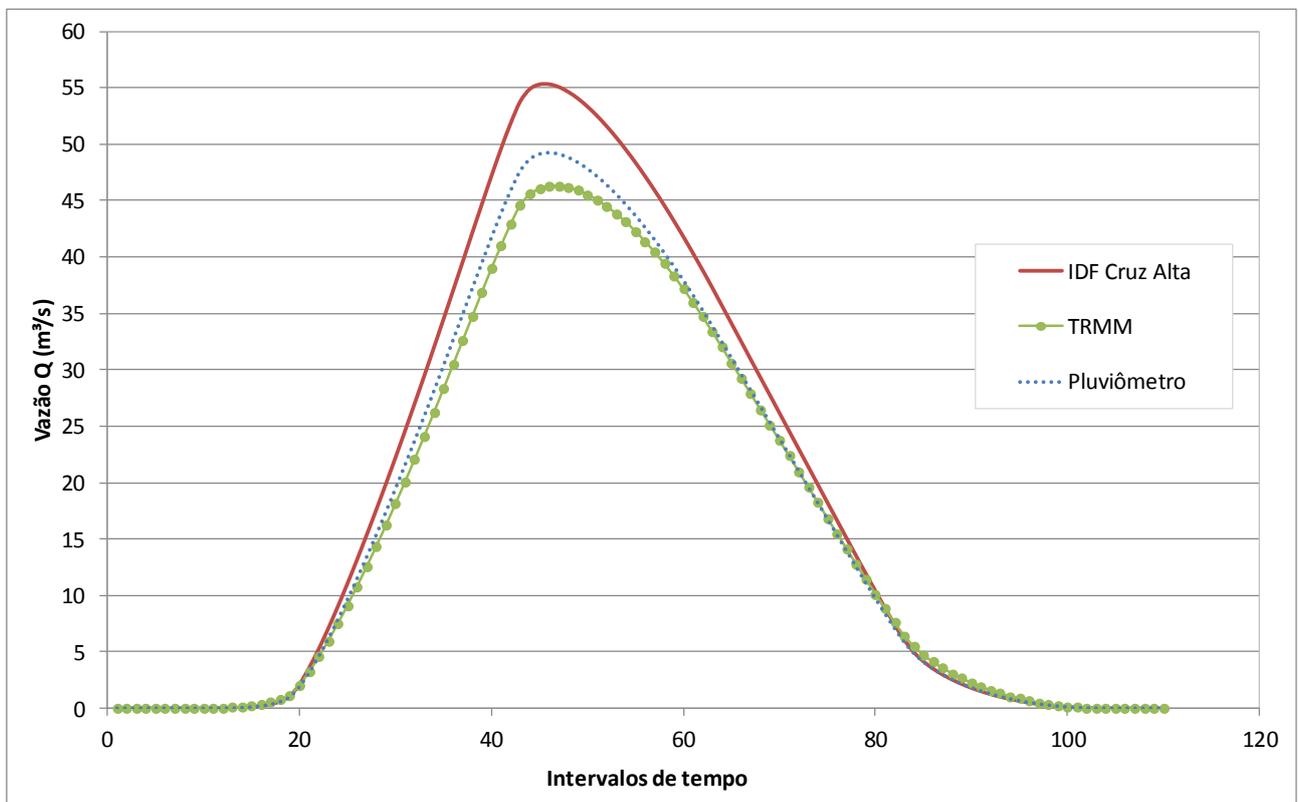


Figura 5.28. Hidrograma de projeto para a cidade de Cruz Alta no cenário de bacia 2.

Conforme mostram os indicadores na Tabela 5.35, o desempenho da precipitação estimada pela desagregação de dados de pluviômetro foi levemente melhor que o da precipitação extraída da IDF do TRMM. No entanto, ambas as metodologias apresentaram valores muito próximos para o cenário de bacia 2, ou seja, para TR igual a 10 anos, sobretudo no que diz respeito ao indicador de volume.

**Tabela 5.35. Resultados das simulações realizadas para Cruz Alta.**

|                                | CENÁRIO BACIA |                |
|--------------------------------|---------------|----------------|
|                                | 1 – TR 5 anos | 2 – TR 10 anos |
| $V_{pfa}$ (mm)                 | 50,8          | 61,8           |
| $V_{plu}$ (mm)                 | 48,1          | 55,5           |
| $V_{TRMM}$ (mm)                | 45,3          | 53,6           |
| $indV_{plu}$                   | -5%           | -10%           |
| $indV_{TRMM}$                  | -11%          | -13%           |
| $Q_{pfa}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 14,5          | 55,3           |
| $Q_{plu}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 13,2          | 49,2           |
| $Q_{TRMM}$ (m <sup>3</sup> /s) | 11,4          | 46,3           |
| $indQ_{plu}$                   | -9%           | -11%           |
| $indQ_{TRMM}$                  | -22%          | -16%           |

Conforme ilustrado na Figura 5.29, no cenário 1 para a cidade de Florianópolis, ambas as metodologias alternativas apresentaram uma superestimativa considerando o indicador de vazão de pico. No entanto, quando considerado o indicador de volume (Tabela 5.36), a metodologia baseada no TRMM superestima em 4% enquanto que a de pluviômetro subestima em 4%. Considerando os valores de  $indV_{plu}$  e  $indV_{TRMM}$  em módulo, ambas as metodologias tiveram a mesma qualidade de precisão, para os dois cenários de bacia considerados.

No caso do cenário 2, o comportamento em termos de vazão de pico se altera, uma vez que ambas as metodologias conseguem boa aproximação, mas, enquanto o TRMM levemente superestima a vazão máxima, o pluviômetro superestima (Figura 5.30). Considerando o módulo de  $indQ_{plu}$  e  $indQ_{TRMM}$ , o desempenho da metodologia de pluviômetro foi um pouco melhor. O indicador de volume escoado manteve o comportamento apresentado no cenário 1.

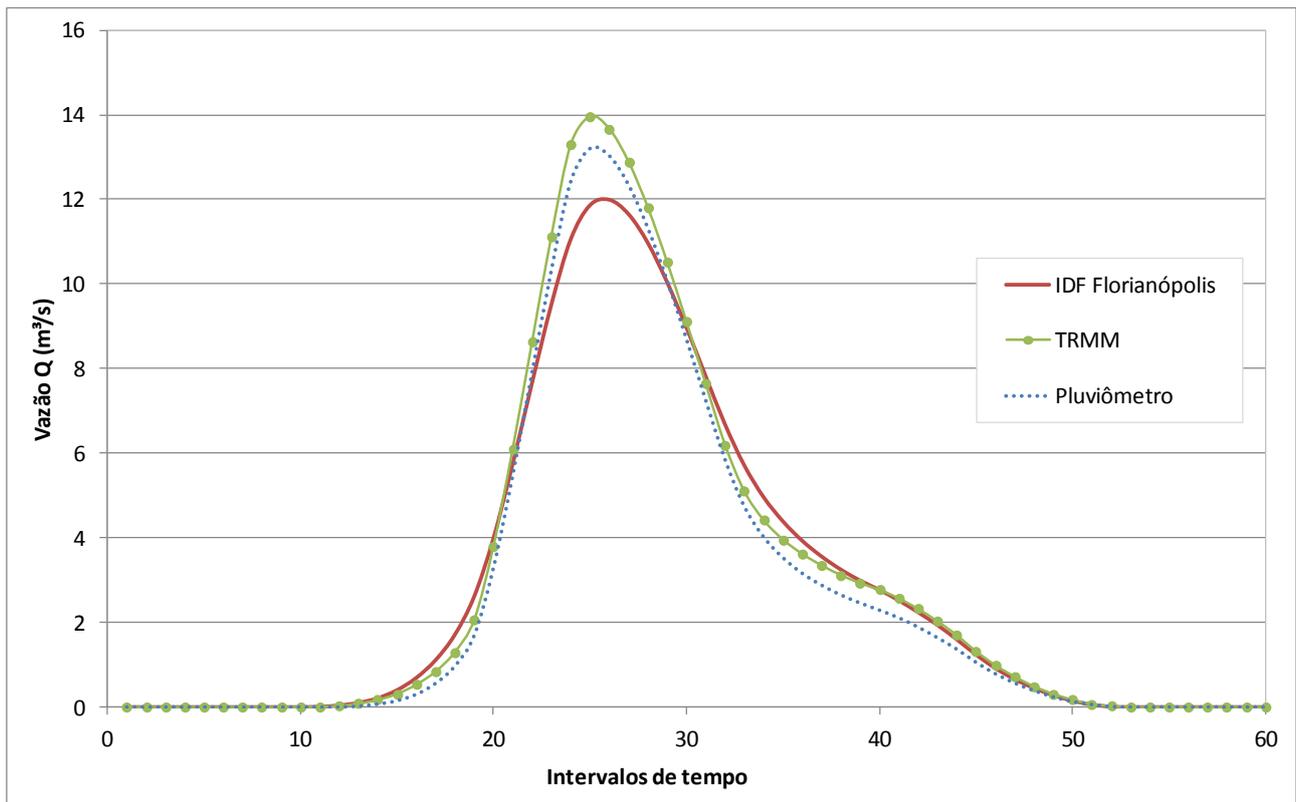
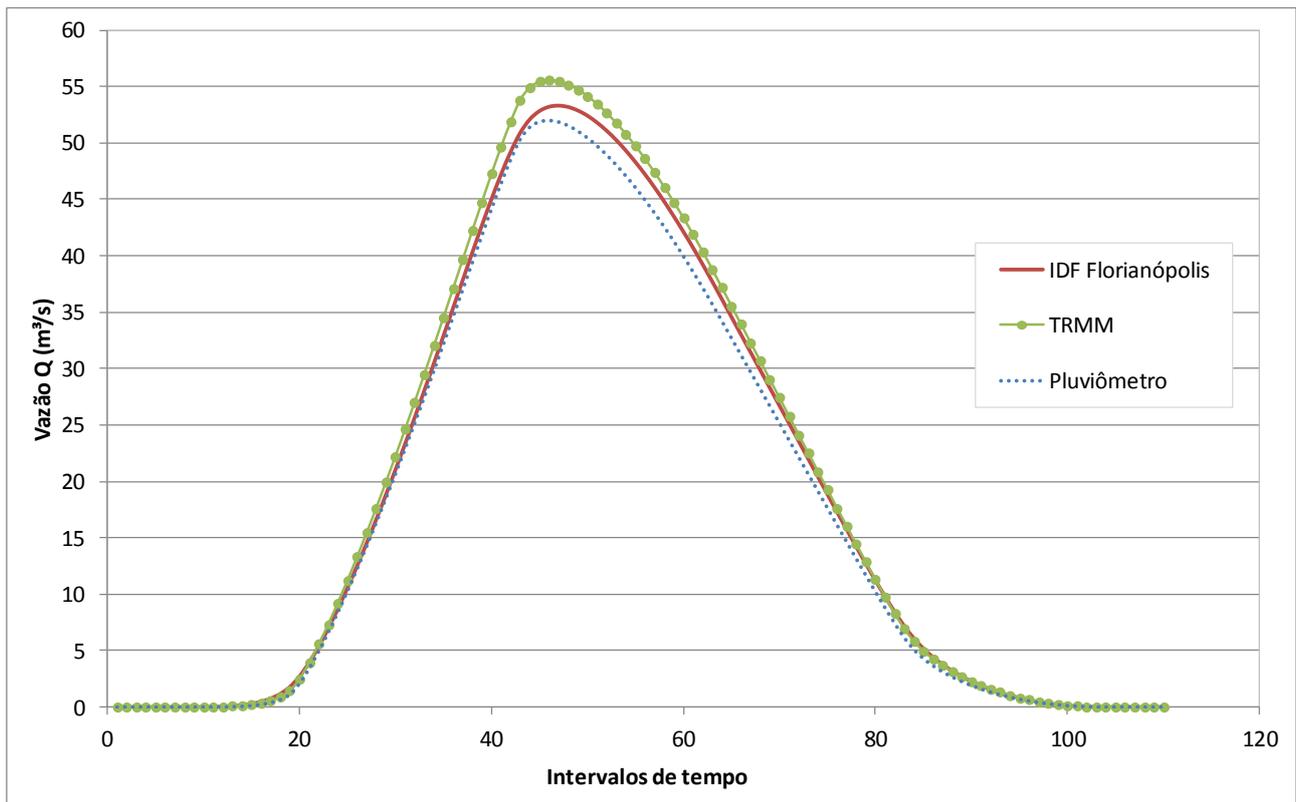


Figura 5.29. Hidrograma de projeto para a cidade de Florianópolis no cenário de bacia 1.

Tabela 5.36. Resultados das simulações realizadas para Florianópolis.

|                                | CENÁRIO BACIA |                |
|--------------------------------|---------------|----------------|
|                                | 1 – TR 5 anos | 2 – TR 10 anos |
| $V_{pfa}$ (mm)                 | 50,5          | 61,2           |
| $V_{plu}$ (mm)                 | 48,2          | 58,6           |
| $V_{TRMM}$ (mm)                | 52,8          | 63,4           |
| $indV_{plu}$                   | -4%           | -4%            |
| $indV_{TRMM}$                  | 4%            | 4%             |
| $Q_{pfa}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 12,0          | 53,3           |
| $Q_{plu}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 13,2          | 52,0           |
| $Q_{TRMM}$ (m <sup>3</sup> /s) | 14,0          | 55,6           |
| $indQ_{plu}$                   | 10%           | -2%            |
| $indQ_{TRMM}$                  | 16%           | 4%             |



**Figura 5.30. Hidrograma de projeto para a cidade de Florianópolis no cenário de bacia 2.**

Para as simulações realizadas em Belo Horizonte, considerando os valores dos indicadores em módulo, para ambos os cenários (Figura 5.31 e Figura 5.32) e indicadores calculados (Tabela 5.37), a metodologia do TRMM teve um melhor desempenho, aproximando-se mais dos valores gerados pela precipitação derivada da IDF de Pfafstetter, embora os gráficos mostrem uma tendência leve a subestimativa das vazões de pico e dos volumes escoados. Esta subestimativa estaria indo contra a segurança no caso de se projetar estruturas de drenagem com base em simulações realizadas com precipitação oriunda do TRMM.

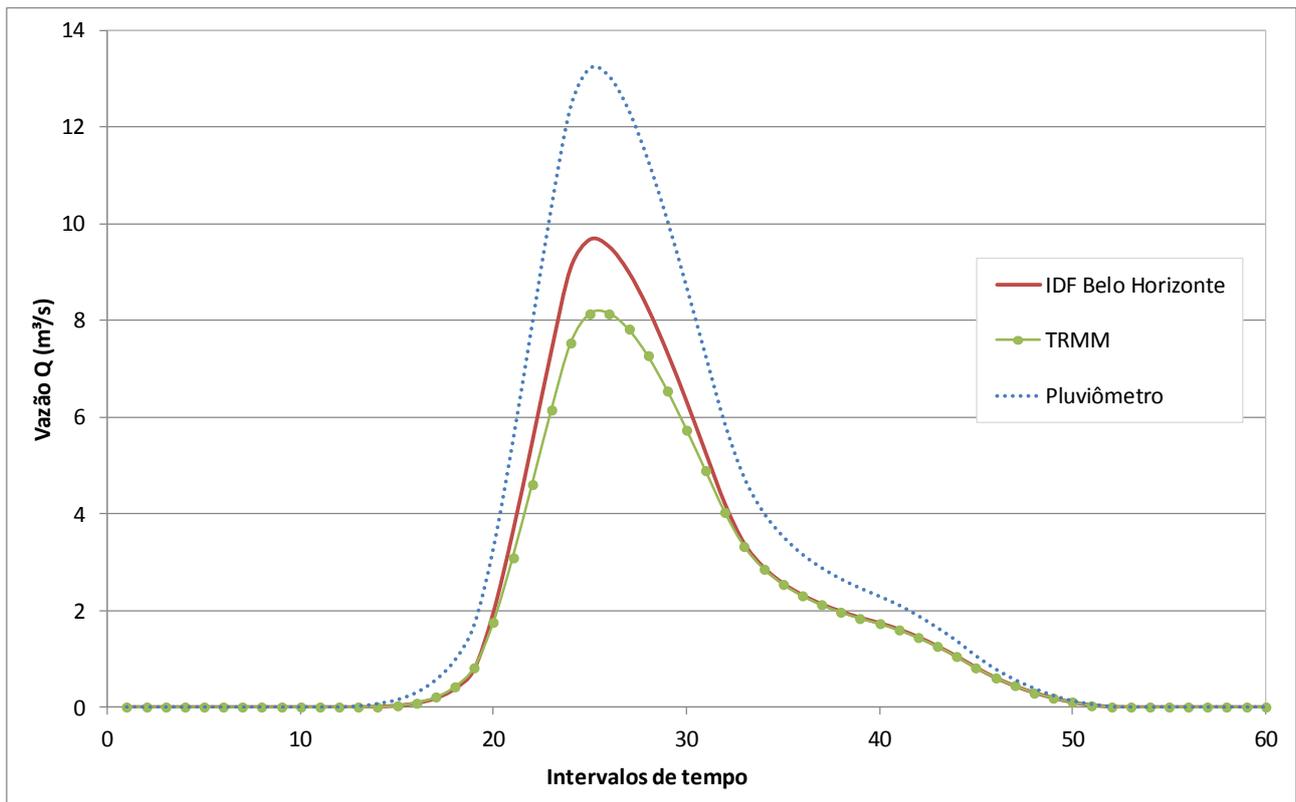


Figura 5.31. Hidrograma de projeto para a cidade de Belo Horizonte no cenário de bacia 1.

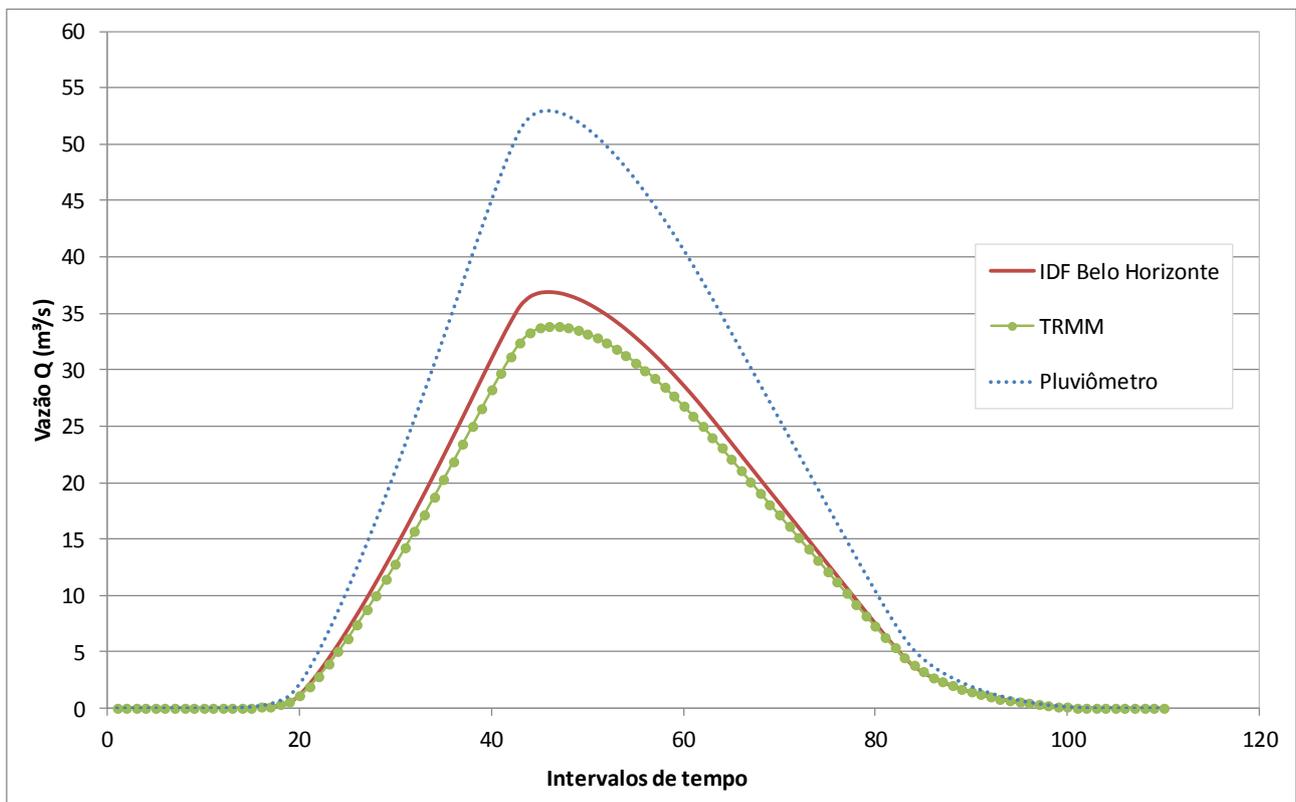


Figura 5.32. Hidrograma de projeto para a cidade de Belo Horizonte no cenário de bacia 2.

**Tabela 5.37. Resultados das simulações realizadas para Belo Horizonte.**

| CENÁRIO BACIA   |               |                |
|---|---------------|----------------|
|   | 1 – TR 5 anos | 2 – TR 10 anos |
| <b><math>V_{\text{pfaf}}</math> (mm)</b>              | 34,5          | 41,6           |
| <b><math>V_{\text{plu}}</math> (mm)</b>               | 48,2          | 59,7           |
| <b><math>V_{\text{TRMM}}</math> (mm)</b>              | 31,1          | 38,6           |
| <b><math>\text{ind}V_{\text{plu}}</math></b>          | 40%           | 44%            |
| <b><math>\text{ind}V_{\text{TRMM}}</math></b>         | -10%          | -7%            |
| <b><math>Q_{\text{pfaf}}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b> | 9,7           | 36,9           |
| <b><math>Q_{\text{plu}}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>  | 13,2          | 53,0           |
| <b><math>Q_{\text{TRMM}}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b> | 8,1           | 33,9           |
| <b><math>\text{ind}Q_{\text{plu}}</math></b>          | 36%           | 44%            |
| <b><math>\text{ind}Q_{\text{TRMM}}</math></b>         | -16%          | -8%            |

No caso de Teresina, de maneira geral, os indicadores apontam para um melhor desempenho da metodologia que utiliza dados do TRMM para determinar a chuva de projeto (Tabela 5.38). Percebe-se uma queda no desempenho do TRMM na simulação do cenário 2, e uma tendência de superestimativa da vazão de pico e do volume escoado em ambos os cenários, indicado pelo valor positivo dos indicadores, e que pode ser visualizada nos gráficos da Figura 5.33 e Figura 5.34.

**Tabela 5.38. Resultados das simulações realizadas para Teresina.**

| CENÁRIO BACIA   |               |                |
|---|---------------|----------------|
|   | 1 – TR 5 anos | 2 – TR 10 anos |
| <b><math>V_{\text{pfaf}}</math> (mm)</b>              | 52,8          | 63,2           |
| <b><math>V_{\text{plu}}</math> (mm)</b>               | 41,5          | 52,0           |
| <b><math>V_{\text{TRMM}}</math> (mm)</b>              | 55,8          | 71,1           |
| <b><math>\text{ind}V_{\text{plu}}</math></b>          | -21%          | -18%           |
| <b><math>\text{ind}V_{\text{TRMM}}</math></b>         | 6%            | 13%            |
| <b><math>Q_{\text{pfaf}}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b> | 14,9          | 56,3           |
| <b><math>Q_{\text{plu}}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>  | 11,3          | 46,1           |
| <b><math>Q_{\text{TRMM}}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b> | 16,3          | 64,7           |
| <b><math>\text{ind}Q_{\text{plu}}</math></b>          | -24%          | -18%           |
| <b><math>\text{ind}Q_{\text{TRMM}}</math></b>         | 9%            | 15%            |

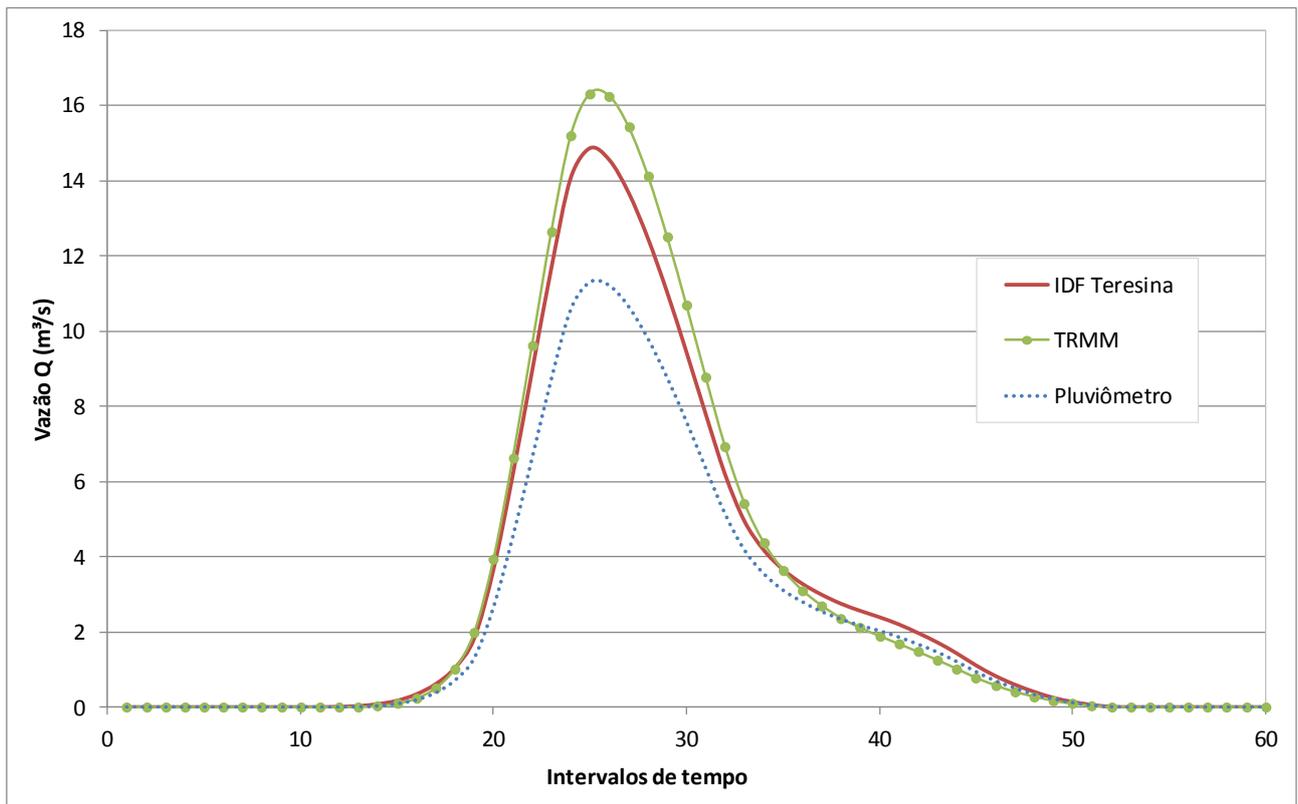


Figura 5.33. Hidrograma de projeto para a cidade de Teresina no cenário de bacia 1.

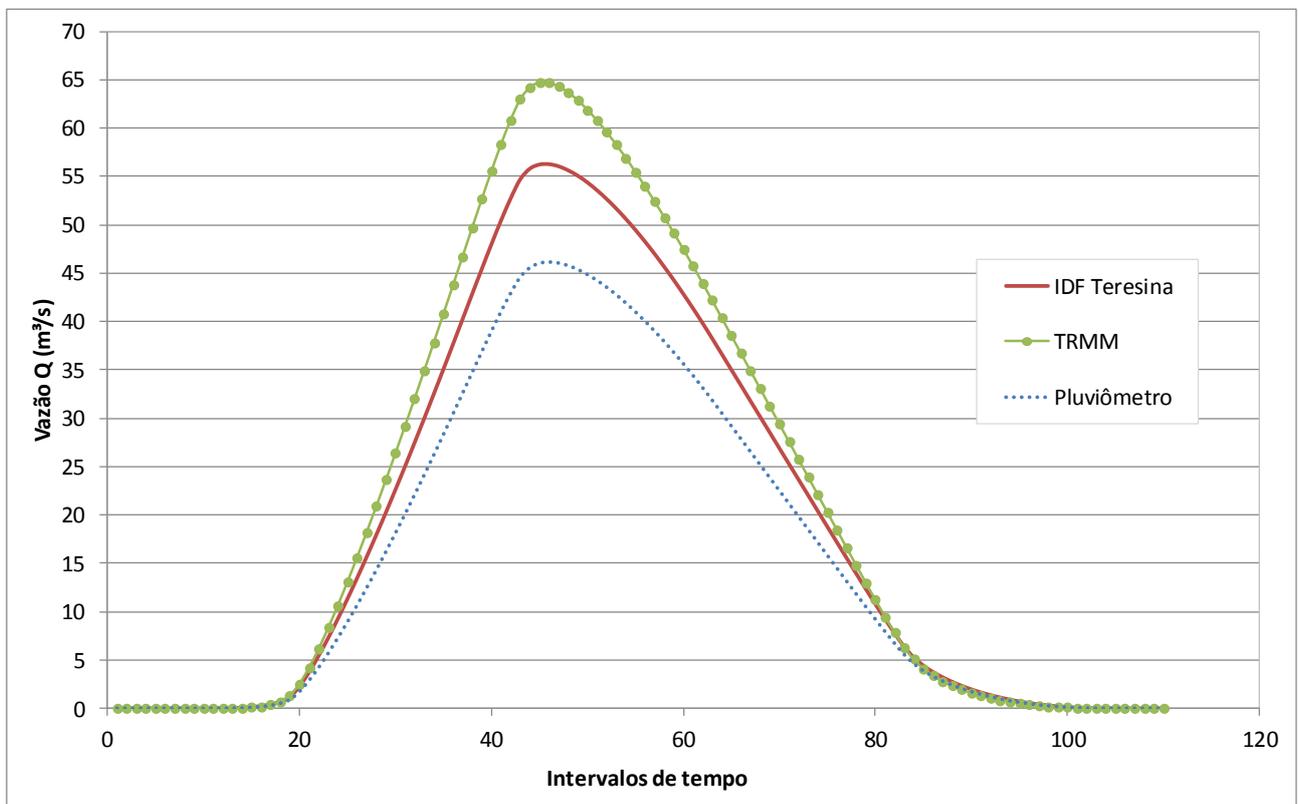


Figura 5.34. Hidrograma de projeto para a cidade de Teresina no cenário de bacia 2.

Finalmente, as simulações realizadas para os cenários hipotéticos de bacias com a precipitação da cidade de Belém apontam um péssimo desempenho do TRMM em comparação com a metodologia de desagregação do pluviômetro para este local. Este desempenho se reflete nos valores dos indicadores, os quais apontam para uma estimativa de vazão de pico e volume escoado de mais que o dobro dos valores resultantes da simulação com a precipitação obtida da IDF existente para o local (Tabela 5.39).

**Tabela 5.39. Resultados das simulações realizadas para Belém.**

|                                | CENÁRIO BACIA |                |
|--------------------------------|---------------|----------------|
|                                | 1 – TR 5 anos | 2 – TR 10 anos |
| $V_{pfa}$ (mm)                 | 43,8          | 51,6           |
| $V_{plu}$ (mm)                 | 48,0          | 53,5           |
| $V_{TRMM}$ (mm)                | 90,0          | 107,3          |
| $indV_{plu}$                   | 10%           | 4%             |
| $indV_{TRMM}$                  | 106%          | 108%           |
| $Q_{pfa}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 11,8          | 45,6           |
| $Q_{plu}$ (m <sup>3</sup> /s)  | 13,1          | 47,5           |
| $Q_{TRMM}$ (m <sup>3</sup> /s) | 25,0          | 95,4           |
| $indQ_{plu}$                   | 11%           | 4%             |
| $indQ_{TRMM}$                  | 112%          | 109%           |

Em contrapartida, pode-se observar na Figura 5.35 e na Figura 5.36 o bom desempenho nas simulações da metodologia alternativa de estabelecimento da IDF com dados de pluviômetro desagregado em Belém.

Os arquivos de saída do programa *IPHS1* contendo os resultados detalhados das simulações precipitação-vazão realizadas são parte integrante deste trabalho, estando localizados no Anexo Digital (Anexo 2).

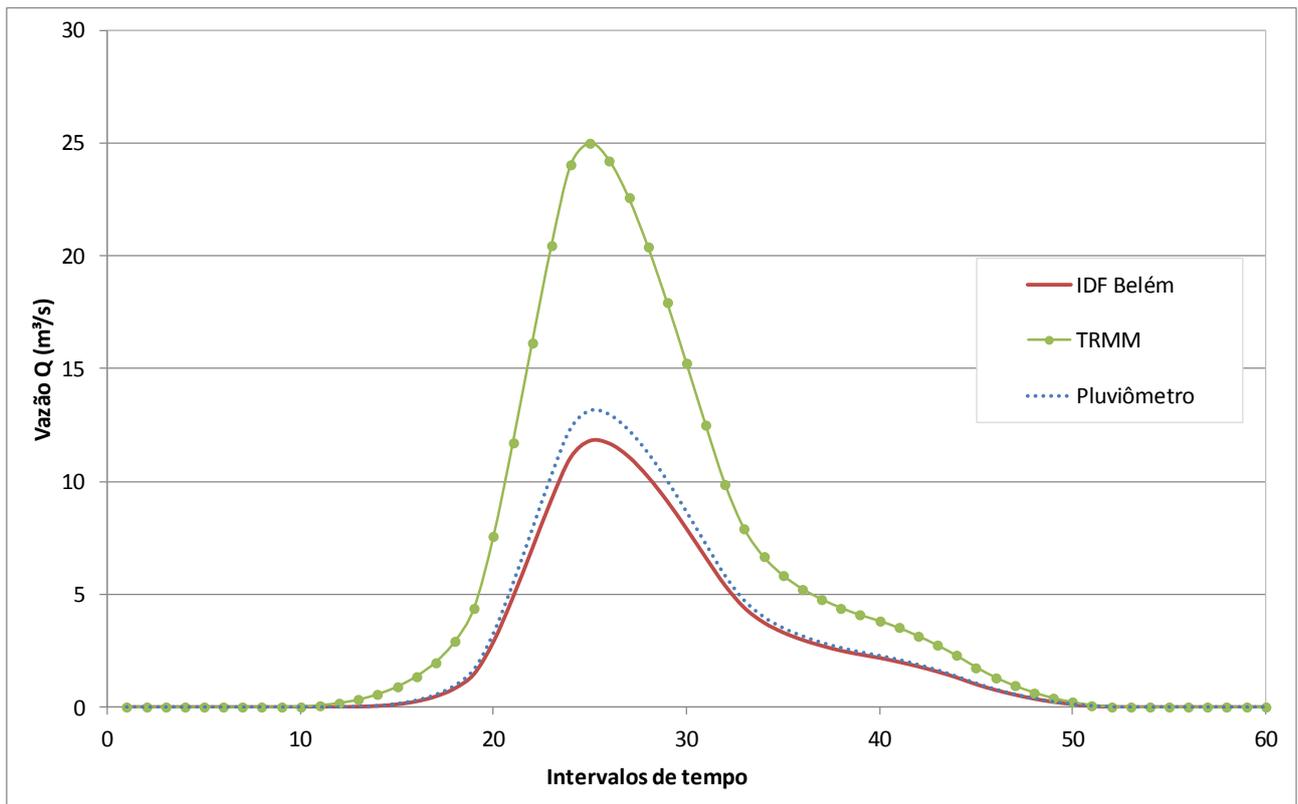


Figura 5.35. Hidrograma de projeto para a cidade de Belém no cenário de bacia 1.

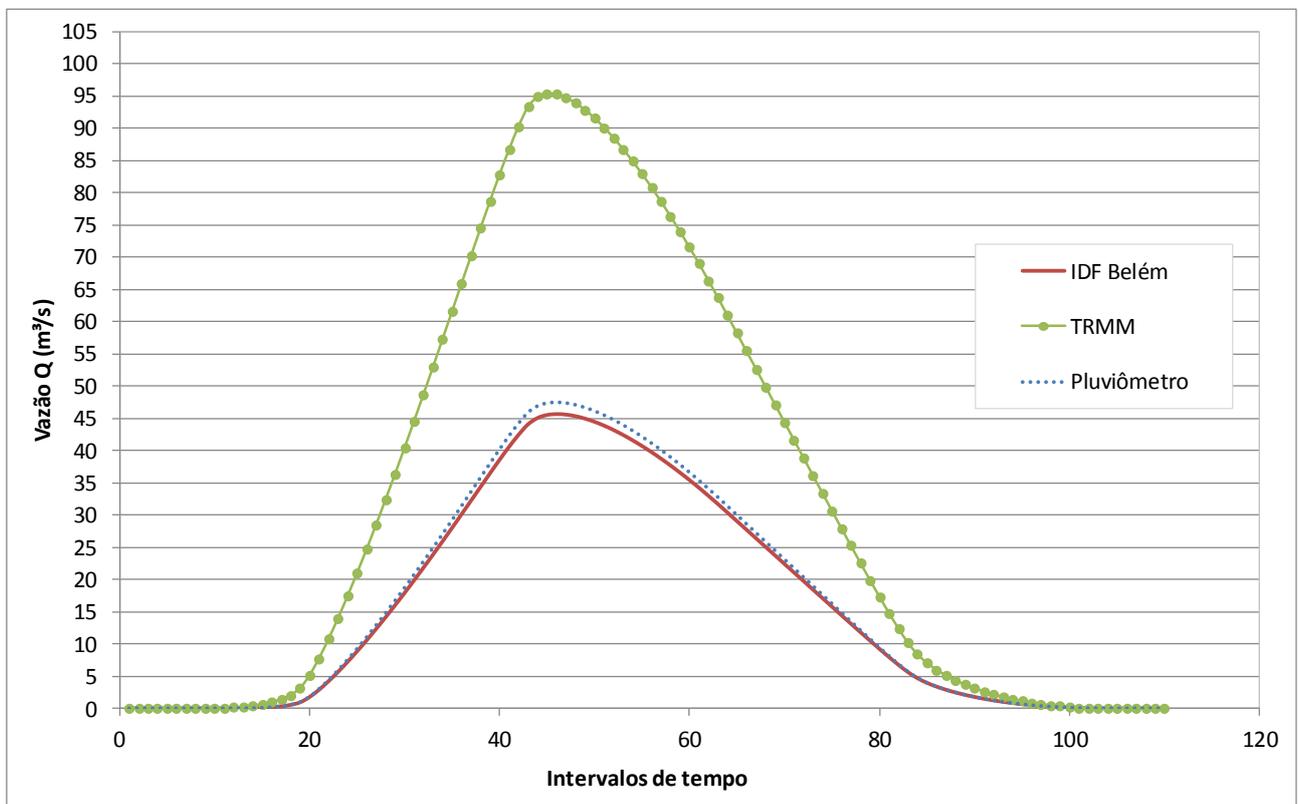


Figura 5.36. Hidrograma de projeto para a cidade de Belém no cenário de bacia 2.

## **5.5 Estimativa de coeficientes de desagregação espacializados**

A Figura 5.37 mostra o resultado da interpolação do coeficiente de intensidade que relaciona a precipitação de 3h e de 24h, com tempo de recorrência de 5 anos, em comparação com as isozonas propostas por Torrico (1974).

No mapa das isozonas de Torrico, as letras A, B e C correspondem a valores baixos de coeficiente de intensidade, enquanto que as letras H, G e F correspondem às zonas com os maiores coeficientes. A comparação entre os mapas da Figura 5.37 é interessante, pois mostra grandes similaridades entre as regiões homogêneas ou isozonas. Há, por exemplo, uma região de coeficientes mais altos no semiárido nordestino e no oeste da Amazônia. Por outro lado, a região sul de modo geral, o Distrito Federal, o litoral nordestino e o noroeste do Pará apresentam valores mais baixos, o que condiz de forma geral com as isozonas de Torrico. Evidentemente, os valores do coeficiente diferem, até porque são relações entre durações diferentes, porém o padrão geral sobre o território brasileiro parece ser similar.

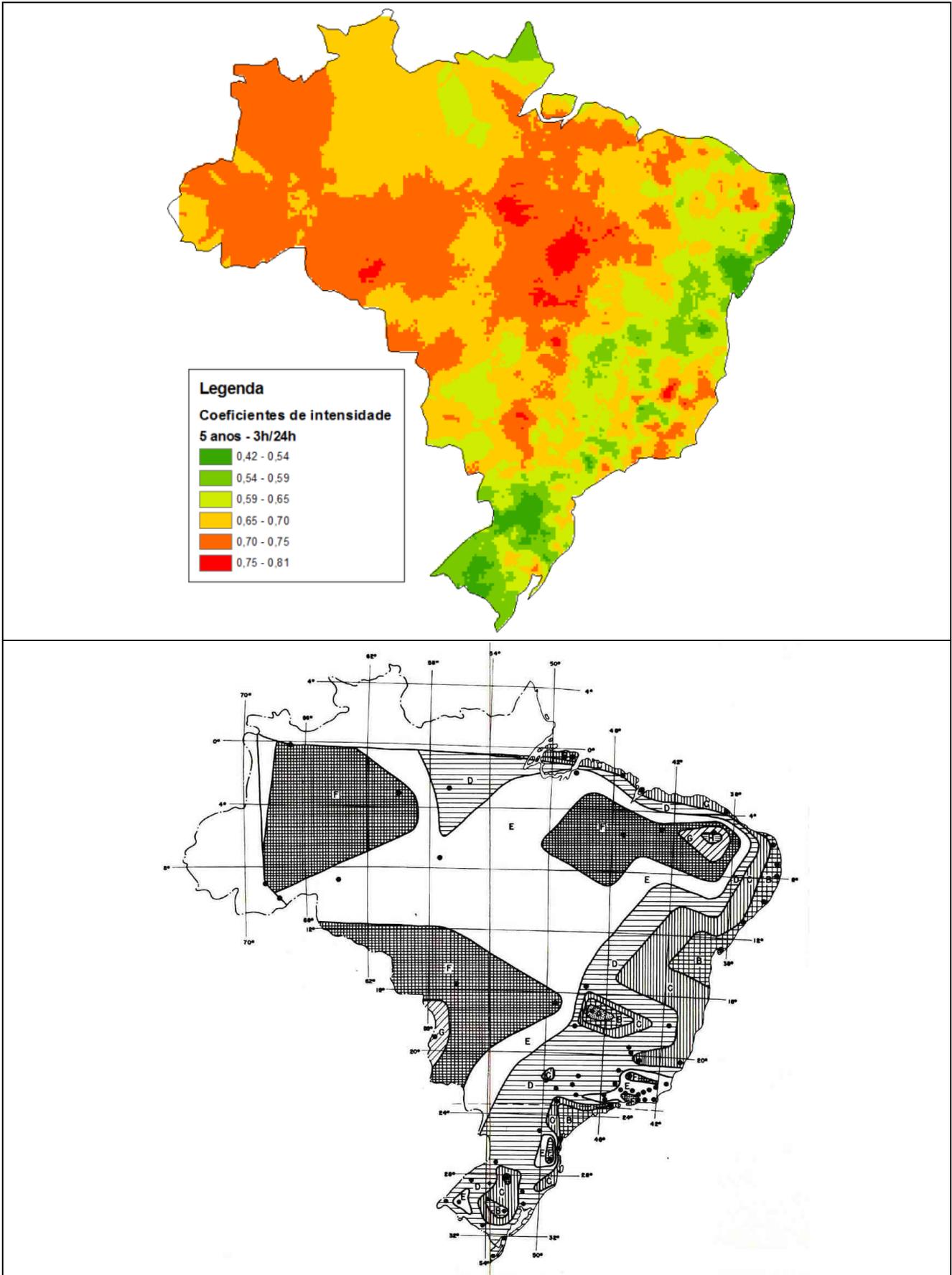


Figura 5.37. Comparação entre o coeficiente de intensidade de 3h/24h, TR= 5 anos e as isozonas de Torricio.

O mapa de coeficientes de intensidade espacializados foi gerado também para as relações entre a chuva de 3 horas e de 12 horas, com TR de 5 anos (Figura 5.38). As mesmas relações foram calculadas para as chuvas máximas com tempo de retorno de 100 anos (Figura 5.39 e Figura 5.40). Pode-se observar que os padrões gerais são semelhantes. Os *rasters*, em formato TIFF, dos coeficientes de desagregação de 24h para 3h e de 12h para 3h, para 5 anos de tempo de retorno, estão disponíveis no Anexo 2.

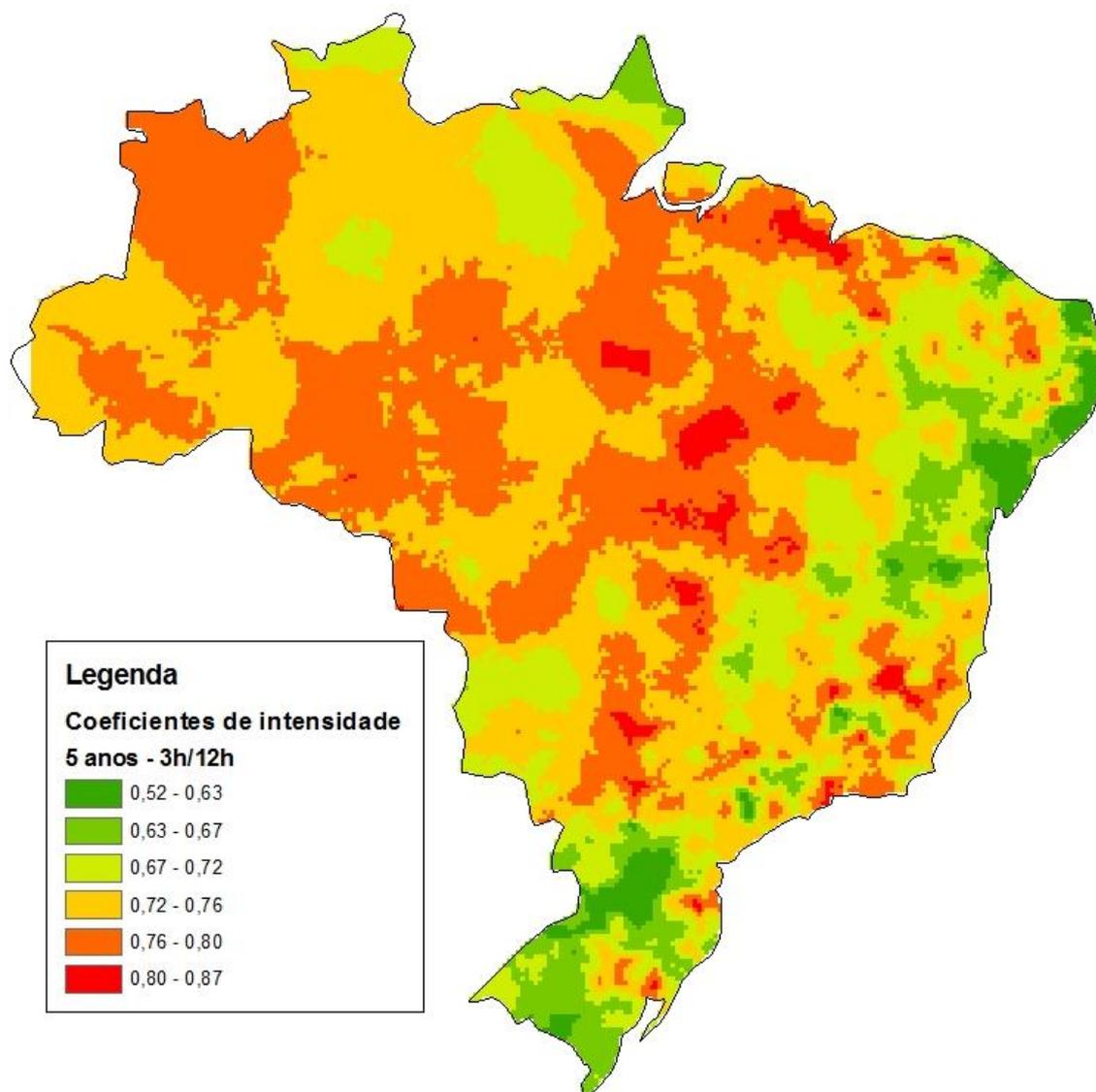


Figura 5.38. Relação entre as precipitações máximas de 3 horas e de 12 horas, para TR = 5 anos.

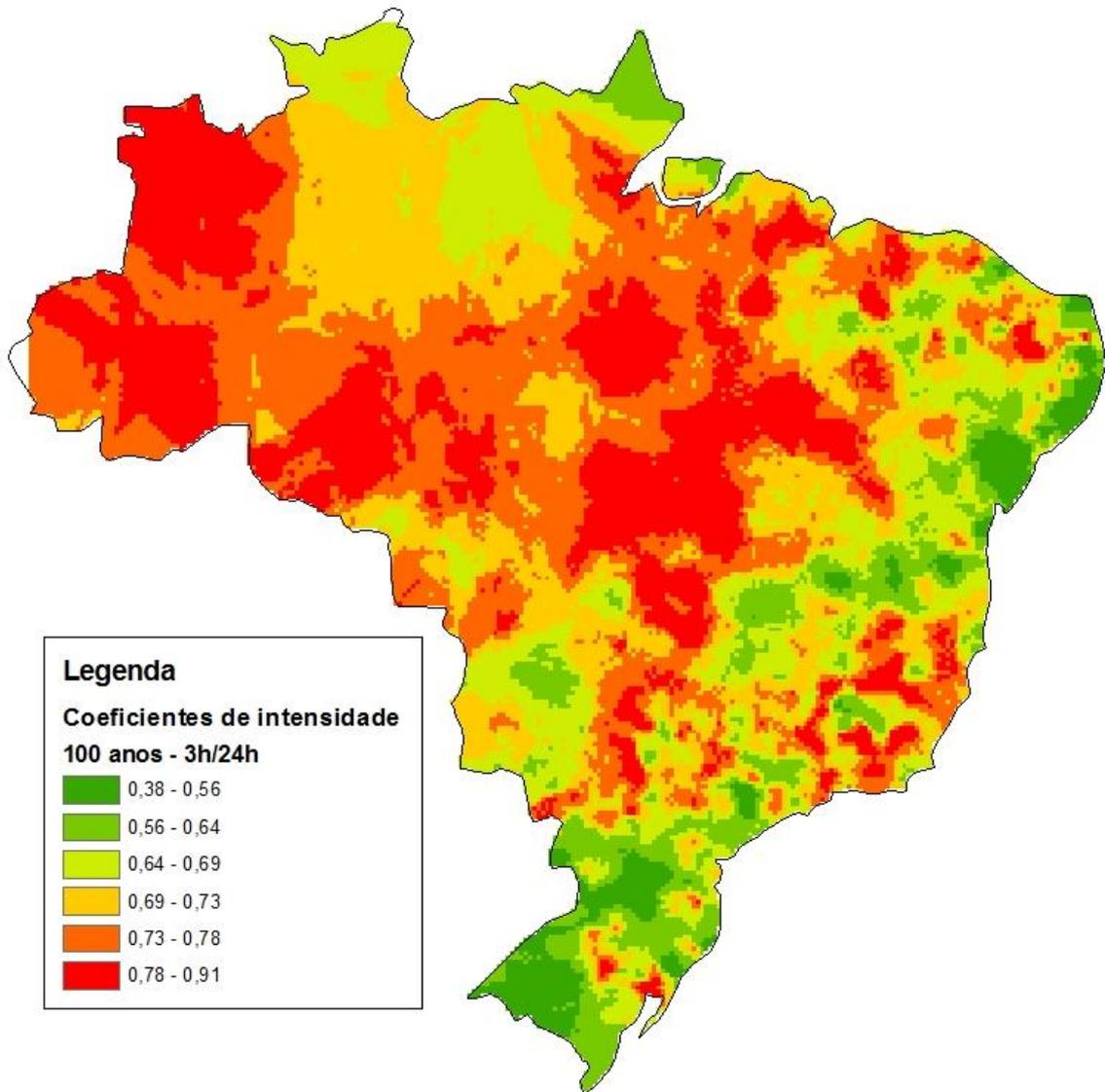


Figura 5.39. Relação entre as precipitações de 3h e de 24h, para TR = 100 anos.

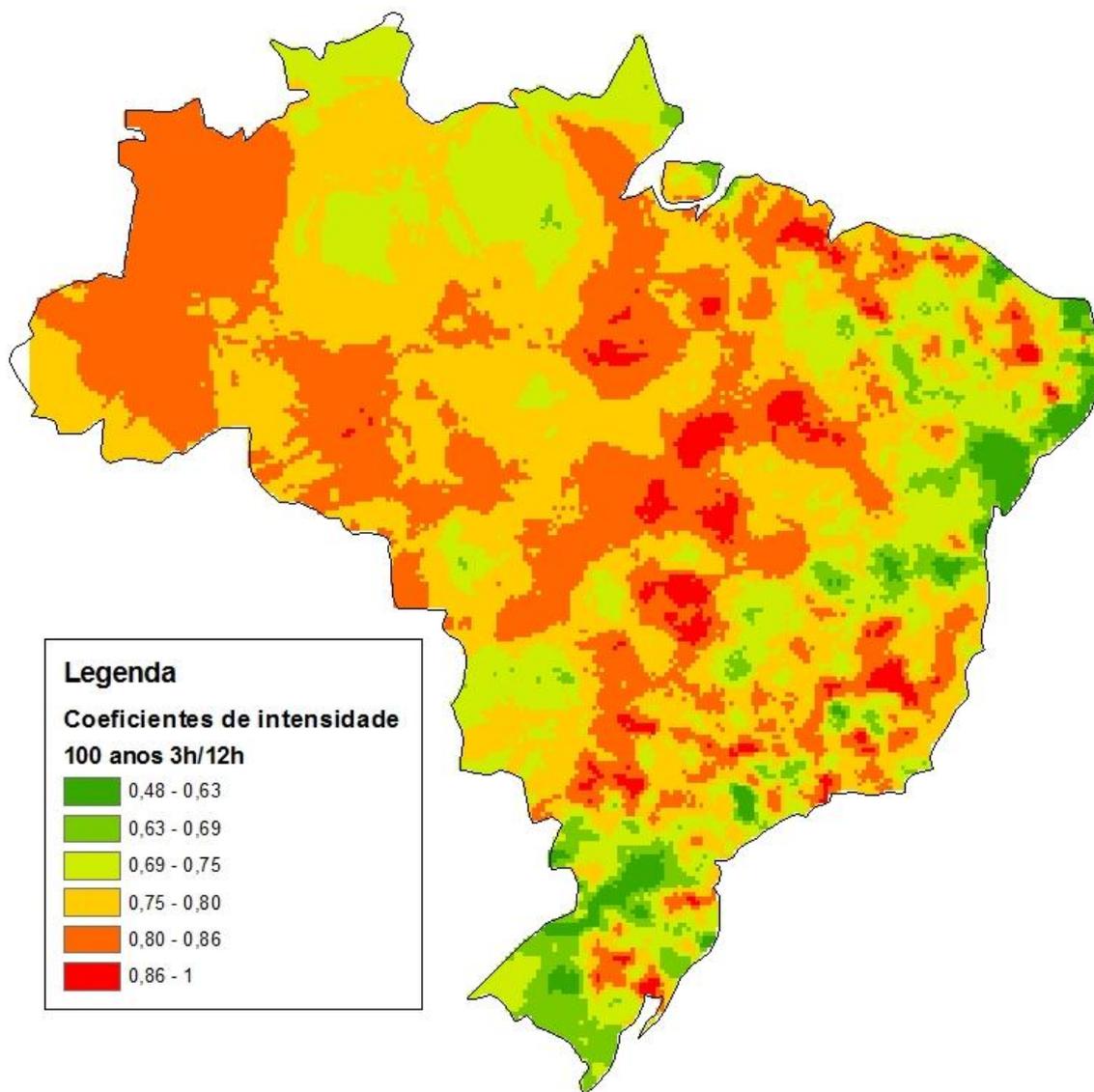


Figura 5.40. Relação entre as precipitações máximas de 3 horas e de 12 horas, para TR = 100 anos.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para o estabelecimento de conclusões sobre esta dissertação, são retomados os objetivos postos no início do trabalho e verificado o atingimento de cada um deles.

### 6.1 Estabelecer curvas de intensidade-duração-frequência a partir de estimativas de precipitação por satélite sobre áreas urbanas brasileiras

As estimativas de precipitação do satélite TRMM podem ser obtidas de forma gratuita e relativamente rápida na *internet*. O tratamento dos dados é similar ao de dados pluviográficos, e foi possível ajustar a distribuição estatística de Gumbel aos máximos anuais da série de dados.

Foi gerado um banco de dados com parâmetros de curvas IDF para todas as sedes municipais brasileiras, que é uma importante ferramenta para a elaboração de projetos, tais como condutos e bacias de retenção, e de planos de drenagem urbana. Vale salientar que a legislação em vigor exige a elaboração destes planos, que, no entanto, ainda se encontram longe de ser realidade na maior parte das cidades brasileiras, de forma que há grande demanda pelo tipo de informação disponibilizada.

O banco de dados em formato *shapefile* está disponível para download a partir do sítio [www.ufsm.br/ecotecnologias](http://www.ufsm.br/ecotecnologias), e pode ser obtido também através de contato direto com a autora deste trabalho<sup>3</sup>. Pretende-se, ainda, atualizar o banco de dados ano a ano, de forma a incorporar as precipitações máximas estimadas pelo TRMM no ano anterior.

Cabe salientar apenas que, na utilização deste banco de dados em projetos e planos futuros, os usuários devem ter em mente as limitações e incertezas inerentes às curvas IDF geradas, já mencionadas ao longo deste trabalho.

---

<sup>3</sup> Através do endereço eletrônico [lidi\\_sg@hotmail.com](mailto:lidi_sg@hotmail.com).

## **6.2 Avaliar a adequação das curvas geradas em comparação com curvas IDF existentes**

No caso de Brasília, onde foi possível realizar a comparação para períodos coincidentes com dados de pluviógrafo, pluviômetro e TRMM, entre os anos de 1998 e 2008, percebeu-se diferenças graficamente destacadas entre as metodologias alternativas e as chuvas de pluviógrafo. Tanto as precipitações estimadas pelo TRMM quanto pela desagregação de pluviômetro subestimaram as precipitações de pluviógrafo.

Adicionalmente, em algumas localidades específicas, as curvas IDF geradas a partir do TRMM foram comparadas com relações IDF clássicas, como as mencionadas em Bertoni e Tucci (1993) e as obtidas de Pfafstetter (1957).

Na maior parte dos casos, houve diferenças importantes entre as precipitações estimadas com base nas relações IDF estabelecidas com dados do TRMM e as estimadas a partir das relações IDF clássicas. Em especial no sul do Brasil, as relações IDF do TRMM superestimaram as intensidades máximas preditas pelas curvas estabelecidas com dados de pluviógrafo. Este resultado é, até certo ponto, surpreendente, uma vez que a precipitação do TRMM é uma média ponderada de um pixel de cerca de 625 km<sup>2</sup>, enquanto que as relações IDF clássicas são obtidas de dados pontuais. Esperava-se, portanto, que o TRMM amortecesse picos de intensidade mais alta, e eventualmente subestimasse a intensidade em comparação com os dados pluviográficos. Das 19 relações IDF investigadas, houve uma superestimativa evidente nas cidades de Porto Alegre (para as três relações IDF analisadas), Florianópolis, São Paulo, Belém e Fortaleza. Apenas nas cidades do Rio de Janeiro e de Formosa (GO), pôde-se constatar que o TRMM evidentemente subestimou as chuvas máximas. Nas demais 10 cidades, a IDF do TRMM aproximou-se relativamente bem da IDF clássica existente. As precipitações estimadas com base no TRMM e na IDF de Brasília estabelecida com base na série longa de dados do pluviógrafo apresentaram boa aderência. Embora seja recomendável uma investigação estatística mais rigorosa, de forma a verificar a significância das diferenças, tal resultado pode ser considerado satisfatório para a validação da metodologia proposta.

Este trabalho buscou investigar preliminarmente a possibilidade de as diferenças verificadas serem devidas às diferenças no período de medição, uma vez que a maioria das equações IDF empregadas neste trabalho foram obtidas com séries de pluviógrafo até as décadas

de 1950 e 1960, enquanto o TRMM disponibiliza dados de 1998 até o presente. Foi feito um teste estatístico dos dados de pluviógrafo disponíveis para Brasília, dividindo-os em dois períodos: até 1998 e a partir de 1998 (este segundo período coincidente com a disponibilidade de dados do TRMM). O teste estatístico não rejeitou a hipótese de que as duas partes da série apresentam variâncias estatisticamente iguais para todas as durações analisadas, e rejeitou a hipótese de que as médias dos dois períodos sejam estatisticamente iguais apenas para as maiores durações.

Desta maneira, os resultados obtidos sugerem que, no caso de Brasília, as diferenças observadas entre o TRMM e o pluviógrafo decorrem das limitações de cada estimativa, em especial das incertezas relacionadas à estimativa de precipitação por satélite, e não de possíveis não-estacionaridades na precipitação máxima.

Uma possível explicação para o fato do TRMM não conseguir captar as chuvas mais intensas no período mais recente detectadas pelo pluviógrafo é que a estimativa do TRMM representa valores espacializados para áreas de tamanho aproximado de 625 km<sup>2</sup> (em vista do tamanho do *pixel* de 0,25° x 0,25°), enquanto que o pluviógrafo faz registros pontuais, o que poderia ter amenizado os picos das chuvas intensas.

Evidentemente, não podem ser tiradas conclusões mais aprofundadas da análise realizada em apenas uma localidade. No entanto, este trabalho não teve acesso a dados pluviográficos recentes em outros locais, de forma que não foi possível ampliar a análise.

Com relação à análise estatística realizada para verificar se a amostra do TRMM não representa um período tendencioso de chuvas extremas no posto pluviográfico considerado, em apenas um local é pouco conclusiva, em especial porque no caso de Brasília as diferenças entre as relações IDF não foram tão marcantes como em outras localidades. Entende-se que esta análise deva ser aprofundada em futuros trabalhos, não tendo sido esgotada nessa pesquisa. Novamente, ressalta-se que não foi possível repetir esta análise estatística para os demais locais considerados neste trabalho, uma vez que não se teve acesso às séries pluviográficas que deram origem às relações IDF clássicas consideradas.

Sendo assim, acredita-se que as diferenças entre as curvas IDF do TRMM e de pluviógrafos devem-se principalmente à própria estimativa de precipitação por satélite, que ainda carrega grande grau de incerteza quando analisada em pequenas áreas e curtos intervalos de tempo. Além disso, a pequena extensão das séries do TRMM não permitem a aplicação de testes estatísticos

mais robustos para a verificação de tendenciosidade das estimativas. Por estas razões, as curvas geradas neste trabalho devem ser usadas com cautela.

Recomenda-se uma investigação estatística mais aprofundada, de forma a determinar a significância estatística das diferenças verificadas entre o TRMM e a verdade de campo.

Adicionalmente, recomenda-se a realização de uma análise do comportamento das precipitações ao longo do tempo em locais que apresentem séries extensas, a fim de verificar se existe uma tendência de os anos recentes serem mais chuvosos que períodos anteriores nos locais onde o TRMM apresentou superestimativa, ou uma tendência contrária onde houve subestimativa.

### **6.3 Avaliar a adequação das curvas geradas em comparação com outra metodologia de estimativa das relações IDF utilizada em locais sem dados pluviográficos**

Investigou-se se as relações IDF do TRMM podem ser usadas em situações práticas de projeto ou planejamento, quando não há dados pluviográficos próximos. Para tanto, as relações foram comparadas com aquelas obtidas de uma metodologia clássica utilizada em locais sem dados, que é a desagregação de dados pluviométricos através de coeficientes de desagregação fixos. Esta comparação foi feita através de indicadores, que relacionam a vazão de pico e o volume escoado por uma chuva de projeto em uma bacia hipotética. Entende-se que, quanto mais próximo de zero for o valor do indicador, mais confiável é a metodologia, no sentido de ser mais próxima da estimativa com base em pluviógrafos (IDF clássica).

Esta investigação foi feita em seis cidades, de acordo com a existência de pluviômetros próximos, que permitissem a utilização da metodologia alternativa. No caso de Brasília, único local onde a comparação foi realizada com curvas IDF estabelecidas a partir de dados de período coincidente (TRMM, pluviógrafo e pluviômetro entre 1998-2008), as metodologias consideradas alternativas ao emprego de dados de pluviógrafo claramente subestimaram os volumes escoados e as vazões máximas para os eventos simulados com precipitações de 5 e 10 anos de tempo de retorno, conforme detectaram os indicadores. No entanto, as metodologias alternativas apresentaram valores bastante próximos entre elas.

Nas cidades de Cruz Alta e Belém, os indicadores da relação IDF do TRMM deram valores muito altos, e a metodologia alternativa de desagregação pluviométrica deu resultados claramente melhores. Em especial em Belém, o uso das relações IDF estabelecida a partir de dados do TRMM levaria a projetos superdimensionados, atentando contra a economicidade.

Já em Teresina e Belo Horizonte, os indicadores mostraram que seria mais interessante utilizar as relações IDF de TRMM do que a metodologia alternativa.

Em Florianópolis, os resultados dos indicadores de volume em módulo levam a um empate. No entanto, em valores absolutos, o TRMM levou a superestimativa, portanto, em favor da segurança. Neste caso, os indicadores propostos não capturam de fato qual a melhor metodologia, visto que acarreta uma curva de compromisso entre custo e segurança que cabe ao projetista avaliar.

Apesar do resultado relativamente bom em Florianópolis, os resultados obtidos sugerem que há grandes incertezas no uso das relações IDF determinadas com base nos dados de TRMM na região sul. Nesta região, quando há ausência de dados, deve-se dar preferência à metodologia de desagregação de dados pluviométricos. Isto pode estar relacionado ao fato de que o TRMM tem melhor desempenho em regiões de precipitação convectiva, o que já foi apontado por Collischonn (2006), de forma que as incertezas aumentam com o aumento da latitude.

Por outro lado, o bom resultado em Teresina sinaliza que, possivelmente nas regiões tropicais as relações IDF geradas a partir de dados do TRMM podem ser uma alternativa interessante quando da ausência de dados. Evidentemente, para se ter uma generalização, tal análise deveria ser repetida em outras localidades. Porém, a proximidade com a precipitação obtida da IDF existente em Aracaju, Manaus, Rio Branco e Porto Velho sinalizam para esta conclusão.

Observou-se que os indicadores propostos aqui são válidos apenas para comparações quando há sub ou superestimativa em ambas as metodologias. Na situação ocorrida em Belo Horizonte, por exemplo, em que uma metodologia levou a um indicador positivo e outra a um negativo, o indicador não captura de fato qual a melhor metodologia, pelo compromisso do projetista entre segurança e economicidade. Sendo assim, recomenda-se a concepção de indicadores mais adequados para comparação de metodologias de geração de relações IDF em locais sem dados.

Deve-se ressaltar que esta análise apresenta tendenciosidade, uma vez que os períodos temporais comparados não são os mesmos. A única comparação válida foi realizada para Brasília, as demais estão limitadas aos períodos dos dados.

#### **6.4 Verificar a aplicabilidade de estimativas de precipitação por satélite na determinação das relações IDF em locais com dados de precipitação precários ou inexistentes**

As estimativas de precipitação por satélite são uma potencial fonte de dados alternativa e importante na elaboração de projetos e planos de drenagem urbana, em especial no grande número de cidades brasileiras que não contam com monitoramento por pluviógrafos.

Deve-se levar em conta ainda que há localidades onde nem mesmo a aplicação da metodologia alternativa, de desagregação de dados de pluviômetros, seria possível, em vista da ausência deste instrumento nas proximidades, ou da indisponibilidade ou inconsistência de seus dados. Nestes locais, a aplicabilidade das relações IDF do TRMM é ainda mais evidente.

Apesar das limitações da metodologia proposta neste trabalho, a tendência para o futuro é que os dados do TRMM utilizados aqui apresentem melhoras no que diz respeito a extensão das séries monitoradas, uma vez que o programa TRMM terá continuidade com o lançamento de uma constelação de satélites prevista para 2013, que, por sua vez, refletirá em incrementos na resolução das medições realizadas.

Em vista do exposto, considera-se que este é um trabalho pioneiro na utilização de estimativas de precipitação por sensoriamento remoto na drenagem urbana. As relações IDF geradas e disponibilizadas para o público podem e devem ser mais bem investigadas em trabalhos futuros.

No entanto, as estimativas de precipitação por satélites não substituem os dados pluviográficos, assim como os pluviômetros também não os substituem. Portanto, as conclusões aqui apresentadas devem ser consideradas em face da inexistência de alternativas de dados. Sendo assim, aconselha-se que onde existirem dados pluviográficos ou pluviométricos representativos, o método de estabelecimento de relações IDF que os utilizem deve ser empregado.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, A. N.; GUETTER, A. K. 2005. *Avaliação hidrológica da técnica CMORPH de estimativa de chuva por satélite sobre a bacia do Iguaçu*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20 a 24 de novembro, João Pessoa - PB.

BACK, A. J. 2001. *Seleção de distribuição de probabilidade para chuvas diárias extremas no estado de Santa Catarina*. Revista Brasileira de Meteorologia, V. 16, nº 2, 211-222.

BACK, A. J. 2009. *Relações entre precipitações intensas de diferentes durações ocorridas no município de Urussanga, SC*. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.13, n.2, p.170–175.

BACK, A. J.; DORFMAN, R.; CLARKE, R. T. 1999. *Modelagem da precipitação horária por meio do modelo de pulsos retangulares de Bartlett-Lewis modificado*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 4, Nº1, jan/mar 1999, p. 5-17.

BARRERA, D. F. 2005. *Precipitation estimation with the hydro-estimator technique: its validation against rain gage observations*. In: VII Congresso da IAHS, Foz do Iguaçu, 3-9 de abril de 2005.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. 2005. *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. Porto Alegre: Ed. ABRH.

BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. 2000. *Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 5 N.4, Out/Dez., 2000, pp. 5-16.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. 1993. *Precipitação*. In: TUCCI, C.E.M. (Org.) *Hidrologia Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS. Cap. 5, p. 177-241.

BRAVO, J. M.; TUCCI, C. E. M.; TASSI, R.; ALLASIA, D. 2008. *Regionalização de curvas intensidade, duração e frequência de precipitação: aplicação ao Distrito Federal*. In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul Sudeste, de 12 a 17 de outubro de 2008, Rio de Janeiro – RJ.

BWANALI, K. Y. 2001. *Remote sensing CCD rainfall estimation in Zimbabwe*. In: II Water Net Symposium: Integrated Water Resources Management: Theory, Practice, Cases; Cidade do Cabo, 30-31 de outubro de 2001.

CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. 2003. *Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.3, p.501-504.

CE-DEP. 2005. *Caderno de Encargos do Departamento de Esgotos Pluviais*. Porto Alegre: Departamento de Esgotos Pluviais. 96p. Disponível em:  
[http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/default.php?p\\_secao=47](http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/default.php?p_secao=47). Acesso em: 06/11/2010.

COLLISCHONN, B. 2006. *Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, RS. 174 f.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. 2006. *Estimativas de precipitação por sensoriamento remoto passivo: desempenho do satélite TRMM na bacia do Alto Paraguai até Descalvados*. Anais... I Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil, 11-15 de novembro de 2006. Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.47-56.

CONOVER, W. J. 1980. *Practical Nonparametric Statistics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

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

CORREIO BRAZILIENSE. 2010. *Chuva causa apagão*. Edição de 19/10/2010.

COSTA, A. R.; V. F. BRITO. 1999. *Equações de chuva intensa para Goiás e sul de Tocantins*. In Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13. Belo Horizonte. Anais da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (CD-ROM).

DAEE/CETESB. 1980. Departamento de Água e Energia Elétrica/Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Drenagem urbana: Manual de projeto. São Paulo: DAEE-CETESB. 466p.

DAMÉ, R. C. F. 2001. *Desagregação de precipitação diária para estimativa de curvas Intensidade-Duração-Frequência*. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, RS. 131f.

DAMÉ, R. C. F.; PEDROTTI, C. B. M.; CARDOSO, M. A. G.; SILVEIRA, C. P.; DUARTE, L. A.; ÁVILA, M. S. V.; MOREIRA, A. C. 2006. *Comparação entre curvas intensidade-duração-frequência de ocorrência de precipitação obtidas a partir de dados pluviográficos com àquelas estimadas por técnicas de desagregação de chuva diária*. Nota Técnica. R. Bras. Agrociência, Pelotas, v. 12, n. 4, p.505-509, out-dez.

DAMÉ, R. C. F., TEIXEIRA, C. F. A.; LORENSI, R. P. 2007. *Simulação de precipitação com duração horária mediante o uso do modelo bartlett-lewis do pulso retangular modificado*. R. Bras. Agrociência, Pelotas, v.13, n.1, p.13-18, jan.-mar.

DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S. 2008. *Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência*. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.28, n.2, p.245-255, abr./jun.

DAVIS, A. P.; McCUEN, R. H. 2005. Stormwater Hydrology. In: *Stormwater Management for Smart Growth*. University of Maryland, Maryland. Springer, USA. Chap.4. p 63-104.

DISTRITO FEDERAL. 2009. *Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal: Relatório de Produto 4*. Volume 8. Tomo 01/07. Secretaria de Estado de Obras. Brasília: Concremat Engenharia. 104 p.

ENDRENY, T. A.; IMBEAH, N. 2009. *Generating robust rainfall intensity–duration–frequency estimates with short-record satellite data*. Journal of Hydrology, Volume 371, Issues 1-4, 5 June 2009, Pages 182-191.

FLAMING, G. M. 2004. *Measurement of global precipitation*. Publicação da Administração Aeroespacial dos EUA (NASA).

FRAGOSO JR., C. R. 2004. *Regionalização da Vazão Máxima Instantânea com base na Precipitação de Projeto*. ReRH: Revista Eletrônica de Recursos Hídricos, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. Volume 1 n.1 Jul/Dez 2004, p. 5-13. Porto Alegre, RS.

GLASBEY, C. A.; COOPER, G.; McGECHAN, M. B. 1995. *Disaggregation of daily rainfall by conditional simulation from a point-process model*. Journal of Hydrology, Amsterdam, v.165, n.1-4, p.1-9.

GONTIJO, N. T. 2007. *Avaliação das relações de frequência entre precipitações e enchentes raras por meio de séries sintéticas e simulação hidrológica*. Dissertação (Mestrado em

Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, MG. 175 f.

HIROSHIMA, K. 1999. *Rainfall observation from Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite*. Journal of Visualization, vol. 2, nº 1, pp. 93-98.

<http://daac.gsfc.nasa.gov/data/> Banco de dados da NASA.

<http://www.ana.gov.br/portalsnirh/> Portal do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos da ANA – Agência Nacional de Águas.

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/default.sh>  
[tm/](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/default.sh) Banco de Dados do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

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

KAWANISHI, T.; KUROIWA, H.; KOJIMA, M.; OIKAWA, K.; KOZU, T.; KUMAGAI, H.; OKAMOTO, K.; OKUMURA, M.; NAKATSUKA, H.; NISHIKAWA, K. 2000. *TRMM Precipitation Radar*. Advances in Space Research. Volume 25, Issue 5, pp. 969-972.

KOUTSOYIANNIS, D.; XANTHOPOULOS, T. 1990. *A dynamic model for short-scale rainfall disaggregation*. Hydrological Sciences Journal, Oxford, v.35, n.3, p.303-22.

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. 2000. *The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit*. Journal of Applied Meteorology, vol. 39, pp. 1965-1982.

LANNA, A. E. 1993. Elementos de estatística e probabilidades. In: TUCCI, C.E.M. (Org.) *Hidrologia Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS. Cap. 4, p. 79-176.

LEVIZZANI, V. 1998. *Intense rainfall monitoring from geostationary satellites*. 9ª Conf. Satellite Meteorology and Oceanography, AMS, 327-330.

MARTINEZ JÚNIOR, F. 1999. *Análise das precipitações intensas no estado de São Paulo*. In Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13. Belo Horizonte. Anais da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (CD-ROM).

MENDES, C. A. B., CIRILO, J. A. *Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação*. Porto Alegre: ABRH, 2001.

NEGRI, R.; PIRATH, C. E. H.; RAMOS, D. A. 2003. *Comparação de equações de chuvas de Joinville – SC aplicadas a projetos de drenagem urbana*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 22º, 14 a 19 de Setembro 2003 - Joinville - Santa Catarina.

NESBITT, S. W.; ZIPSER, E. J. 2003. *The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements*. J. Climate, 16, 1456–1475.

NICHOLSON, S. 2005. *On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel*. Journal of Arid Environments 63, p. 615-641.

OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; WEHR, T. R.; BORGES, L. B.; SARMENTO, P. H. L.; GRIEBELER, N. P. 2005. *Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal*. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.35, n.1, p.13-18.

PETTY, G. W. 1995. *The Status of Satellite-Based Rainfall Estimation over Land*. Remote Sensing of Environment 51, p. 125-137.

PFAFSTETTER, O. 1957. *Chuvas Intensas no Brasil*. 1ª ed. Rio de Janeiro: DNOCS. 419 p.

PORTO ALEGRE. 2005. *Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre: Manual de Drenagem Urbana*. Volume VI. PMPOA/DEP. Porto Alegre: IPH-UFRGS. 167 f. Disponível em: [http://galileu.iph.ufrgs.br/aguasurbanas/Contents/Softwares/IPH\\_CFDIP/Downloads/Manual\\_Drenagem\\_Urbana.pdf](http://galileu.iph.ufrgs.br/aguasurbanas/Contents/Softwares/IPH_CFDIP/Downloads/Manual_Drenagem_Urbana.pdf). Acesso em: 06/11/2010.

RAMAGE, K.; JOBARD, I.; LEBEL, T.; DESBOIS, M. 2003. *Satellite estimation of 1-day to 10-day cumulated precipitation: comparison and validation over tropical Africa of TRMM, METEOSAT and GPCP products*. The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 29 de setembro a 3 de outubro, Weimar, Alemanha.

RODRIGUES, J.; ANDRADE, E.; OLIVEIRA, T.; LOBATO, F. *Equações de Intensidade-Duração-Frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará*. Scientia Agraria, v. 9, n. 4, p. 511-519, Curitiba.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; COX, D.R.; ISHAM, V. 1987. *A point process model for rainfall: further developments*. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, v.417, p. 283-98.

SCHUMACHER, C.; HOUZE JR., R. A. 2004. *Mesoscale Convective Systems over Sub-Saharan Africa and the Tropical East Atlantic*. 26<sup>th</sup> Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 3-7 maio, Miami – EUA.

SCS. SOIL CONSERVATION SERVICE. 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Tech Release No. 55. Washington, DC.

SHEPHERD, J.M. 2006. *Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes*. Journal of Arid Environments, 67 (4), 607-628.

SHEPHERD, J.; BURIAN, S. 2003. *Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city*. Earth Interactions, 7 (4), 1-17.

SHEPHERD, J.; PIERCE, H.; NEGRI, A. 2002. *Rainfall modification by major urban areas: observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite*. Journal of Applied Meteorology, 41, 689-701.

SILVA, D.; PEREIRA, S.; PRUSKI, F.; GOMES F<sup>o</sup> R.; LANA, A.; BAENA. L. *Equações de intensidade-duração-frequência da precipitação pluvial para o estado do Tocantins*. Engenharia na Agricultura, Viçosa, v-11, n 1-4.

SOROOSHIAN, S.; GAO, X.; HSU, K.; MADDOX, R. A.; HONG, Y.; GUPTA, H. V.; IMAM, B. 2002. *Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information*. J. Climate, 15, 983–1001.

STRUZIK, P. 2003. *Accumulated precipitation distribution based on combined satellite information and ground measurements*. The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 29 de setembro a 3 de outubro, Weimar, Alemanha.

SILVA, D. D.; GOMES FILHO, R. R.; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F. 2002. *Chuvas intensas para o Estado da Bahia*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.2, p.362-367.

SILVA, D. D.; PINTO, F. R. L. P.; PRUSKI, F. F.; PINTO, F. A. 1999a. *Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo*. Engenharia Agrícola, v.18, n.3, p.11-21.

SILVA, D. D.; VALVERDE, A. E. L.; PRUSKI, F. F.; GONÇALVES, R. A. B. 1999b. *Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para o Estado de São Paulo*. Engenharia Agrícola, v.7, n.2, p.70-87.

SILVEIRA, A. L. L. 2000. *Equação para os Coeficientes de Desagregação de Chuvas*. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 143-147, Out/Dez, 2000.

TAKAYABU, Y. N. 2002. *Spectral representation of rain profiles and diurnal variations observed with TRMM PR over the equatorial area*. Geophys. Res. Lett., 29, 1584.

TESTFATION, Y.; DINKU, T. 2003. *Rainfall estimation from satellite data in Ethiopia: calibration and application*. The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 29 de setembro a 3 de outubro, Weimar, Alemanha.

TORRICO, J. J. T. 1974. *Práticas hidrológicas*. Rio de Janeiro: Transcom. 120 p.

TUCCI, C. E. M. 1993. Escoamento Superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) *Hidrologia Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS. Cap. 11, p. 391-441.

TUCCI, C. E. M. 2002. *Regionalização de Vazões*. 1ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS. 256p.

TUCCI, C. E. M. 2005. *Modelos hidrológicos*. ABRH. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 678p.

TUCCI, C. E. M. 2007. *Gestión de Inundaciones Urbanas*. GWP/Rhama, 288 p.

TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E. A.; PASINATO H. D. 1989. *Sistema de Simulação Precipitação Vazão IPHS1*. IPH-UFRGS. Porto Alegre. 66p.

VILLANUEVA, A.; ALLASIA D. G.; NEVES, M.; TASSI, R.; BERNHARDT, S. 2005. *IPHS1 para Windows - Manual de Fundamentos*. IPH-UFRGS. Porto Alegre. 76p.

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

## 8. ANEXOS

**Anexo 1. Parâmetros a, b, c e d das curvas IDF geradas com dados do TRMM para os municípios brasileiros com mais de 100.000 habitantes.**

| NOME                    | ESTADO           | População | a    | b    | c    | d    | R2    |
|-------------------------|------------------|-----------|------|------|------|------|-------|
| Rio Branco              | Acre             | 290.639   | 1586 | 0,18 | 15,0 | 0,82 | 0,998 |
| Arapiraca               | Alagoas          | 202.398   | 358  | 0,22 | 4,7  | 0,66 | 0,997 |
| Maceió                  | Alagoas          | 896.965   | 266  | 0,22 | -0,5 | 0,54 | 0,997 |
| Macapá                  | Amapa            | 344.153   | 1775 | 0,17 | 15,4 | 0,82 | 0,999 |
| Manaus                  | Amazonas         | 1646.602  | 1177 | 0,21 | 10,9 | 0,77 | 0,997 |
| Parintins               | Amazonas         | 102.044   | 2138 | 0,19 | 17,6 | 0,85 | 0,998 |
| Alagoinhas              | Bahia            | 132.725   | 490  | 0,27 | 5,5  | 0,67 | 0,995 |
| Barreiras               | Bahia            | 129.501   | 1265 | 0,19 | 18,5 | 0,85 | 0,998 |
| Camaçari                | Bahia            | 220.495   | 398  | 0,22 | 3,4  | 0,64 | 0,996 |
| Feira de Santana        | Bahia            | 571.997   | 549  | 0,21 | 7,0  | 0,69 | 0,997 |
| Ilhéus                  | Bahia            | 220.144   | 907  | 0,16 | 7,4  | 0,71 | 0,998 |
| Itabuna                 | Bahia            | 210.604   | 926  | 0,18 | 7,9  | 0,72 | 0,998 |
| Jequié                  | Bahia            | 145.964   | 3328 | 0,16 | 30,0 | 0,98 | 0,998 |
| Juazeiro                | Bahia            | 230.538   | 1505 | 0,16 | 20,1 | 0,87 | 0,999 |
| Lauro de Freitas        | Bahia            | 144.492   | 288  | 0,22 | 0,4  | 0,57 | 0,997 |
| Paulo Afonso            | Bahia            | 101.952   | 781  | 0,27 | 10,7 | 0,76 | 0,995 |
| Porto Seguro            | Bahia            | 114.459   | 2653 | 0,18 | 22,5 | 0,89 | 0,998 |
| Salvador                | Bahia            | 2892.625  | 289  | 0,21 | 0,0  | 0,57 | 0,994 |
| Simões Filho            | Bahia            | 109.269   | 288  | 0,22 | 0,4  | 0,57 | 0,997 |
| Teixeira de Freitas     | Bahia            | 118.702   | 758  | 0,13 | 8,8  | 0,71 | 0,999 |
| Vitória da Conquista    | Bahia            | 308.204   | 235  | 0,19 | -1,2 | 0,54 | 0,995 |
| Caucaia                 | Ceara            | 316.906   | 1800 | 0,23 | 14,0 | 0,80 | 0,997 |
| Crato                   | Ceara            | 111.198   | 2993 | 0,22 | 23,6 | 0,91 | 0,998 |
| Fortaleza               | Ceara            | 2431.415  | 1800 | 0,23 | 14,0 | 0,80 | 0,997 |
| Itapipoca               | Ceara            | 107.281   | 616  | 0,20 | 7,9  | 0,70 | 0,998 |
| Juazeiro do Norte       | Ceara            | 242.139   | 2993 | 0,22 | 23,6 | 0,91 | 0,998 |
| Maracanaú               | Ceara            | 197.301   | 741  | 0,27 | 6,1  | 0,67 | 0,995 |
| Maranguape              | Ceara            | 102.982   | 741  | 0,27 | 6,1  | 0,67 | 0,995 |
| Sobral                  | Ceara            | 176.895   | 1511 | 0,15 | 21,1 | 0,88 | 0,999 |
| Brasília                | Distrito Federal | 2455.903  | 1932 | 0,20 | 25,1 | 0,92 | 0,997 |
| Cachoeiro de Itapemirim | Espirito Santo   | 195.288   | 756  | 0,17 | 8,4  | 0,73 | 0,998 |
| Cariacica               | Espirito Santo   | 356.536   | 2073 | 0,15 | 20,4 | 0,86 | 0,998 |
| Colatina                | Espirito Santo   | 106.637   | 2623 | 0,21 | 23,5 | 0,91 | 0,998 |
| Linhares                | Espirito Santo   | 124.564   | 765  | 0,22 | 8,7  | 0,71 | 0,997 |
| Serra                   | Espirito Santo   | 385.37    | 1752 | 0,27 | 17,4 | 0,84 | 0,995 |
| Vila Velha              | Espirito Santo   | 398.068   | 2073 | 0,15 | 20,4 | 0,86 | 0,998 |
| Vitória                 | Espirito Santo   | 314.042   | 2073 | 0,15 | 20,4 | 0,86 | 0,998 |
| Águas Lindas de Goiás   | Goias            | 131.884   | 1549 | 0,16 | 19,2 | 0,88 | 0,998 |
| Anápolis                | Goias            | 325.544   | 2040 | 0,20 | 23,7 | 0,90 | 0,997 |
| Aparecida de Goiânia    | Goias            | 475.303   | 3517 | 0,16 | 30,0 | 0,98 | 0,999 |
| Goiânia                 | Goias            | 1244.645  | 1014 | 0,16 | 14,0 | 0,80 | 0,998 |
| Luziânia                | Goias            | 196.046   | 1986 | 0,19 | 25,0 | 0,91 | 0,998 |
| Rio Verde               | Goias            | 149.382   | 3405 | 0,22 | 26,7 | 0,94 | 0,997 |
| Valparaíso de Goiás     | Goias            | 114.45    | 294  | 0,24 | 2,4  | 0,63 | 0,995 |
| Caxias                  | Maranhao         | 143.197   | 2286 | 0,19 | 21,4 | 0,88 | 0,998 |
| Codó                    | Maranhao         | 110.574   | 1403 | 0,17 | 14,2 | 0,81 | 0,998 |
| Imperatriz              | Maranhao         | 229.671   | 3013 | 0,17 | 23,6 | 0,91 | 0,999 |
| São José de Ribamar     | Maranhao         | 131.379   | 1660 | 0,21 | 12,7 | 0,79 | 0,997 |
| São Luís                | Maranhao         | 957.515   | 2605 | 0,21 | 19,5 | 0,87 | 0,998 |

| NOME                 | ESTADO             | População | a    | b    | c    | d    | R2    |
|----------------------|--------------------|-----------|------|------|------|------|-------|
| Timon                | Maranhao           | 144.333   | 3125 | 0,24 | 25,3 | 0,94 | 0,996 |
| Cuiabá               | Mato Grosso        | 526.83    | 1692 | 0,22 | 19,1 | 0,86 | 0,998 |
| Rondonópolis         | Mato Grosso        | 172.783   | 3900 | 0,17 | 29,5 | 0,98 | 0,998 |
| Sinop                | Mato Grosso        | 105.762   | 2681 | 0,15 | 25,2 | 0,93 | 0,999 |
| Várzea Grande        | Mato Grosso        | 230.307   | 1692 | 0,22 | 19,1 | 0,86 | 0,998 |
| Campo Grande         | Mato Grosso do Sul | 724.524   | 2420 | 0,22 | 24,7 | 0,92 | 0,998 |
| Dourados             | Mato Grosso do Sul | 181.869   | 3265 | 0,13 | 26,4 | 0,94 | 0,999 |
| Araguari             | Minas Gerais       | 106.403   | 2224 | 0,17 | 24,1 | 0,91 | 0,999 |
| Barbacena            | Minas Gerais       | 122.377   | 2189 | 0,22 | 22,7 | 0,89 | 0,997 |
| Belo Horizonte       | Minas Gerais       | 2412.937  | 754  | 0,19 | 11,4 | 0,74 | 0,998 |
| Betim                | Minas Gerais       | 415.098   | 206  | 0,19 | -1,0 | 0,54 | 0,995 |
| Conselheiro Lafaiete | Minas Gerais       | 109.28    | 568  | 0,15 | 6,7  | 0,69 | 0,999 |
| Contagem             | Minas Gerais       | 608.65    | 206  | 0,19 | -1,0 | 0,54 | 0,995 |
| Coronel Fabriciano   | Minas Gerais       | 100.805   | 1154 | 0,21 | 11,7 | 0,77 | 0,997 |
| Divinópolis          | Minas Gerais       | 209.921   | 2654 | 0,17 | 27,0 | 0,94 | 0,998 |
| Governador Valadares | Minas Gerais       | 260.396   | 2776 | 0,13 | 25,7 | 0,93 | 0,998 |
| Ibirité              | Minas Gerais       | 148.535   | 421  | 0,22 | 3,4  | 0,64 | 0,996 |
| Ipatinga             | Minas Gerais       | 238.397   | 1007 | 0,21 | 12,1 | 0,77 | 0,998 |
| Itabira              | Minas Gerais       | 105.159   | 989  | 0,18 | 10,2 | 0,75 | 0,998 |
| Juiz de Fora         | Minas Gerais       | 513.348   | 1201 | 0,18 | 12,8 | 0,77 | 0,999 |
| Montes Claros        | Minas Gerais       | 352.384   | 1867 | 0,23 | 20,4 | 0,88 | 0,997 |
| Passos               | Minas Gerais       | 102.765   | 991  | 0,15 | 17,0 | 0,81 | 0,998 |
| Patos de Minas       | Minas Gerais       | 133.054   | 470  | 0,25 | 4,1  | 0,65 | 0,996 |
| Poços de Caldas      | Minas Gerais       | 144.386   | 746  | 0,20 | 8,6  | 0,72 | 0,998 |
| Pouso Alegre         | Minas Gerais       | 120.467   | 814  | 0,15 | 9,3  | 0,72 | 0,999 |
| Ribeirão das Neves   | Minas Gerais       | 329.112   | 206  | 0,19 | -1,0 | 0,54 | 0,995 |
| Sabará               | Minas Gerais       | 120.77    | 754  | 0,19 | 11,4 | 0,74 | 0,998 |
| Santa Luzia          | Minas Gerais       | 222.507   | 754  | 0,19 | 11,4 | 0,74 | 0,998 |
| Sete Lagoas          | Minas Gerais       | 217.506   | 2150 | 0,14 | 22,5 | 0,90 | 0,999 |
| Teófilo Otoni        | Minas Gerais       | 126.895   | 1311 | 0,15 | 17,2 | 0,84 | 0,999 |
| Uberaba              | Minas Gerais       | 287.76    | 2456 | 0,15 | 25,1 | 0,93 | 0,997 |
| Uberlândia           | Minas Gerais       | 608.369   | 440  | 0,11 | 5,2  | 0,67 | 0,998 |
| Varginha             | Minas Gerais       | 116.093   | 953  | 0,18 | 10,8 | 0,76 | 0,998 |
| Abaetetuba           | Para               | 132.222   | 4552 | 0,14 | 27,1 | 0,95 | 0,999 |
| Ananindeua           | Para               | 484.278   | 2127 | 0,19 | 14,7 | 0,81 | 0,998 |
| Belém                | Para               | 1408.847  | 1696 | 0,19 | 10,3 | 0,76 | 0,997 |
| Bragança             | Para               | 101.728   | 3389 | 0,22 | 23,3 | 0,90 | 0,998 |
| Cametá               | Para               | 110.323   | 6219 | 0,12 | 30,0 | 0,98 | 0,999 |
| Castanhal            | Para               | 152.126   | 2039 | 0,15 | 15,9 | 0,82 | 0,999 |
| Itaituba             | Para               | 118.194   | 2966 | 0,20 | 23,9 | 0,90 | 0,998 |
| Marabá               | Para               | 196.468   | 1204 | 0,16 | 12,0 | 0,78 | 0,999 |
| Parauapebas          | Para               | 133.298   | 2539 | 0,24 | 21,4 | 0,89 | 0,996 |
| Santarém             | Para               | 274.285   | 2686 | 0,24 | 19,4 | 0,86 | 0,996 |
| Campina Grande       | Paraíba            | 371.06    | 447  | 0,20 | 7,0  | 0,70 | 0,998 |
| João Pessoa          | Paraíba            | 674.762   | 2009 | 0,17 | 17,5 | 0,84 | 0,998 |
| Santa Rita           | Paraíba            | 122.454   | 2009 | 0,17 | 17,5 | 0,84 | 0,998 |
| Apucarana            | Parana             | 115.323   | 3092 | 0,18 | 26,4 | 0,94 | 0,998 |
| Araucária            | Parana             | 109.943   | 3144 | 0,19 | 22,8 | 0,90 | 0,998 |
| Campo Largo          | Parana             | 105.492   | 910  | 0,18 | 8,3  | 0,71 | 0,998 |
| Cascavel             | Parana             | 285.784   | 1051 | 0,17 | 10,6 | 0,74 | 0,999 |
| Colombo              | Parana             | 233.916   | 870  | 0,16 | 7,9  | 0,70 | 0,999 |
| Curitiba             | Parana             | 1797.408  | 1647 | 0,18 | 14,6 | 0,81 | 0,998 |
| Foz do Iguaçu        | Parana             | 311.336   | 649  | 0,14 | 4,0  | 0,63 | 0,999 |
| Guarapuava           | Parana             | 164.567   | 802  | 0,12 | 7,5  | 0,70 | 1,000 |

| NOME                    | ESTADO              | População | a    | b    | c    | d    | R2    |
|-------------------------|---------------------|-----------|------|------|------|------|-------|
| Londrina                | Parana              | 497.833   | 1729 | 0,22 | 16,4 | 0,84 | 0,997 |
| Maringá                 | Parana              | 325.968   | 617  | 0,17 | 7,5  | 0,68 | 0,997 |
| Paranaguá               | Parana              | 133.559   | 3494 | 0,18 | 20,9 | 0,87 | 0,999 |
| Pinhais                 | Parana              | 112.038   | 870  | 0,16 | 7,9  | 0,70 | 0,999 |
| Ponta Grossa            | Parana              | 306.351   | 528  | 0,15 | 3,7  | 0,63 | 0,999 |
| São José dos Pinhais    | Parana              | 263.622   | 1152 | 0,19 | 10,2 | 0,74 | 0,998 |
| Toledo                  | Parana              | 109.857   | 1228 | 0,19 | 12,2 | 0,76 | 0,998 |
| Cabo de Santo Agostinho | Pernambuco          | 163.139   | 514  | 0,28 | 2,6  | 0,61 | 0,994 |
| Camaragibe              | Pernambuco          | 136.381   | 594  | 0,25 | 3,1  | 0,62 | 0,996 |
| Caruaru                 | Pernambuco          | 289.086   | 855  | 0,18 | 14,7 | 0,81 | 0,998 |
| Garanhuns               | Pernambuco          | 124.996   | 1407 | 0,22 | 23,8 | 0,91 | 0,997 |
| Jaboatão dos Guararapes | Pernambuco          | 665.387   | 261  | 0,26 | -1,4 | 0,52 | 0,995 |
| Olinda                  | Pernambuco          | 391.433   | 594  | 0,25 | 3,1  | 0,62 | 0,996 |
| Paulista                | Pernambuco          | 307.284   | 1595 | 0,22 | 13,4 | 0,78 | 0,997 |
| Petrolina               | Pernambuco          | 268.339   | 1505 | 0,16 | 20,1 | 0,87 | 0,999 |
| Recife                  | Pernambuco          | 1533.58   | 594  | 0,25 | 3,1  | 0,62 | 0,996 |
| Vitória de Santo Antão  | Pernambuco          | 121.233   | 523  | 0,26 | 6,1  | 0,68 | 0,995 |
| Parnaíba                | Piauí               | 140.839   | 1550 | 0,22 | 16,0 | 0,83 | 0,997 |
| Teresina                | Piauí               | 779.939   | 3125 | 0,24 | 25,3 | 0,94 | 0,996 |
| Angra dos Reis          | Rio de Janeiro      | 148.476   | 2392 | 0,19 | 23,4 | 0,90 | 0,998 |
| Barra Mansa             | Rio de Janeiro      | 175.315   | 1014 | 0,14 | 13,9 | 0,80 | 0,999 |
| Belford Roxo            | Rio de Janeiro      | 480.555   | 2329 | 0,21 | 22,6 | 0,89 | 0,998 |
| Cabo Frio               | Rio de Janeiro      | 162.229   | 1869 | 0,18 | 22,5 | 0,88 | 0,998 |
| Campos dos Goytacazes   | Rio de Janeiro      | 426.154   | 2224 | 0,16 | 19,6 | 0,86 | 0,999 |
| Duque de Caxias         | Rio de Janeiro      | 842.686   | 2329 | 0,21 | 22,6 | 0,89 | 0,998 |
| Itaboraí                | Rio de Janeiro      | 215.792   | 983  | 0,17 | 13,2 | 0,77 | 0,998 |
| Macaé                   | Rio de Janeiro      | 169.513   | 775  | 0,15 | 7,8  | 0,70 | 0,999 |
| Magé                    | Rio de Janeiro      | 232.171   | 2457 | 0,17 | 22,8 | 0,90 | 0,999 |
| Maricá                  | Rio de Janeiro      | 105.294   | 3546 | 0,14 | 28,9 | 0,97 | 0,998 |
| Mesquita                | Rio de Janeiro      | 182.495   | 2329 | 0,21 | 22,6 | 0,89 | 0,998 |
| Nilópolis               | Rio de Janeiro      | 153.581   | 2329 | 0,21 | 22,6 | 0,89 | 0,998 |
| Niterói                 | Rio de Janeiro      | 474.002   | 2494 | 0,13 | 20,9 | 0,89 | 0,999 |
| Nova Friburgo           | Rio de Janeiro      | 177.376   | 2883 | 0,19 | 23,6 | 0,92 | 0,998 |
| Nova Iguaçu             | Rio de Janeiro      | 830.672   | 2329 | 0,21 | 22,6 | 0,89 | 0,998 |
| Petrópolis              | Rio de Janeiro      | 306.645   | 2457 | 0,17 | 22,8 | 0,90 | 0,999 |
| Queimados               | Rio de Janeiro      | 130.275   | 1177 | 0,14 | 15,8 | 0,80 | 0,999 |
| Resende                 | Rio de Janeiro      | 118.547   | 4370 | 0,23 | 30,0 | 0,98 | 0,996 |
| Rio de Janeiro          | Rio de Janeiro      | 6093.472  | 2494 | 0,13 | 20,9 | 0,89 | 0,999 |
| São Gonçalo             | Rio de Janeiro      | 960.631   | 2494 | 0,13 | 20,9 | 0,89 | 0,999 |
| São João de Meriti      | Rio de Janeiro      | 464.282   | 2329 | 0,21 | 22,6 | 0,89 | 0,998 |
| Teresópolis             | Rio de Janeiro      | 150.268   | 1817 | 0,15 | 18,8 | 0,86 | 0,999 |
| Volta Redonda           | Rio de Janeiro      | 255.653   | 1014 | 0,14 | 13,9 | 0,80 | 0,999 |
| Mossoró                 | Rio Grande do Norte | 234.39    | 1787 | 0,23 | 18,4 | 0,85 | 0,997 |
| Natal                   | Rio Grande do Norte | 774.23    | 1003 | 0,21 | 7,9  | 0,71 | 0,998 |
| Parnamirim              | Rio Grande do Norte | 172.751   | 808  | 0,20 | 5,4  | 0,68 | 0,998 |
| Alvorada                | Rio Grande do Sul   | 207.142   | 3022 | 0,16 | 23,5 | 0,91 | 0,998 |
| Bagé                    | Rio Grande do Sul   | 112.55    | 865  | 0,16 | 7,9  | 0,71 | 0,999 |
| Bento Gonçalves         | Rio Grande do Sul   | 100.643   | 2683 | 0,18 | 21,8 | 0,88 | 0,998 |
| Cachoeirinha            | Rio Grande do Sul   | 112.603   | 3022 | 0,16 | 23,5 | 0,91 | 0,998 |
| Canoas                  | Rio Grande do Sul   | 326.458   | 3022 | 0,16 | 23,5 | 0,91 | 0,998 |
| Caxias do Sul           | Rio Grande do Sul   | 399.038   | 2339 | 0,18 | 19,5 | 0,86 | 0,998 |
| Gravataí                | Rio Grande do Sul   | 261.15    | 5981 | 0,13 | 30,0 | 0,99 | 0,998 |
| Novo Hamburgo           | Rio Grande do Sul   | 253.067   | 2648 | 0,15 | 21,4 | 0,87 | 0,998 |
| Passo Fundo             | Rio Grande do Sul   | 183.3     | 1830 | 0,21 | 15,2 | 0,82 | 0,998 |

| NOME                  | ESTADO            | População | a    | b    | c    | d    | R2    |
|-----------------------|-------------------|-----------|------|------|------|------|-------|
| Pelotas               | Rio Grande do Sul | 339.934   | 504  | 0,17 | 2,3  | 0,61 | 0,998 |
| Porto Alegre          | Rio Grande do Sul | 1420.667  | 3114 | 0,17 | 23,1 | 0,90 | 0,998 |
| Rio Grande            | Rio Grande do Sul | 194.351   | 571  | 0,16 | 3,6  | 0,63 | 0,998 |
| Santa Cruz do Sul     | Rio Grande do Sul | 115.857   | 2758 | 0,17 | 20,5 | 0,87 | 0,999 |
| Santa Maria           | Rio Grande do Sul | 263.403   | 574  | 0,15 | 4,3  | 0,64 | 0,998 |
| São Leopoldo          | Rio Grande do Sul | 207.721   | 3022 | 0,16 | 23,5 | 0,91 | 0,998 |
| Sapucaia do Sul       | Rio Grande do Sul | 122.231   | 3022 | 0,16 | 23,5 | 0,91 | 0,998 |
| Uruguaiana            | Rio Grande do Sul | 123.743   | 3558 | 0,14 | 24,5 | 0,91 | 0,998 |
| Viamão                | Rio Grande do Sul | 253.264   | 3114 | 0,17 | 23,1 | 0,90 | 0,998 |
| Ji-Paraná             | Rondonia          | 107.679   | 2914 | 0,16 | 23,7 | 0,91 | 0,998 |
| Porto Velho           | Rondonia          | 369.345   | 562  | 0,16 | 3,6  | 0,64 | 0,998 |
| Boa Vista             | Roraima           | 249.853   | 734  | 0,23 | 5,9  | 0,69 | 0,996 |
| Blumenau              | Santa Catarina    | 292.972   | 4685 | 0,21 | 30,0 | 0,98 | 0,997 |
| Chapecó               | Santa Catarina    | 164.803   | 576  | 0,13 | 3,3  | 0,62 | 0,999 |
| Criciúma              | Santa Catarina    | 185.506   | 2483 | 0,23 | 20,3 | 0,88 | 0,997 |
| Florianópolis         | Santa Catarina    | 396.723   | 852  | 0,18 | 7,4  | 0,70 | 0,999 |
| Itajaí                | Santa Catarina    | 163.218   | 5289 | 0,19 | 30,0 | 0,98 | 0,998 |
| Jaraguá do Sul        | Santa Catarina    | 129.973   | 1043 | 0,17 | 11,6 | 0,73 | 0,996 |
| Joinville             | Santa Catarina    | 487.003   | 2800 | 0,14 | 22,2 | 0,88 | 0,999 |
| Lages                 | Santa Catarina    | 161.583   | 1743 | 0,16 | 15,8 | 0,81 | 0,999 |
| Palhoça               | Santa Catarina    | 122.471   | 852  | 0,18 | 7,4  | 0,70 | 0,999 |
| São José              | Santa Catarina    | 196.887   | 852  | 0,18 | 7,4  | 0,70 | 0,999 |
| Americana             | Sao Paulo         | 199.094   | 2300 | 0,23 | 22,6 | 0,90 | 0,997 |
| Araçatuba             | Sao Paulo         | 178.839   | 1241 | 0,18 | 14,4 | 0,79 | 0,999 |
| Araraquara            | Sao Paulo         | 195.815   | 906  | 0,14 | 13,3 | 0,78 | 0,999 |
| Araras                | Sao Paulo         | 108.689   | 1663 | 0,17 | 18,5 | 0,84 | 0,999 |
| Atibaia               | Sao Paulo         | 119.166   | 2304 | 0,21 | 20,7 | 0,88 | 0,997 |
| Barretos              | Sao Paulo         | 107.988   | 1657 | 0,14 | 19,1 | 0,86 | 0,999 |
| Barueri               | Sao Paulo         | 252.748   | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Bauru                 | Sao Paulo         | 347.601   | 2588 | 0,14 | 24,5 | 0,92 | 0,999 |
| Birigui               | Sao Paulo         | 103.394   | 1765 | 0,19 | 20,2 | 0,86 | 0,999 |
| Botucatu              | Sao Paulo         | 120.8     | 891  | 0,20 | 11,9 | 0,76 | 0,998 |
| Bragança Paulista     | Sao Paulo         | 136.286   | 2361 | 0,17 | 21,2 | 0,88 | 0,998 |
| Campinas              | Sao Paulo         | 1039.297  | 1378 | 0,20 | 15,1 | 0,81 | 0,998 |
| Carapicuíba           | Sao Paulo         | 379.566   | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Catanduva             | Sao Paulo         | 109.362   | 2000 | 0,15 | 21,4 | 0,88 | 0,999 |
| Cotia                 | Sao Paulo         | 172.823   | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Cubatão               | Sao Paulo         | 120.271   | 1237 | 0,21 | 12,5 | 0,75 | 0,996 |
| Diadema               | Sao Paulo         | 386.779   | 1965 | 0,18 | 17,8 | 0,84 | 0,999 |
| Embu                  | Sao Paulo         | 237.318   | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Ferraz de Vasconcelos | Sao Paulo         | 168.897   | 3100 | 0,19 | 22,9 | 0,90 | 0,998 |
| Franca                | Sao Paulo         | 319.094   | 1146 | 0,11 | 16,3 | 0,80 | 0,998 |
| Francisco Morato      | Sao Paulo         | 146.634   | 3058 | 0,18 | 25,0 | 0,92 | 0,998 |
| Franco da Rocha       | Sao Paulo         | 121.451   | 3058 | 0,18 | 25,0 | 0,92 | 0,998 |
| Guaratinguetá         | Sao Paulo         | 107.895   | 3395 | 0,17 | 26,3 | 0,94 | 0,999 |
| Guarujá               | Sao Paulo         | 296.15    | 1237 | 0,21 | 12,5 | 0,75 | 0,996 |
| Guarulhos             | Sao Paulo         | 1236.192  | 3058 | 0,18 | 25,0 | 0,92 | 0,998 |
| Hortolândia           | Sao Paulo         | 190.781   | 1378 | 0,20 | 15,1 | 0,81 | 0,998 |
| Indaiatuba            | Sao Paulo         | 173.508   | 514  | 0,24 | 3,7  | 0,64 | 0,994 |
| Itapeçerica da Serra  | Sao Paulo         | 148.728   | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Itapetininga          | Sao Paulo         | 138.45    | 2741 | 0,26 | 23,3 | 0,90 | 0,996 |
| Itapevi               | Sao Paulo         | 193.686   | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Itaquaquecetuba       | Sao Paulo         | 334.914   | 3563 | 0,17 | 25,8 | 0,93 | 0,999 |
| Itu                   | Sao Paulo         | 147.157   | 520  | 0,20 | 5,9  | 0,66 | 0,994 |

| NOME                     | ESTADO    | População | a    | b    | c    | d    | R2    |
|--------------------------|-----------|-----------|------|------|------|------|-------|
| Jacareí                  | Sao Paulo | 207.028   | 1439 | 0,12 | 13,8 | 0,80 | 0,999 |
| Jandira                  | Sao Paulo | 103.531   | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Jaú                      | Sao Paulo | 125.469   | 631  | 0,15 | 6,6  | 0,70 | 0,998 |
| Jundiaí                  | Sao Paulo | 342.983   | 981  | 0,24 | 11,3 | 0,76 | 0,996 |
| Limeira                  | Sao Paulo | 272.734   | 2300 | 0,23 | 22,6 | 0,90 | 0,997 |
| Marília                  | Sao Paulo | 218.113   | 1922 | 0,22 | 19,9 | 0,88 | 0,997 |
| Mauá                     | Sao Paulo | 402.643   | 3100 | 0,19 | 22,9 | 0,90 | 0,998 |
| Mogi Guaçu               | Sao Paulo | 131.87    | 1475 | 0,14 | 16,0 | 0,81 | 0,999 |
| Moji das Cruzes          | Sao Paulo | 362.991   | 1412 | 0,16 | 13,9 | 0,78 | 0,998 |
| Osasco                   | Sao Paulo | 701.012   | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Pindamonhangaba          | Sao Paulo | 135.682   | 1720 | 0,20 | 17,9 | 0,84 | 0,998 |
| Piracicaba               | Sao Paulo | 358.108   | 1115 | 0,21 | 12,3 | 0,78 | 0,998 |
| Poá                      | Sao Paulo | 104.904   | 3100 | 0,19 | 22,9 | 0,90 | 0,998 |
| Praia Grande             | Sao Paulo | 233.806   | 792  | 0,18 | 7,2  | 0,70 | 0,998 |
| Presidente Prudente      | Sao Paulo | 202.789   | 2248 | 0,17 | 21,2 | 0,89 | 0,999 |
| Ribeirão Pires           | Sao Paulo | 107.046   | 3100 | 0,19 | 22,9 | 0,90 | 0,998 |
| Ribeirão Preto           | Sao Paulo | 547.417   | 1305 | 0,15 | 15,8 | 0,83 | 0,998 |
| Rio Claro                | Sao Paulo | 185.421   | 2192 | 0,19 | 21,9 | 0,88 | 0,998 |
| Salto                    | Sao Paulo | 102.405   | 502  | 0,21 | 3,2  | 0,63 | 0,997 |
| Santa Bárbara d'Oeste    | Sao Paulo | 184.318   | 674  | 0,27 | 6,0  | 0,69 | 0,993 |
| Santana de Parnaíba      | Sao Paulo | 100.236   | 1042 | 0,22 | 13,2 | 0,78 | 0,997 |
| Santo André              | Sao Paulo | 667.891   | 1965 | 0,18 | 17,8 | 0,84 | 0,999 |
| Santos                   | Sao Paulo | 418.288   | 1237 | 0,21 | 12,5 | 0,75 | 0,996 |
| São Bernardo do Campo    | Sao Paulo | 781.39    | 1965 | 0,18 | 17,8 | 0,84 | 0,999 |
| São Caetano do Sul       | Sao Paulo | 144.857   | 1965 | 0,18 | 17,8 | 0,84 | 0,999 |
| São Carlos               | Sao Paulo | 212.956   | 2010 | 0,21 | 22,5 | 0,88 | 0,997 |
| São José do Rio Preto    | Sao Paulo | 402.77    | 1642 | 0,15 | 19,2 | 0,87 | 0,999 |
| São José dos Campos      | Sao Paulo | 594.948   | 749  | 0,15 | 7,8  | 0,69 | 0,998 |
| São Paulo                | Sao Paulo | 10886.52  | 1965 | 0,18 | 17,8 | 0,84 | 0,999 |
| São Vicente              | Sao Paulo | 323.599   | 1237 | 0,21 | 12,5 | 0,75 | 0,996 |
| Sertãozinho              | Sao Paulo | 103.558   | 1305 | 0,15 | 15,8 | 0,83 | 0,998 |
| Sorocaba                 | Sao Paulo | 559.157   | 182  | 0,22 | -2,6 | 0,47 | 0,993 |
| Sumaré                   | Sao Paulo | 228.696   | 674  | 0,27 | 6,0  | 0,69 | 0,993 |
| Suzano                   | Sao Paulo | 268.777   | 3100 | 0,19 | 22,9 | 0,90 | 0,998 |
| Taboão da Serra          | Sao Paulo | 219.2     | 1483 | 0,20 | 14,4 | 0,80 | 0,998 |
| Tatuí                    | Sao Paulo | 101.838   | 1992 | 0,12 | 21,4 | 0,88 | 0,999 |
| Taubaté                  | Sao Paulo | 265.514   | 1973 | 0,15 | 19,0 | 0,85 | 0,999 |
| Várzea Paulista          | Sao Paulo | 100.411   | 981  | 0,24 | 11,3 | 0,76 | 0,996 |
| Aracaju                  | Sergipe   | 520.303   | 970  | 0,23 | 11,3 | 0,75 | 0,997 |
| Nossa Senhora do Socorro | Sergipe   | 148.546   | 970  | 0,23 | 11,3 | 0,75 | 0,997 |
| Araguaína                | Tocantins | 115.759   | 2850 | 0,21 | 24,2 | 0,91 | 0,998 |
| Palmas                   | Tocantins | 178.386   | 2976 | 0,16 | 26,4 | 0,95 | 0,999 |

## Anexo 2. Anexo Digital

CD contendo:

- arquivo *shapefile* dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  das curvas IDF geradas com dados do TRMM para todos os municípios brasileiros
- arquivo *raster* contendo os coeficientes de desagregação de 24h para 3h e de 12h para 3h obtidos do TRMM, para 5 anos de tempo de retorno
- arquivos de saída do IPHS1 – resultados das simulações.