DEFINIÇÃO DE REDE ADAPTATIVA DE MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO COM SUPORTE DE SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO DOIS RIOS – RJ

Fernanda Spitz Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho
José Otavio Goulart Pecly

Rio de Janeiro
Outubro de 2014

DEFINIÇÃO DE REDE ADAPTATIVA DE MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO COM SUPORTE DE SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO DOIS RIOS – RJ

Fernanda Spitz Dias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

_____

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph. D.

_____

Dr. José Otávio Goulart Pecly, D. Sc.

_____

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araújo, D. Sc.

_____

Prof. Leonardo de Faria Peres, D. Sc.

_____

Dr. Luciano Nóbrega Rodrigues Xavier, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
OUTUBRO DE 2014

Dias, Fernanda Spitz

Definição de Rede Adaptativa de Monitoramento Hidrometeorológico com Suporte de Sensoriamento Remoto na Bacia do Dois Rios – RJ / Fernanda Spitz Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XXV, 272 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho

José Otávio Goulart Pecly

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 238-254.

1. Monitoramento Hidrometeorológico. 2. TRMM. 3. Geoestatística. 4. Definição de Rede. I. Rotunno Filho, Otto Corrêa *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelas pessoas maravilhosas presentes na minha vida e pelos milagres cotidianos que fazem a vida valer à pena.

Aos meus pais, pelo amor, carinho e educação dedicados desde sempre e por me ensinarem os verdadeiros valores e também a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Ao Diogo, meu amor, namorado, companheiro e amigo, por toda a compreensão e apoio e também por mostrar todos os dias que juntos somos mais fortes e que nada tem sentido se não estivermos juntos.

Aos colegas de trabalho e amigos da Coordenadoria de Planejamento e Projetos Estratégicos (COPPES), em especial, Irene, Larissa, Leonardo, Edson, Pedro, Daniele e Luiz Paulo, pelo incentivo e apoio, desde as discussões profissionais até os conselhos pessoais nos momentos mais difíceis.

A todos os demais amigos da COPPES e INEA, que contribuíram para este trabalho de forma direta ou indireta.

A todos os colegas da PCE – Projetos e Consultoria de Engenharia Ltda., que também me ajudaram e sempre me deram força durante todo o período em que trabalhei lá.

À amiga Luciana Melo, que sempre me deu força e conselhos durante este trabalho.

À amiga Patricia Antunes, que, mesmo não trabalhando juntas, deu forças ao me fazer lembrar todos os desafios e dificuldades superados vividos durante a faculdade.

Aos orientadores, Otto Corrêa Rotunno Filho e José Otávio Goulart Pecly, por acreditarem no meu potencial e me apoiarem e auxiliarem durante todo o desenvolvimento da dissertação.

À doutoranda Isela Vasquez e à mestranda Alline Lamenha, que me ajudaram em momentos complicados, mostrando-se pessoas especiais, mesmo que tenhamos nos conhecido há pouco tempo.

Ao estudante Daniel Moreira, engenheiro da CPRM, e ao estudante Vitor Paiva, ambos cursando o programa de doutorado junto ao Programa de Engenharia Civil (PEC) da COPPE/UFRJ com orientação do professor Otto, por toda ajuda disponibilizada.

Agradecimentos extensivos são dirigidos às agências de fomento FAPERJ e CNPq, que, por meio de suporte aos projetos PEC/COPPPE FAPERJ Edital 014/2010 (2010-2012) – Centro de Referência em Modelagem Ambiental Aplicado à Gestão de Bacias Hidrográficas Rurais e Urbanas – Apoio às instituições de pesquisa sediadas no estado do Rio de Janeiro, FAPERJ Cientista do Nosso Estado – Processo E-26/103.116/2011 (2012-2014) e FAPERJ – Pensa Rio – Edital 19/2011 (2012-2014) – E26/110.753/2012 e ao projeto FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) – E-26/010.002980/2014, bem como aos projetos PROSUL (Edital CNPq Nº 005/2007), CNPq Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9 e ao projeto IME-PEC/COPPE – CAPES – Aux-PE-PRO-Defesa 1783/2008 (2008–2012), entre outros, que estimulam o avanço científico-tecnológico brasileiro na temática que abrange o escopo desta pesquisa.

Reconhecimento é aqui expresso a instituições que fornecem suporte e disponibilizam dados para o desenvolvimento de pesquisas no Brasil, como, por exemplo, no nível nacional, Secretaria de Educação Superior (SESu) – Ministério da Educação (MEC) - FNDE – Programa de Educação Tutorial - PET CIVIL UFRJ, CPRM, ANA, EMBRAPA, CEPEL, ONS, INMET, INPE e INEA, e, no nível internacional, NASA, NOAA e ESA.

Ao Programa de Engenharia Civil, corpo docente e de funcionários, pela oportunidade de estudo e formação.

A todos que, de certa forma, conviveram comigo durante a realização deste trabalho, seja durante as aulas do mestrado, ou em outras situações, como cursos, e até mesmo na vida pessoal, que me apoiaram e que me deram sugestões para aperfeiçoamento deste trabalho.

“A mera formulação de um problema é muito mais importante que a sua solução, o qual deve ser simplesmente uma questão de habilidades matemática ou experimental. Levantar novas questões, novas possibilidades, considerar velhos problemas sob um novo ângulo, isto requer imaginação criativa e marca avanços reais na ciência.”

Albert Einstein

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.

RECONHECIMENTO

Os dados utilizados, neste estudo, foram adquiridos como parte do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Os algoritmos foram desenvolvidos pela Equipe de Ciência TRMM. Os dados foram processados pelo Sistema de Dados e Informações Científicas do TRMM (TSDIS) e pelo escritório do TRMM; eles são arquivados e distribuídos pelo Centro de Arquivamento e Distribuição Ativa Goddard. TRMM é um projeto internacional patrocinado pela Agência Nacional de Desenvolvimento Espacial do Japão (NASDA) e pelo Escritório de Ciências da Terra do Instituto Nacional de Aeronáutica e Administração Espacial (NASA).

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

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DEFINIÇÃO DE REDE ADAPTATIVA DE MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO COM SUPORTE DE SENSORIAMENTO REMOTO NA BACIA DO DOIS RIOS – RJ

Fernanda Spitz Dias

Outubro / 2014

Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho
José Otávio Goulart Pecly

Programa: Engenharia Civil

O monitoramento dos dados hidrometeorológicos é essencial para o desenvolvimento de estudos e projetos de sistemas de gestão de recursos hídricos, tornando possível a detecção de tendências e alterações no regime hídrico. A obtenção desses dados, tanto no tempo quanto no espaço, requer uma rede de estações de monitoramento suficiente e adequada. Este trabalho tem o objetivo de definir rede de monitoramento hidrometeorológico, juntamente com a estimativa de custos, para a bacia do rio Dois Rios, situada no estado do Rio de Janeiro. Exploram-se dados espaço-temporais de precipitação, de temperatura e de vegetação obtidas via sensoriamento remoto, com construção de indicador de estresse hídrico. Obteve-se uma rede com 21 estações de 4 tipos, que contemplam diferentes combinações de monitoramento de variáveis hidrometeorológicas como precipitação, nível de água, vazão, temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, radiação solar e velocidade e direção do vento. Os resultados apontam que o conhecimento da variabilidade hidrometeorológica da região, mediante a abordagem integrada de componentes principais, análise geoestatística e indicadores de vulnerabilidade ambiental, em conjunto com a obtenção de valor econômico correspondente agregado, oferece suporte para aplicações em disponibilidade de água em quantidade e em qualidade, geração de energia e produção de alimentos com vistas à construção de ambientes rurais e urbanos sustentáveis.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEFINITION OF ADAPTIVE HYDROMETEOROLOGICAL MONITORING NETWORK WITH REMOTE SENSING SUPPORT FOR DOIS RIOS WATERSHED - RJ

Fernanda Spitz Dias

October / 2014

Advisors: Otto Corrêa Rotunno Filho
José Otávio Goulart Pecly

Department: Civil Engineering

The monitoring of hydrometeorological data is essential for the development of studies and projects regarding water resources management systems, making possible the detection of trends and changes in the water flow regime. The acquisition of such data, both in time and in space, requires a sufficient and appropriate network of monitoring stations. This work aims to develop the study and the definition of a hydrometeorological monitoring network, along with the estimated cost of the proposal network for the Dois Rios River Basin, located in the state of Rio de Janeiro. This dissertation explores spatio-temporal data of precipitation, temperature and vegetation obtained via remote sensing, jointly with the construction of water stress indicator We obtained a monitoring network with 21 stations classified under 4 types, englobing different combinations of hydrometeorological variables, such as precipitation, water level, flow, air temperature, air humidity, atmospheric pressure, solar radiation, wind direction and wind velocity. The results highlight that the knowledge of the patterns of hydrometeorological variability for region using an integrated approach of the principal components and geostatistical analysis and indicators of environmental vulnerability jointly with obtaining the corresponding economic value provide adequate support for applications with respect to water availability and to water quality, power generation and food production envisaging to build sustainable rural and urban environments.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS xiii

LISTA DE TABELAS xx

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS xxi

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO 1

1.1 Considerações Iniciais 1

1.2 Justificativa 3

1.3 Objetivo 4

1.4 Escopo do Trabalho 4

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA 6

CAPÍTULO 3 – MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO: HISTÓRICO 16

3.1 Evolução das Redes de Monitoramento Hidrometeorológico 17

3.1.1 No Brasil 18

3.1.2 No Estado do Rio de Janeiro 30

CAPÍTULO 4 – SENSORIAMENTO REMOTO E HIDROMETEOROLOGIA 34

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA 54

5.1 Análise Exploratória 61

5.1.1 Seleção dos Dados 61

5.1.2 Verificação da Qualidade e Representatividade dos Dados 62

5.1.2.1 Séries Temporais 63

5.1.2.2 Correlações 64

5.1.3 Avaliação da Rede Existente 66

5.1.3.1 Rede Mínima 66

5.1.3.2 Análise de Componentes Principais 68

5.2 Análise Temporal 73

5.3 Análise Espacial – Posicionamento das Estações 76

5.4 Análise dos Aspectos Físico-Hídricos da Bacia – Reposicionamento das Estações 92

5.5 Definição da Rede de Monitoramento 93

5.6 Análise Crítica 93
5.6.1 Disponibilidade Hídrica e Estresse Hídrico 94
CAPÍTULO 6 – ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO DOIS RIOS 99
6.1 Características Gerais 99
6.2 Localização da Bacia 100
6.3 Hidrografia 101
6.3.1 Rio Negro 102
6.3.2 Rio Grande 103
6.4 Geologia 103
6.5 Geomorfologia 104
6.6 Vegetação 104
6.7 Ocupação e Uso Antrópico do Solo 105
6.8 Clima 105
6.8.1 Precipitação 106
6.8.2 Temperatura 109
6.8.3 Evapotranspiração 109
6.9 Disponibilidade Hídrica 109
6.10 Reservas e Áreas de Proteção 111
CAPÍTULO 7 – DEFINIÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO 112
7.1 Análise Exploratória 112
7.1.1 Seleção dos Dados 112
7.1.1.1 Definição dos Períodos Chuvoso e Estiagem 119
7.1.1.2 Definição das Sub-bacias 120
7.1.2 Verificação da Qualidade e da Representatividade dos Dados 122
7.1.2.1 Séries Temporais 123
7.1.2.2 Correlações 130
7.1.3 Avaliação da Rede Existente 141
7.1.3.1 Rede Mínima 141
7.1.3.2 Análise de Componentes Principais 143

7.2 Análise Temporal 149
7.3 Análise Espacial – Posicionamento das Estações 160
7.3.1 Precipitação 162
7.3.2 Temperatura 185
7.4 Análise dos Aspectos Físico-Hídricos da Bacia – Reposicionamento das Estações 189
7.4.1 Hidrografia 190
7.4.2 Relevo, Uso e Ocupação do Solo e Áreas Protegidas 193
7.5 Rede Final Proposta 207
7.6 Análise Crítica 212
CAPÍTULO 8 – ESTIMATIVA DE CUSTOS DA REDE 222
8.1 Aquisição, Instalação e Implementação 222
8.2 Operação e Manutenção 226
8.3 Custos Totais Estimados 228
CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 229
9.1 Quanto ao diagnóstico da rede 231
9.2 Quanto ao processo de posicionamento das estações 231
9.3 Quanto à disponibilidade hídrica e ao estresse hídrico 232
9.4 Quanto ao custo de implantação da rede 233
9.5 Quanto à implementação de uma rede ótima 234
9.6 Quanto aos pontos fortes e fracos da metodologia 234
9.7 Recomendações para trabalhos futuros 234
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 238
ANEXO A – Instituições Responsáveis pelo Monitoramento Hidrometeorológico 255
ANEXO B – Técnicas de Estimativa de Precipitação 265
ANEXO C – Instrumentos de Medição das Variáveis Hidrometeorológicas 267
ANEXO D – Interpolação de Dados Espaciais 271

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Estações pluviométricas no Brasil até 1920 21
Figura 3.2 – Estações pluviométricas no Brasil até 1960 22
Figura 3.3 – Estações pluviométricas no Brasil até 2007 23
Figura 3.4 – Estações fluviométricas no Brasil até 1920 24
Figura 3.5 – Estações fluviométricas no Brasil até 1960 25
Figura 3.6 – Estações fluviométricas no Brasil até 2007 26
Figura 3.7 – Estações telemétricas no Brasil até 1960 27
Figura 3.8 – Estações telemétricas no Brasil até 2007 28
Figura 3.9 – Estações meteorológicas convencionais – INMET 29
Figura 3.10 – Estações meteorológicas automáticas – INMET 29
Figura 3.11 – Estações da rede atual – estado do Rio de Janeiro 33
Figura 4.1 – Janelas espectrais: o espectro eletromagnético, a transmissividade eletromagnética e os comprimentos de onda usados no sensoriamento remoto 35
Figura 4.2 – Tipos de órbitas de satélites 39
Figura 4.3 – Representação esquemática da aquisição dos dados TRMM através dos três sensores primários (TMI, PR e VIRS) 43
Figura 4.4 – Esquema de processamento dos dados TRMM 45
Figura 4.5 – Exemplo de imagem de taxa de precipitação na América (período de 3 horas) 46
Figura 5.1 – Fluxograma geral metodológico para definição de rede de monitoramento hidrometeorológico 58
Figura 5.2 – Fluxograma dos passos da metodologia proposta para definição de rede de monitoramento hidrometeorológico 60
Figura 5.3 – Exemplo de transformação de eixos e componentes principais 69
Figura 5.4 – Exemplo de função de autocorrelação 75
Figura 5.5 – Exemplo de espaçamento *h* 78
Figura 5.6 – Exemplo de distâncias consideradas no cálculo de um variograma 79
Figura 5.7 – Parâmetros para elaboração de variograma experimental 80
Figura 5.8 – Características de um variograma 81
Figura 5.9 – Exemplos de fenômenos de isotropia e anisotropia 82

Figura 5.10 – Variogramas em duas direções distintas representando a anisotropia de uma variável 82
Figura 5.11 – Exemplo de ajuste de modelo variográfico 83
Figura 5.12 – Exemplo de variograma esférico 84
Figura 5.13 – Exemplo de variograma exponencial 85
Figura 5.14 – Exemplo de variograma gaussiano 86
Figura 5.15 – Exemplo de variograma aleatório 87
Figura 5.16 – Exemplo de variogramas de potência (inclusive linear) 88
Figura 5.17 – Exemplo variograma ajustado por modelo seno-cardinal 89
Figura 5.18 – Exemplo de combinação de modelos variográficos (*nested models*) 90
Figura 6.1 – Regiões hidrográficas do Rio de Janeiro 100
Figura 6.2 – Limites das regiões hidrográficas 101
Figura 6.3 – Hidrografia da bacia do rio Dois Rios 102
Figura 6.4 – Precipitação média anual para a bacia do rio Dois Rios (1950 a 2000) 106
Figura 6.5 – Localização das estações Dois Rios e São Lourenço 107
Figura 6.6 – Precipitações mensais – posto São Lourenço (montante) – período de 2000 a 2013 108
Figura 6.7 – Precipitações mensais – posto Dois Rios (jusante) – período de 2000 a 2013 108
Figura 6.8 – Unidades hidrológicas de planejamento (UHP) na bacia do rio Dois Rios (RH VII) 110
Figura 7.1 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo 117
Figura 7.2 – Regiões de abrangência do TRMM na bacia do rio Dois Rios 118
Figura 7.3 – Dados (diários) de precipitação TRMM para o dia 12/12/2013 118
Figura 7.4 – Sub-bacias da bacia do rio Dois Rios 121
Figura 7.5 – Localização dos postos pluviométricos e estações virtuais do TRMM 122
Figura 7.6 – Séries mensais – Dois Rios e TRMM_DR 124
Figura 7.7 – Séries mensais – Ponte Bersot e TRMM_PB 125
Figura 7.8 – Séries mensais – São Lourenço e TRMM_SL 126
Figura 7.9 – Séries mensais – Visconde de Imbé e TRMM_VI 127
Figura 7.10 – Séries mensais – Aldeia e TRMM_A 128
Figura 7.11 – Séries mensais – São Fidélis e TRMM_SF 129
Figura 7.12 – Correlação diária entre o posto pluviométrico Dois Rios e a estação virtual TRMM_DR 130

Figura 7.13 – Correlação mensal entre o posto pluviométrico Dois Rios e a estação virtual TRMM_DR 131
Figura 7.14 – Correlação diária entre o posto Ponte Bersot e a estação virtual TRMM_PB 131
Figura 7.15 – Correlação mensal entre o posto Ponte Bersot e a estação virtual TRMM_PB 132
Figura 7.16 – Correlação diária entre o posto São Lourenço e a estação virtual TRMM_SL 132
Figura 7.17 – Correlação mensal entre o posto São Lourenço e a estação virtual TRMM_SL 133
Figura 7.18 – Correlação diária entre o posto Visconde de Imbé e a estação virtual TRMM_VI 133
Figura 7.19 – Correlação mensal entre o posto Visconde de Imbé e a estação virtual TRMM_VI 134
Figura 7.20 – Correlação diária entre o posto Aldeia e a estação virtual TRMM_A 134
Figura 7.21 – Correlação mensal entre o posto pluviométrico Aldeia e a estação virtual TRMM_A 135
Figura 7.22 – Correlação diária entre o posto pluviométrico São Fidélis e a estação virtual TRMM_SF 135
Figura 7.23 – Correlação mensal entre o posto São Fidélis e a estação virtual TRMM_SF 136
Figura 7.24 – Estações pluviométricas e as sub-bacias 142
Figura 7.25 – ACP considerando somente os postos pluviométricos (mensal) 144
Figura 7.26 – ACP considerando somente os postos pluviométricos (identificação de cada posto) 145
Figura 7.27 – ACP considerando somente as estações virtuais do TRMM (mensal) 146
Figura 7.28 – ACP considerando somente os postos pluviométricos (anual) 147
Figura 7.29 – ACP considerando somente as estações virtuais do TRMM (anual) 148
Figura 7.30 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro em 12/01/2011 150
Figura 7.31 – Função de autocorrelação para o posto Ypu em 12/01/2011 151
Figura 7.32 – Função de autocorrelação para o posto Olaria em 12/01/2011 151
Figura 7.33 – Função de autocorrelação para o posto pluviométrico Pico do Caledônia em 12/01/2011 152

Figura 7.34 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 152
Figura 7.35 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 (somente os 48 primeiros *lags*) 153
Figura 7.36 – Função de autocorrelação para o posto Ypu no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 153
Figura 7.37 – Função de autocorrelação para o posto Ypu no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 (somente os 48 primeiros *lags*) 154
Figura 7.38 – Função de autocorrelação para o posto Olaria no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 154
Figura 7.39 – Função de autocorrelação para o posto Olaria no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 (somente os 48 primeiros *lags*) 155
Figura 7.40 – Função de autocorrelação para o posto Pico do Caledônia no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 155
Figura 7.41 – Função de autocorrelação para o posto Pico do Caledônia no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 (somente os 48 primeiros *lags*) 156
Figura 7.42 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro no período para o mês de jan/2011 (somente os 380 primeiros *lags*) 156
Figura 7.43 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro no período para o mês de jan/2011 (somente os 48 primeiros *lags*) 157
Figura 7.44 – Função de autocorrelação para o posto Ypu no período para o mês de jan/2011 (somente os 380 primeiros *lags*) 157
Figura 7.45 – Função de autocorrelação para o posto Ypu no período para o mês de jan/2011 (somente os 48 primeiros *lags*) 158
Figura 7.46 – Função de autocorrelação para o posto Olaria no período para o mês de jan/2011 (somente os 380 primeiros *lags*) 158
Figura 7.47 – Função de autocorrelação para o posto Olaria no período para o mês de jan/2011 (somente os 48 primeiros *lags*) 159
Figura 7.48 – Região mais densamente monitorada ou com maior concentração de estações na bacia do Dois Rios 161
Figura 7.49 – Variograma omnidirecional para toda a bacia – período chuvoso extremo – diário (12/01/2011) 163

Figura 7.50 – Variogramas direcionais (0º, 45º e 90º) para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso extremo – diário (12/01/2011) 164
Figura 7.51 – Variograma omnidirecional para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso extremo – mensal (jan/2011) 165
Figura 7.52 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso extremo – diário (12/01/2011) 166
Figura 7.53 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso extremo – mensal (jan/2011) 167
Figura 7.54 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período chuvoso extremo – diário (12/01/2011) 168
Figura 7.55 – Variograma omnidirecional para a região povoada considerando somente os postos – período chuvoso extremo – mensal (jan/2011) 169
Figura 7.56 – Variograma omnidirecional para toda a bacia – período chuvoso médio – diário (26/01/2013) 170
Figura 7.57 – Variograma omnidirecional para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso médio – mensal (jan/2013) .. 171
Figura 7.58 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso médio – diário (26/01/2013) 172
Figura 7.59 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso médio – mensal (jan/2013) .. 173
Figura 7.60 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período chuvoso médio – diário (26/01/2013) 174
Figura 7.61 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período chuvoso médio – mensal (jan/2013) 175
Figura 7.62 – Variograma omnidirecional para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período de estiagem – diário (21/07/2011) 176
Figura 7.63 – Variograma omnidirecional para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período de estiagem – mensal (jul/2011) 177

Figura 7.64 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período de estiagem – diário (21/07/2011) 178
Figura 7.65 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período de estiagem – mensal (jul/2011) 179
Figura 7.66 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período de estiagem – diário (21/07/2011).....180
Figura 7.67 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período de estiagem – mensal (jul/2011).....181
Figura 7.68 – Rede hidrometeorológica – proposta 1 185
Figura 7.69 – Variograma omnidirecional para a temperatura considerando o período chuvoso (09/01/2011 a 16/01/2011).....186
Figura 7.70 – Variograma omnidirecional para a temperatura considerando o período de estiagem (20/07/2011 a 27/07/2011) 187
Figura 7.71 – Rede hidrometeorológica – proposta 2 189
Figura 7.72 – Hidrografia e rede hidrometeorológica – proposta 2 190
Figura 7.73 – Rede hidrometeorológica – proposta 3 192
Figura 7.74 – Relevo e rede hidrometeorológica – proposta 3.....193
Figura 7.75 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Dois Rios 194
Figura 7.76 – Detalhe: estação 1 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 194
Figura 7.77 – Detalhe: estação 2 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 195
Figura 7.78 – Detalhe: estação 3 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 195
Figura 7.79 – Detalhe: estação 4 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 196
Figura 7.80 – Detalhe: estação 5 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 196
Figura 7.81 – Detalhe: estação 6 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 197
Figura 7.82 – Detalhe: estação 7 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 197
Figura 7.83 – Detalhe: estação 8 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 198
Figura 7.84 – Detalhe: estação 9 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 198
Figura 7.85 – Detalhe: estação 10 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 199
Figura 7.86 – Detalhe: estação 11 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 199
Figura 7.87 – Detalhe: estação 12 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 200
Figura 7.88 – Detalhe: estação 13 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 200
Figura 7.89 – Detalhe: estação 14 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 201
Figura 7.90 – Detalhe: estação 15 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 201
Figura 7.91 – Detalhe: estação 16 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 202

Figura 7.92 – Detalhe: estação 17 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 202
Figura 7.93 – Detalhe: estação 18 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 203
Figura 7.94 – Detalhe: estação 19 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo 203
Figura 7.95 – Rede hidrometeorológica – proposta 4 206
Figura 7.96 – Áreas de proteção e a rede hidrometeorológica (proposta 4).....207
Figura 7.97 – Rede proposta 4 e as sub-bacias principais 208
Figura 7.98 – Rede proposta 4 e as unidades hidrológicas de planejamento 209
Figura 7.99 – Rede hidrometeorológica – proposta 5 210
Figura 7.100 – Rede hidrometeorológica – proposta final 211
Figura 7.101 – Exemplo de molinete e medição convencional de vazão.....212
Figura 7.102 – Características populacionais e a rede final proposta 213
Figura 7.103 – NDVI obtido para o período chuvoso (09/01/2011 a 16/01/2011) 215
Figura 7.104 – NDVI obtido para o período de estiagem (20/07/2011 a 27/07/2011) .215
Figura 7.105 – Temperatura obtida para o período chuvoso extremo (09/01/2011 a 16/01/2011).....216
Figura 7.106 – Imagem de temperatura para o período chuvoso (09/01/2011 a 16/01/2011) após a interpolação 217
Figura 7.107 – Temperatura obtida para o período de estiagem (20/07/2011 a 27/07/2011).....217
Figura 7.108 – Estresse hídrico obtido para o período chuvoso (09/01/2011 a 16/01/2011).....219
Figura 7.109 – Estresse hídrico obtido para o período de estiagem (20/07/2011 a 27/07/2011).....219
Figura C.1 – Exemplo de um pluviômetro automático 267
Figura C.2 – Exemplo de um piranômetro 269
Figura C.3 – Exemplo de um sensor de velocidade do vento.....270

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resumo das características dos três sensores primários do TRMM (TMI, PR e VIRS).....44
Tabela 4.2 – Especificações técnicas do sensor MODIS.....48
Tabela 4.3 – Informações sobre as 36 bandas MODIS 49
Tabela 4.4 – Camadas de dados disponíveis no produto MODIS MOD09Q1 (Reflectância da superfície) 51
Tabela 4.5 – Camadas de dados disponíveis no produto MODIS MOD11A2 (Temperatura da superfície terrestre e emissividade).....52
Tabela 5.1 – Densidade mínima de estações de monitoramento de precipitação recomendada pelo WMO (área em km2 por estação) de acordo com o tipo 67
Tabela 6.1– População dos municípios integrantes da bacia do rio Dois Rios 99
Tabela 6.2 – Unidades hidrológicas de planejamento (UHP) na bacia do rio Dois Rios (RH VII) 110
Tabela 6.3 – Disponibilidade hídrica nas UHPs – bacia do rio Dois Rios (RH VII) 111
Tabela 7.1 – Estações pluviométricas disponíveis na sub-bacia do rio Dois Rios.....114
Tabela 7.2 – Estações pluviométricas utilizadas 116
Tabela 7.3 – Períodos de análises dos dados e aplicação das metodologias 120
Tabela 7.4 – Rios principais e áreas de drenagem das sub-bacias 121
Tabela 7.5 – Dados dos postos pluviométricos e estações virtuais do TRMM.....123
Tabela 7.6 – Resumo dos coeficientes de correlação (R) e dos coeficientes angulares (A) das correlações diárias e mensais entre os postos pluviométricos e as estações virtuais do TRMM.....136
Tabela 7.7 – Quantidade de estações nas sub-bacias.....142
Tabela 7.8 – Estações considerada nos cálculos de ACF 150
Tabela 7.9 – Quadro-resumo do número de lags para ACF = 0 159
Tabela 7.10 – Resumo dos resultados dos variogramas para o período chuvoso.....182
Tabela 7.11 – Resumo dos resultados dos variogramas para o período de estiagem 183
Tabela 8.1 – Variáveis e sensores para cada tipo de estação.....223
Tabela 8.2 – Custo total estimado dos sensores 224
Tabela 8.3 – Custos adicionais de aquisição e instalação para cada estação.....225

LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
ACF	*Autocorrelation Function*
ACP	Análise de Componentes Principais
AMSR-E	*Advanced Microwave Scanning Radiometer to EOS*
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVHRR	*Advanced Very High Resolution Radiometer*
CBERS	*China-Brazil Earth Resources Satellite* (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres)
CBH-R2R	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Dois Rios
CCO	Centro de Controle Operacional
CEFH	Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas
CEP	Coeficiente de Efeito Pepita
CERES	*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*
CERHI-RJ	Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Rio de Janeiro
CMORPH	CPC *Morphing Technique*
CNARH	Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos
COMAER	Comando da Aeronáutica
CPRM	Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
EOF	*Empirical Orthogonal Functions*
EOS	*Earth Observing System*
ESA	*European Spatial Agency*
ESD	*Earth Science Division*
ESP	*Earth Science Program*
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
FIR	*Far Infrared*
GeoTIFF	*Geo-referenced Tagged Image File Format*
GOES	*Geostationary Operational Environmental Satellite*
GPM	*Global Precipitation Measurement*
GRACE	*Gravity Recovery And Climate Experiment*
GSFC	*Goddard Space Flight Center*
GSM	*Global System for Mobile*
HDF	*Hierarchical Data Format*
IAHS	*International Association of Hydrological Sciences*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEF	Fundação Instituto Estadual de Florestas
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	Infravermelho (*infra-red*)
ISAS	*Institute of Space and Astronautic Science*

JAXA	*Japanese Aerospace Exploration Agency*
LANSAT	*Land Remote Sensing Satellite*
LDCM	LANDSAT *Data Continuity Mission*
LIS	*Lightning Imaging Sensor*
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MD	Ministério da Defesa
MME	Ministério de Minas e Energia
MODIS	*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*
MW	*Microwave*
NAL	*National Aerospace Laboratory of Japan*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
NASDA	*National Space Development Agency of Japan*
NCEP	*National Centers for Environmental Prediction*
NCSA	*National Center for Supercomputing Applications*
NDVI	*Normalized Difference Vegetation Index*
NIR	Infravermelho Próximo *(Near Infrared)*
NOAA	*National Oceanic and Atmospherical Administration*
PCA	Análise de Componentes Principais *(Principal Components Analysis)*
PERHI-RJ	Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio de Janeiro
PNAE	Programa Nacional de Atividades Espaciais
PR	*Precipitation Radar*
PUB	*Prediction in Ungauged Basins*
RADAR	*Radio Detection and Ranging*

RED	*Red Surface Reflectance*
RH	Região Hidrográfica
SAR	*Synthetic Aperture Radar*
SCS	*Soil Conservation Service*
SEA	Secretaria de Estado do Ambiente
SERLA	Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINDAE	Sistema Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais
SMAP	*Soil Moisture Active-Passive*
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SPI	*Standard Precipitation Index*
SURSAN	Superintendência de Urbanização e Saneamento
SWOT	*Surface Water and Topography*
TM	*Thematic Mapper*
TMI	TRMM *Microwave Imager*
TMPA	TRMM *Multi-satellite Precipitation Analysis*
TRMM	*Tropical Rainfall Measuring Mission*
TSC	Temperatura Superficial Continental
UC	Unidade de Conservação
UHP	Unidade Hidrológica de Planejamento
USGS	*United States Geological Survey*
UTC	*Universal Time Coordinated*
UV	Ultravioleta *(Ultraviolet)*

VIRS	Sensor do Visível e Infravermelho *(Visible and Infrared Sensor)*
VIS	*Visible Spectrum*
WMO	*World Meteorological Organization*

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A adequada gestão dos recursos hídricos depende substancialmente do conhecimento sobre o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas (FIOREZE *et al.*, 2008). Esse conhecimento é fundamental para a elaboração de estudos hidrológicos e obras hidráulicas em questões relacionadas ao gerenciamento de recursos hídricos e também no auxílio à previsão de desastres ambientais.

As informações hidrometeorológicas possuem o potencial de gerar impactos significativos e abrangentes na sociedade como um todo, com profundas repercussões na eficiência econômica e competitividade dos negócios, na segurança e qualidade de vida da população e na sustentabilidade ambiental (USWRP, 1997).

Por outro lado, os dados disponíveis de monitoramento quali-quantitativo são escassos e por vezes inconsistentes (SILVEIRA *et al*., 1998), sendo carente também de mecanismos mais eficientes na avaliação do valor da informação, da medição de dados para futuras análises de riscos e prevenção de desastres ambientais. Apesar da relevância dos estudos de redes de monitoramento hidrometeorológico, iniciativas desse tipo têm sido insuficientes, devido à existência de um conjunto de desafios e restrições que limitam seu adequado planejamento. Usualmente, os estudos relacionados ao tema baseiam-se na análise e otimização da rede, sendo poucos os estudos que, de fato, propõem uma metodologia para a instalação de uma rede de monitoramento.

Como ainda existem regiões onde os dados hidrológicos básicos são insuficientes ou inexistentes e muitas estações apresentam séries com poucos anos de dados, que, por vezes, não configuram uma amostra representativa, surge, como proposta deste trabalho, a definição de redes de monitoramento hidrometeorológico.

No Brasil, a instalação de redes de monitoramento dá-se conforme a viabilidade logística de aquisição de informação e de condições adequadas para operação da rede por parte das instituições responsáveis ou, alternativamente, em função da necessidade de obtenção de dados na região em que será implementado um determinado empreendimento, sendo, muitas vezes, operadas somente durante o curto período de estudo e desenvolvimento dos projetos desses empreendimentos. Por outro lado,

constata-se uma lacuna importante de informações que efetivamente atendam ao gerenciamento de recursos hídricos nas mais diversas escalas de bacias hidrográficas brasileiras, com estudos que ofereçam um diagnóstico adequado para implementação de monitoramento de variáveis hidrológicas e meteorológicas segundo distintos matizes de diferentes aplicações.

A definição de redes para o monitoramento de variáveis hidrometeorológicas, como precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, entre outras, deve ser baseada não somente na variabilidade temporal dessas variáveis, mas também na correspondente variação espacial, buscando, não apenas uma rede ótima, que seria potencialmente correspondente a um número mínimo de estações necessárias, como, também, custos reduzidos para instalação dessas estações.

Face a esse contexto, optou-se, nesta dissertação, pelo objetivo de definir uma rede de monitoramento, que possa servir para múltiplas finalidades, a partir dos dados de precipitação observados *in situ* nos postos pluviométricos e também dos dados de precipitação e temperatura obtidos por meio de sensoriamento remoto. Nesse sentido, serão explorados aspectos relacionados ao tema como, por exemplo, a rede mínima recomendada e métodos estatísticos de diagnóstico por meio de análise de componentes principais e autocorrelações. Adicionalmente, mediante a abordagem metodológica fundamentada em análise geoestatística por meio da construção de semivariogramas, a partir deste ponto denominados de variogramas por simplicidade, será estimada a distância ideal entre as estações propostas na rede e, consequentemente, a quantidade de estações que serão instaladas.

Nas últimas três décadas, observaram-se avanços consideráveis na área de conhecimento de sensoriamento remoto, em especial no âmbito de satélites nominados ambientais, aumentando a quantidade de informações disponíveis, incluindo estimativas de precipitação. Com melhores resultados nas estimativas, os produtos têm migrado da pesquisa para o produto operacional, difundido por atores de hidrometeorologia (COLLISCHONN, 2006). A utilização de sensores remotos na estimativa de precipitação mostra-se como uma alternativa interessante para contrapor problemas de carência de dados e monitoramento.

O presente trabalho aduz a proposta de conceber uma rede de monitoramento hidrometeorológico predominantemente baseada em ferramentas de natureza

matemático-estatística, apoiada, sobretudo, na incorporação de uma nova visão da bacia hidrográfica, levando em consideração diferentes aspectos físicos e sociais, de maneira a melhor avaliar os impactos das atividades humanas capazes de modificar a paisagem e notadamente alterar os processos hidrometeorológicos naturais, tais como a impermeabilização dos solos.

Para aplicação da proposta deste trabalho, será objeto de estudo a bacia hidrográfica do rio Dois Rios, situada no estado do Rio de Janeiro, mais especificamente na região serrana, tendo sido escolhida por ser uma bacia com características diversificadas em relação ao relevo e à vegetação e também quanto ao regime hidrometeorológico.

1.2 Justificativa

O monitoramento de eventos hidrometeorológicos é uma tarefa complexa, uma vez que os fenômenos de interesse são caracterizados pela alta variabilidade no tempo e no espaço, o que requer a solução ótima no que se refere ao número e à localização das estações de monitoramento dentro da área em estudo.

O interesse na otimização ocorre devido ao fato de que há um significativo aumento no número de sistemas instalados, o que induz a uma revisão nos critérios de definição e projeto das redes de monitoramento tradicionais com vistas à redução dos custos de instalação e operação de novas estações, bem como à melhoria do acompanhamento, em tempo real, dos eventos hidrometeorológicos extremos como estiagens e inundações.

Em relação à área de estudo, a sua escolha foi, inicialmente, motivada pela ocorrência do evento chuvoso crítico em janeiro de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro, que deixou muitos mortos, feridos e desabrigados. Alguns estudos analisaram e discutiram esse acontecimento catastrófico como em MEDEIROS e BARROS (2011), PINHEIRO *et al*. (2011), FREITAS *et al*. (2012), GONÇALVES (2013) e OLIVEIRA (2014). Tal ocorrência evidenciou a necessidade de monitoramento e controle desses eventos.

1.3 Objetivo

Este trabalho propõe um procedimento para avaliar e configurar rede de monitoramento hidrometeorológico de uma bacia hidrográfica a partir do emprego de análise geoestatística, de modo a definir a estrutura de correlação espacial, com suporte de dados de precipitação obtidos nas estações físicas instaladas na bacia (postos pluviométricos), dados de precipitação de satélite obtidos através do TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission* e dados de temperatura e vegetação, obtidos, por sua vez, a partir de imagens de satélite MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectrometer*. O estudo de caso empregado é a bacia do Dois Rios.

Mais especificamente, dividiu-se o estudo em etapas. Parte-se de um diagnóstico da atual rede de monitoramento hidrometeorológico mediante a análise do comportamento da rede e caracterização da regionalização de informações com o uso do método de componentes principais, para, então, analisar a cadência de amostragem da variável precipitação e, posteriormente, empregar a caracterização matemático-estatística e análise geoestatística aos dados de chuva *in situ* e de satélite. Na sequência, tem-se a definição da rede, levando também em consideração os aspectos físico-hídricos da bacia. Por fim, tem-se a análise crítica da rede de monitoramento proposta, contrastando-a com informações satelitais espacializadas de vegetação e temperatura, que permitem prospectar, até certo ponto, as condições de vulnerabilidade ambiental na bacia de estudo, gerando-se, então, o indicador de estresse hídrico. Ainda nessa etapa, em contraste com o indicador de estresse hídrico, optou-se, ainda, por incluir a demanda hídrica por meio da avaliação da distribuição espacial da população na bacia com base no censo do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). Após a definição e análise crítica da rede adequada para a bacia do rio Dois Rios, com a finalidade de prevenção de eventos extremos e desastres e estimativas dos balanços hídricos na escala do mês e do dia, são mensurados os custos da rede proposta.

1.4 Escopo do Trabalho

Esta dissertação está organizada em nove capítulos, sendo este primeiro direcionado à contextualização do tema abordado e apresentação da motivação do desenvolvimento deste trabalho, apresentando, também, o objetivo geral e correspondentes etapas que evidenciam a abordagem metodológica proposta conjuntamente com a estruturação e organização do documento.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, que descreve alguns estudos e artigos relacionados aos dados utilizados, ao tema e à análise e à metodologia empregadas que serviram de base para a elaboração deste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta um histórico sobre as instituições que realizam o monitoramento no Brasil e no mundo, bem como a evolução do monitoramento hidrometeorológico nacional ao longo dos últimos 100 anos.

No Capítulo 4, são apresentadas as ferramentas de sensoriamento remoto associadas à hidrometeorologia, bem como apresentação dos satélites e produtos utilizados como suporte neste trabalho, a saber, TRMM e MODIS.

A metodologia desenvolvida no presente trabalho, desde a análise dos dados até a definição de redes de monitoramento por meio de técnicas geoestatísticas estão apresentadas no Capítulo 5.

Já o Capítulo 6 apresenta o estudo de caso, isto é, a caracterização da bacia escolhida, associada ao rio denominado de Dois Rios, para avaliação do monitoramento e proposição de uma rede de monitoramento hidrometeorológica de alerta para possíveis desastres naturais e avaliação do balanço hídrico diário e/ou mensal.

O Capítulo 7, por sua vez, apresenta os resultados obtidos a partir das análises realizadas em relação aos dados utilizados na metodologia empregada bem como os resultados encontrados em cada etapa da metodologia, juntamente com a proposição da rede de monitoramento hidrometeorológica.

No Capítulo 8, consta uma estimativa simplificada dos custos de aquisição, instalação, implantação, operação e manutenção da rede proposta.

Finalmente, no último capítulo, é apresentado um resumo com as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, assim como as recomendações para futuros trabalhos nessa mesma linha de atuação.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

A precipitação, como componente fundamental do ciclo global da água, é um parâmetro chave da ecologia, hidrologia e meteorologia (GOOVAERTS, 2000; LANGELLA *et al*., 2010; LI e SHAO, 2010).

Portanto, é de grande importância a compreensão das características da variação espacial e temporal da precipitação. Os dados tradicionais de precipitação são, geralmente, obtidos a partir de medidas pontuais, as quais dependem fortemente das observações de campo (GOODRICH *et al.*, 1995; WHEATER *et al.*, 2000). No entanto, é difícil fornecer dados espaciais de precipitação com alta resolução a partir de observações tradicionais de chuva obtidas das estações pluviométricas (WILHEIT, 1986). Essa limitação é, principalmente, atribuída a dois fatores. Em primeiro lugar, as observações de precipitação são baseadas em um número finito de estações pluviométricas, tornando difícil refletir efetivamente a variação espacial da chuva, especialmente em certas regiões onde a distribuição das estações é muito esparsa, um fenômeno muito comum em países em desenvolvimento (HUGHES, 2006; JEFFERY, 2006; BEESLEY *et al.*, 2009). Em segundo lugar, as observações das estações pluviométricas só podem refletir a precipitação dentro de um raio ao redor do local dos instrumentos (COLLISCHONN *et al*., 2008).

Nos últimos anos, o desenvolvimento do sensoriamento remoto e da tecnologia de sistemas de informação geográfica tem apresentado novos métodos de observação de chuvas (DINGMAN, 2002; MICHAELIDES *et al.*, 2009.). Apoiado por essas tecnologias, muitas instituições de pesquisa e organizações governamentais têm desenvolvido uma série de conjuntos de dados de precipitação em escalas regional e global (HUFFMAN *et al*., 1997, 2001, 2009), como, por exemplo, o TRMM (KUBOTA *et al.*, 2007; KUMMEROW *et al.*, 1998, 2000; HUFFMAN *et al.*, 2007), cujo objetivo específico, a princípio, era medir a precipitação sobre os oceanos e os trópicos. Esses produtos de precipitação do TRMM têm sido largamente aplicados em várias partes do mundo e em diversas áreas de aplicação, incluindo, a título de ilustração, o desenvolvimento de algoritmos dos dados de precipitação como em HADDAD *et al*. (1997) e em IGUCHI *et al.* (2000), redução e avaliação das escalas dos dados espaciais como em MEKONNEN *et al*. (2008), KATAYAMA (2008), IMMERZEL *et al*. (2009) e JIA *et al*. (2011), análise dos dados como em HIROSHIMA (1999) e HUFFMAN *et*

al. (2007; 2010), avaliação de desempenho e comparação com os dados observados nos postos pluviométricos como desenvolvidos por COLLISCHONN *et al*. (2006), SU *et al*. (2008), LEIVAS *et al*. (2009), LIU *et al*. (2012), ZENG *et al*. (2012) e CURTARELLI *et al*. (2013), estudos de avaliação e validação dos dados do TRMM como em HABIB e KRAJEWSKI (2002), RAMAGE *et al*. (2003), FRANCHITO *et al*. (2009) e DUAN *et al*. (2012), aplicação em modelos hidrológicos, como feito por COLLISCHONN *et al*. (2006; 2008) e PACA (2008), entre outras aplicações nas mais diversas áreas.

É bastante reconhecido que as estimativas de precipitação por satélite têm as suas próprias incertezas e é imperativo quantificá-las antes de uma comparação entre esses dados espaciais e os dados observados nos postos pluviométricos. Segundo HABIB e KRAJEWSKI (2002), a tarefa de quantificar a incerteza de um radar de precipitação provou ser difícil, tendo, como obstáculo fundamental, a falta de um padrão de referência adequado. Tradicionalmente, as medições de precipitação disponíveis a partir de pluviômetros são as utilizadas como referência, entretanto são escassas, uma vez que as bacias usualmente são carentes de estações pluviométricas. Para análise e validação adequadas dos dados do TRMM, seria ideal realizar a comparação desses dados de radar com dados de chuva em regiões que apresentem alta densidade de postos pluviométricos, tornando possível examinar a variabilidade da precipitação em escalas espaciais e temporais de alguns metros e alguns minutos, respectivamente. Infelizmente, essa configuração desejável não encontra amparo no caso da bacia em estudo. Quando os resultados da comparação e validação dos dados TRMM forem apresentados mais adiante neste trabalho, serão mencionadas as conclusões encontradas em diversos estudos similares.

Escalas de espaço e tempo são fundamentais para a hidrologia, sendo que a questão de como as diferentes escalas interagem e de como é possível transportar resultados de uma escala representam desafios para a compreensão hidrológica e tomada de decisões para gestão estratégica dos recursos hídricos de uma região. Como existe ampla variabilidade de escalas espaço-temporais que incorporam a complexidade de muitos fenômenos naturais e sociais, surge um entendimento comum de que as abordagens analíticas devem depender fortemente da escala de interesse. Algumas escalas de representação em hidrologia são mais adequadas dependendo da finalidade, como, por exemplo, modelagem, gestão de recursos hídricos, usos do solo e dinâmica sedimentológica, representação da umidade do solo e das trocas de fluxos de calor na

superfície do solo em modelos hidrológicos, previsão de picos de vazão em eventos chuvosos, desenvolvimento sustentável, dentre outros.

Argumenta-se que os níveis de escala em que é possível uma conceituação significativa dos processos físicos não são arbitrários, e sua escala não é contínua, uma vez que as formulações adequadas a um determinado nível, geralmente, não são aplicáveis aos níveis imediatamente adjacentes. Assim sendo, KLEMEŠ (1983), em um trabalho sobre conceituação e escalas em hidrologia, discutiu algumas possibilidades por meio da busca de um nível adequado de conceituação que possibilite avançar para cima ou para baixo ao longo da hierarquia de escalas hidrológicas. BLÖSCHL e SIVAPALAN (1995) desenvolveram um trabalho sobre problemas de escala em hidrologia e discutem heterogeneidade e variabilidade em bacias hidrográficas, primeiramente analisando as escalas do ponto de vista da modelagem, especificamente, através de diferentes abordagens associadas às variáveis, parâmetros, insumos e conceituações. Em segundo lugar, analisaram a temática a partir de uma perspectiva mais holística, que trata da análise de similaridade e conceitos dimensionais. Ainda na linha de escalas em hidrologia, têm-se as análises de ondeletas, como no estudo de WANG e DING (2003) aplicado à previsão hidrológica, baseado na escala multi-temporal e nas características não lineares de uma série histórica observada, a partir de um novo modelo híbrido entre a análise de ondeletas e redes neurais artificiais denominado de modelo de rede de ondeletas.

Nos estudos de aumento da resolução espacial (downscaling) dos dados espaciais de precipitação, destaca-se o produto CMORPH (CPC *Morphing Technique*), disponibilizado pelo NCEP – *National Center for Environmental Prediction* da NOAA (*National Oceanic and Atmospherical Administration*), com resolução espacial de 8 km, sendo derivado basicamente de sensores micro-ondas a partir de satélites de órbita polar, propagados no tempo e no espaço por meio de sensores infravermelhos. JOYCE *et al.* (2004) apresentaram o CMORPH como um método que produz estimativas de precipitação global por meio de sensor passivo de micro-ondas e de dados de infravermelho com alta resolução espacial e temporal. ARAÚJO e GUETTER (2007) validaram a chuva estimada pelo satélite CMORPH na modelagem hidrológica do Alto Iguaçu. ZEWELDI e GEBREMICHAEL (2009) avaliaram os produtos de precipitação do CMORPH em fina escala espaço-tempoRAL. DINKU *et al.* (2010) utilizaram redes de estações relativamente densas em duas regiões montanhosas, uma na África e uma na

América do Sul, para validar os produtos de satélite CMORPH e TRMM. Um estudo recente de BUARQUE *et al.* (2011) comparou as características das chuvas amazônicas do CMORPH e os dados de precipitação da rede pluviométrica nacional brasileira.

Um aspecto muito importante e pertinente ao tema de monitoramento hidrometeorológico diz respeito ao monitoramento de eventos extremos. Recentemente, estudos sobre o monitoramento desses eventos críticos relativos tanto à ocorrência de chuvas intensas e inundações, quanto a eventos de seca, têm sido realizados com o auxílio de técnicas de sensoriamento remoto, baseado em satélites e malha de dados em alta resolução. LIU *et al.* (2013) abordaram as incertezas na determinação dos limites extremos de precipitação para a bacia do rio Pearl na China, através da avaliação da aplicabilidade de métodos não-paramétrico, paramétrico e de análise de flutuação retificada na determinação dos limites extremos de precipitação, além de quantificar a incerteza desses valores em cada método. Eles concluíram que, embora envolva processos computacionais complicados, o método da análise de flutuação retificada provou ser o mais adequado, sendo capaz de fornecer um conjunto único de limites extremos de precipitação para grandes bacias com distribuição irregular espaço-temporal da precipitação. LOVINO *et al.* (2014) desenvolveram um estudo para a região nordeste da Argentina, que consiste na análise do comportamento espaço-temporal da precipitação em eventos extremos através da análise de componentes principais, aplicada aos campos de índices de precipitação padrão (do inglês, SPI – *Standard Precipitation Index*) em diferentes escalas temporais, determinando, assim, a vulnerabilidade da região. O monitoramento de evento extremo de estiagem também tem sido estudado, como na China, em que ZHANG e JIA (2013) propuseram um novo índice de detecção de seca a partir de técnicas de sensoriamento remoto para monitoramento da escassez de água no curto prazo, especialmente em regiões semi-áridas, através da integração de três variáveis: precipitação (proveniente do TRMM), umidade do solo e temperatura superficial continental (derivados do AMSR-E).

Uma rede de estações de monitoramento é projetada para dar a melhor representação possível de um estado de campo meteorológico que varia continuamente no tempo e no espaço (KAMEL *et al.*, 2010). No caso desta dissertação, abordam-se variáveis de natureza hidrológica e meteorológica, o que, por vezes, levará à adoção da expressão variáveis hidrometeorológicas.

O monitoramento está associado com questões relativas ao valor da informação hidrometeorológica, que, apesar de ser um tema relevante, não tem estimulado iniciativas desse tipo em número suficiente. Destaca-se, por exemplo, LEITE (2008), que desenvolveu um trabalho sobre uma abordagem metodológica propondo uma mudança de foco da realização de estudos isolados para o estabelecimento de um processo sistemático e estruturado de gestão do valor da informação hidrometeorológica nas organizações sensíveis ao tempo, clima ou recursos hídricos, enfatizando a importância de conjugar, em um mesmo processo de gestão, com revisões e renovações contínuas, módulos interdependentes que abranjam a configuração do problema e o espaço de análise, a seleção e a integração de múltiplos métodos de estimativa de valor e a derivação de estratégias de gestão.

Muitas tarefas de gestão de bacias hidrográficas (recarga de recursos hídricos, controle de qualidade da água ou proteção contra as cheias) requerem conjuntos de dados climáticos de redes de monitoramento de observações pontuais (KŘEČEK e PUNČOCHÁŘ, 2012). Por muitos anos, tem sido feito um apelo urgente para a melhoria dos dados de entrada climatológicos (pressão atmosférica, radiação solar, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento, entre outros) usados por modelos hidrológicos de bacias (BECKER e SERBAN, 1990; COOPER e FERNANDO, 2009).

O programa de previsão em bacias não monitoradas (do inglês, PUB – *Prediction in Ungauged Basins*), estabelecido, inicialmente, para a década 2003-2013, é, por exemplo, uma iniciativa da Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS – *International Association of Hydrological Sciences*) no sentido de estabelecer diretrizes para o desenvolvimento de estudos ainda que se conviva com a carência de dados hidrometeorológicos em muitas regiões do planeta. Destina-se, portanto, à formulação e à implementação de programas científicos que visam alcançar grandes avanços na capacidade de fazer previsões confiáveis em bacias sem monitoramento (SIVAPALAN *et al.*, 2003). O programa PUB define procedimentos para a previsão da resposta hídrica em termos de, por exemplo, vazões de escoamento superficial e subterrâneo, armazenamento e recarga das águas subterrâneas, produção de sedimentos e de nutrientes, entre outras avaliações, em bacias não monitoradas ou pobremente monitoradas, incluindo as incertezas associadas, utilizando, quando disponíveis, insumos físico-climáticos, como solos, vegetação, geologia e topografia, alterações ou mudanças climáticas potenciais futuras e mudanças no uso e ocupação do solo.

Naturalmente, nesse contexto, os estudos prescindem do benefício de séries temporais de observação de longo termo de uma dada variável hidrológica que está sendo prevista, ou seja, não contam com o subsídio direto para a calibração.

Ainda nessa linha de estimativa em bacias sem monitoramento, RAO e HSIEH (1991) desenvolveram uma técnica baseada em funções ortogonais empíricas para estimar diária e mensalmente as séries temporais de variáveis hidrológicas como precipitação, temperatura e escoamento superficial (*runoff*) em locais não monitorados. A precisão do método foi testada através da aplicação em locais com disponibilidade de dados, e os resultados indicaram que o método era rápido e preciso. YADAV *et al*. (2007) introduziram um modelo independente de regionalização através de um estudo piloto com 30 bacias hidrográficas do Reino Unido, que aborda a previsão de vazões em bacias não monitoradas com base em evidências empíricas obtidas das relações entre a estrutura, o clima e o comportamento de resposta das bacias. Como resultado, as características definidas como dominantes, isto é, que controlam o regime de vazões, foram os índices de umidade, a topografia e a hidrogeologia, mostrando que essa nova abordagem fornece previsões contínuas de vazão confiáveis nos locais sem monitoramento estudados.

A recomendação da Organização Meteorológica Mundial (WMO – *World Meteorological Organization*) quanto ao número mínimo de estações em uma rede de monitoramento hidrometeorológica constitui-se no emprego de uma metodologia simples na avaliação e otimização de redes. Essa metodologia foi utilizada por BELETE (1999), uma vez que a densidade da rede hidrometeorológica da Etiópia não satisfazia tais recomendações devido às restrições orçamentárias e às limitações da capacidade das organizações governamentais responsáveis. Nesse trabalho, o autor propôs, então, uma estratégia rigorosa baseada nas condições socioeconômicas do país, estabelecendo a instalação de estações em locais como escolas e igrejas ou mesquitas que dispusessem de observadores. Verificou-se, assim, que 50% desses referidos estabelecimentos estavam aptos para instalação de estações adicionais.

Diversos estudos foram realizados para análise de redes de monitoramento, utilizando diferentes metodologias. ACQUAAH e DANKWA (1965) verificaram a rede de medição de precipitações na República de Ghana e em suas divisões regionais e destacaram a importância do conhecimento meteorológico e hidrológico dos recursos

hídricos para o desenvolvimento da agricultura e da indústria. KISHI e CENTENO (1992) ressaltaram a importância do conhecimento dos dados hidrológicos para o estudo dos recursos hídricos por meio da análise da rede pluviométrica do estado de Alagoas, partindo da quantificação dos postos e obtenção das densidades pluviométricas nas regiões geográficas do estado. PAIVA (2001) apresentou um exemplo de projeto de rede de estações pluviométricas, fluviométricas e sedimentométricas para a bacia do rio Ibicuí, sub-bacia da bacia do rio Uruguai. ALVES *et al*. (2002) analisaram a distribuição espacial da rede pluviométrica existente no estado de Pernambuco, na qual as informações pluviométricas disponibilizadas eram utilizadas em projetos nas áreas da meteorologia, recursos hídricos, entre outras, contemplando, nessa análise, as redes de equipamentos convencionais e telemétricos.

Associado ao tema de monitoramento hidrometeorológico, não se pode deixar de citar o sistema Mesonet de Oklahoma, que é uma rede automatizada de 108 estações que cobrem o estado de Oklahoma nos Estados Unidos. Cada estação transmite os dados de temperatura do ar, umidade, pressão barométrica, velocidade e direção do vento, precipitação, radiação solar e temperatura do solo a cada 15 minutos. O endereço eletrônico central de transmissão recebe os dados, executa alguns testes de qualidade, arquiva os dados e divulga-os em tempo real para uma ampla comunidade de usuários. BROCK *et al.* (1995) elaboraram um trabalho que fornece uma visão geral a respeito do Mesonet de Oklahoma a partir de uma descrição técnica do projeto e de sua instrumentação, além de abordar outros aspectos como acurácia e precisão do sensor, sua resolução, a altura em relação ao nível do solo e o método de exposição.

Outras técnicas e metodologias são aplicadas quando o tema é definição e otimização de redes de monitoramento hidrometeorológico, como a abordagem geoestatística, baseada na teoria de variáveis regionalizadas, que assume que as amostras espaciais podem permitir a compreensão de um processo espacial aleatório com suporte do uso de eficazes instrumentos estatísticos para as estimativas espaciais. A metodologia consiste em uma sequência de etapas que fornecem diferentes informações sobre a distribuição espacial da variável de interesse. As principais etapas são as seguintes: compilação de uma base de dados válida, análise de rede de monitoramento e análise estrutural, incluindo a variografia (KAMEL *et al.*, 2010).

A análise geoestatística na avaliação da variação espacial e/ou temporal de dados climáticos tem sido largamente utilizada. VIEIRA *et al*. (1991) estudaram o mapeamento da chuva diária máxima provável para o estado de São Paulo e utilizaram a autocorrelação espacial, calculada pelo variograma, para verificar a dependência espacial da chuva. GOMES (2001) elaborou mapas de isoietas utilizando, como ferramenta principal, a geoestatística para estudar o comportamento espacial da precipitação do estado de São Paulo. ZAMBOTI (2001) realizou o mapeamento de chuvas médias mensais nos meses de verão para o estado do Paraná, utilizando o variograma como ferramenta de análise da dependência espacial dos dados. BARBOSA (2000) construiu variogramas de alguns eventos pluviométricos a partir de dados de chuva acumulada em uma hora, integrando dados de postos pluviométricos e radar meteorológico na bacia do Alto Tietê, para avaliação da distribuição espaço-temporal da chuva. Para a mesma região, LOU (2004) também utilizou a análise geoestatística como auxílio na compreensão da variabilidade espacial e temporal das chuvas a partir da determinação de variogramas e covariogramas para um evento frontal e para um evento convectivo.

Várias publicações têm aplicado a teoria estatística para projeto de rede de monitoramento de chuva. SHIH (1982) introduziu várias etapas com base em um fator de covariância entre as estações de chuva para projetar a rede pluviométrica. A entropia de Shannon foi usada para decidir a adição ou remoção de estações pluviométricas (KRSTANOVIC e SINGH, 1992; AL-ZAHRANI e HUSAIN, 1998). O método da krigagem, proposto por MATHERON (1962) para interpolação espacial, também tem sido aplicado para os projetos de rede (BASTIN *et al*., 1984; ST-HILAIRE *et al*., 2003). CHEN *et al*. (2008) propôs um método composto por krigagem e entropia, no qual foi possível determinar a distribuição espacial das estações pluviométricas, sendo selecionados os locais para a instalação de 2 a 4 estações pluviométricas na bacia hidrográfica do Wadi Ibrahim, na Arábia Saudita. Também na bacia desse rio, AWADALLAH (2012) utilizou os dados de precipitação disponíveis para propor a localização de 4 estações, conforme as diretrizes da WMO, de maneira a gerir os recursos hídricos de forma eficiente e em tempo real. Os locais foram selecionados por meio da abordagem de técnicas geoestatísticas. Segundo esse autor, mais pesquisas são necessárias para aplicação da metodologia em uma escala maior abrangência e para confirmação de que as estações pluviométricas propostas acrescentam informações à

representação da distribuição espacial da precipitação na região. Além disso, a comparação entre os métodos de entropia é necessária para decidir sobre o método mais adequado quando da seleção de locais para instalação de estações.

Para a otimização de uma rede de estações pluviométricas na Tunísia, região mediterrânea costeira localizada no norte da África, KAMEL *et al*. (2010) aplicaram e compararam três técnicas geoestatísticas multivariadas que permitiram a introdução de uma segunda variável, como elevação altimétrica, a fim de estimar a precipitação média mensal e apresentar seus correspondentes mapas de erros ou incertezas. Esses mapas de erro foram construídos utilizando o desvio padrão da estimativa de variância e concluíram que, em regiões onde o erro estimado apresentava-se significativo, era interessante adicionar novas estações. Nesse trabalho, a autocorrelação entre o conjunto de dados foi descrita por um semivariograma que é uma das funções mais relevantes para indicar a correlação espacial entre observações obtidas em locais de amostragem (estações pluviométricas), sendo usualmente representada por um gráfico que mostra a diferença medida na variável de interesse pela distância para os diferentes pares de estações. Sendo assim, KAMEL *et al*. (2010) planejaram a rede de monitoramento ótima a partir de modelos de variogramas, definidos com base apenas nas estações de medição de chuva e suas localizações geográficas.

Acrescente-se a esse conjunto de trabalhos, a análise de componentes principais (ACP), ferramenta que tem apoiado diversos estudos de regionalização de natureza espaço-temporal. Nesta dissertação, essa análise apoiou o diagnóstico da situação da rede de monitoramento da área de estudo. Exemplos de aplicação de componentes principais podem ser resgatados, por exemplo, nas análises de setores censitários com vistas à definição de classes socioeconômicas e à análise de condições e de programas de saneamento nas áreas das bacias contribuintes da Baía de Guanabara, como mostrado em TEIXEIRA (2001) e em SOARES (2004). BAERISWYL e REBETEZ (1997) desenvolveram um estudo de regionalização da precipitação na Suíça por meio da análise de componentes principais. SINGH (2005) estudou as características do padrão de chuvas das monções na Índia por meio de análise de componentes principais. STATHIS e MYRONDIS (2009) utilizaram o método da análise de componentes principais para avaliação do padrão das características de precipitação na região central da Grécia, Thessaly. GUEDES *et al*. (2010) utilizaram o método da ACP para estabelecer algumas características do padrão pluviométrico mensal de estações no

estado do Piauí para explicar a variância total dos dados, facilitando a correlação no tempo e no espaço da origem da chuva.

Adicionalmente, o emprego de análise de componentes principais tem sido feito em estudos envolvendo imagens de sensoriamento remoto, para efeito de classificação da cobertura e uso do solo bem como em sua evolução. É o caso da dissertação de RIBEIRO (2001), quando estuda o comportamento da mudança da cobertura e uso do solo da bacia dos rios Iguaçu-Sarapuí e correspondente impacto nas condições hídricas de escoamento com emprego do modelo do *Soil Conservation Service* (SCS).

Mais recentemente, XAVIER (2012) explora a técnica de componentes principais com o uso do satélite GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), que recolhe dados mensais do campo gravimétrico amostrados em píxeis com resolução espacial de 400 km e do satélite TRMM, com resolução espacial de 25 km, para estudar o comportamento da variabilidade do armazenamento de água na Amazônia ao longo da primeira década deste século. LUCENA (2012), por sua vez, emprega análise de componentes principais para avaliar a evolução do campo espacial da cobertura e uso do solo e de temperatura de superfície para a região metropolitana do Rio de Janeiro ao longo das três últimas décadas com enfoque no estudo de formação e identificação de ilhas de calor.

No próximo capítulo, agrega-se o resgate histórico da fundamentação do monitoramento hidrometeorológico a partir da revisão de alguns estudos pertinentes ao escopo desta dissertação, incorporando, sob o ponto de vista hidrometeorológico, referências adicionais que tratam de medições *in situ* e de medições por satélite no contexto de rede hidrometeorológica de monitoramento na escala da bacia hidrográfica.

CAPÍTULO 3 – MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO: HISTÓRICO

O monitoramento das variáveis hidrometeorológicas tem sido efetuado basicamente por meio de duas técnicas. A primeira consiste no monitoramento sinótico, que descreve as observações em grande escala, para uma vasta área de abrangência em um determinado intervalo de tempo, enquanto a segunda trata do monitoramento pontual, em escala muito reduzida, dado por meio de estações instaladas com sensores capazes de identificar, em um intervalo de tempo especificado, os valores das variáveis hidrometeorológicas, válidos, em princípio, para um determinado raio de influência da estação.

No mundo, de modo geral, há uma difusão crescente das informações hidrometeorológicas disponibilizadas através de dados de satélite, além de redes mais densas de monitoramento local. No Brasil, a maior parte do monitoramento das agências brasileiras é proveniente das estações hidrometeorológicas instaladas ao longo do território. O monitoramento em grande escala, sob o ponto de vista de uso de produto tecnológico satelital com participação do Brasil, é dado pelo satélite sino-brasileiro de recursos terrestres (CBERS).

Existem várias organizações e intuições, nos níveis mundial e nacional, responsáveis pelo monitoramento dos eventos hidrológicos, meteorológicos e climáticos.

No mundo, a instituição mais representativa é o WMO – *World Meteorological Organization*, que disponibiliza boletins sobre informações meteorológicas e dados para diversos lugares no mundo, além das agências americanas de grandes projetos e missões da NASA – *National Aeronautics and Space Administration* e NOAA – *National Oceanic and Atmospherical Administration*. Além dessas instituições, não é possível deixar de citar a agência europeia ESA – *European Spatial Agency* e a agência japonesa JAXA – *Japan Aerospace Exploration Agency*.

No Brasil, as agências responsáveis pelo CBERS são o INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e a AEB – Agência Espacial Brasileira. Em relação às instituições responsáveis pelas estações hidrometeorológicas no nível nacional, tem-se a ANA – Agência Nacional de Águas, INMET – Instituto Nacional de Meteorologia e

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil e, no nível estadual (Rio de Janeiro), o INEA – Instituto Estadual do Ambiente.

No Anexo A, são apresentadas informações mais detalhadas sobre as instituições supracitadas, bem como suas competências e principais atividades desenvolvidas.

3.1 Evolução das Redes de Monitoramento Hidrometeorológico

O conhecimento das características do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para a elaboração de projetos de obras hidráulicas e ações de gestão de recursos hídricos. Esse conhecimento é formado, em especial, a partir da coleta de informações relativas principalmente às precipitações, leituras de nível de água dos rios e vazões.

A rede de estações hidrológicas de monitoramento deve ser, em princípio, suficiente para cobrir toda a área de interesse, de forma que seja possível modelar, com adequada precisão, o comportamento hidrológico do local. Para o conhecimento e análise das condições climáticas e das variáveis meteorológicas, como temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, pressão atmosférica e direção e velocidade do vento, as estações são consideradas meteorológicas. Assim sendo, quando uma dada estação dispõe de sensores e/ou equipamentos eletrônicos para monitorar tanto variáveis hidrológicas quanto meteorológicas, considera-se o que se convencionou chamar de estação hidrometeorológica.

Inicialmente, uma rede de monitoramento hidrometeorológico era implementada condicionada ao objetivo de atender a algum projeto específico, como, por exemplo, mitigação de inundações, irrigação e, em especial, construção de barragens com vistas ao aproveitamento do potencial hidroelétrico brasileiro. As estações eram instaladas sem levar em consideração a existência ou não de outras na mesma região e, em geral, priorizando coleta de dados na escala diária, naturalmente associada a bacias hidrográficas de maior porte.

Por outro lado, tem surgido a necessidade de, cada vez mais, instalar novas redes de monitoramento, em locais ainda não explorados. Adicionalmente, há o desafio de recolher informações em diversas escalas espaço-temporais, com amostragens mais adequadas para os fenômenos físicos que estão sendo avaliados e que interferem no balanço hídrico e no balanço de energia de uma bacia hidrográfica, atendendo, assim, a

diversos setores sociais, incluindo, de forma geral, aplicações correlatas, por exemplo, à avaliação da disponibilidade de água em quantidade e em qualidade para fins e usos diversos pela sociedade, à produção de energia em suas diversas formas (hidroelétrica, solar, eólica, biomassa, entre outras), ao acompanhamento de safras agrícolas e correspondente geração de alimentos, à navegação e criação de hidrovias e ao estudo de sustentabilidade de áreas rurais e urbanas.

Os itens, a seguir, mostram a evolução das redes de monitoramento hidrometeorológico no Brasil e no estado do Rio de Janeiro.

3.1.1 No Brasil

Os levantamentos hidrológicos no Brasil tiveram sua origem há mais de cem anos, quando foram instaladas as primeiras estações pluviométricas com medições regulares (ANA, 2007) e consistiam basicamente de estações destinadas ao monitoramento das precipitações atmosféricas anuais acumuladas.

Posteriormente, foram instaladas estações com medição de níveis de água e de vazões líquidas em alguns poucos rios. Segundo GONTIJO JR. (2007), as primeiras estações para o monitoramento hidrometeorológico que se tem registro foram instaladas no final do século XIX, voltadas principalmente para orientar o DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas e o INMET – Instituto Nacional de Meteorologia na execução de suas competências.

Essas estações foram instaladas proporcionalmente ao surgimento das necessidades de aproveitamento das forças hidráulicas. A partir do início do século passado, a hidrometria passou a ser realizada de maneira mais estruturada, evoluindo em aspectos relativos à metodologia operacional, aos equipamentos de medição e observação, assim como no número de seções a serem monitoradas (ANA, 2007).

Em 1920, foi criada a CEFH – Comissão de Estudos de Forças Hidráulicas, no âmbito do Serviço Geológico e Mineralógico do Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio, que conduzia simultaneamente os estudos em hidrologia, quase exclusivamente baseada na pluviometria, e em energia elétrica, voltando-se para a avaliação de desníveis hidráulicos, sem qualquer competência normativa ou de outorga de concessões.

Buscando aumentar as pesquisas e aprofundar as investigações para localizar as fontes de energia hidráulica no território brasileiro, foi criada a Diretoria Geral de Pesquisas Científicas, absorvendo o Serviço Geológico e Mineralógico, do qual fazia parte a Diretoria das Águas. A atividade de hidrologia passou, no mesmo ano, para a Diretoria Geral da Produção Mineral e teve uma duração muito curta, menos de um ano, acabando por se transformar no DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral em 1934 (*adaptado de* ANA, 2007).

Como o DNPM era um órgão com atribuições diversificadas e heterogêneas, muitas vezes incompatíveis entre si, sua atuação acabou sendo descentralizada e dispersa pelo país. Com a edição do Código de Águas, ainda em 1934, este acabou tornando-se um instrumento extremamente importante para o desenvolvimento tanto do setor elétrico nacional quanto dos estudos dos aproveitamentos dos potenciais hidráulicos e da hidrometria.

Com o passar dos anos e o advento da construção de grandes hidrelétricas e a crescente demanda pelo abastecimento, a necessidade e instalação das estações foram aumentando devido à institucionalização do gerenciamento das redes por intermédio do MME (1960), notadamente o DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, encarregado da aplicação dos preceitos do Código de Águas e pioneiro no processo de desenvolvimento de esforços para criação de um Sistema Nacional de Informações Hidrológicas.

Com a extinção do DNAEE, ao final de 1996, foi instituída a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, órgão responsável, a partir de então, pelas atividades de hidrologia referentes aos aproveitamentos de energia hidráulica, com o encargo de cumprir e fazer cumprir o Código de Águas e a administração da rede hidrométrica nacional.

Em 2000, foi criada a grande detentora e responsável, até os dias de hoje, pela rede hidrometeorológica do país, ANA, que, por intermédio da Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica, realiza o monitoramento de chuva, nível, vazão, qualidade de água e sedimentos em diversos pontos distribuídos por todo o território nacional (ANA, 2007).

Portanto, no Brasil, a locação das estações hidrológicas tem sido realizada, ao longo das últimas décadas, de maneira predominantemente empírica, isto é, de acordo com o surgimento das necessidades de instalação de novas estações para desenvolvimento de estudos e projetos, sem o auxílio de métodos adequados que visam o planejamento da instalação, operação e manutenção.

A seguir, serão apresentados mapas com a evolução da rede hidrometeorológica nacional referentes às estações pluviométricas, fluviométricas e telemétricas, respectivamente.

Estações Pluviométricas

A Figura 3.1 mostra que, já no ano de 1920, a densidade de estações no país, apesar de medirem praticamente precipitação no nível anual, era consideravelmente alta para a época, principalmente na região costeira que abrange as regiões nordeste, sul e sudeste.

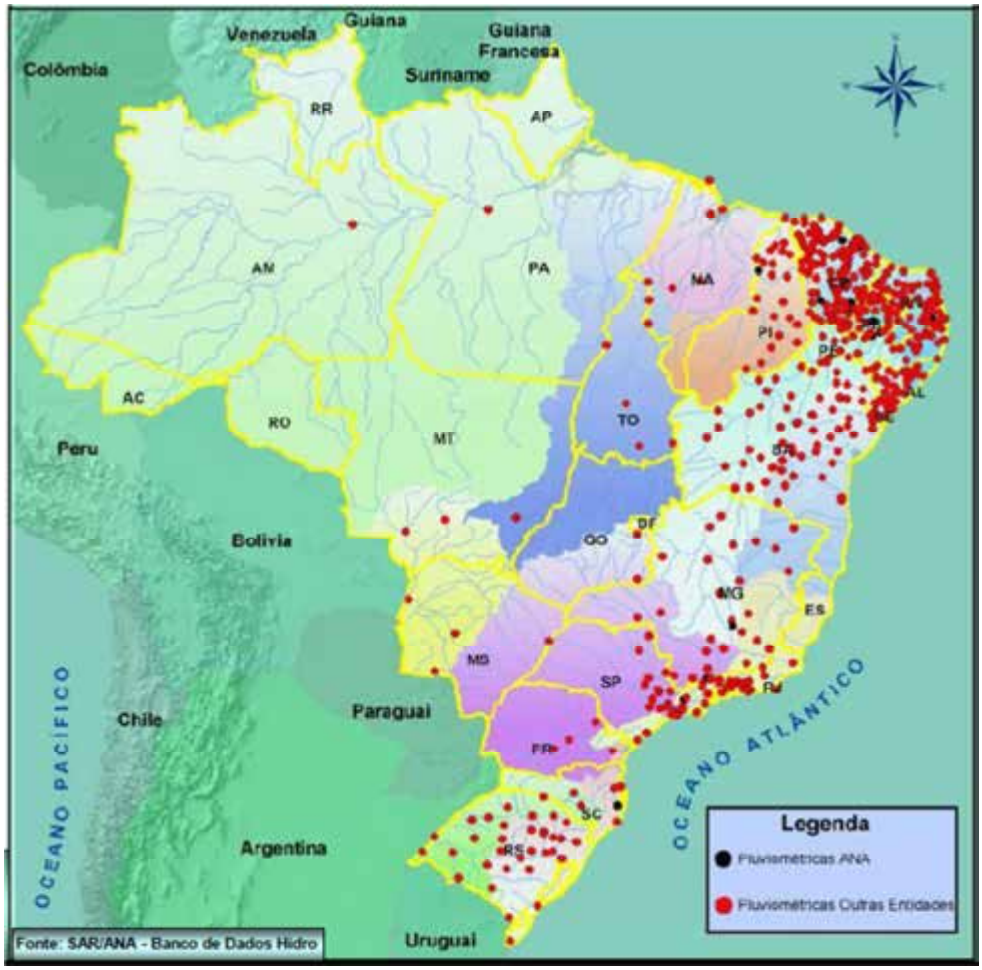


Figura 3.1 – Estações pluviométricas no Brasil até 1920
Fonte: SAR / ANA – Banco de Dados Hidro (2007)

Na Figura 3.2, é possível notar que, no ano de 1960, as regiões norte e centro-oeste começam a ter estações pluviométricas instaladas, ao passo que, nas demais regiões, a densidade é bastante elevada.

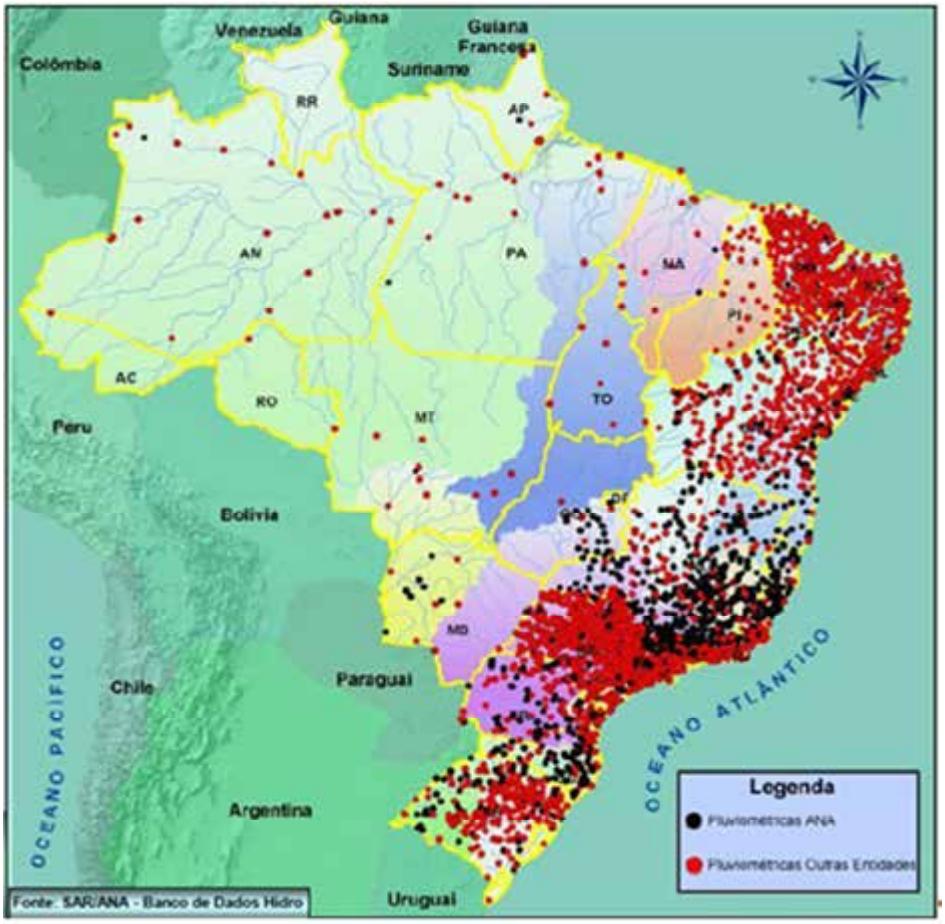


Figura 3.2 – Estações pluviométricas no Brasil até 1960
Fonte: SAR / ANA – Banco de Dados Hidro (2007)

Em 2007, a rede hidrometeorológica nacional, operada pela ANA conta com 8.080 estações pluviométricas, como pode ser verificado na Figura 3.3.

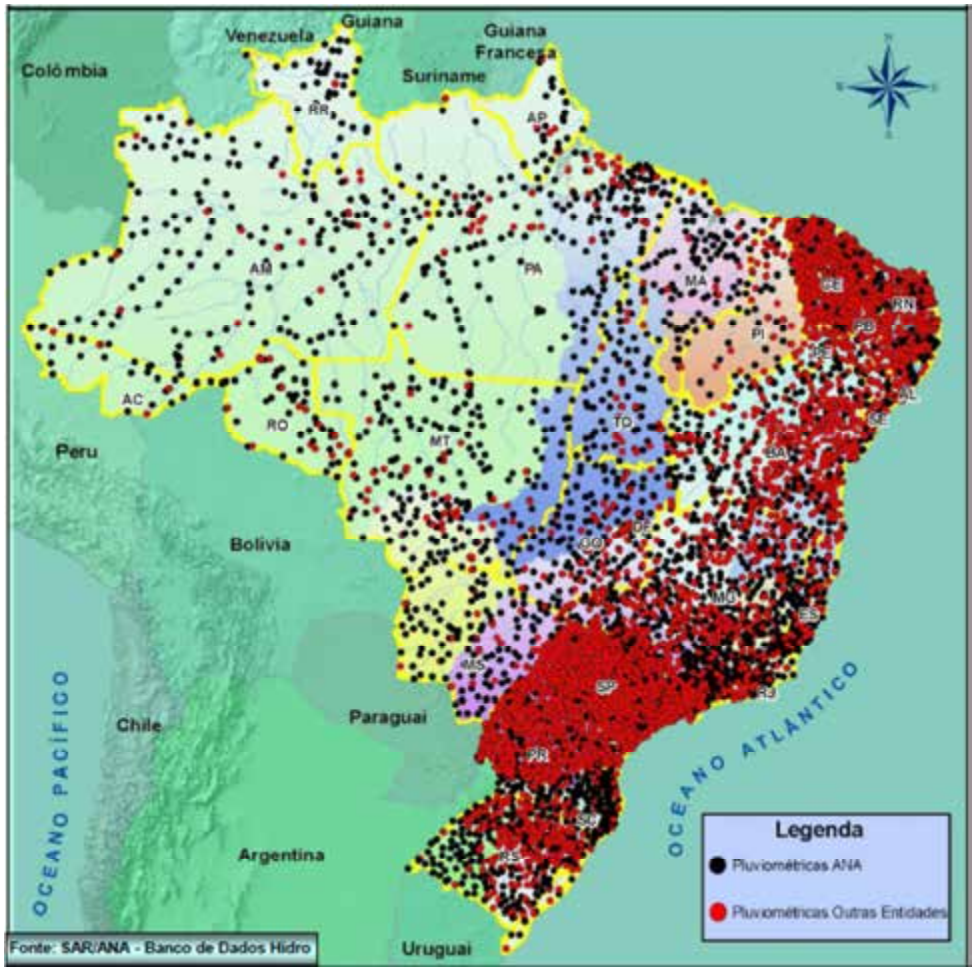


Figura 3.3 – Estações pluviométricas no Brasil até 2007
Fonte: SAR / ANA – Banco de Dados Hidro (2007)

Estações Fluviométricas

As estações fluviométricas estão relacionadas às variáveis associadas aos rios, isto é, nível de água e vazão líquida. Na Figura 3.4, é possível observar a distribuição de estações fluviométricas até o ano de 1920 no Brasil, destacando-se que somente eram realizados monitoramento do nível de água.

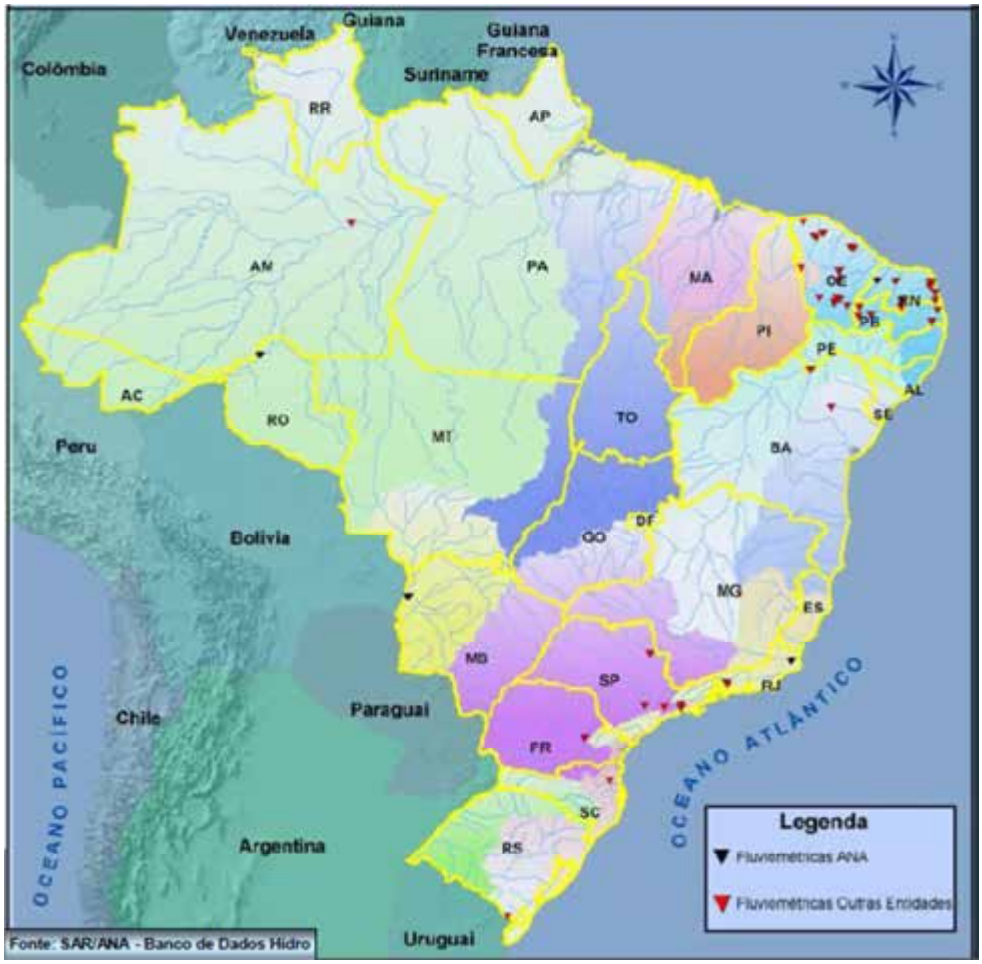


Figura 3.4 – Estações fluviométricas no Brasil até 1920
Fonte: SAR / ANA – Banco de Dados Hidro (2007)

A Figura 3.5 mostra que a distribuição das estações fluviométricas no Brasil em 1960 é dada predominantemente nas regiões sul e sudeste do país, devido ao desenvolvimento dos grandes centros urbanos, com necessidade de abastecimento humano e geração de energia elétrica.

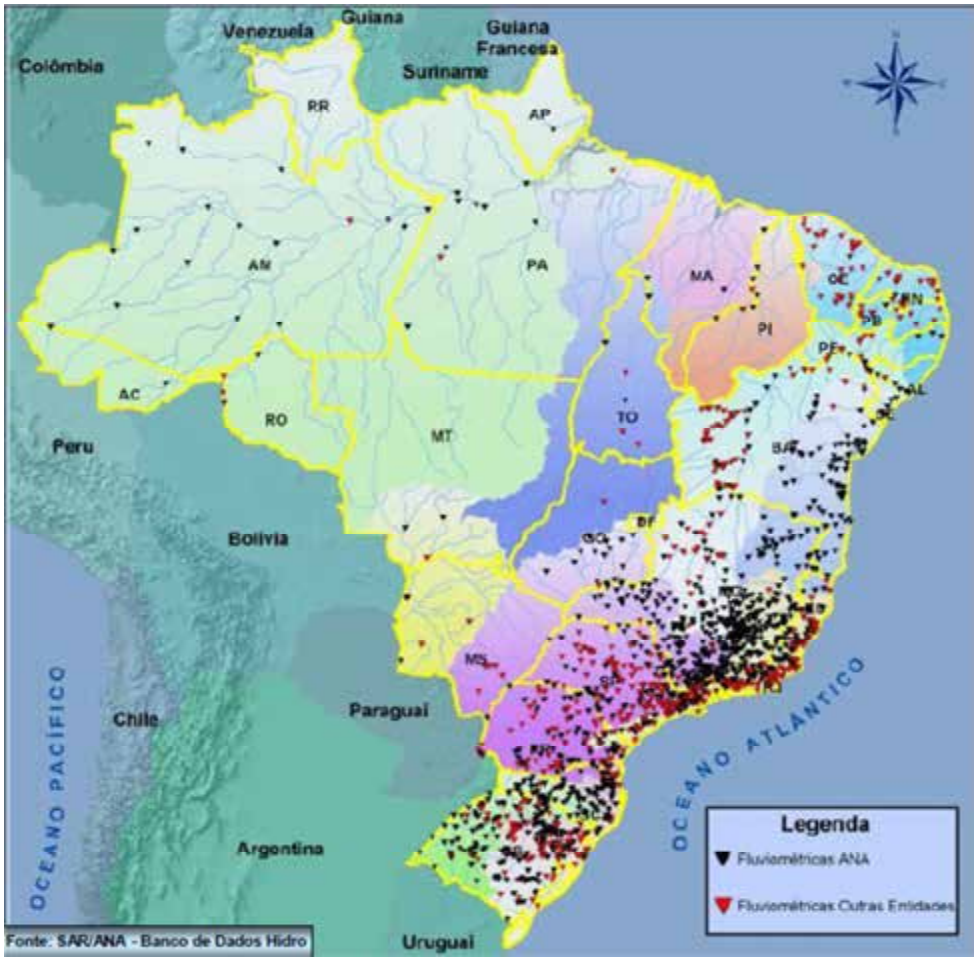


Figura 3.5 – Estações fluviométricas no Brasil até 1960
Fonte: SAR / ANA – Banco de Dados Hidro (2007)

Já no ano de 2007, conforme Figura 3.6, praticamente todo o território brasileiro dispõe de estações de monitoramento fluviométrico, com acompanhamento não somente do nível de água, mas também de vazão, perfazendo um total de 5.275 estações.

Figura 3.6 – Estações fluviométricas no Brasil até 2007
Fonte: SAR / ANA – Banco de Dados Hidro (2007)

Estações Telemétricas

As estações telemétricas medem dados de chuva e de nível de água em um intervalo de tempo que pode variar de 5 a 15 minutos. Essas estações contam com dispositivos de registro de dados (*data loggers*), que são coletores e armazenadores de dados dotados de sistemas de alimentação (fontes, baterias, entre outros) e de sistemas de transmissão dos dados, que podem ser via satélite, celular ou rádio.

Esse tipo de estações começou a ser instalada no Brasil no fim dos anos 50 e início dos anos 60 do século XX. Na Figura 3.7, é possível notar que, em todo território nacional, havia apenas 1 estação telemétrica instalada até 1960.

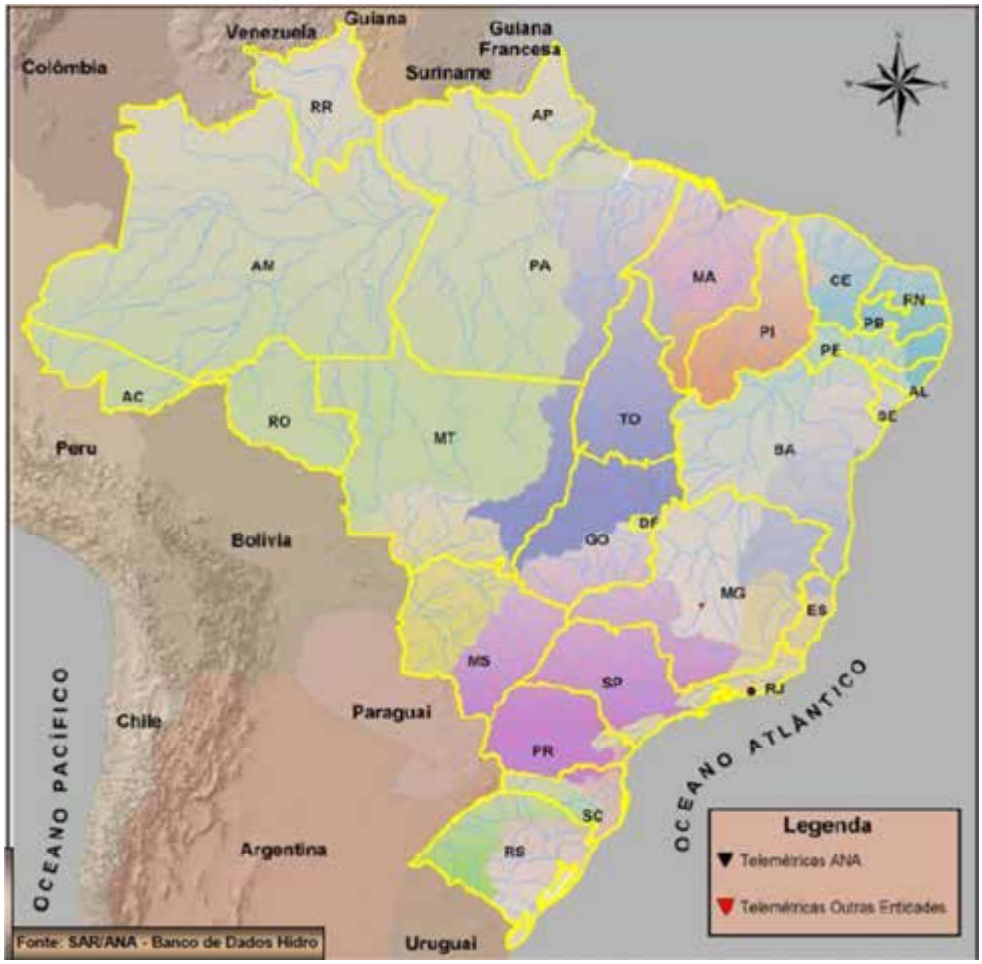


Figura 3.7 – Estações telemétricas no Brasil até 1960
Fonte: SAR / ANA – Banco de Dados Hidro (2007)

Já em 2007, com o avanço das tecnologias, obtém-se um total de 1.793 estações telemétricas instaladas no Brasil, como pode ser visto na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Estações telemétricas no Brasil até 2007
Fonte: SAR / ANA – Banco de Dados Hidro (2007)

Estações Climatológicas

O INMET também possui 711 estações (convencionais e automáticas) em todo Brasil, instaladas desde 1909, que medem as seguintes variáveis: temperatura do ar, umidade do ar, pressão atmosférica, precipitação e direção e velocidade do vento.

Desse total, 237 são estações convencionais (estando apenas 6 inoperantes e sem dados) e 474 automáticas (destas, 20 não registram os dados atualmente), conforme apresentado na Figura 3.9 e na Figura 3.10, respectivamente.

Figura 3.9 – Estações meteorológicas convencionais – INMET
Fonte: http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/convencionais.php
(acessado em 03 de julho de 2014)

Figura 3.10 – Estações meteorológicas automáticas – INMET
Fonte: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas
(acessado em 03 de julho de 2014)

3.1.2 No Estado do Rio de Janeiro

O estado do Rio de Janeiro, de modo geral, acompanhou a evolução do país quanto à instalação e operação de estações hidrometeorológicas. As estações foram surgindo conforme a necessidade de elaboração e implementação de estudos e projetos hidrológicos e hidráulicos, principalmente os relacionados ao setor de geração de energia elétrica.

Paralelamente ao esforço desenvolvido no nível federal, o monitoramento hidrometeorológico no estado do Rio de Janeiro teve início na década de 1970, com a antiga SURSAN – Superintendência de Urbanização e Saneamento. Posteriormente, todas as estações existentes ficaram sob a responsabilidade da SERLA, desde a sua criação em 1975.

Com o passar dos anos, muitas estações foram sendo desativadas, ou porque estavam obsoletas e depredadas ou porque haviam sido roubadas. Dessa forma, alguns anos depois, teve início um processo de reestruturação da rede de monitoramento com o remanejamento de diversas estações e a instalação de novas. Nesse meio tempo, as estações ficaram sob a responsabilidade da SERLA até 1998, quando a COHIDRO começou a operar até 2001 e, posteriormente voltou à atividade entre 2004 e 2006. A SERLA reassumiu o comando em meados de 2006 e, em 2008, com a criação do INEA, foi firmado convênio com a CPRM para operação e manutenção das estações. Entretanto, esse convênio terminou em março de 2012, e o estado está em processo de licitação de empresa privada que assuma a operação das estações.

Logo no início de sua criação, o INEA começou a implantar o Sistema de Alerta de Cheias com o objetivo principal de informar à população, antecipadamente, situações de risco de chuvas intensas e de cheias nos cursos de água. Inicialmente, o sistema abrangia apenas a região da baixada fluminense, expandindo-se, em 2010, para Nova Friburgo e Macaé. Hoje em dia, abrange também os municípios de Petrópolis, Teresópolis e a região norte e noroeste fluminense (PERHI-RJ, 2013).

A localização das estações é determinada a partir do mapeamento das áreas mais suscetíveis às enchentes, sendo os sensores instalados em áreas adjacentes e no leito dos rios.

O sistema é composto por estações pluviométricas, que medem a intensidade das chuvas nas cabeceiras dos rios, e por postos fluviométricos que medem a capacidade de vazão dos cursos de água. As estações são operadas por telemetria e enviam dados automaticamente via celular, a cada 15 minutos, com medição da quantidade de chuva e do nível de água dos rios. No Centro de Controle Operacional (CCO) do INEA, técnicos fazem o acompanhamento das condições do tempo e dos rios ao longo de 24 horas, durante os 7 dias da semana (PERHI-RJ, 2013). Existem, também, as estações consideradas hidrológicas, que medem chuva e nível de água.

Os instrumentos utilizados no sistema de alerta de cheias são os pluviômetros automáticos e os sensores de nível. Conforme supracitado, os dados são transmitidos em tempo real, via celular, para o sistema de controle, e a manutenção é feita, no mínimo, mensalmente por técnico especializado, de modo a identificar problemas nas estações que interfiram no desempenho e, consequentemente, na transmissão e no recebimento dos dados no centro de controle.

Sendo assim, o INEA possui, hoje, a operação e a manutenção de duas redes de monitoramento hidrometeorológico, a saber:

- Rede Básica, composta por estações pluviométricas com medições de chuva através de pluviômetros e pluviógrafos e estações fluviométricas com medições de nível de água; cabe ressaltar que, nessa rede básica, os dados ainda são obtidos da maneira convencional, em que cada estação conta com um observador que faz as leituras diariamente de chuva e nível (às 7 horas e às 17 horas);
- Rede do Sistema de Alerta de Cheias, composta de estações automáticas e telemétricas que coletam dados de chuva e de nível de água de 15 em 15 minutos e que tem a finalidade de alerta em situações de eventos chuvosos extremos.

Atualmente, o INEA está desenvolvendo o PERHI-RJ – Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio de Janeiro, um estudo que apresenta a avaliação da rede atual de estações de monitoramento quali-quantitativo do estado e propõe a sua otimização.

A rede atual no estado do Rio de Janeiro conta com estações pluviométricas, fluviométricas, hidrológicas (pluviométricas e fluviométricas), sejam elas convencionais

ou telemétricas, sob responsabilidade de diferentes órgãos e/ou agências, inclusive do setor elétrico, apresentada na Figura 3.11.

Cabe destacar que, na legenda, conforme denotação usual, os triângulos representam as estações fluviométricas, os círculos identificam as estações pluviométricas e os triângulos circunscritos, as estações hidrológicas.

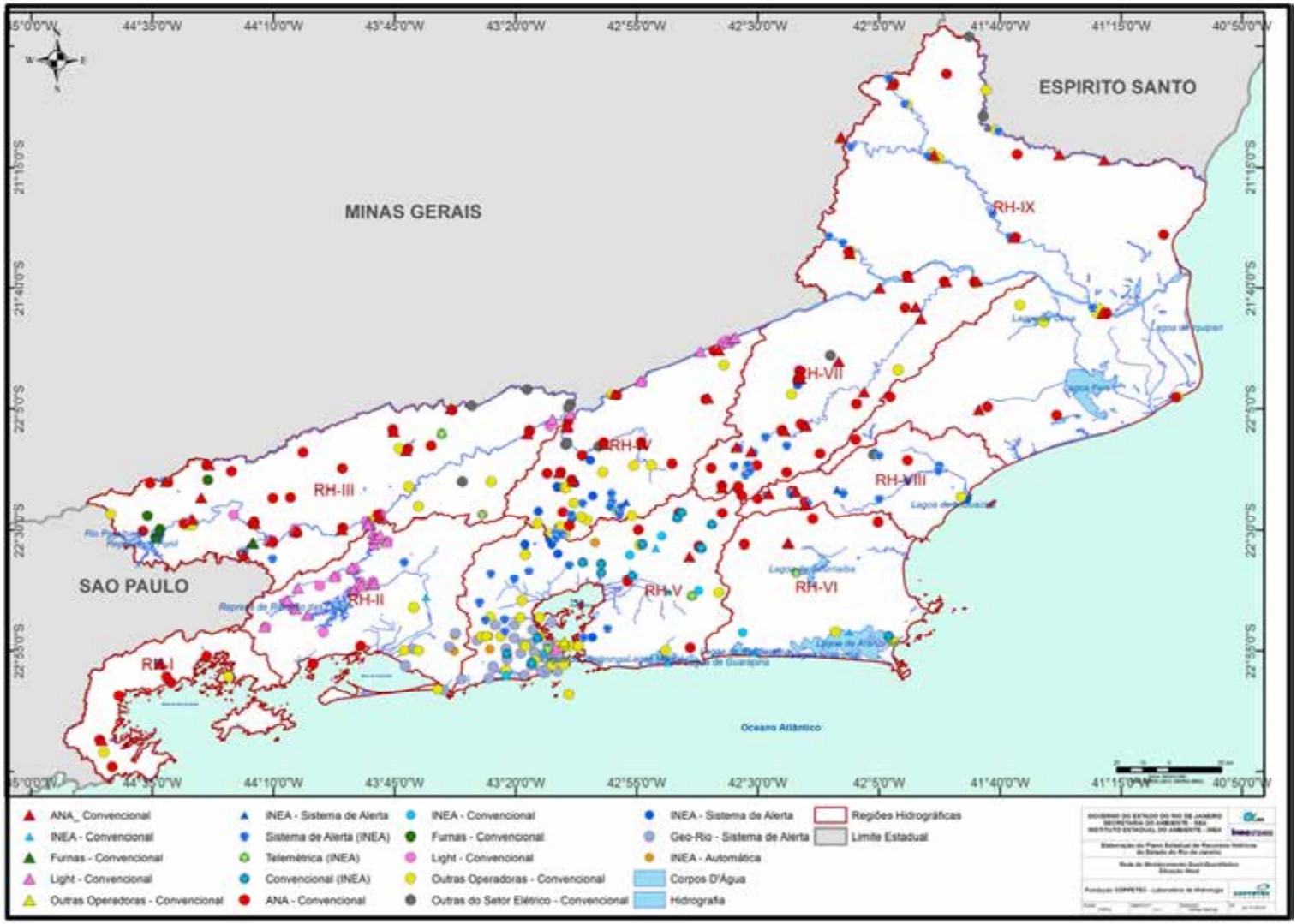


Figura 3.11 – Estações da rede atual – estado do Rio de Janeiro

CAPÍTULO 4 – SENSORIAMENTO REMOTO E HIDROMETEOROLOGIA

Apesar da importância do monitoramento das variáveis hidrometeorológicas, na maioria das regiões brasileiras, a escassez de observações meteorológicas é uma característica evidente. Como o número de estações, muitas vezes, é pequeno ou insuficiente, tem-se uma baixa densidade geográfica das informações disponíveis. Em muitos casos, ainda que existam longas séries de dados para alguns locais, não existem registros exatamente na área de interesse e/ou estudo.

Nesse contexto, o sensoriamento remoto é um meio eficaz para o monitoramento do sistema superfície-atmosfera. A representatividade espacial e temporal da observação obtida por satélite é, hoje, imprescindível para melhorar a compreensão do comportamento e da interação das variáveis hidrometeorológicas.

Sendo assim, sensoriamento remoto é uma tecnologia que utiliza sensores para extrair informações sobre objetos ou fenômenos a partir da radiação eletromagnética, sem que haja contato direto entre eles e sem que o homem seja parte essencial no processo de aquisição de dados. Tendo em vista que a energia eletromagnética se propaga no vácuo com a velocidade de $3x10^8$ $m.s^{-1}$ em direção ao sensor ela se constitui num dos mais importantes campos de força para a atividade de sensoriamento remoto, oferecendo um meio de transferência de informação, em alta velocidade, entre objeto e sensor. Nesse caso, sua velocidade e suas características principais (frequência e comprimento de onda), relacionam-se por meio da equação:

$$c = \lambda \cdot f \tag{4.1}$$

sendo:

c – velocidade da luz no vácuo ($3x10^8$ $m.s^{-1}$);

λ – comprimento de onda da radiação eletromagnética (m);

f – frequência da onda (Hz).

Pela análise da Equação 4.1, nota-se que o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência, isto é, quanto maior a frequência de aceleração de uma carga elétrica, menor o comprimento de onda resultante.

Alguns comprimentos de onda são bloqueados devido à presença de vapor de água, aerossóis e outros gases quando atravessam o topo da atmosfera. Sendo assim, em algumas faixas do espectro, a transmissividade (porcentagem de radiação que efetivamente atravessa a atmosfera) é maior, constituindo as janelas espectrais, de acordo com a Figura 4.1.

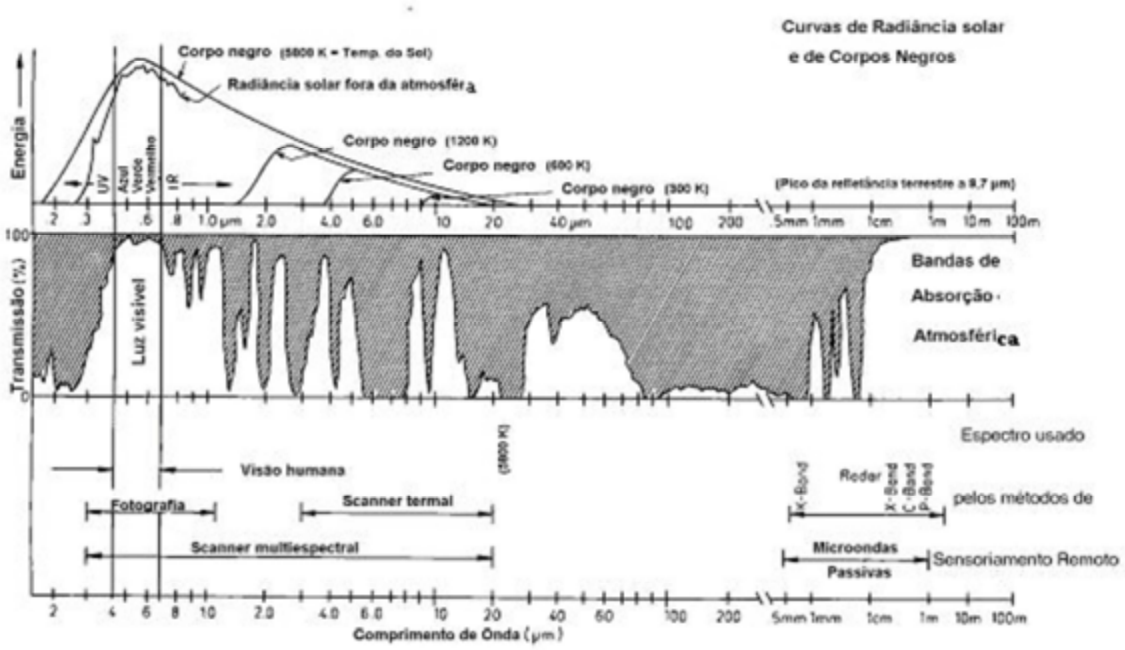


Figura 4.1 – Janelas espectrais: o espectro eletromagnético, a transmissividade eletromagnética e os comprimentos de onda usados no sensoriamento remoto
Fonte: KRONBERG (1984)

A radiação natural forma um espectro contínuo, que contém comprimentos de ondas de milésimos de nanômetros até dezenas de quilômetros (RICHARDS, 1986). Entretanto, divide-se o espectro em diversas faixas, denominadas bandas espectrais. As técnicas de sensoriamento remoto utilizam, em especial, o intervalo de 0,2 μm até 1 m, dividido em bandas espectrais, a saber:

- UV – ultravioleta (0,2 μm a 0,4 μm);
- VIS – visível (0,4 μm a 0,7 μm);
- IR – infravermelho (0,7 μm a 1 mm):
- MW – micro-ondas (1 mm a 1 m).

Observando o espectro eletromagnético, do ponto de vista do sensoriamento remoto, os sistemas ópticos utilizam, com maior frequência, a faixa do espectro que se estende do ultravioleta até o infravermelho distante, correspondendo aos comprimentos

de onda de 0,2 a 12 μm. Já os sistemas ativos de radar utilizam a faixa do espectro correspondente às micro-ondas.

O Sol é a principal fonte de radiação eletromagnética disponível para o sensoriamento remoto, que registra, basicamente, o fluxo radiante que deixa a superfície em direção ao sistema sensor. O que interessa é conhecer como esse fluxo radiante se modifica espectral e espacialmente em uma determinada área. Como o fluxo que deixa uma superfície é medido durante um breve intervalo de tempo (intervalo de exposição ou integração), o que é realmente registrado é a energia. Geralmente, os intervalos de exposição ou integração são constantes, o que faz com que diferenças de cena para cena sejam devidas a modificações no fluxo radiante registrado. Os principais fatores causadores dessas modificações são a condição atmosférica e o ângulo de incidência do fluxo radiante. Desse modo, abaixo são listadas algumas das principais grandezas radiométricas intervenientes (MOREIRA, 2011):

- energia radiante (J) – energia transportada em forma de radiação eletromagnética, isto é, definida como sendo a medida da capacidade da radiação realizar um trabalho físico, aquecer um objeto ou causar uma mudança de estado na matéria;
- fluxo radiante (W) – taxa de variação de energia radiante no tempo;
- irradiância ($W.m^{-2}$) – fluxo radiante incidente sobre uma superfície por unidade de área;
- excitância ($W.m^{-2}$) – fluxo radiante emergente de uma superfície por unidade de área;
- emissividade (adimensional) – razão entre a excitância de um material pela excitância de um corpo negro à mesma temperatura;
- absortância (adimensional) – razão entre o fluxo absorvido e o fluxo incidente numa superfície;
- reflectância (adimensional) – razão entre o fluxo refletido e o fluxo incidente numa superfície;
- transmitância (adimensional) – razão entre o fluxo transmitido e o fluxo incidente numa superfície.

Para o sensoriamento remoto, interessa, principalmente, a reflexão, pois é, a partir da energia refletida pelas feições da superfície terrestre, que os filmes ou dispositivos

das câmaras são sensibilizados. Essa reflexão dá-se de duas maneiras: especular e difusa.

Na reflexão especular, parte da luz incidente (que não é absorvida nem transmitida) é refletida com um ângulo igual ao de incidência, sendo equivalente a um espelho. A reflexão difusa é a de maior interesse na aquisição de imagens, pois, nesse tipo, parte da luz incidente, que não é absorvida nem transmitida, é refletida em diversos ângulos e em diversas intensidades. Assim, para diferentes corpos e diferentes radiações, e, consequentemente, para diferentes comprimentos de onda, têm-se diferentes intensidades refletidas e/ou emitidas.

As imagens de satélite são organizadas em matrizes de forma que, a cada elemento de área na superfície, corresponda uma resposta espectral. Essas matrizes são armazenadas em arquivos computacionais (*raster*), e o elemento de área é conhecido como píxel, cujas dimensões podem variar de alguns metros a vários quilômetros. Obviamente, por se tratar de um elemento finito de área, a resposta do píxel é uma média das respostas dos diferentes alvos nele contidos, havendo uma perda de detalhamento nesse processo, quando comparado com amostras pontuais. Em síntese, as imagens de satélite podem ser associadas a quatro tipos de resoluções, a saber: espectral, espacial, radiométrica e temporal.

O princípio básico envolvido nos métodos de sensoriamento remoto é que, em diferentes faixas de comprimentos de ondas/frequências, cada tipo de objeto reflete ou emite uma certa intensidade de radiação, que é dependente dos atributos físicos ou da composição do objeto em estudo. Assim, utilizando essa informação de uma ou mais faixas de comprimentos de ondas do sensor, que configura a sua resolução espectral, há possibilidade de se diferenciar diferentes tipos de objetos e mapear a sua distribuição, seja no solo, seja na água.

Adicionalmente, a resolução espacial de uma imagem é determinada pela capacidade do detector em distinguir objetos na superfície terrestre. Em geral, a resolução espacial de um detector é expressa em termos do seu campo instantâneo de visada, que define a área do terreno focalizada a uma dada altitude pelo instrumento sensor. De maneira simplificada, esse campo representa o tamanho do píxel. Da mesma forma, temperaturas baixas de topo de nuvem estão associadas a um maior

desenvolvimento vertical de uma nuvem e, consequentemente, a uma maior taxa de precipitação.

Por sua vez, a resolução radiométrica mede a sensibilidade do sistema em detectar níveis de intensidade de radiação, ou seja, trata-se da capacidade de um determinado sensor em distinguir entre níveis distintos de intensidade do sinal de retorno. Assim, quanto maior a resolução radiométrica, maior a quantidade de níveis de brilho ou níveis de cinza que o sensor poderá distinguir.

O número de níveis de cinza é determinado em função do número de bits (dígitos binários) disponibilizados para armazenar dados segundo a configuração do sensor. Por exemplo, o sensor óptico TM (*Thematic Mapper*) do satélite LANDSAT (*Land Remote Sensing Satellite*), que opera na faixa de comprimentos de onda do visível e do infravermelho, tem resolução radiométrica de 8 bits, o que equivale a um registro de imagens em 256 níveis de cinza, sendo que, no caso, são registrados tons de cinza referenciados entre zero (0) e 255. Já o satélite MODIS apresenta resolução radiométrica de 12 bits, registrando imagens dotadas, na escala do píxel, de capacidade de discriminação de 4.096 níveis de cinza.

Por fim, cabe ressaltar a resolução temporal do sensor, que está associada à frequência de passagem do satélite sobre uma dada porção da superfície terrestre.

Os sensores utilizados em sensoriamento remoto podem ainda ser classificados, quanto à fonte de energia, para geração das imagens do sistema Terra/atmosfera, em passivos ou ativos, sendo que os primeiros não possuem fonte própria de radiação, utilizando-se da radiação solar refletida ou emitida pela superfície, enquanto os segundos possuem fonte própria de radiação eletromagnética, como, por exemplo, aquisição de informações na faixa de radar (*RAdio Detection And Ranging*) por meio da tecnologia SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

Já os satélites a bordo do qual se encontram os sensores podem ser classificados em função da órbita que descrevem em torno do planeta. Assim, os satélites podem apresentar órbitas geoestacionárias, polares ou oblíquas, conforme apresentado na Figura 4.2. Essas órbitas implicam diferenças na concepção e na forma de aquisição de dados em termos de resolução espectral, espacial, temporal e radiométrica para diferentes sensores.

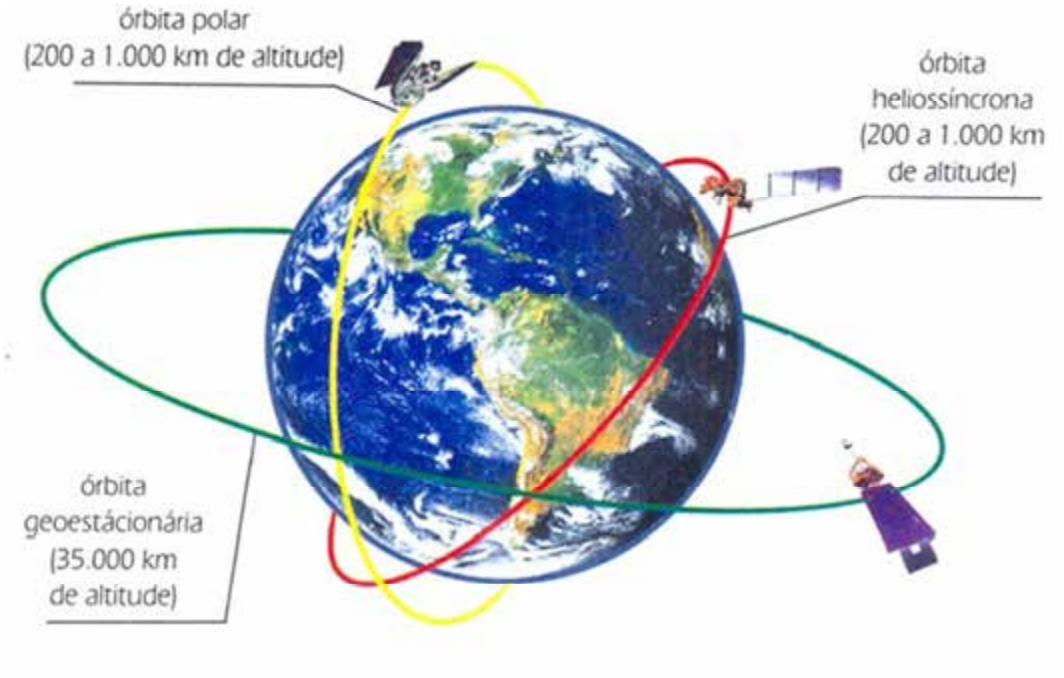


Figura 4.2 – Tipos de órbitas de satélites
Fonte: FLORENZANO (2007)

Quanto à natureza da órbita de passagem, por exemplo, os satélites polares e oblíquos podem ser classificados ainda em heliossíncronos e não-heliossíncronos. Os primeiros são caracterizados por passarem sempre à mesma hora do dia sobre uma determinada latitude. A vantagem dessa repetitividade é que imagens ópticas são adquiridas sob as mesmas condições de iluminação solar a cada dia (PETTY, 1995).

Na atualidade, as imagens de satélite têm se constituído numa ferramenta para obtenção das mais diversas componentes do ciclo hidrológico. Esses satélites desempenham um papel de comunicação na transmissão de informações a partir de várias plataformas de coleta de dados, como temperatura e chuva observada. Em muitas regiões sem estações ou sem cobertura suficiente por parte de radares meteorológicos, os dados de satélite tornam-se o principal meio para a realização de estimativas de precipitação e de temperatura. Dessa forma, vários instrumentos de satélites diferentes são utilizados nesse processo, sendo os sensores ópticos, provavelmente, os mais usuais e conhecidos, com ampla cobertura da superfície terrestre.

No entanto, quando estão presentes nuvens, sensores ópticos são capazes apenas de observar a temperatura do topo das nuvens. Por outro lado, os sensores de micro-ondas passivos ou ativos em satélites são sensíveis em termos de retroespalhamento à presença e à conformação de gotas de água e de gelo em nuvens para produzir

estimativas de precipitação com quantitativos volumétricos mais confiáveis. Finalmente, os sensores baseados em dispositivos que amostram segundo faixas de micro-ondas do espectro eletromagnético, como presentes em radiômetros ou em radares, têm um papel importante no monitoramento da precipitação global, oferecendo informações complementares potencialmente de maior precisão nas dimensões verticais e horizontais.

Em relação à frequência temporal de aquisição dos dados de precipitação por satélite, os dados geoestacionários, a título de ilustração, podem ser obtidos a cada meia hora e, em alguns casos, em intervalos menores. Na ausência de sensores de micro-ondas em plataformas orbitais geoestacionárias, os satélites geoestacionários podem proporcionar o acompanhamento temporal de eventos chuvosos oportunamente em alguns locais, contudo não são capazes de produzir taxas de chuva confiáveis. Assim, os pesquisadores desenvolveram produtos de precipitação sinérgicos que combinam a precisão das taxas de chuva obtidas mediante o emprego de sensores na faixa de micro-ondas com as vantagens temporais de dados gerados por sensores ópticos em satélites geoestacionários. Esses produtos de alta resolução foram desenvolvidos visando à assimilação de dados na modelagem numérica, validação de modelos e estudos climáticos, sendo muito utilizados também por meteorologistas na previsão meteorológica e climática e por hidrólogos no estudo dos impactos da chuva ou de sua falta na superfície terrestre.

Por exemplo, a análise de precipitação pelo multisatélite TRMM (TMPA) da NASA combina estimativas da precipitação na faixa de micro-ondas com estimativas de precipitação a partir de sensor na faixa do infravermelho de satélite geoestacionário. As taxas de chuva através de micro-ondas são usadas para calibrar as estimativas do servidor do satélite geoestacionário (GOES). Além do TRMM, a NOAA desenvolveu o produto CMORPH, que é construído inteiramente a partir de estimativa de precipitação através de sensores passivos na faixa de micro-ondas.

Alguns pontos importantes sobre a obtenção, validação e utilização da precipitação por satélites estão listados a seguir:

- estimativas de precipitação por satélite podem ser parcialmente corrigidas por pluviômetro, , também referido ao longo do texto como estação real de medição e verdade de campo dos dados;

- estimativas de precipitação em formato de grade são a principal fonte de informações de precipitação para áreas que carecem de estações e/ou radar meteorológico;
- estimativas de precipitação podem ser computadas para todo o planeta, fazendo uso tanto de satélites de órbita polar como de satélites geoestacionários.

No Anexo B, são apresentadas, de forma sucinta, alguns comentários complementares sobre as técnicas para estimativa de precipitação e de temperatura baseadas no visível e no infravermelho e em imagens de micro-ondas.

Uma vez que o presente trabalho tem o suporte de dados provenientes de sensoriamento remoto, são apresentadas, a seguir, informações relativas aos produtos utilizados do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*), que permitiram a obtenção de dados de chuva e de temperatura, respectivamente, mais especificamente empregados nesta dissertação.

TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*)

A precipitação é, provavelmente, o elo mais crucial do ciclo hidrológico e uma das mais difíceis variáveis atmosféricas de mensurar. O programa de satélite proposto conjuga a intenção de obter melhores medições de precipitação tropical por meio da adição de informações provenientes de sensores passivos e ativos de micro-ondas (radar) e de sensores que operam parte no visível e infravermelho do espectro (SIMPSON *et al.*, 1998). O satélite TRMM foi lançado em 27 de novembro de 1997, e os dados de todos os instrumentos tornaram-se disponíveis aproximadamente 30 dias após o lançamento. Desde então, muito progresso tem sido feito na calibração dos sensores, na melhoria dos algoritmos de chuva relacionados às aplicações de modelagem e nos novos conjuntos de dados adaptados especificamente para essas aplicações (KUMMEROW *et al.*, 2000).

O objetivo principal do TRMM é fornecer estimativas precisas de chuva tropical global (SIMPSON *et al.*, 1996; KUMMEROW *et al.*, 2000), sendo um projeto desenvolvido em parceria entre a NASA e a JAXA, que foi concebido como uma missão de satélite para estudar as chuvas tropicais para análises climáticas.

Como o próprio nome indica, TRMM foi originalmente concebido para estudos e avaliações da precipitação tropical, no entanto, ao longo dos anos, tem sido aplicado nas mais diversas áreas, como monitoramento de secas e cheias. Apesar do nome, TRMM cobre uma área de superfície da Terra que se estende muito além dos trópicos, cobrindo uma faixa entre 38°N e 38°S. Usando entradas adicionais de satélite, os dados dos produtos TRMM fornecem uma extensão da cobertura entre 50° N e 50° S (FUNK *et. al.*, 2008).

O satélite possui órbita oblíqua não-heliossíncrona bastante baixa (inicialmente 350 km; desde 2001, cerca de 403 km), de forma que o período de translação é bastante curto (91 minutos), permitindo resoluções espacial e temporal comparativamente altos (PACA, 2008).

Os dados de precipitação do TRMM são estimados a partir de um algoritmo que combina múltiplos sensores orbitais, originando, dessa forma, os dados de precipitação global (HUFFMAN *et al*., 2007). Em função de ser o satélite mais bem equipado em termos de instrumentos para estimativa de precipitação, o satélite TRMM fornece estimativas mais precisas do que 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.

Os instrumentos primários a bordo do satélite TRMM para obtenção dos dados de chuva são os seguintes:

- TMI – gerador de imagens de micro-ondas (passivo) é o principal instrumento na medição de precipitação, obtida através da lei inversa de Planck e correlação com temperatura de topo de nuvem; o instrumento gera imagens com um ângulo a partir do nadir (a direção diretamente abaixo do observador, ou seja, o ponto da esfera celeste diametralmente oposto ao zênite) de até 49°, permitindo fornecer informações quantitativas de precipitação em uma faixa de 760 km de largura;
- PR – radar de precipitação (sensores de micro-ondas ativos) é o primeiro radar meteorológico a ser lançado a bordo de um satélite, permitindo refinar as estimativas, afetadas pelas diferentes formações de nuvens e viabilizando a produção de mapas tridimensionais de estruturas

precipitantes; esse radar é capaz de detectar taxas de precipitação muito baixas, da ordem de menos de 0,7 $mm.h^{-1}$;

- VIRS – radiômetro no visível e infravermelho, isto é, um espectroradiômetro de imageamento com bandas no intervalo de comprimento de onda de 0,6 a 12 µm, sendo, em muitos aspectos, muito semelhante ao AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) que tem sido empregado desde 1978 pela NOAA.

A Figura 4.3 apresenta um desenho esquemático da aquisição de dados dos três sensores primários do TRMM, e a Tabela 4.1 apresenta um resumo das características desses sensores.

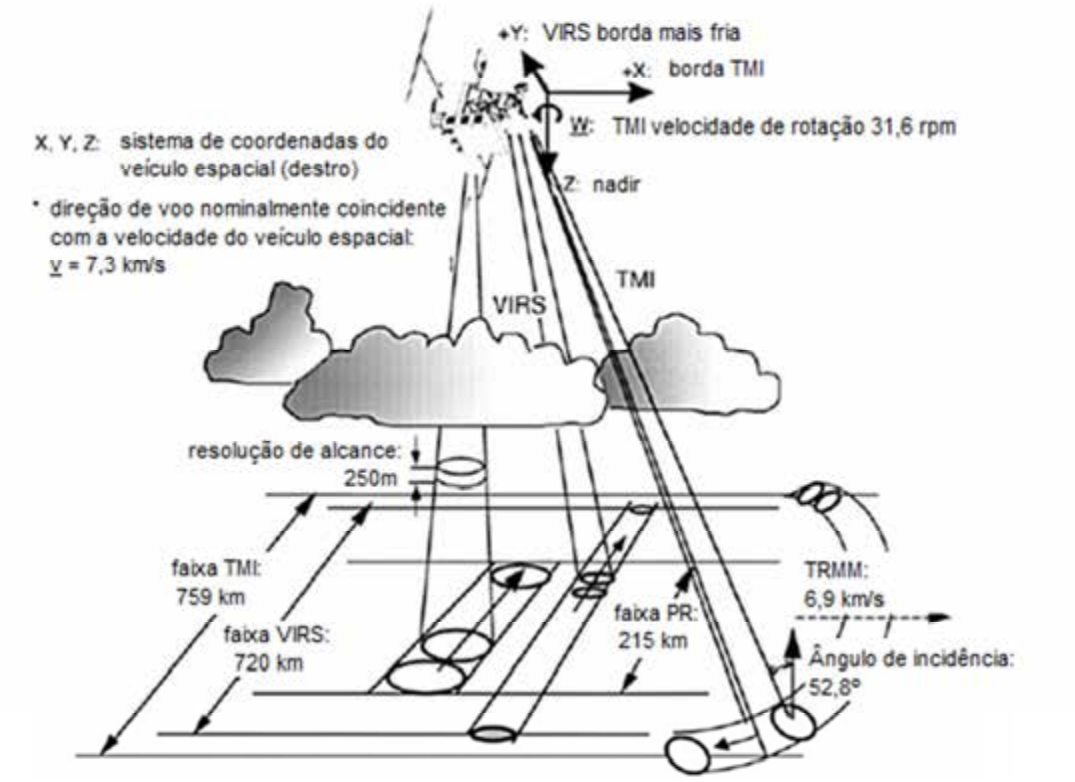


Figura 4.3 – Representação esquemática da aquisição dos dados TRMM através dos três sensores primários (TMI, PR e VIRS)
Fonte: adaptado de KUMMEROW *et al*. (1998)

Tabela 4.1 – Resumo das características dos três sensores primários do TRMM (TMI, PR e VIRS)
Fonte: adaptado de KUMMEROW *et al*. (2000)

Radiômetro Micro-ondas (TMI)	**Radar (PR)**	**Radiômetro Visível e Infravermelho (VIRS)**
10,7; 19,3; 21,3; 37,0 e 85,5 GHz (dualmente polarizado exceto o de 21,3: apenas vertical)	13,8 GHz	0,63; 1,61; 3,75; 10,8 e 12 µm
Área de 10 km x 7 km de visão de 37 GHz	4,3 km e cobertura e 250 m resolução vertical	2,2 km de resolução
Escaneamento cônico (53º inclinação)	Escaneamento cruzado (*cross-track*)	Escaneamento cruzado (*cross-track*)
Faixa de 760 km	Faixa de 215 km	Faixa de 720 km

Adicionalmente, o satélite TRMM carrega dois instrumentos que fazem parte do sistema de observação da Terra (EOS, do inglês, *Earth Observing System*), a saber:

- CERES – sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens;
- LIS – sensor de imageamento de relâmpagos.

A Figura 4.4 apresenta os procedimentos para a geração das diferentes estimativas de precipitação do TRMM.

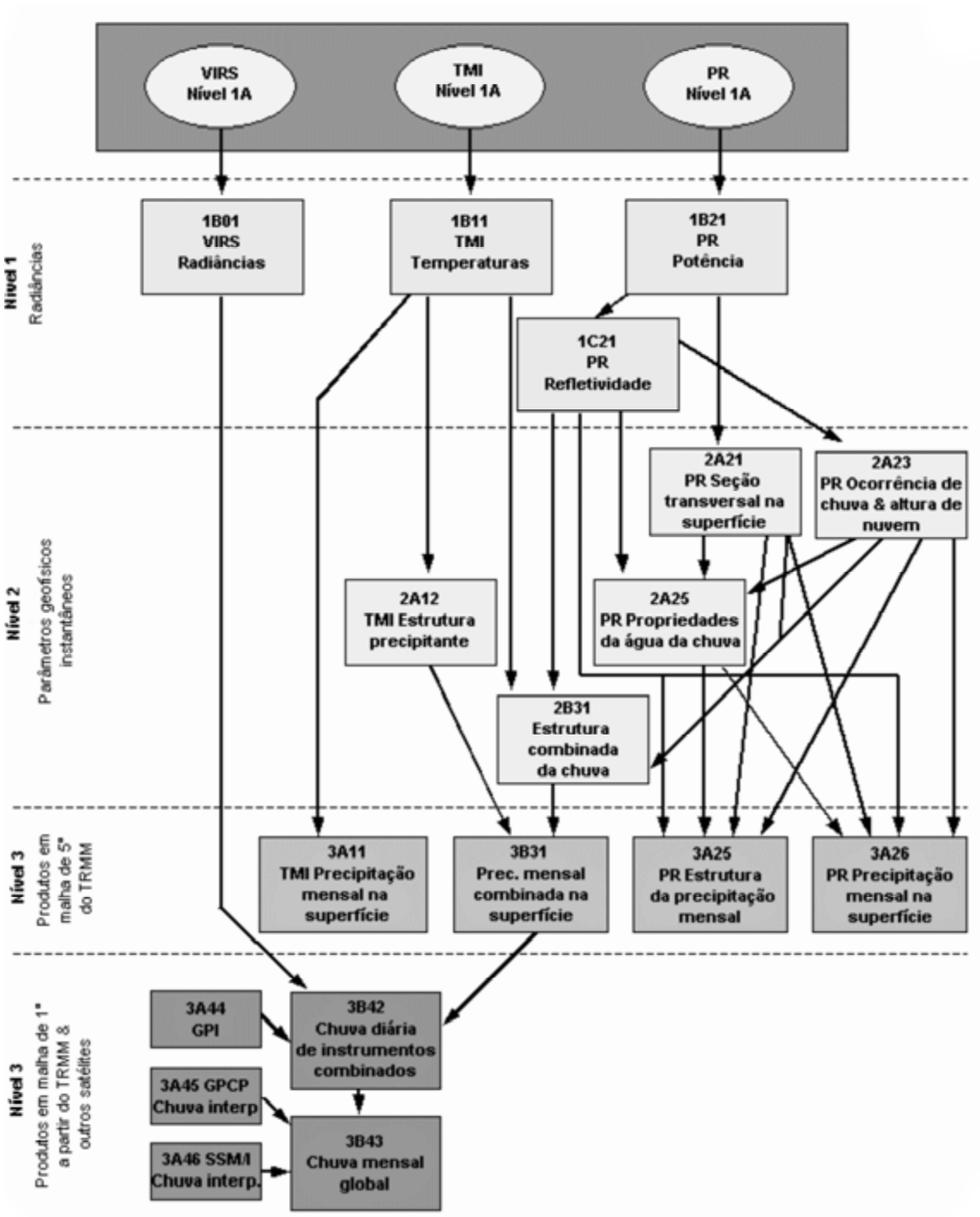


Figura 4.4 – Esquema de processamento dos dados TRMM
Fonte: adaptado de http://www.eorc.jaxa.jp/en/index.html

Como pode ser verificado na Figura 4.4, vários produtos são gerados a partir das estimativas do satélite TRMM. Neste estudo, foi utilizado o produto 3B42, que usa estimativas de precipitação por micro-ondas do TMI e VIRS, corrigidas através de informações sobre a estrutura vertical das nuvens, obtidas do PR (HIROSHIMA, 1999).

Esses produtos, obtidos de intervalos temporais de 3 (três) horas e resolução espacial de 0.25º são disponibilizados gratuitamente pela NASA em seu endereço eletrônico.

A Figura 4.5 fornece um exemplo de como os produtos TRMM podem ser utilizados para criar uma imagem da localização e intensidade de chuvas a cada 3 horas.

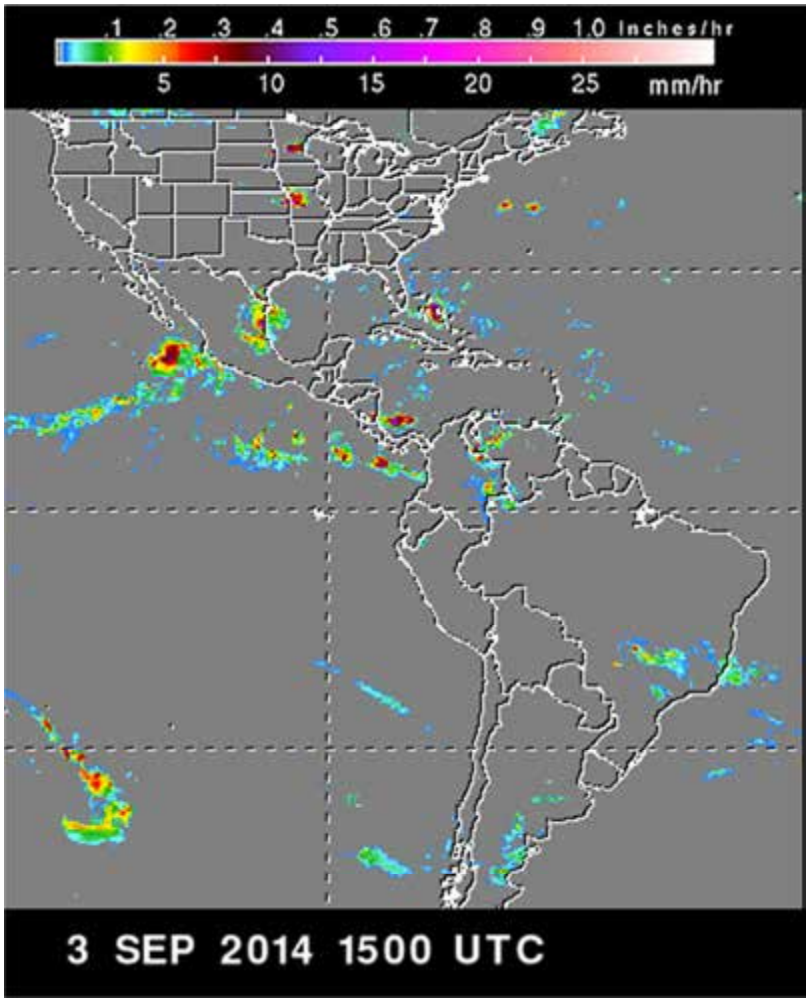


Figura 4.5 – Exemplo de imagem de taxa de precipitação na América (período de 3 horas)
Fonte: http://trmm.gsfc.nasa.gov/images_dir/images.html

Ao observar a Figura 4.5, é possível notar que o horário refere-se ao UTC (*Universal Time Coordinated*), isto é, ao horário de Greenwich, sendo necessário ajustar os dados obtidos para o fuso horário do local de interesse. Os dados podem ser acumulados e processados em computador para criar imagens que mostrem a precipitação média mensal, em milímetros por dia ($mm.dia^{-1}$). A codificação de cores permite identificar facilmente as zonas de maior precipitação ou pouca ou nenhuma precipitação.

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). O adiamento do fim da operação evidenciou ainda mais a satisfação com os dados e resultados obtidos através do satélite, atestada por vários autores como HIROSHIMA (1999), KUMMEROW *et al*. (2000) e FLAMING (2004).

Devido a esse relativo sucesso, a NASA preparou um programa para suceder o TRMM, chamado o GPM (brevemente citado no Anexo A), através do lançamento de múltiplos satélites, equipados com sensores e radares similares ao anterior e com maior resolução.

Portanto, o TRMM representa um grande avanço em relação ao registro e compreensão de uma das variáveis mais importantes do ciclo hidrológico, a precipitação, auxiliando na modelagem climática, na compreensão das circulações globais de larga escala e dos sistemas de chuvas tropicais e nos projetos e estudos hidrológicos desenvolvidos.

MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*)

O sensor MODIS encontra-se a bordo das plataformas espaciais TERRA (lançada em 18 de dezembro de 1999) e AQUA (lançado em 4 de maio de 2002), apresentando diversas vantagens em relação aos satélites e sensores convencionais. Uma das vantagens do emprego desse sensor óptico consiste na disponibilização gratuita de dados com variadas opções de resolução espacial (moderada a global) para diversas bandas espectrais e com resolução temporal diária. Além disso, os produtos e imagens, em sua maioria, são distribuídos e corrigidos radiometricamente, minimizando a influência de nuvens e aerossóis, que, muitas vezes, interferem na utilização dos produtos orbitais

Assim como o TRMM, o MODIS também faz parte do programa EOS e tem como objetivo o monitoramento das mudanças que ocorrem no planeta, contando, também, com o monitoramento global e contínuo da superfície terrestre.

O MODIS apresenta uma órbita quasi-polar e síncrona com o sol, amostrando uma faixa de 2.330 km na direção perpendicular ao voo (MORAES, 2013), período médio de revolução em torno de 98,9 minutos, imageamento global a cada dois dias,

ciclo de repetição de 16 dias, com disponibilidade gratuita e ininterrupta das imagens. A Tabela 4.2 apresenta as especificações técnicas do sensor.

Tabela 4.2 – Especificações técnicas do sensor MODIS
Fonte: adaptado de http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php

Órbita	705 km, 10:30 descendente (Terra) e 13:30 ascendente (Aqua), síncrona com o sol, quase-polar
Cobertura Espacial	2.330 km (transversal – *cross-track*) por 10 km (longitudinal – *along track at nadir*)
Tamanho	1,0 x 1,6 x 1,0 m
Peso	228,7 kg
Potência	162,5 W (média para uma órbita)
Taxa de Dados	10,6 Mbps (de dia); 6,1 Mbps (média)
Quantização	12 bits
Resolução Espacial	250 m (bandas 1-2); 500 m (bandas 3-7); 1.000 m (bandas 8-36)

O sensor MODIS foi projetado para satisfazer os requisitos de três campos de estudos: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espectral selecionadas para esses objetivos e com uma cobertura global quase diária (JUSTICE *et al.*, 2002 apud LATORRE, 2003).

O MODIS apresenta uma alta sensibilidade radiométrica de 12 bits em 36 bandas espectrais com o comprimento de onda variando de 0,4 μm a 14,4 μm (BARNES *et al.*, 2003; SAVTCHENKO *et al.*, 2004).

A Tabela 4.3 apresenta algumas informações sobre as bandas do sensor MODIS.

Tabela 4.3 – Informações sobre as 36 bandas MODIS
Fonte: adaptado de MODIS/GSFC/NASA (2008) *apud* MORAES (2013)

Uso Primário	Banda	Comprimento de onda (nm)	Resolução espacial (m)
Superfícies Terra e Nuvem2	1	620 – 670	250
	2	841 – 876	
Propriedades da Superfície Terra / Nuvem	3	459 – 479	500
	4	545 – 565	
	5	1.230 -1.250	
	6	1.628 – 1.652	
	7	2.105 – 2.155	
Cor dos Oceanos Fitoplâncton Bioquímica	8	405 – 420	1.000
	9	438 – 448	
	10	483 – 493	
	11	526 – 536	
	12	546 – 556	
	13	662 – 672	
	14	673 – 683	
	15	743 – 753	
	16	862-877	
Vapor de Água Atmosférico	17	890 – 920	
	18	931 – 941	
	19	915 – 965	
Temperatura Superfície / Nuvem	20	3.660 – 3.840	
	21	3.929 – 3.989	
	22	3.929 – 3.989	
	23	4.020 – 4.080	
Temperatura Atmosférica	24	4.433 – 4.498	
	25	4.482 – 4.549	
Nuvens Cirrus e Vapor de Água	26	1.360 – 1.390	
	27	6.535 – 6.895	
	28	7.175 – 7.475	
Propriedade das Nuvens	29	8.400 – 8.700	
Ozônio	30	9.580 – 9.880	
Temperatura Superfície / Nuvem	31	10.780 – 11.280	
	32	11.770 – 12.270	
Altitude Topo da Nuvem	33	13.185 – 13.485	
	34	13.485 – 13.785	
	35	13.785 – 14.085	
	36	14.085 – 14.385	

Observa-se que as primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre 405 nm a 2.155 nm. As bandas 20 a 36, com exceção da banda 26 (1.360 nm a 1.390 nm), cobrem a porção termal do espectro (3.660 nm a 14.385 nm) e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (BARKER *et al*., 1992).

Além das bandas individuais, os usuários podem ter acesso a vários tipos de produtos provenientes do sensor MODIS, que possibilitam pesquisas sobre o balanço energético, cobertura terrestre e produtos destinados à vegetação (ROSENDO e ROSA, 2005).

O MODIS destaca-se e tem sido largamente utilizado em diversos estudos, muito também devido ao fato de apresentar 36 bandas espectrais, número muito superior quando comparado com as 5 bandas do AVHRR e as 8 do LANDSAT.

Os produtos são disponibilizados em arquivos no formato *Hierarchical Data Format* (HDF). Esse formato, bem difundido, agrega grandes volumes de informação e diversos tipos de metadados e foi desenvolvido pela NCSA – *National Center for Supercomputing Applications* visando à portabilidade (ARAI, 2002). Para ser utilizado como imagem no formato matricial (*raster*), os arquivos HDF podem ser abertos em dispositivos (*drivers)* específicos, como um simples algoritmo no código computacional MATLAB (função '*hdfread*') ou também ser convertidos para o formato *Geo-referenced Tagged Image File Format* (GeoTIFF), por exemplo, através do MODIS *Reprojection Tool* (disponível em https://mrtweb.cr.usgs.gov/), comumente utilizado em aplicações onde a localização geográfica é uma informação essencial.

As imagens do sensor MODIS utilizadas, baixadas do endereço eletrônico da USGS – *United States Geological Servey*, referem-se aos produtos de reflectância da superfície, MOD09, e de temperatura da superfície da terra e emissividade, MOD11, ambos do satélite Terra. Essas imagens são fornecidas previamente calibradas, georreferenciadas e corrigidas dos efeitos atmosféricos. Neste trabalho, são utilizadas imagens de dois tipos Q1 e A2, com resolução espacial de 250 m e 1 km, respectivamente. Ambos os produtos referem-se à composição de 8 dias.

O produto MODIS de reflectância (MOD09Q1) provê uma estimativa da reflectância espectral da superfície como se esta fosse medida ao nível do chão sem

dispersão ou absorção atmosférica. Os ajustes de dados científicos providos por esse produto incluem valores de reflectância para bandas 1 e 2 e ajustes de qualidade, conforme especificações na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Camadas de dados disponíveis no produto MODIS MOD09Q1 (Reflectância da superfície)
Fonte: adaptado de https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod09q1

Conjuntos de Dados Científicos (Camadas HDF)	Unidade	Tipo de Resolução	Preenchimento	Intervalo de Validade	Fator Mutiplicativo de Escala
250 m Superfície Reflectância Banda 1 (620-670nm)	Reflectância	16-bit inteiro com sinal	-28672	-100 - 16000	0,0001
250 m Superfície Reflectância Banda 2 (841-876nm)	Reflectância	16-bit inteiro com sinal	-28672	-100 - 16000	0,0001
250 m Qualidade da Banda de Reflectância	Campo de bits	16-bit inteiro com sinal	65535	0 - 32767	ND

Legenda: ND – Não disponível

Na Tabela 4.4, as hachuras indicam as camadas utilizadas para elaboração do presente trabalho.

O produto MODIS de temperatura global da superfície da terra e emissividade (MOD11A2) engloba os valores médios temperatura da superfície terrestre de céu limpo para o dia e para a noite. Os produtos da versão 5 são validados, o que significa que sua precisão foi testada em um conjunto de locais e intervalos de tempo vastamente distribuídos por meio de inúmeras tentativas de validação na superfície terrestre.

Os ajustes de dados científicos providos por esse produto incluem camadas tanto para o dia quanto para a noite de valores de temperatura, controle de qualidade, tempos de observação, ângulos de visada, condições de céu limpo e emissividade estimada nas bandas 31 e 32, conforme especificações na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Camadas de dados disponíveis no produto MODIS MOD11A2
(Temperatura da superfície terrestre e emissividade)
Fonte: adaptado de https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod11a2

Conjuntos de Dados Científicos (Camadas HDF)	**Unidade**	**Tipo de Resolução**	**Preenchimento**	**Intervalo de Validade**	**Fator Multiplicativo de Escala**
1 km Temperatura da Superfície da Terra (TST) 8 dias - DIA	Kelvin	16-bit inteiro sem sinal	0	7500 - 65535	0,02
Controle de Qualidade DIA (temperatura e emissividade)	Campo de bits	8-bit inteiro sem sinal	Verificar notas de garantia de qualidade	0 - 255	ND
DIA tempo de visão: média do tempo de observação do período do dia TST	Horas	8-bit inteiro sem sinal	255	0 - 240	0,1
DIA ângulo de visão: média de visão do ângulo zênite de observação do período do dia TST	Graus	8-bit inteiro sem sinal	255	0 - 130	1(-65)
1 km Temperatura da Superfície da Terra (TST) 8 dias - NOITE	Kelvin	16-bit inteiro sem sinal	0	7500 - 65535	0,02
Controle de Qualidade NOITE (temperatura e emissividade)	Campo de bits	8-bit inteiro sem sinal	Verificar notas de garantia de qualidade	0 - 255	ND
NOITE tempo de visão: média do tempo de observação do período do dia TST	Horas	8-bit inteiro sem sinal	255	0 - 240	0,1
NOITE ângulo de visão: média de visão do ângulo zênite de observação do período do dia TST	Graus	8-bit inteiro sem sinal	255	0 - 130	1(-65)
Banda 31 Emissividade	-	8-bit inteiro sem sinal	0	1 - 255	0,0020 (+0,49)

Conjuntos de Dados Científicos (Camadas HDF)	Unidade	Tipo de Resolução	Preenchimento	Intervalo de Validade	Fator Multiplicativo de Escala
Banda 32 Emissividade	-	8-bit inteiro sem sinal	0	1 - 255	0,0020 (+0,49)
Dias de céu limpo: dias em condições de céu limpo e com TSTs válidas	-	8-bit inteiro sem sinal	0	1 - 255	ND
Noites de céu limpo: dias em condições de céu limpo e com TSTs válidas	-	8-bit inteiro sem sinal	0	1 - 255	ND

Legenda: ND – Não disponível

Da mesma forma que feito para as imagens de reflectância, as hachuras na Tabela 4.5 indicam as camadas utilizadas neste trabalho.

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA

Uma rede de monitoramento de dados hidrometeorológicos representa um conjunto de atividades de coleta de dados, projetada e operada para atender a um objetivo único ou a uma série de objetivos complementares e compatíveis entre si. Frequentemente, esses objetivos estão associados a um uso particular, por exemplo, para uma avaliação de recursos hídricos, para um plano de desenvolvimento ou para a concepção de um projeto. Uma dada estação hidrológica pode ser incluída em mais de uma rede se os dados forem usados para mais de uma finalidade, que é o caso mais comum. Alternativamente, uma única rede pode ser constituída por vários tipos de estação se todas contribuem com informações para que o objetivo principal da rede seja alcançado. Por exemplo, como é comum e também enfoque deste trabalho, as estações pluviométricas e fluviométricas podem ser inseridas em uma mesma rede de previsão de cheias.

O emprego tão somente da palavra rede, usualmente, pressupõe a sua utilização em um sentido menos rigoroso. É provável, assim, que seja referenciada também como rede quantitativa de água ou rede de chuvas. Em síntese, o papel de uma rede de monitoramento seria contar com uma distribuição espacial adequada dos dados hidrológicos e meteorológicos de forma a bem representar os processos físicos correspondentes.

Um projeto de rede pode ser baseado na maximização do valor econômico dos dados que serão coletados. Todavia essa opção não tem sido adotada de fato. Geralmente, na tomada de decisões de recursos hídricos, os impactos econômicos dos dados hidrológicos não são considerados em toda correspondente dimensão social. As decisões são tomadas com base na disponibilidade estrita dos dados, e a opção da decisão de coletar mais dados não é explorada na sua integralidade, sendo, na maioria das vezes, nesse sentido, inviabilizada.

A crescente difusão das redes automáticas estimula e permite que se imponham critérios de projeto que levem em conta as novas demandas para o monitoramento de fenômenos hidrológicos em tempo real. Um dos critérios empregados no projeto de rede consiste em minimizar o erro de estimação da variável hidrometeorológica nos pontos de estudo onde as medições diretas não estão disponíveis, com base no uso de técnicas

de geoestatística (BASTIN *et al*., 1984; BOGARDI e BARDOSSY, 1985; PARDO-IGUZQUIZA, 1998).

A metodologia proposta, neste trabalho, para definição de uma rede de monitoramento hidrometeorológico, baseia-se no fato de que um projeto de uma rede de monitoramento visa responder as seguintes questões:

- quais variáveis hidrometeorológicas precisam ser observadas?
- em que locais essas variáveis necessitam ser monitoradas?
- qual a frequência de observação a ser adotada?
- qual é a duração do programa de monitoramento?
- quão precisa a observação deve ser?

Em relação à primeira questão, no tocante a uma rede hidrometeorológica completa que sirva para a prevenção de eventos extremos, para a gestão de recursos hídricos e para o auxílio em estudos e projetos relacionados com temas hidrometeorológicos (clima, recursos hídricos, hidrologia, hidráulica, qualidade da água, entre outros), é necessário observar diversas variáveis hidrometeorológicas: chuva, nível de água, vazão líquida, temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar, vento (velocidade e direção), qualidade da água (temperatura da água, condutividade, turbidez e pH), características do solo (umidade e temperatura do solo), hidrossedimentologia (vazão sólida e qualidade dos sedimentos). Por outro lado, as diretrizes para definição de redes de monitoramento meteorológico, hidrológico associado à quantidade, hidrológico referente à qualidade da água, hidrossedimentológico e observacional de características do solo constituem abordagens distintas, tendo cada um desses tipos de rede características próprias e análises independentes.

Neste trabalho, como os dados disponíveis na bacia em estudo são predominantemente relativos à precipitação e à temperatura, optou-se por propor uma rede hidrometeorológica que avalie apenas as variáveis hidrológicas associadas à quantidade de água (precipitação, nível de água e vazão líquida) e variáveis meteorológicas complementares à precipitação de chuva (temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar e direção e velocidade do vento).

Quanto à segunda questão, que se refere aos locais em que as estações devem ser instaladas, as alternativas devem ser avaliadas de maneira que não sejam colocadas diversas estações em um mesmo local e acabem ocasionando redundância ou sobreposição excessiva de informações (por exemplo, estações tão próximas que forneçam séries de dados praticamente iguais), buscando-se uma distância adequada para o posicionamento das estações, de modo que seja possível observar a variabilidade hidrometeorológica da bacia, reduzindo, sempre que possível, os custos da rede.

Nesse sentido, a presente dissertação propõe a aplicação de uma abordagem geoestatística, mais especificamente por meio do emprego de variogramas, de forma a encontrar a distância potencialmente ideal ou adequada entre as estações. Posteriormente, defini-se a viabilidade de implantação e instalação de uma estação no local pré-determinado com base em aspectos relevantes da bacia, como, por exemplo, a hidrografia, o relevo, o uso e ocupação do solo, a existência de áreas protegidas, a disponibilidade hídrica e o estresse hídrico na região, aduzindo, ao arcabouço metodológico concebido, contribuição original no sentido de integrar técnicas de natureza matemático-estatística com suporte de sensoriamento remoto na perspectiva de suscitar uma visão diferenciada de captar e dimensionar o impacto hídrico na escala da bacia hidrográfica, reconhecida, por sua vez, como um sistema físico e social.

Respondendo a terceira questão, cada variável hidrometeorológica pode apresentar grande variabilidade ao longo de um dia. Como ilustração, em um dado dia, pode chover 15 minutos pela manhã e a temperatura, na parte da manhã, pode ser inferior à da tarde, com variação significativa de alguns graus, enquanto a radiação solar pode ser maior no meio do dia com ventos que, por sua vez, podem atingir velocidades maiores à noite. Assim, uma gama de diferentes situações ocorre ao longo de uma hora ou de um dia em que as variáveis hidrometeorológicas são afetadas. Sendo assim, as variabilidades ao longo de um dia, de cada variável hidrometeorológica, devem ser acompanhadas e avaliadas estatisticamente para que seja possível definir a frequência adequada de amostragem (intervalo de tempo de observação), de modo que os regimes hidrometeorológicos sejam razoavelmente bem caracterizados.

A questão associada à duração do programa de monitoramento está atrelada, por vezes, à finalidade da rede. Por exemplo, para controle de desastres e eventos extremos, o ideal é o que o monitoramento seja contínuo, isto é, não tendo uma data específica

para ser suspenso. Entretanto, se o objetivo da rede ou de uma estação for observar as vazões para construção de um empreendimento hidroelétrico, o programa de monitoramento, embora não recomendado, pode durar apenas um ou dois anos. Neste trabalho, propõe-se monitorar continuamente as variáveis hidrometeorológicas apresentadas acima, contudo, como será abordado mais adiante, a rede deve ser continuamente avaliada e redimensionada se necessário.

Em relação à última questão, associada à precisão, a coleta dos dados deverá ocorrer com interrupções mínimas e ser a mais acurada possível, admitindo erros mínimos de observação, uma vez que os dados inconsistentes, na maioria das vezes, acabam por ser desprezados, e, se as lacunas persistirem, esse período de dados pode vir a se torna irrecuperável. Primeiramente, tem-se a questão da precisão necessária para cada variável. Para exemplificar, cada variável deve ser observada nas unidades padronizadas. A unidade de precipitação é dada em milímetros, e a precisão da medição deve ser expressa nos décimos (exemplo: choveu 5,5 mm); a temperatura é medida em graus Celsius e também é expressa em valores com décimos (exemplo: 21,6 ºC); e assim por diante, padrões são estabelecidos para as outras variáveis.

Em segundo lugar, a precisão das observações está diretamente relacionada com a precisão dos instrumentos de medição de cada variável, isto é, a precisão mais acurada possível para uma dada variável é a precisão do melhor instrumento de medição (melhor processo de fabricação) disponível no mercado. Essa questão não será abordada neste trabalho, uma vez que os instrumentos de medição que serão considerados quando da instalação das estações propostas serão os instrumentos e sensores já usualmente utilizados em estações de monitoramento hidrometeorológico. O Anexo C apresenta os instrumentos e sensores mais comuns para monitoramento das variáveis hidrometeorológicas que constituirão a rede a ser definida no item 7.5.

Este capítulo busca a proposição e aplicação de um procedimento que possibilite a avaliação, a definição e, até mesmo, o redimensionamento, se for o caso, de redes de monitoramento, sejam elas novas ou complementares às existentes.

Dessa forma, a proposta é aplicar ferramentas geoestatísticas com base em dados de precipitação e de temperatura. Os dados de chuva utilizados serão provenientes das medições em pluviômetros instalados nas estações convencionais e/ou telemétricas e das medições obtidas através de técnicas de sensoriamento remoto. Já os dados de

temperatura utilizados serão somente oriundos de técnicas de sensoriamento remoto. Dessa forma, mediante a identificação dos padrões de variações de regimes de chuva e temperatura dentro da mesma bacia, será proposta, nesses locais, a instalação de novas estações.

A metodologia concebida neste trabalho consiste no desenvolvimento de 6 (seis) etapas para seleção da quantidade e do posicionamento ótimo das estações da rede de monitoramento que será proposta, isto é, para a definição da rede de monitoramento na bacia em estudo considerando a abordagem feita nas questões discutidas anteriormente. A Figura 5.1 apresenta o fluxograma metodológico desta dissertação.

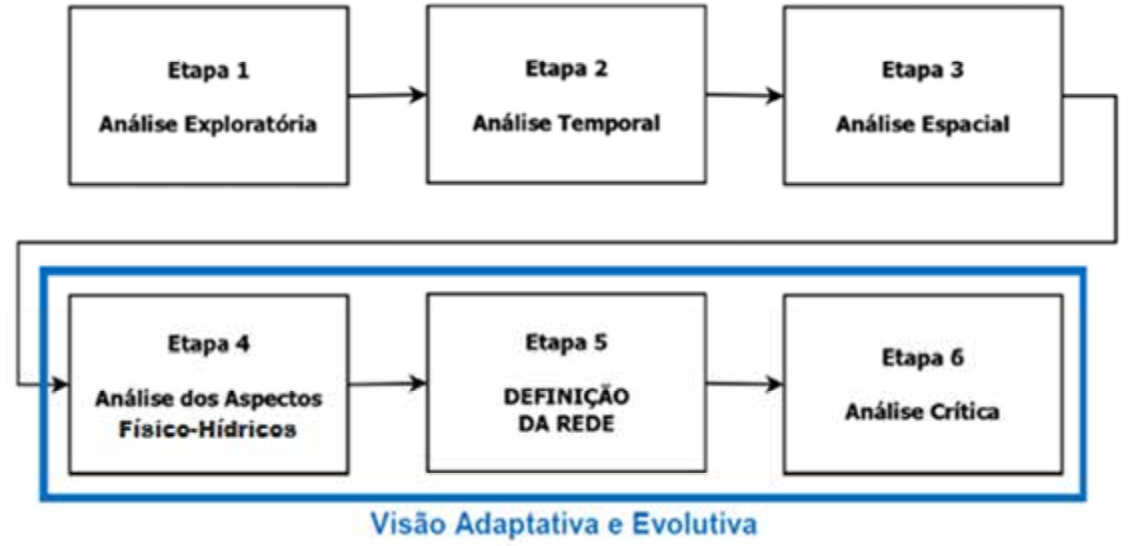


Figura 5.1 – Fluxograma geral metodológico para definição de rede de monitoramento hidrometeorológico

A seguir, é apresentado um breve resumo do que será executado em cada etapa:

1- <u>análise exploratória</u>, que consiste na seleção dos dados, verificação da qualidade e da representatividade dos mesmos e avaliação da rede atualmente instalada na bacia através da análise de rede mínima e da análise de componentes principais;
2- <u>análise temporal</u> para determinação da cadência de amostragem da variável precipitação;
3- <u>análise espacial</u> para definição da distância e do posicionamento das estações através da utilização de análise geoestatística;

4- análise dos aspectos físico-hidrológicos, que contemplem o comportamento da bacia para reposicionamento das estações, com destaque para a abordagem de caracterizações que envolvam hidrografia, relevo e o uso e cobertura do solo;
5- definição da rede propriamente dita, isto é, a proposta final da rede de monitoramento com base em todos os aspectos supracitados;
6- análise crítica, que integra e considera outros fatores, trazendo uma visão nova e adaptativa à definição de rede, como, por exemplo, avaliação da rede proposta considerando questões de distribuição populacional, disponibilidade hídrica e estresse hídrico.

A Figura 5.2 mostra o fluxograma dos passos da metodologia proposta para definição de uma rede de monitoramento segundo uma visão nova, adaptativa e evolutiva.

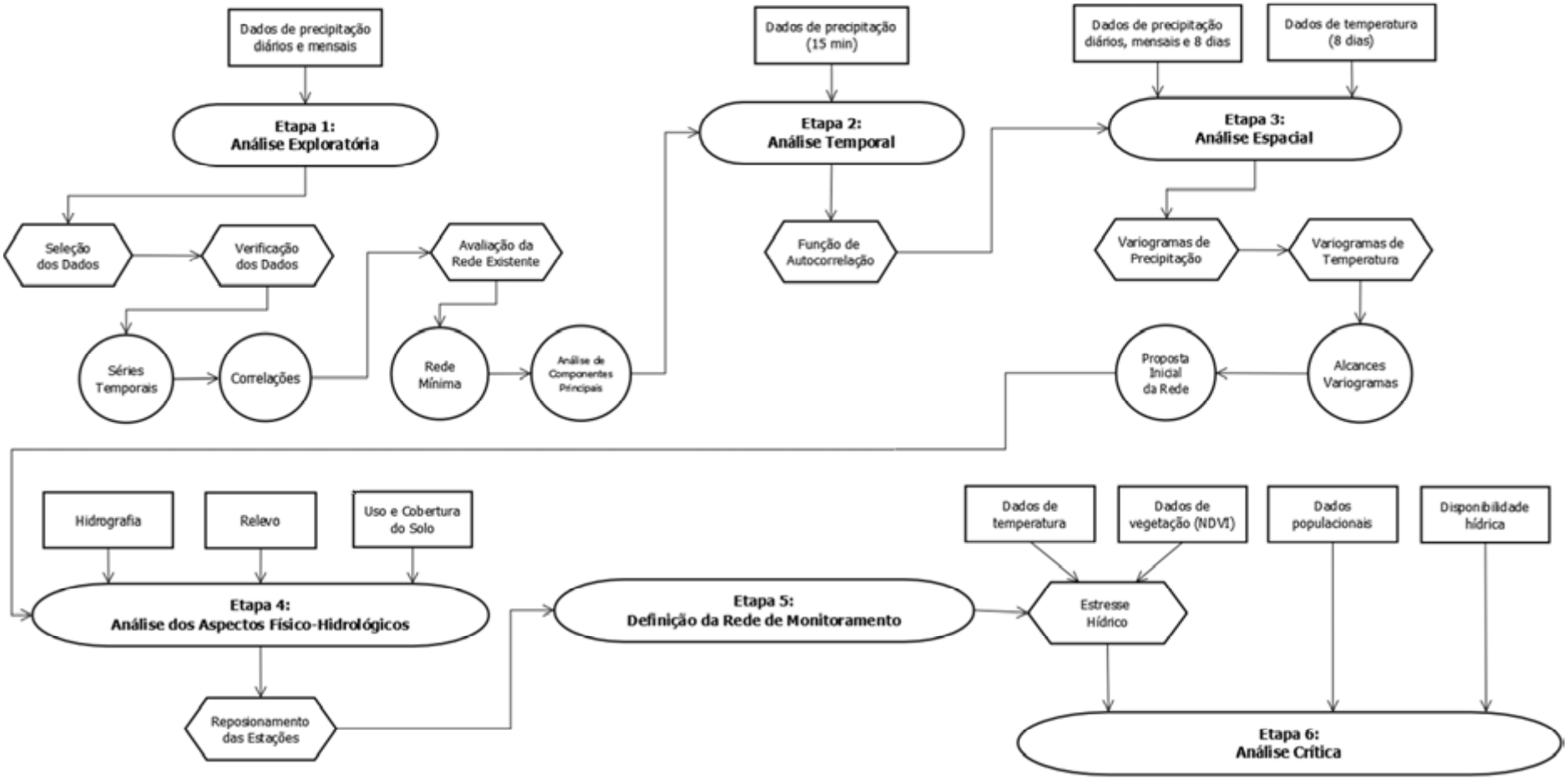


Figura 5.2 – Fluxograma dos passos da metodologia proposta para definição de rede de monitoramento hidrometeorológico

5.1 Análise Exploratória

Essa primeira etapa da metodologia visa à seleção dos dados, bem como à verificação da qualidade e da representatividade dos dados, quantitativamente, a partir da análise da rede mínima, e qualitativamente, a partir da análise de componentes principais que auxiliará na avaliação da distribuição da rede atualmente instalada na bacia.

5.1.1 Seleção dos Dados

Para desenvolvimento deste trabalho, foram selecionados, inicialmente, dados de precipitação em escalas diárias e mensais provenientes das observações *in loco* dos postos pluviométricos atualmente instalados na bacia e também oriundos do satélite TRMM, que são dados de chuva espaciais, isto é, dados aplicados à superfície. Esses dados espaciais foram transformados em dados pontuais aplicando a média dos dados da área correspondente no ponto central dessa área de abrangência da informação (chuva). Essa transformação faz-se necessária, uma vez que, para a análise da qualidade dos dados e posterior emprego das ferramentas geoestatísticas, os dados de precipitação precisam estar disponíveis na mesma escala (neste caso, pontual e não distribuídos em uma superfície). Reconhece-se aqui que os suportes de obtenção dos dados de chuva por pluviômetros e por satélite são distintos, o que requer que seja adotado um certo cuidado na avaliação dos resultados obtidos no trabalho.

Já para a temperatura, os dados foram obtidos por meio de sensoriamento remoto, oriundos do emprego de imagens MODIS referente à temperatura superficial continental (TSC), que representa um parâmetro físico importante nos processos ocorridos na superfície terrestre em escala local, regional e global. Com o desenvolvimento tecnológico de sensores eficazes para sensoriamento remoto termal, o estudo da TSC tem sido ampliado através da utilização de sensores de infravermelho, sendo possível, com derivações da lei de Planck e de informações atmosféricas, estimá-la a partir da temperatura de brilho, ou seja, temperatura no topo da atmosfera. Dessa forma, no referido produto MODIS disponibilizado, a temperatura de brilho é corrigida e ajustada para obtenção da temperatura da superfície terrestre continental (TSC).

Além da seleção dos dados, é importante definir o período de dados que serão utilizados para aplicação das demais etapas da metodologia. Levando-se em conta essa condição, será definido um período comum entre os dados das medições das estações

pluviométricas e dos dados do TRMM. Na análise dos dados de temperatura, será considerado o mesmo período definido para a variável precipitação.

Para desenvolvimento da terceira etapa da metodologia (análise espacial), faz-se necessário definir períodos de análises nas escalas diária e mensal, além da escala da composição de 8 dias devido à disponibilidade dos produtos MODIS. Serão avaliados dois períodos distintos e representativos das séries históricas disponíveis, a saber, um período chuvoso e um período de estiagem.

Essa opção fundamenta-se no fato de que o objetivo deste trabalho é definir uma rede de monitoramento em que o posicionamento das estações seja dado de tal forma que a bacia seja considerada bem monitorada, atendendo a diversas finalidades, e a variabilidade hidrometeorológica seja bem representada. Assim, em ambos os períodos, serão considerados os dias mais críticos e o mês mais extremo. Complementarmente, para o período chuvoso, também será considerado um evento médio.

5.1.2 Verificação da Qualidade e Representatividade dos Dados

Os fenômenos hidrológicos apresentam uma aleatoriedade intrínseca devida à complexa interação e dependência entre inúmeros fatores influentes nas diversas fases do ciclo hidrológico (NAGHETTINI e PINTO, 2007), que é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre, a atmosfera e o subsolo, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação da Terra (SILVEIRA, 1993).

Primeiramente, para efetuar estimativas e delimitar incertezas correlatas, o engenheiro deve conduzir uma análise rigorosa dos dados hidrológicos de longo termo, que leva em consideração uma gama de técnicas e de métodos matemáticos e estatísticos que possibilitam a extração de resultados e conclusões úteis, suficientes e apropriados aos objetivos dos estudos que ele se dispõe a realizar.

Os dados hidrológicos são medidos em locais definidos, seja por um ou mais pluviômetros numa bacia hidrográfica, seja por um posto fluviométrico instalado numa seção de um rio. O primeiro tipo de instrumento observa a ocorrência da precipitação como uma amostra pontual de um processo espaço-temporal, enquanto o segundo permite avaliar a integração espacial do escoamento na bacia hidrográfica ao longo do tempo. Uma rede hidrológica desses postos dificilmente cobre todos os locais de

interesse necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região. Existem lacunas temporais e espaciais que necessitam ser preenchidas para posteriores estudos hidrológicos. A análise criteriosa da consistência de dados elimina substancialmente o risco na utilização incorreta dos dados hidrológicos em futuros projetos de uso dos recursos hídricos.

Para que seja possível executar o proposto no escopo deste trabalho, é fundamental que os dados que serão utilizados para análise e posterior configuração de redes de monitoramento sejam avaliados, tratados e corrigidos, no caso de apresentarem inconsistências.

Os dados pluviométricos foram obtidos a partir de estações reais, aquelas dotadas de pluviômetros e/ou pluviógrafos, que medem a chuva pontualmente, e do satélite TRMM, que afere a precipitação espacialmente.

Nesse sentido, o procedimento adotado visa qualificar e analisar a representatividade dos dados de precipitação obtidos nos postos pluviométricos e nas estações aqui denominadas de virtuais (ou fictícias) do TRMM. Em particular, exploram-se, nesta dissertação, para a região de estudo, a correspondente consistência e a confiabilidade dos dados TRMM, isto é, se apresentam a mesma tendência quanto ao regime de precipitação espaço-temporal, conforme captado e representado por postos pluviométricos.

Por essa razão, primeiramente, serão realizadas análises das séries temporais mensais e correlações diárias e mensais entre os dados, apresentadas nos itens 5.1.2.1 e 5.1.2.2, respectivamente. Para tal, as falhas serão desconsideradas, uma vez que o objetivo é a visualização das discrepâncias entre as séries e a verificação da qualidade dos dados disponíveis.

Posteriormente, a rede instalada atualmente na bacia será avaliada, conforme será visto nos itens 5.1.3.1 e 5.1.3.2.

5.1.2.1 Séries Temporais

Uma série temporal é um conjunto de observações ordenadas no tempo, não necessariamente igualmente espaçadas, que apresentam dependência serial, isto é, dependência entre instantes de tempo. A maneira tradicional de analisar uma série temporal é através da sua decomposição nas componentes de tendência, ciclo e

sazonalidade. (MORETTIN e TOLOI, 1987). Na análise de séries temporais, é necessário conhecer a relação entre as diferentes séries em cada instante de tempo.

A tendência de uma série indica o seu comportamento. Os ciclos são caracterizados pelas oscilações nas séries ao longo da componente de tendência. E a sazonalidade em uma série corresponde às oscilações em um determinado período do ano, do mês, da semana ou do dia. A principal diferença essencial entre as componentes sazonal e cíclica é que a primeira possui movimentos facilmente previsíveis e que ocorrem em intervalos regulares de tempo, enquanto que os movimentos cíclicos tendem a ser irregulares.

Os principais objetivos de análise de séries temporais são os seguintes:

- compreender o mecanismo gerador da série;
- análise e modelagem da série temporal;
- predizer o comportamento futuro da série.

Neste caso, serão analisadas as séries de chuva dos postos pluviométricos e dos dados TRMM, com enfoque na descrição das séries, verificação de suas características mais relevantes e as relações com outros registros de dados.

5.1.2.2 Correlações

A correlação fornece a relação entre diferentes séries em cada instante de tempo.

Preliminarmente, para entender o conceito de correlação, é preciso compreender as seguintes medidas estatísticas:

- média;
- variância e desvio padrão;
- covariância.

A média é o valor de uma série que aponta um valor tal em que se concentram os dados de uma distribuição. A média de uma variável *x* é dada por

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \tag{5.1}$$

sendo:

$\bar{x}$ – média da amostra da variável *x*;

n – número de observações na amostra da variável *x*;

x_i– valores da variável *x* no tempo *i*.

A variância de uma variável aleatória *x* é uma medida da sua dispersão estatística, indicando quão longe em geral os seus valores se encontram do valor esperado, isto é, trata-se de uma medida do espalhamento da distribuição ao redor da média. A Equação 5.2 mostra a fórmula da variância expressa por

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \tag{5.2}$$

sendo:

s_x^2 – variância da variável *x*;

n – número de observações na amostra da variável *x*;

x_i– valores da variável *x* no tempo *i;*

$\bar{x}$ – média da amostra da variável *x*.

O desvio padrão, calculado como a raiz quadrada da variância, representa, também, uma medida de dispersão que mede a variabilidade dos valores em torno da média. O valor mínimo do desvio padrão é 0 (zero), indicando que não há variabilidade, ou seja, que todos os valores são iguais à média. O desvio padrão é expresso por

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{5.3}$$

sendo:

s_x – desvio padrão da amostra da variável *x*;

n – número de observações da amostra da variável *x*;

x_i – valores da variável x no tempo *i*;

$\bar{x}$ – média da amostra da variável *x*.

A medida que diz que duas variáveis estão relacionadas é chamada de covariância. Considerando duas variáveis *x* e *y*, cada uma com *n* observações, a covariância entre as duas é dada pela equação

$$s_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{n - 1} \tag{5.4}$$

sendo:

s_{xy} –covariância entre *x* e *y*;

n – número de observações nas amostras das variáveis *x* e *y*;

x_i e y_i– valores das variáveis *x* e *y* no tempo *i*, respectivamente;

$\bar{x}$ e $\bar{y}$ – média das amostras das variáveis *x* e *y*, respectivamente.

A partir das variâncias das variáveis *x* e *y* e da covariância entre elas, é possível obter o coeficiente de correlação linear (*r*) para as duas séries, segundo a seguinte equação

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{5.5}$$

Os valores de *r* variam de -1 a 1, sendo que o valor 0 (zero) implica a não existência de correlação linear entre as variáveis. Quanto mais próximo de 1 ou de -1, maior a correlação direta ou inversa, respectivamente, entre elas.

5.1.3 Avaliação da Rede Existente

A seguir, serão apresentados dois procedimento de análise da rede já existente, que consistem na verificação da rede atual: o primeiro em relação à quantidade de estações e o segundo associado à sua distribuição.

5.1.3.1 Rede Mínima

Para uma determinada região, existem valores recomendados, segundo a WMO, para implantação de uma rede de monitoramento de postos hidrometeorológicos, que seriam adequados em função de sua topografia e climatologia. Dessa forma, a WMO estabeleceu regras gerais para o dimensionamento das redes hidrológicas, publicando as

Recomendações para densidades mínimas, desde 1965 até hoje bastante utilizadas, segundo suas atualizações e reedições, caracterizadas pela facilidade de aplicação.

A Tabela 5.1 mostra a quantidade mínima de estações recomendadas para uma rede de estações pluviométricas de acordo com as características da bacia e com o tipo de estação, convencional ou automática para tentar compensar o fato de que, no primeiro tipo, a medição é feita de maneira manual. Essa distinção tenta compensar a defasagem dos tipos de medição no tempo.

Tabela 5.1 – Densidade mínima de estações de monitoramento de precipitação recomendada pelo WMO (área em km^2 por estação) de acordo com o tipo
Fonte: adaptado de WMO (2008)

Unidade Fisiográfica	**Convencional**	**Automática**
Costas	900	9.000
Montanhas	250	2.500
Planícies de Interiores	575	5.750
Acidentado / Ondulante	575	5.750
Pequenas Ilhas	25	250
Áreas Urbanas	-	10-20
Regiões Polares / Áridas	10.000	100.000

Segundo a WMO, a rede mínima é aquela que evitará deficiências graves no desenvolvimento e na gestão de recursos hídricos em escala compatível com o nível de desenvolvimento econômico do país, ou seja, essa rede fornecerá a estrutura básica para a sua expansão com o objetivo de atender às necessidades futuras para fins específicos.

Ressalta-se que a rede mínima não será necessariamente adequada para a formulação de planos de desenvolvimento detalhados e não atenderá a inúmeras exigências de uma região para a operação de projetos e gestão de recursos hídricos.

De modo a gerar subsídios no atendimento das diversas finalidades e dos usos associados aos recursos hídricos, o recomendado e desejado é que a bacia tenha uma rede adequada e bem distribuída.

5.1.3.2 Análise de Componentes Principais

O aumento das séries temporais de dados, incluindo aquelas oriundas de técnicas de sensoriamento remoto, tornou necessário o desenvolvimento e utilização de métodos capazes de extrair informações representativas da base de dados, fornecendo, no caso deste trabalho, meios de avaliação da localização das estações de monitoramento.

Mais especificamente, nesta dissertação, a análise de componentes principais (ACP), conforme ilustrada em trabalho de GUEDES *et al.* (2010), objetivou, por critérios matemáticos, estabelecer uma avaliação qualitativa no que concerne à distribuição de estações da rede atual implantada na área de estudo, visando identificar a sua adequabilidade e grau de redundância, isto é, evidenciar postos pluviométricos que apresentam resultados similares e que poderiam ser remanejados de tal maneira que seja possível obter melhor representação da distribuição da chuva na bacia.

A ACP (do inglês, PCA – *principal components analysis*) foi introduzida, pela primeira vez, em 1956, por LORENZ, denominada como funções ortogonais empíricas (do inglês, EOF – *empirical orthogonal functions*). Ambas as nomenclaturas, PCA ou EOF, são comumente usadas (NORTH *et al.*, 1982) referindo-se aos mesmos procedimentos.

A ACP é uma técnica matemático-estatística multivariada que pode ser utilizada em hidrometeorologia, em especial quando existe uma quantidade significativa de informações a serem compreendidas e analisadas. Em particular, permite representar o comportamento de variação de um conjunto de variáveis no domínio do espaço e do tempo, revelando, para o fenômeno de interesse, características regionais e tendências de flutuações ao longo do tempo.

Assim, baseia-se na identificação dos padrões presentes em um conjunto de dados, realçando suas semelhanças e diferenças, com potencial de síntese do volume original de dados sem perda de informações significativas, incluindo a possibilidade de representação gráfica.

Nesse contexto, a ACP pode ser definida como um método de transformação das variáveis originais em um novo conjunto de variáveis, não correlacionadas, denominadas componentes principais (AFIF e CLARK, 1999). As componentes principais são combinações lineares das variáveis originais, ponderadas pela

contribuição de cada uma, para explicar a variância em uma dimensão ortogonal particular. Note-se que o número de componentes principais que podem ser extraídas é igual ao número de variáveis originais. Por outro lado, muitas vezes, poucas componentes são responsáveis por grande parte da explicação total, devido à correlação existente entre as variáveis originais.

A Figura 5.3 mostra um exemplo da transformação dos eixos e a obtenção das duas primeiras componentes principais, sendo que, em (a), ilustra-se um problema com 2 variáveis originais, enquanto, em (b), configura-se um problema com três variáveis originais. Observe-se que a componente 1 (PC_1) está disposta ao longo do eixo de maior variabilidade, contendo, portanto, a maior parcela de explicação sobre a variabilidade do conjunto de variáveis originais.

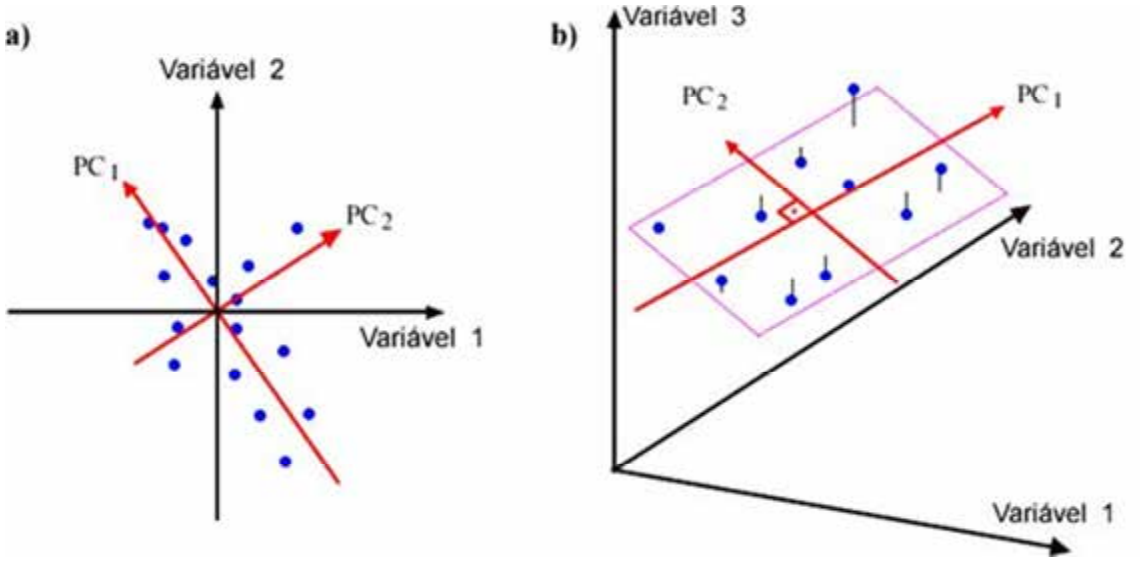


Figura 5.3 – Exemplo de transformação de eixos e componentes principais
Fonte: http://fspanero.wordpress.com/2009/12/30/analise-de-componente-principais-pca/

Em síntese, a análise de componentes principais é feita a partir da diagonalização da matriz de covariância dos dados originais, com a consequente determinação de componentes, a partir dos dados originais, que não guardam correlação entre si. As componentes correspondem aos autovetores da transformação linear, enquanto os autovalores associados oferecem uma medida de dispersão ao longo dos respectivos autovetores. As componentes principais são extraídas na ordem da mais explicativa, em termos do percentual da variância original, para o menos explicativa, ou, em outras palavras, do maior autovalor para o menor autovalor. Exemplo dessa discussão teórica e

de aplicação do método de componentes principais pode ser encontrado, por exemplo, em LUCENA (2012), quando analisa a formação de ilhas de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro.

Detalham-se, na sequência, algumas equações que fundamentam a análise de componentes principais, conforme exposto conceitualmente, de forma sucinta, nesta seção.

Inicialmente, cabe resgatar a definição de covariância para 2 (duas) variáveis (*x*, *y*), conforme mostra a Equação 5.4. A matriz de covariância (*MC*), para um problema em duas dimensões, é dada pelas covariâncias das variáveis *x* e *y* entre si e entre elas como

$$MC = \begin{pmatrix} s_{xx} & s_{xy} \\ s_{yx} & s_{yy} \end{pmatrix} \tag{5.6}$$

sendo:

s_{xx} – variância de *x*;

s_{yy} – variância de *y*;

$s_{xy} = s_{yx}$ – covariância entre *x* e *y*.

Seja uma matriz A (*n* x *n*) e considere-se a transformação linear *y* = A*x*, onde *x* e *y* são os vetores de um espaço *n*-dimensional. Um vetor $x \neq 0$ é dito autovetor da matriz A se a transformação linear deste vetor é colinear a este vetor, isto é, A*x* = λ*x*, em que o escalar λ é chamado de autovalor da matriz A correspondente ao autovetor *x*.

De acordo com o teorema, toda transformação linear (matriz) em um espaço vetorial complexo tem, pelo menos, um autovetor (real ou complexo).

Se (A – λE)x = 0, essa equação tem soluções diferentes de nula ($x \neq 0$) se e somente se seu determinante for 0 (zero), ou seja, det (A – λE) = 0, sendo essa última chamada de equação característica e o polinômio em λ definido por ela chamado de polinômio característico. Nesse caso, as raízes desse polinômio são os autovalores da matriz A, e o conjunto de autovetores é chamado de espectro da matriz.

Assim, a transformação é realizada de maneira a manter a variabilidade dos dados originais com o mesmo número de eixos primitivos não mais correlacionados entre si.

Os novos eixos são os autovetores da matriz de covariância dos dados originais (SOARES, 2004).

Considerando-se a matriz de dados X (*p* estações x *n* observações), pode-se obter a matriz de covariância *MC* expressa por

$$MC = \frac{1}{p} \cdot X \cdot X^t \tag{5.7}$$

sendo:

p – número de postos ou estações;

X – matriz com os valores centrados;

X^t – matriz transposta de X.

A normalização da matriz das variáveis x_1, x_2, x_3, ..., x_p, através da padronização da média e variância, pode ser realizada de duas maneiras:

- média 0 (zero) e variância 1 (um)

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_{x_j}} \text{ com } i = 1,2,\dots,p \text{ e } j = 1,2,\dots,n \tag{5.8}$$

- variância 1 (um) e média qualquer

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sigma_{x_j}} \text{ com i} = 1,2,\dots,\text{p e j} = 1,2,\dots,\text{n} \tag{5.9}$$

Após a normalização, a matriz de covariância será igual à matriz de correlação R:

$$R = \frac{1}{p} \cdot Z \cdot Z^t \tag{5.10}$$

sendo:

p – número de postos ou estações;

Z – matriz com os valores centrados (normalização de X);

Z^t – matriz transposta de Z.

A normalização acima também pode ser obtida por meio da padronização da variância igual a 1 (um) e média qualquer.

Sendo a matriz R uma matriz de correlação simétrica e positiva de dimensão (*n* x *n*), a mesma será diagonalizável por uma matriz ortogonal A, de mudança de base denominada de matriz dos autovetores. Com isso a matriz diagonal D, cujos elementos diagonais são os autovalores de MC, é obtida por:

$$D = A^{-1} \cdot R \cdot A = A^{t} \cdot R \cdot A \tag{5.11}$$

Sendo A^{-1} a matriz inversa da matriz ortogonal A e A^{t} a matriz transposta de A.

A proporção dos autovalores é a relação de importância explicativa das componentes no que diz respeito às variáveis. Se uma componente tem um autovalor baixo, significa que ela está contribuindo pouco para a explicação das variâncias nas variáveis e pode ser ignorada em relação às componentes mais importantes. Os autovalores medem a quantidade de variação na amostra total explicada por cada componente.

As componentes principais (CP1, CP2, ..., CPn) são obtidas por combinações lineares das variáveis originais, mediante a multiplicação entre a matriz transposta dos autovetores (A^{t})e a matriz de observações X, ou seja:

$$CP = A^{t} \cdot X \tag{5.12}$$

Os valores de X_i do *p*-ésimo local podem ser estimados pela expressão

$$X_i = A_{j1} \cdot CP_1 + A_{j2} \cdot CP_2 + \cdots + A_{jn} \cdot CP_n \tag{5.13}$$

onde as variáveis de CP_n correspondem ao conjunto dos autovetores de X em ordem decrescente dos autovalores mais significativos conforme a relação

$$CP_n = \sum_{j=1}^{n} a_{jn} \cdot X_n \tag{5.14}$$

Para obtenção dos resultados das análises de componentes principais, foi utilizada a extensão XLSTAT (www.xlstat.com) no código computacional MS Excel.

5.2 Análise Temporal

Neste item, será abordada a cadência de amostragem da variável precipitação. Para avaliar a frequência de medição da precipitação em uma estação, é necessário analisar as séries temporais. Esse procedimento pode ser feito através dos métodos matemático-estatísticos no domínio temporal, os quais procuram caracterizar as séries de dados nos mesmos intervalos de tempo e termos em que são observados e reportados.

Dessa forma, tem-se, como ferramenta para a caracterização das relações entre valores de dados segundo o domínio temporal, a função de autocorrelação (ACF, do inglês, *autocorrelation function*), que indica a existência ou não de dependência entre os dados da série temporal.

A seguir, apresenta-se a análise com base na função de autocorrelação, que utiliza o mesmo principio da correlação, entretanto é aplicada para uma única variável. Essa função indica como os valores de x no tempo t estão relacionados com seus valores imediatamente posteriores $t + 1$, $t + 2$, ..., $t + k$. O valor de k, normalmente, define a defasagem (*lag*) empregada na função de autocorrelação, isto é, matematicamente, as análises no domínio temporal operam no mesmo espaço dos valores dos dados, isto é, no mesmo intervalo de tempo em que se dispõe dos dados observados.

Para uma série temporal com n elementos, a autocorrelação, representada graficamente por r_k, variando entre -1 e +1, com defasagem (*lag*) k, é dada pela expressão

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k}(x_t - \bar{x}) \cdot (x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^{n}(x_t - \bar{x})^2} \tag{5.15}$$

sendo:

r_k – coeficiente de autocorrelação de ordem k;

k – número de ordem de autocorrelações na função ($k_{max} = n/2$);

n – número de observações na amostra da variável x;

t – tempo no instante t;

x_t– valores da variável x no tempo t;

$\bar{x}$ – média da amostra da variável x.

Assim, ao configurar as séries dos coeficientes de autocorrelação r_k versus os valores de k, tem-se a função de autocorrelação (ACF), que, também, é conhecida como correlograma, permitindo identificar características da série temporal.

A função de autocorrelação fornece uma estimativa do comportamento da série temporal, possibilitando examinar como a dependência temporal entre os valores da série cai com a defasagem ou espaçamento k. Nesse sentido, requer uma interpretação adequada do correlograma, em que se faz necessário associar certos padrões do correlograma com determinadas características de uma série temporal, como, por exemplo, aleatoriedade, tendenciosidade, estacionariedade, sazonalidade, entre outras.

A Figura 5.4 mostra um exemplo de função de autocorrelação ou correlograma para uma série de vazões.

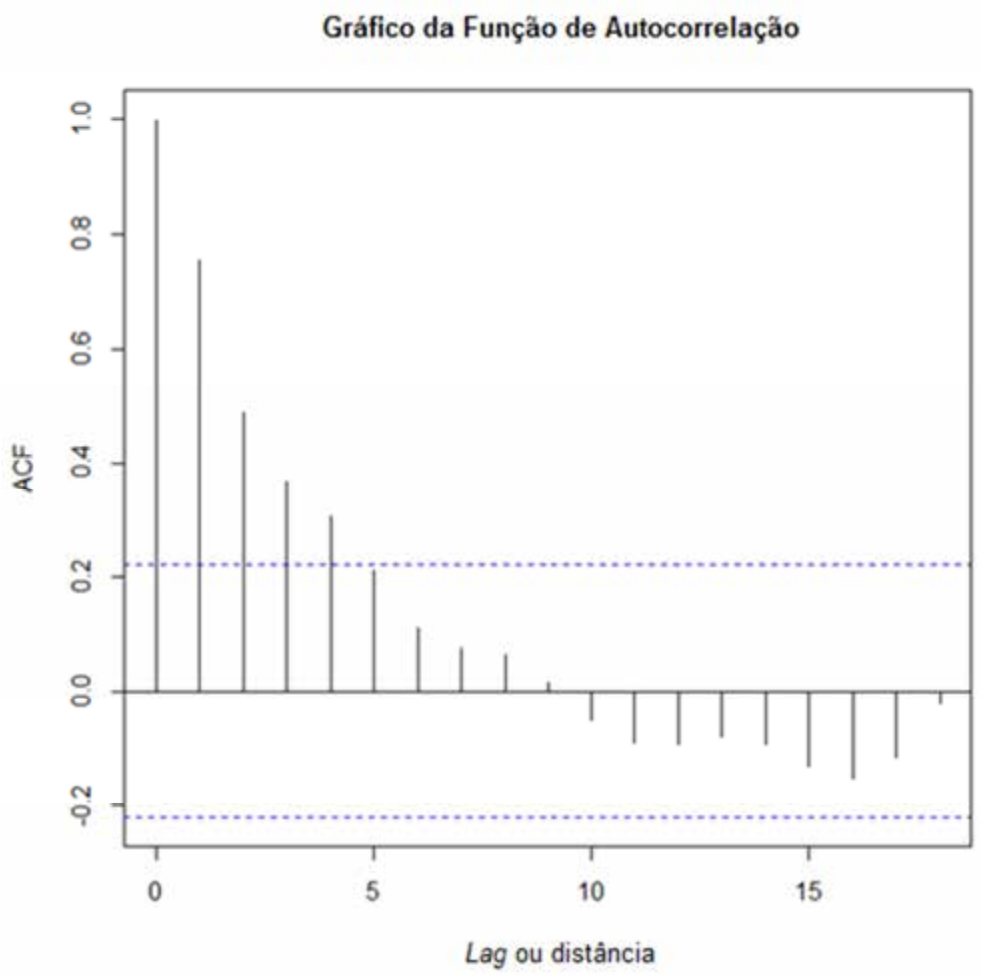


Figura 5.4 – Exemplo de função de autocorrelação
Fonte: adaptado de http://www.stats.gla.ac.uk/glossary/?q=node/13

É possível notar, ao observar a Figura 5.4, que a autocorrelação para defasagem (*lag*) 0 (zero) é igual a 1 (um), significando que, quando o intervalo entre duas observações é 0 (zero), considera-se a mesma observação e, portanto, autocorrelação equivalente a 1 (um). Alguns autores omitem, no gráfico de ACF, a defasagem (*lag*) 0 (zero), começando da defasagem (*lag*) 1 (um).

Quando os valores da função de autocorrelação estão próximos de 0 (zero), há indicação de baixa correlação entre os dados. Observando a Figura 5.4, nota-se que a correlação é válida, em termos simplificados, até o momento em que a função cruza o eixo das abscissas em 0 (zero), estabelecendo o valor da defasagem (*lag*) almejado para definição da frequência máxima de medição, isto é, quando se tem a máxima defasagem (*lag*) de cadência positiva.

Vale destacar que os gráficos de autocorrelação apresentam níveis de significância, representados pelos limites inferiores e superiores (linhas horizontais azuis na Figura 5.4). As defasagens (*lags*) que não ultrapassam esses limites, ou seja, situam-se dentro da área entre esses limiares, são considerados insignificantes.

Portanto, busca-se encontrar, através da análise de ACF, o espaço de tempo (*lag*) ideal para monitoramento dos dados de precipitação e complementação das informações necessárias para definição da rede.

Para geração dos gráficos apresentados no item 7.2, foi utilizado o código computacional Web-reg disponibilizado gratuitamente (http://www.web-reg.de/corr_addin.html).

5.3 Análise Espacial – Posicionamento das Estações

A abordagem geoestatística pode ser considerada como um conjunto de técnicas matemático-probabilísticas que lidam com a caracterização de atributos espaciais, empregando, essencialmente, modelos aleatórios de um modo semelhante à análise de séries temporais de dados.

A análise geoestatística utiliza pontos de amostragem tomados em diferentes locais com vistas a permitir compreender e extrair a estrutura de correlação espacial dos dados associada ao comportamento de variabilidade de um determinado fenômeno físico. Obtém-se, então, uma superfície usando os valores das medidas locais para estimar valores em cada posição desejada em uma determinada área.

Assim, a amostra é recolhida a partir da medição de variável de interesse, associada a algum fenômeno, modelada como variável aleatória em cada ponto do espaço, relacionadas, por sua vez, entre si por meio de uma superfície aleatória. Exemplos de variável de interesse são, por exemplo, o vazamento de radiação de uma usina de energia nuclear, derramamento de óleo, elevações do terreno, conteúdo de minério, estratigrafia de camadas do solo, entre outros. Neste trabalho, a disposição de redes de monitoramento hidrometeorológico delimitou o enfoque de aplicação da análise geoestatística.

Procedimentos estatísticos são, usualmente, utilizados para organizar e resumir os dados para que inferências possam ser feitas sobre os fenômenos de interesse. Como

todas as técnicas estatísticas, a geoestatística baseia-se em um conceito probabilístico, partindo do princípio que a diferença de valor entre duas observações quaisquer é função da distância e da direção em que ocorre esse afastamento entre os pontos de medida, sugerindo que as diferenças na área estudada devam ser consistentes em toda ela (*adaptado de* ANDRIOTTI, 2002).

As técnicas geoestatísticas podem ser usadas para descrever e modelar padrões espaciais e predizer valores em locais em que não existem observações, sendo possível estimar a incerteza associada a esses valores. O instrumento básico para representar a variabilidade espacial é o variograma, que pode ser derivado da covariância, sob determinadas condições (LEMAY, 1995), tornando-se possível a descrição quantitativa e qualitativa da variação espacial (MELLO, 2004).

O variograma fornece uma medida de continuidade espacial, podendo ser entendido, de acordo com EGUCHI (2001), quando se analisa a sua definição. Ele mede a variabilidade das diferenças entre as realizações da variável aleatória de interesse, de tal maneira que, quanto menor a variância espacial, menor a variação dessas diferenças.

Segundo LANDIM (1998), o reconhecimento do comportamento espacial da variável regionalizada, do tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, da variação nas diferentes direções do terreno e da continuidade da característica estudada no terreno pode ser obtido na análise do variograma.

Dessa forma, a partir da análise espacial dos dados, a geoestatística pode ser utilizada para estudar a variabilidade espacial, assim como auxiliar na escolha de um modelo de variograma que melhor descreva a variabilidade dos dados. Assumindo que pares de pontos em uma determinada área com distâncias menores entre si apresentam diferenças menores em relação a pontos que estiverem mais afastados uns dos outros, é possível examinar os variogramas.

A expressão empírica para representar o variograma é dada por

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{5.16}$$

sendo:

x_i – coordenada da posição i;

$N(h)$ – número de pares de valores medidos de $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$;

$Z(x_i)$ – valor da variável aleatória de interesse na posição x_i;

$Z(x_i + h)$ – valor da variável aleatória de interesse na posição $x_i + h$;

h –distância (*lag*) (igualmente espaçados, conforme exemplo da Figura 5.5).

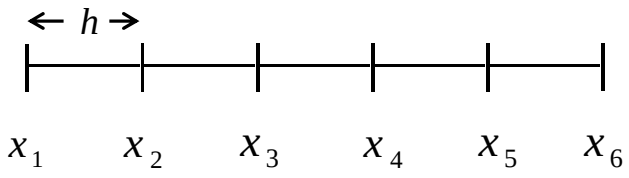


Figura 5.5 – Exemplo de espaçamento *h*

Na bibliografia consultada, as palavras variograma e semivariograma, muitas vezes, referem-se à mesma quantidade, sendo muito comum encontrar o termo variograma, quando, na verdade, trata-se de semivariograma. De fato, variograma e semivariograma são duas quantidades diferentes, sendo a primeira o dobro da segunda. Abaixo, são apresentadas as opiniões distintas de dois renomados pesquisadores de geoestatística, Noel Cressie e Donald Myers, a respeito do uso concomitante desses dois termos como referidos à mesma quantidade.

> *"Discordo fortemente de se utilizar o termo variograma no lugar de semivariograma. Existem duas quantidades importantes:*
>
> 1) *$2\gamma(h)$ variograma*
> 2) *$\gamma(h)$ semivariograma*
>
> *A quantidade 1 é o parâmetro natural a estimar a partir das diferenças quadráticas médias. Entretanto, para krigagem nós realmente necessitamos da quantidade 2, que é a metade da quantidade 1" (CRESSIE, 1989).*
>
> *"Consultei os artigos submetidos a um congresso de geoestatística e verifiquei que o termo variograma foi utilizado na maioria esmagadora das vezes, mesmo entre os pesquisadores de Fontainebleau. Uma vez que não há razão por*

distinguir entre eles, ou seja, nós não necessitamos dos dois termos, eu me posiciono a favor da brevidade" (MYERS, 1989).

Neste trabalho, a função semivariograma será denominada simplesmente de variograma, uma vez que é largamente assim considerada na bibliografia especializada. Portanto, a função γ(h) será, em todas as circunstâncias, referenciada por variograma, exceto se indicado o contrário.

Ratificando o que foi supracitado em relação à distância *h*, pode ser verificado, na Figura 5.6, que, para cada distância *h*, é definida uma tolerância Δ*h*, sendo considerados somente os pontos que estão a uma distância maior que *h* – Δ*h* e menor que *h* + Δ*h*.

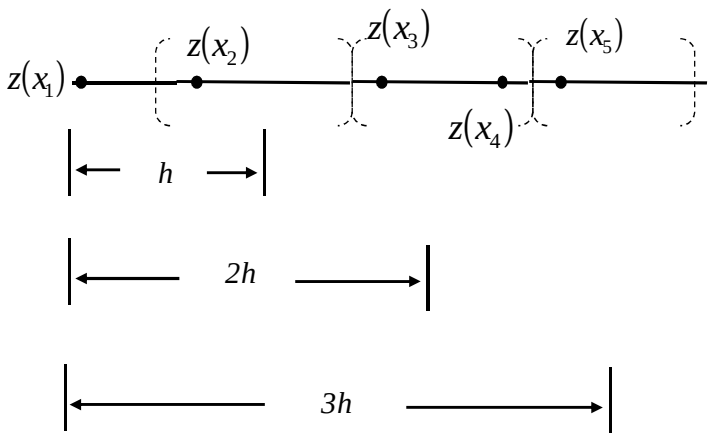


Figura 5.6 – Exemplo de distâncias consideradas no cálculo de um variograma

Segundo SMITH (2014), a escolha da distância máxima de defasagem (*max-lag*) envolve algumas restrições implícitas. Em primeiro lugar, para um dado conjunto de pontos de amostragem, $\{z(x_i): i = 1,2, \dots, n\} \subset R$, não se pode considerar distâncias com defasagem maior do que a máxima distância dos pares (h_{max}) nessa amostra, como sintetizado em

$$h_{max} = max\{\| z(x_i) - z(x_j) \|: i < j \leq n\} \tag{5.17}$$

Além disso, a experiência prática tem mostrado que, mesmo para distâncias com defasagem (*lag*) próxima de h_{max}, as estimativas dos variogramas resultantes tendem a ser instáveis (CRESSIE, 1985). Assim, é prática comum a restrição de $estimar\ h$ de maneira que não seja maior do que a metade da máxima defasagem h_{max}, ou seja:

$$\bar{h} = \frac{h_{max}}{2} \tag{5.18}$$

Nos casos gerais, os dados raramente encontram-se regularmente espaçados. Além disso, estes não são, geralmente, analisados de forma unidimensional (linhas), mas em áreas com várias linhas. Dessa forma, adotam-se tolerâncias angulares e tolerâncias de passo para a seleção dos pares de pontos no cálculo de γ(h) (YAMAMOTO, 2001).

A função variograma é determinada segundo uma direção pré-definida, portanto *γ(h)* é vetorial. Assim, os variogramas são construídos segundo várias direções (YAMAMOTO, 2001).

Para melhor compreensão de como é obtido um variograma, com os correspondentes parâmetros de distância, direção e ângulo de tolerância, deve-se verificar a Figura 5.7.

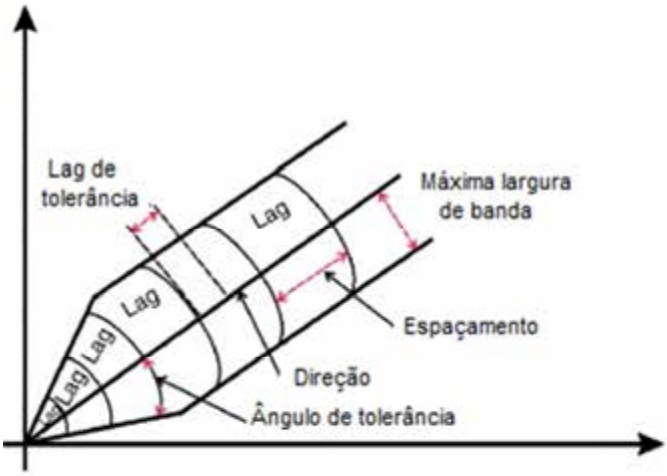


Figura 5.7 – Parâmetros para elaboração de variograma experimental
Fonte: adaptado de LEMAY (1995)

Na análise de todo variograma, busca-se encontrar as 3 (três) características essenciais que serão explicadas com base na Figura 5.8.

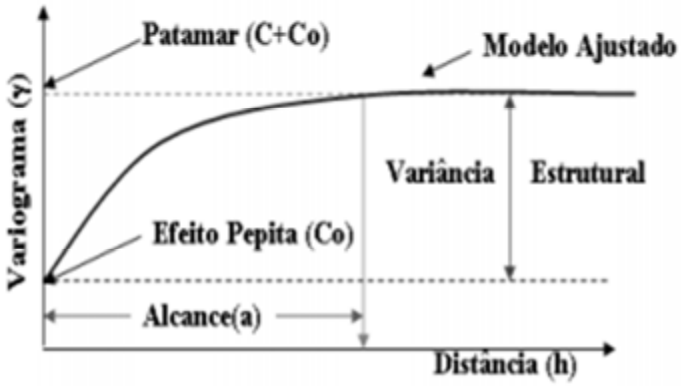


Figura 5.8 – Características de um variograma
Fonte: WANDERLEY *et al.* (2012)

- patamar (*sill*) – valor que corresponde à variância e que se refere ao ponto em que o variograma se estabiliza, de modo que, desse ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras devido ao fato de que a variância da diferença entre os pares de amostras torna-se invariante com a distância;
- alcance (*range*) – distância em que o variograma atinge o patamar, isto é, distância dentro da qual as amostras apresentam correlação espacialmente;
- efeito pepita (*nugget effect*) – teoricamente, o variograma deveria sair do zero; caso ocorra o efeito pepita, releva-se a descontinuidade do variograma para distâncias menores do que o espaçamento da amostra típica, incluindo erros de medição.

A partir dessas características, de acordo com MATHERON (1971), o variograma fornece um significado preciso da variabilidade entre os pontos amostrais.

A continuidade espacial pode variar com as diferentes direções no espaço. O variograma pode depender apenas da distância *h* entre os pontos (isotropia) ou, além de variar com as distâncias *h*, pode apresentar comportamentos diferentes ao longo de várias direções (anisotropia). Em outras palavras, a dispersão espacial de uma variável pode ser isotrópica, onde não existe direção preferencial, isto é, para qualquer direção, a variabilidade é simétrica; ou anisotrópica, quando a dispersão é distinta para várias direções.

A Figura 5.9 apresenta um exemplo dos conceitos de isotropia e anisotropia.

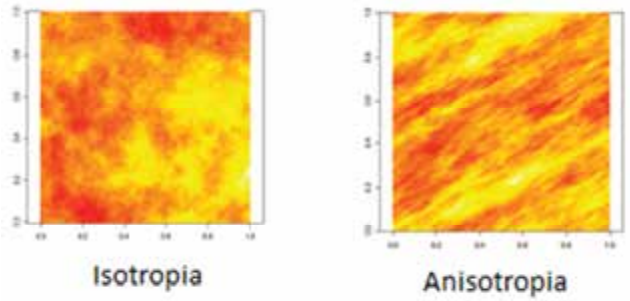


Figura 5.9 – Exemplos de fenômenos de isotropia e anisotropia
Fonte: adaptado de VALENTE e MESQUITA (2013)

Na anisotropia, o alcance varia em função da direção, mas o efeito pepita e o patamar permanecem constantes. No caso geral, todas as direções podem fornecer diferentes alcances (SINCLAIR e BLACKWELL, 2004). A Figura 5.10 mostra um caso relativamente simples desse fenômeno.

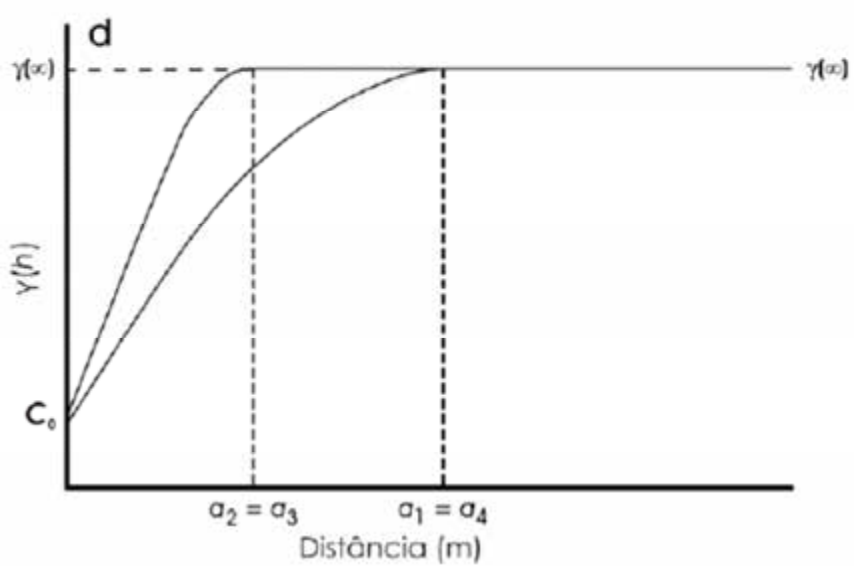


Figura 5.10 – Variogramas em duas direções distintas representando a anisotropia de uma variável
Fonte: PEREIRA (2013) modificado de SINCLAIR e BLACKWELL (2004)

Normalmente, a elaboração dos variogramas começa com a construção dos variogramas omnidirecionais, com um ângulo de tolerância de 90º para ambos os lados de uma direção qualquer considerada, isto é, para o qual a tolerância direcional é grande o suficiente para tornar a influência da direção do vetor posição *h* muito pequena.

Depois, é possível explorar os padrões de anisotropia, que são as direções de máxima ou mínima continuidade, nos variogramas direcionais. No caso dos variogramas direcionais, precisa ser especificado um ângulo de tolerância.

A função γ(h) é calculada para várias distâncias *h* (*lags*), formando um gráfico dos pontos correspondentes aos pares de amostras separadas pela distância *h*. Sobre esse variograma experimental, ajusta-se um modelo teórico (SOUZA, 2002).

A construção de um modelo matemático que se encaixe com as estatísticas espaciais, variogramas e covariâncias de uma ou várias variáveis correlacionadas é a segunda etapa da abordagem geoestatística. O modelo espacial a ser ajustado baseia-se nos próprios dados através da utilização de curvas experimentais, entretanto também integra conhecimentos adicionais do modelador sobre o fenômeno físico em análise. No caso deste trabalho, atenção foi concentrada nas variáveis precipitação e temperatura.

Os modelos ajustados aos variogramas podem ser referidos também como modelos variográficos. A Figura 5.11 exemplifica o ajuste de um modelo variográfico em um variograma experimental.

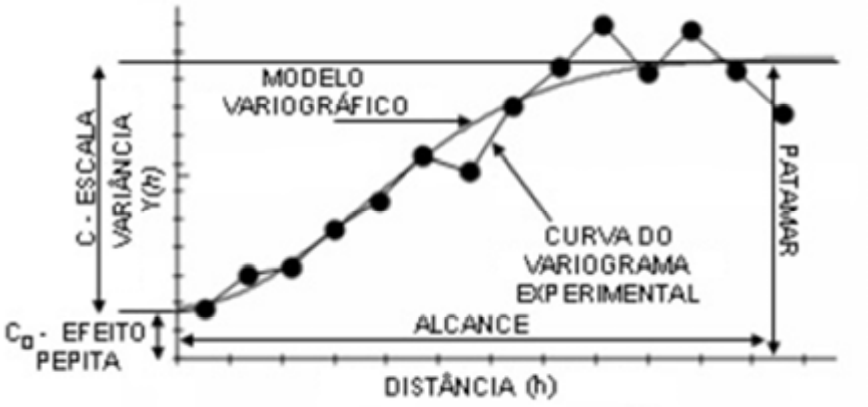


Figura 5.11 – Exemplo de ajuste de modelo variográfico
Fonte: BETTÚ e SOARES (2013)

Dentre os principais modelos, podem ser citados os modelos com patamar (esférico, exponencial, gaussiano e aleatório), modelos sem patamar (potência / linear) e outros (cúbico, seno-cardinal e gama).

Modelo Esférico

O modelo apresenta uma função dada pela equação

$$\gamma(h) = \begin{cases} C\left(\frac{3}{2}\left[\frac{h}{a}\right] - \frac{1}{2}\left[\frac{h}{a}\right]^3\right) \cdots para\ h \leq a \\ C \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots para\ h > a \end{cases} \tag{5.19}$$

sendo:

C – uma constante;

h – distância (*lag*);

a – alcance do variograma.

A Figura 5.12 apresenta um exemplo de variograma ajustado segundo o modelo esférico.

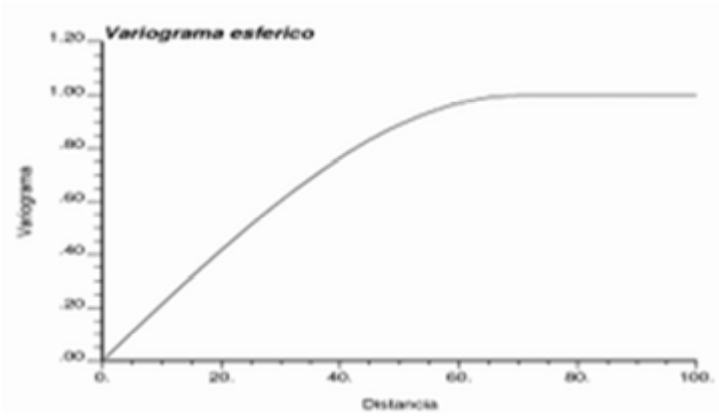


Figura 5.12 – Exemplo de variograma esférico
Fonte: http://dc378.4shared.com/doc/OS-vBuBZ/preview.html

Modelo Exponencial

O modelo pode ser expresso por

$$\gamma(h) = C\left(1 - e^{-\frac{h}{a}}\right) \tag{5.20}$$

sendo:

C – uma constante;

h – distância (*lag*);

a – alcance do variograma.

A Figura 5.13 apresenta um exemplo de variograma ajustado por meio do modelo exponencial.

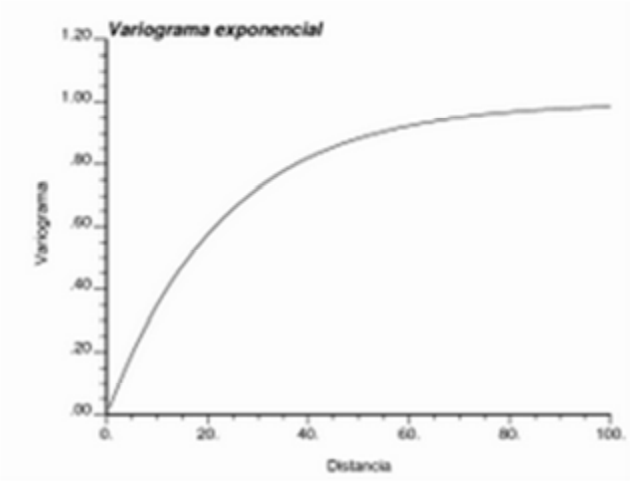


Figura 5.13 – Exemplo de variograma exponencial
Fonte: http://dc378.4shared.com/doc/OS-vBuBZ/preview.html

Modelo Gaussiano

O modelo gaussiano apresenta comportamento parabólico próximo à origem e um ponto de inflexão na função. Semelhantemente ao modelo exponencial, o valor máximo é atingido assintoticamente. Sua função é dada pela equação

$$\gamma(h) = C\left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}\right) \tag{5.21}$$

sendo:

C – uma constante;

h – distância (*lag*);

a – alcance do variograma.

Um exemplo de variograma gaussiano pode ser visto na Figura 5.14.

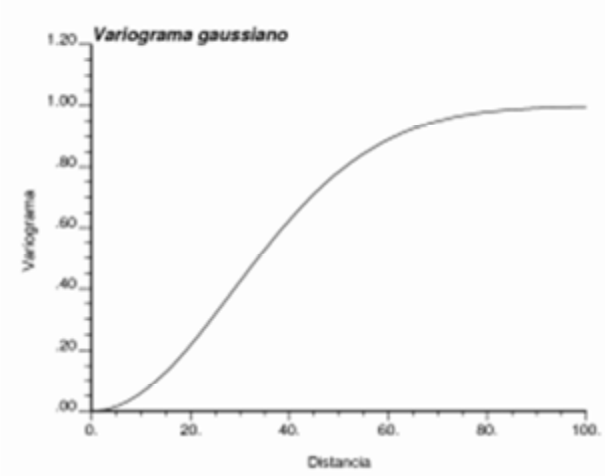


Figura 5.14 – Exemplo de variograma gaussiano
Fonte: http://dc378.4shared.com/doc/OS-vBuBZ/preview.html

Nos modelos apresentados acima (Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14), o efeito de pepita, ou seja, descontinuidade na origem, é obtido somando uma constante C_0 ao modelo variográfico.

Modelo Aleatório

Este modelo é caracterizado puramente pelo efeito pepita (C_0), sendo representativo de fenômenos naturais de elevada descontinuidade, representando o extremo de uma situação de aleatoriedade, onde não ocorre covariância entre os valores e, portanto, a análise variográfica não se aplica. Sua função é dada pela equação

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 \cdots para\ h = 0 \\ C_0 \cdots para\ h > 0 \end{cases} \tag{5.22}$$

sendo C_0, uma constante, como pode ser visto no exemplo da Figura 5.15.

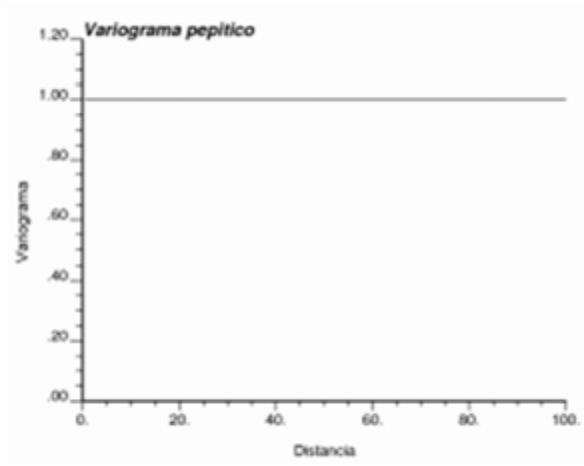


Figura 5.15 – Exemplo de variograma aleatório
Fonte: http://dc378.4shared.com/doc/OS-vBuBZ/preview.html

Modelo Potência / Linear

Neste modelo, à medida que a distância cresce, há um aumento constante da variabilidade, dado segundo a equação

$$\gamma(h) = ah^{\theta} \cdots\cdots\cdots para\ 0 \leq \theta \leq 2 \qquad (5.23)$$

sendo:

h – distância (*lag*);

a – alcance do variograma;

θ – coeficiente de potência.

Nos valores extremos de θ, tem-se os modelos aleatório (θ = 0) e parabólico (θ = 2). Quando o valor de θ for 1, o modelo é chamado linear. Em geral, esses tipos são utilizados para modelar fenômenos com capacidades infinitas de dispersão (SALGUEIRO, 2005).

A Figura 5.16 mostra os ajustes dos variogramas segundo os modelos de potência.

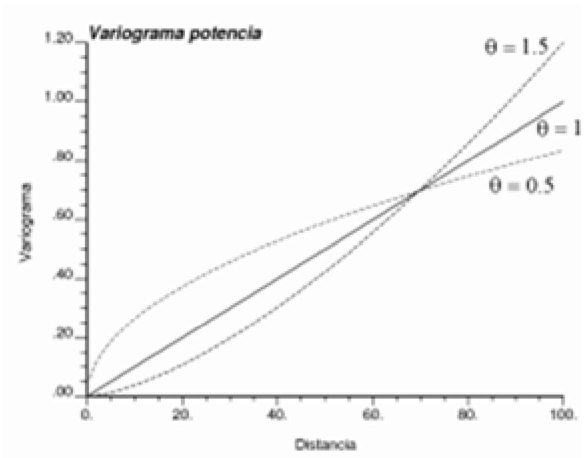


Figura 5.16 – Exemplo de variogramas de potência (inclusive linear)
Fonte: http://dc378.4shared.com/doc/OS-vBuBZ/preview.html

Os outros modelos serão apresentados brevemente a seguir.

Modelo Cúbico

O modelo cúbico pode ser expresso por meio da equação

$$\gamma(h) = \begin{cases} C\left(\dfrac{7h^2}{a^2} - \dfrac{35h^3}{4a^3} + \dfrac{7h^5}{2a^5} - \dfrac{3h^7}{4a^7}\right) \cdots para\ 0 \leq h \leq a \\ C \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad para\ h > a \end{cases} \tag{5.24}$$

sendo:

C – uma constante;

h – distância (*lag*);

a – alcance do variograma.

Modelo Seno-Cardinal

Neste modelo, pode ser representado o chamado efeito buraco (*hole effect*), que é caracterizado por ondulações no variograma, sendo a representação de um fenômeno periódico (cíclico). Esse efeito não contribui para a variância total do fenômeno, todavia sua frequência e amplitude devem ser analisadas, caso aconteça. Muitas vezes, o efeito buraco é observado somente em uma direção.

A equação do modelo seno-cardinal ou cíclico é apresentada como

$$\gamma(h) = C\left(1 - \frac{sen\left(h/a\right)}{\left(h/a\right)}\right) \tag{5.25}$$

sendo:

C – uma constante;

h – distância (*lag*);

a – alcance do variograma.

Na Figura 5.17, é possível observar o ajuste para o caso de um fenômeno cíclico.

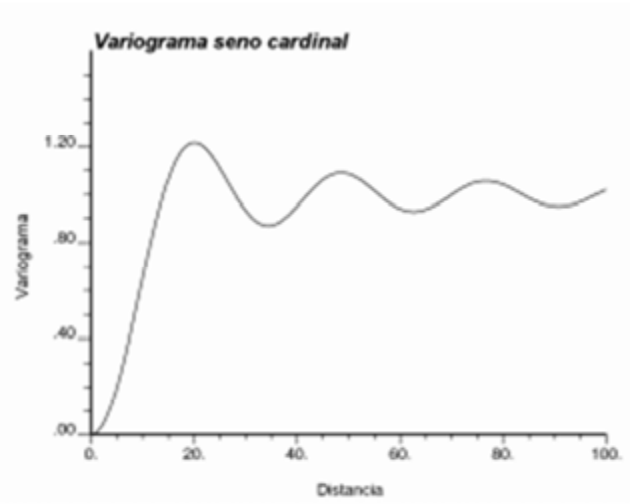


Figura 5.17 – Exemplo variograma ajustado por modelo seno-cardinal
Fonte: http://dc378.4shared.com/doc/OS-vBuBZ/preview.html

Modelo Gama

O modelo gama é caracterizado pela equação

$$\gamma(h) = C\left(1 - \frac{1}{\left[1 + \left(h/a\right)\right]^{\alpha}}\right) \tag{5.26}$$

sendo:

C – uma constante;

h – distância (*lag*);

a – alcance do variograma;

α – parâmetro da função.

Esse modelo, para α = 1, é denominado de modelo hiperbólico.

O ajuste de um variograma por um único modelo teórico pode não ser satisfatório. Dessa forma, pode ser usada uma combinação de modelos para um ajuste mais preciso do variograma empírico obtido. Os modelos variográficos que resultam da soma de dois ou mais modelos são chamados modelos combinados ou aninhados (do inglês, *nested models*), segundo a fórmula:

$$\gamma(h) = \gamma_0(h) + \gamma_1(h) + \gamma_2(h) + \cdots + \gamma_k(h) \tag{5.27}$$

A Figura 5.18 mostra um exemplo da combinação de modelos variográficos.

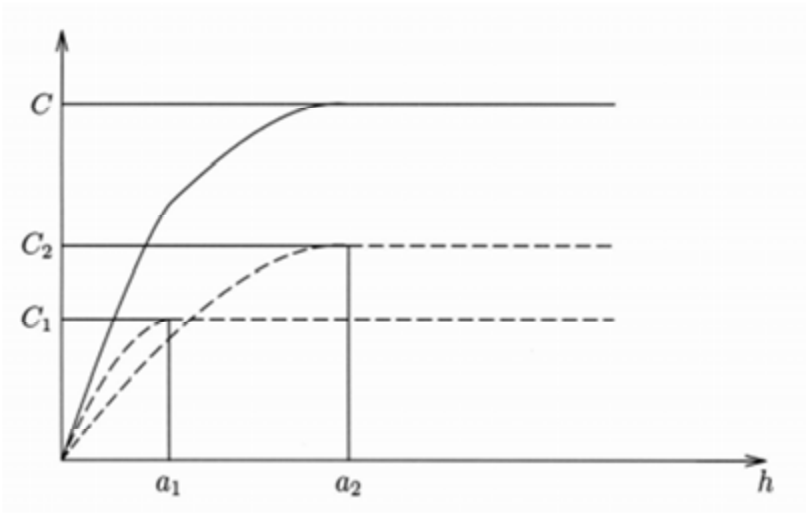


Figura 5.18 – Exemplo de combinação de modelos variográficos (*nested models*)
Fonte: http://www.statistik.tuwien.ac.at/public/dutt/vorles/geo_data/geo_abstr_27-38.pdf

Como critério de seleção do modelo, neste trabalho, será utilizada a técnica de validação-cruzada, que é uma das formas de avaliar a qualidade do ajuste de um modelo através do coeficiente de determinação (R^2), que é a razão entre a soma de quadrados da regressão e a soma de quadrados total, indicando quanto o modelo é capaz de explicar os dados coletados. O R^2 varia entre 0 (zero) e 1 (um), indicando quanto o modelo consegue explicar os valores observados, o que significa que, quanto maior o valor de

R^2 e mais próximo de 1, mais explicativo e eficiente é o modelo para representar a estrutura de correlação espacial do fenômeno estudado.

Na literatura, os modelos mais utilizados para ajustes de variogramas são os modelos com patamar (esférico, exponencial e gaussiano) e os sem patamar (linear e potência).

ZAMBOTI (2001), por exemplo, indicou que os ajustes dos modelos com patamar dos tipos esférico, exponencial e gaussiano aplicados aos variogramas experimentais vêm mostrando resultados satisfatórios em estudos sobre precipitação. SALGUEIRO (2005), na análise da distribuição espacial da precipitação anual média na bacia do rio Ipojuca, em Pernambuco, observou que o modelo esférico foi o que melhor se ajustou ao variograma experimental.

RAMOS *et al*. (2009), ao utilizar a geoestatística para análise temporal da temperatura, verificaram que o modelo esférico apresentou o melhor ajuste para o variograma experimental da temperatura média horária ao longo do dia para os anos de 2001 e 2002 em Botucatu – SP.

Após a realização do ajuste de um modelo variográfico, é possível avaliar a dependência espacial que, segundo CAMBARDELLA *et al*. (1994), pode ser efetuado por meio do coeficiente de efeito pepita (*CEP*), definido como a razão entre o efeito pepita e o patamar ($C_0/C+C_0$). Se o $CEP \leq 0{,}25$, a amostra apresenta alta dependência espacial, isto é, a componente aleatória é pequena; se $0{,}25 \leq CEP \leq 0{,}75$, a amostra apresenta moderada dependência espacial, isto é, a componente aleatória é importante, e, se $CEP \geq 0{,}75$, a amostra tem baixa dependência espacial. Assim, a variável apresenta alta dependência espacial quando o efeito pepita é 0,25 do patamar. Segundo VIEIRA *et al*. (1997), quanto menor o coeficiente de efeito pepita, maior será a semelhança entre os valores vizinhos e a continuidade do fenômeno e menor será a variância da estimativa.

A análise dos modelos variográficos por meio do CEP é coerente apenas para os modelos com patamar, uma vez que os modelos sem patamar satisfazem a hipótese intrínseca para construção da superfície aleatória, permitindo que os variogramas possam ser definidos, entretanto sem atingir a estabilização em qualquer patamar.

Na presente dissertação, a construção dos variogramas e os ajustes dos modelos variográficos servirão para definição do espaçamento ideal entre as estações, considerando os dados de precipitação e de temperatura. A partir desse espaçamento, as estações serão posicionadas na área da bacia, respeitando tal distância.

Os variogramas apresentados no item 7.3 serão calculados utilizando o código computacional GS+ Versão 10 da *Gamma Design* (www.gammadesign.com).

5.4 Análise dos Aspectos Físico-Hídricos da Bacia – Reposicionamento das Estações

O posicionamento obtido a partir do espaçamento encontrado nas análises variográficas pode indicar que a localização das estações não seja em locais favoráveis para instalação. Desse modo, é necessária uma análise mais refinada da região em estudo, considerando alguns aspectos relevantes ao local exato onde as estações propostas serão posicionadas, como, por exemplo, a hidrografia, o relevo, o uso e cobertura do solo e a existência de áreas protegidas.

A hidrografia da bacia auxiliará na definição dos locais e dos rios em que o monitoramento se faz mais necessário. A análise é simples, sendo que devem ser considerados os locais apropriados para que possam ser inseridos os sensores de nível de água e também locais propícios à medição de vazão, evitando-se pedras, curvas acentuadas, entre outros obstáculos. A definição das estações propostas que serão dotadas de linímetros para medição dos níveis de água dos principais rios da bacia do rio Dois Rios será acompanhada da própria definição da localização mais adequada para cada estação proposta.

Sendo assim, busca-se o reposicionamento das estações levando em consideração alguns aspectos importantes, entre outros, que podem gerar conflitos e dificuldades na hora da instalação, a saber:

- pico de uma montanha, o que pode inviabilizar tanto a instalação quanto a operação e manutenção;
- em uma escola ou local público, que pode apresentar maior vulnerabilidade a danos nas estações em função de vandalismo;
- em uma propriedade privada, em que se faz necessária a autorização do proprietário;

- áreas de proteção e preservação, que requerem autorização para implantação de seções de monitoramento.

Cabe ressaltar que a telemetria, processo de comunicação automatizado em que as medições são feitas e os dados são coletados remotamente e depois transmitidos para os equipamentos de recepção e processamento para o real monitoramento, não foi considerada no posicionamento das estações, devido às dificuldades em estimar tais implicações.

5.5 Definição da Rede de Monitoramento

A partir das distâncias determinadas no âmbito das análises variográficas que serão realizadas para os dados de precipitação e de temperatura, será definida uma rede de monitoramento preliminar ou inicial, que servirá de base para as demais análises dos aspectos físico-hídricos da bacia.

Desse modo, ter-se-á uma primeira definição de rede, somente considerando uma grade de estações a partir das distâncias (alcances) encontrados na análise geoestatísticas. Tendo essa malha de estações na bacia (mapa de localização das estações), serão adicionados os demais aspectos (hidrografia, relevo, uso e ocupação do solo e áreas protegidas) para avaliação da viabilidade de posicionamento das estações nos locais previamente estabelecidos, além da definição de quais variáveis serão monitoradas em cada estação proposta.

Sendo assim, ter-se-á novas configurações de rede de monitoramento a cada análise de um aspecto físico-hídrico da bacia em estudo. Concluindo essas análises, será definida a rede de monitoramento com base em uma nova visão, adaptativa e evolutiva, levando em consideração não somente os aspectos relacionados às variáveis hidrometeorológicas em questão, mas, também, os demais aspectos que caracterizam a bacia e influenciam no seu regime hidrometeorológico.

5.6 Análise Crítica

A análise crítica, última etapa da metodologia proposta, também faz parte da visão nova e adaptativa para definição de rede de monitoramento, uma vez que busca a avaliação da rede proposta considerando outros fatores intrínsecos à bacia em estudo, como, por exemplo, o aumento das demandas pelo uso da água e também a

disponibilidade hídrica e o estresse hídrico, que são apresentados e discutidos no próximo item.

A análise crítica conta, também, com a avaliação das condições ambientais e de bem-estar da população através da utilização dos dados populacionais, não apenas como uma fonte de informação, mas, principalmente, nas análises espaciais e temporais, auxiliando na compreensão da ocupação da bacia e de como essa ocupação influencia na ocorrência de eventos extremos, uma vez que a bacia deve ser reconhecida como um espaço geográfico social.

5.6.1 Disponibilidade Hídrica e Estresse Hídrico

Neste trabalho, optou-se por incorporar, na metodologia de definição de redes de monitoramento hidrometeorológico, indicadores de disponibilidade hídrica e de avaliação do estresse hídrico, implicando o desenvolvimento de procedimento computacional com suporte de sensoriamento remoto para efetuar os correspondentes cálculos.

Essa nova perspectiva adotada inova na temática abordada na presente dissertação na medida em que consubstancia e fundamenta o que se denominou de análise crítica, proporcionando condições para avaliação da rede de monitoramento consistente com a dinâmica físico-social, de natureza adaptativa, de uma bacia hidrográfica.

Mais ainda, o monitoramento de eventos extremos, por exemplo, requer outra lógica de implementação e avaliação do monitoramento hidrometeorológico, que não deve estar tão somente fundamentada no conjunto de medições físicas convencionais da área de hidrologia e de meteorologia.

Nesse novo referencial, reconhece-se que a disponibilidade hídrica representa a quantidade de água disponível na natureza para ser utilizada nas atividades humanas (MACHADO, 2007). Já a demanda hídrica corresponde à quantidade de água, em uma bacia ou região, necessária para o desenvolvimento das atividades humanas.

A variação da disponibilidade hídrica é influenciada pelos usos que provocam a escassez ou eventual desaparecimento desse recurso, isto é, os usos consuntivos (demandas). O aumento da demanda ou consumo resulta na diminuição da disponibilidade hídrica, enquanto a diminuição da demanda gera o aumento da disponibilidade.

Com base nesses conceitos de disponibilidade e demanda, é possível compreender o conceito de estresse hídrico, que está associado à escassez de água. De forma simplificada, essa escassez pode ser justificada por duas razões distintas, a saber:

- disponibilidade hídrica elevada (chove muito, e, consequentemente, os rios estão abastecidos) e demandas altas (retiradas de quase ou toda água disponível);
- baixa disponibilidade hídrica (chove pouco e rios com pequenas vazões), que, com as demandas da bacia ou região, a pequena quantidade de água disponível é praticamente ou toda retirada.

Diante do exposto, a disponibilidade hídrica e o estresse hídrico podem auxiliar no reposicionamento das estações, levando-se em consideração o fato de que, em locais em que a disponibilidade hídrica é maior, as redes de monitoramento precisam ser mais densas, uma vez que as demandas tendem também a ser maiores nesses locais. O estresse hídrico surge como ferramenta auxiliar na identificação de locais em que sejam identificados conflitos (disponibilidade x demanda), auxiliando na gestão dos recursos hídricos. Em outros termos, o monitoramento de locais em que ocorram conflitos pelo uso da água e sua consequente escassez, é fundamental para as tomadas de decisão dos gestores desses recursos.

A seguir, é apresentado o procedimento para o cálculo do estresse hídrico no âmbito deste trabalho com base em imagens de satélite.

A estimativa do estresse hídrico desenvolvida no presente trabalho partiu de duas características de análise, sendo avaliada a inter-relação entre elas, a saber.

- biomassa vegetal associada à cobertura do solo – baseada no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI, do inglês *normalized difference vegetation index*), gerado pelo contraste entre as reflectâncias dos objetos da cena obtidas nas bandas do infravermelho próximo e do vermelho do espectro eletromagnético;
- temperatura da superfície terrestre continental (TSC).

Todas as imagens empregadas para obtenção do estresse hídrico como produto final foram processadas utilizando o código computacional ArcGIS versão 10.1.

Uma vez que as imagens de reflectância (bandas 1 e 2) e de temperatura apresentam resoluções espaciais diferentes, a saber, 250 m e 1.000 m, respectivamente, os arquivos matriciais (*rasters*) de temperatura necessitam ser redimensionados, isto é, a resolução espacial deve ser ajustada para que ela esteja compatível com a resolução das imagens de reflectância. Cada píxel foi reamostrado, subdividindo-o em 4 sub-píxeis, todos contendo o valor originário. Dessa forma, é possível garantir que a quantidade de píxeis, organizados segundo as linhas e as colunas das matrizes de reflectância e de temperatura, sejam idênticas, com o intuito de evitar problemas na geração do produto final desejado.

Antes de obter o índice de vegetação NDVI propriamente dito, segundo a tabela de propriedades do produto de reflectância, as bandas 1 e 2 devem ser corrigidas por um valor equivalente a 0,0001. Feito esse ajuste para a estimativa qualitativa e quantitativa da reflectância da superfície do solo, pode, então, ser calculado o NDVI, conforme explicado a seguir.

As análises da vegetação e detecção de mudanças são realizadas com o intuito de avaliar os recursos naturais e monitorar a cobertura vegetal (ROSENDO e ROSA, 2005). O NDVI tem se mostrado bastante útil na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, e seu ponto forte é o conceito de razão que reduz várias formas de ruídos multiplicativos como diferenças de iluminação, sombra de nuvens, atenuação atmosférica e certas variações topográficas (SILVA, 2004).

O NDVI, consagrado pela literatura, é gerado a partir das bandas 1 e 2 de reflectância do satélite MODIS, segundo a equação

$$NDVI = \frac{(b2 - b1)}{(b2 + b1)} \tag{5.28}$$

sendo:

b1 – reflectância monocromática do vermelho, RED – *red surface reflectance* (620–670 nm);

b2 – reflectância monocromática do infravermelho próximo, NIR (841–876 nm).

Os valores obtidos para o NDVI situam-se entre -1 e 1, ressaltando-se que superfícies vegetadas apresentam, em geral, NDVI entre 0 e 1, enquanto os valores negativos representam água e nuvens.

Para a estimativa qualitativa e quantitativa da temperatura, as imagens obtidas pelo produto MODIS já estão prontas, necessitando apenas a correção indicada na tabela do produto, equivalente a 0,02. Além dessa correção, é necessário outro cálculo no arquivo matricial da temperatura para obtenção da imagem necessária. A temperatura dada está em Kelvin, necessitando a conversão para Celsius, isto é, subtraindo o valor de 273,15.

A utilização de dados da banda térmica infravermelha para monitorar o estresse hídrico fundamenta-se no fato de que, quanto maior a umidade do solo, maior será a capacidade de condutividade térmica. Além disso, o fato da evaporação resfriar a superfície dos solos contribui ainda mais na diferença entre as temperaturas de solos secos e úmidos, consideradas como interfaces. Dessa forma, o indicador apresentará valores maiores nas regiões submetidas a um maior estresse, ou seja, em locais onde as temperaturas são maiores e o índice de vegetação menor, como é o caso de regiões urbanas compostas por materiais de elevada capacidade térmica.

Finalmente, pode ser obtido o estresse hídrico a partir da combinação das imagens de temperatura e de índice de vegetação, conforme proposto por LAMBIN e EHRLICH (1997), expresso pela equação

$$eh = arctan\left(\frac{Temperatura}{NDVI}\right) \tag{5.29}$$

Como comentários finais, cabe enfatizar questões que a análise crítica da rede de monitoramento, associada à disponibilidade e estresse hídrico conjuntamente com informações populacionais, suscita, conforme discriminação a seguir:

- a rede proposta atende ao monitoramento de eventos extremos?
- como ponderar a ocupação populacional com a avaliação da resiliência de bacias hidrográficas no enfrentamento de eventos extremos?
- o monitoramento de eventos extremos permite delimitar limiares de disponibilidade hídrica e de ocupação em uma região?

- como a rede pode adequadamente monitorar processos de alterações ou mudanças climáticas e correspondentes impactos nos ecossistemas presentes em uma bacia hidrográfica?

CAPÍTULO 6 – ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO DOIS RIOS

6.1 Características Gerais

O rio Dois Rios é formado pelo encontro das águas dos rios Negro e Grande, cujas bacias de drenagem fazem parte da Região Serrana Fluminense, percorrendo aproximadamente 35 km desse ponto até desaguar no rio Paraíba do Sul. Sua bacia hidrográfica tem uma área de drenagem de 4.376 km^2, abrangendo 11 municípios do estado do Rio de Janeiro, a saber, Bom Jardim, Cantagalo, Cordeiro, Itaocara, Macuco e São Sebastião do Alto, em sua totalidade, e Duas Barras, Nova Friburgo, Santa Maria Madalena, Trajano de Moraes, e São Fidélis, parcialmente.

O encontro dos rios Negro e Grande ocorre na divisa entre São Sebastião do Alto e São Fidélis, tendo a bacia de drenagem, propriamente dita, do rio Dois Rios, após a confluência desses rios, uma área inferior a 200 km^2. Em termos de recursos hídricos, a contribuição média da bacia hidrográfica é da ordem de 45,8 m^3/s.

Nessa bacia, habitam cerca de 353.000 pessoas, distribuídas pelos 11 municípios do estado da seguinte maneira, como pode ser visto na Tabela 6.1.

Tabela 6.1– População dos municípios integrantes da bacia do rio Dois Rios
Fonte: adaptado de http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.html
(Disponível em: 29/11/2011)

Município	População (hab)
Bom Jardim	25.333
Cantagalo	19.830
Cordeiro	20.430
Duas Barras	10.930
Itaocara	22.899
Macuco	5.269
Nova Friburgo	182.082
Santa Maria Madalena	10.321
São Sebastião do Alto	8.895
Trajano de Morais	10.289
São Fidélis	37.543
Bacia do Rio Dois Rios (RH-VII)	**353.821**

As características associadas, de relevo e solos dessa bacia, configuram uma situação crítica de vulnerabilidade do meio físico à erosão, especialmente no curso superior, onde o relevo apresenta grau de dissecação muito forte e densidade de drenagem muito fina.

Nos itens a seguir, serão apresentadas algumas características e aspectos relevantes da bacia em estudo com base em informações disponibilizadas pelo CBH-R2R – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Dois Rios e pelo INEA, com a publicação 'O Estado do Ambiente – Indicadores Ambientais do Rio de Janeiro' de 2010.

6.2 Localização da Bacia

O estado do Rio de Janeiro está dividido em 9 regiões hidrográficas, conforme Resolução nº 107/2013 do CERHI-RJ – Conselho Estadual de Recursos Hídricos, e a bacia do rio Dois Rios é considerada a própria Região Hidrográfica VII (RH VII), como pode ser visto na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Regiões hidrográficas do Rio de Janeiro
Fonte: INEA

A bacia do rio Dois Rios está situada na região serrana, com o município de Nova Friburgo, maior cidade junto aos divisores da Serra do Mar, suscetível a eventos críticos relacionados às restrições impostas pelo relevo, à falta de infraestrutura em saneamento básico e com áreas agrícolas a jusante de pontos de lançamento de esgotos.

Observa-se que, embora o limite da bacia seja, em grande parte, coincidente com os divisores de bacias ou sub-bacias, há dois trechos que coincidem com rios, prevalecendo, nesses casos, as divisas municipais, a saber: o trecho maior, ao longo do rio Paraíba do Sul, e o menor, que coincide com o ribeirão do Quilombo, na divisa entre os municípios de Cantagalo e Carmo, conforme mostrado na Figura 6.2.

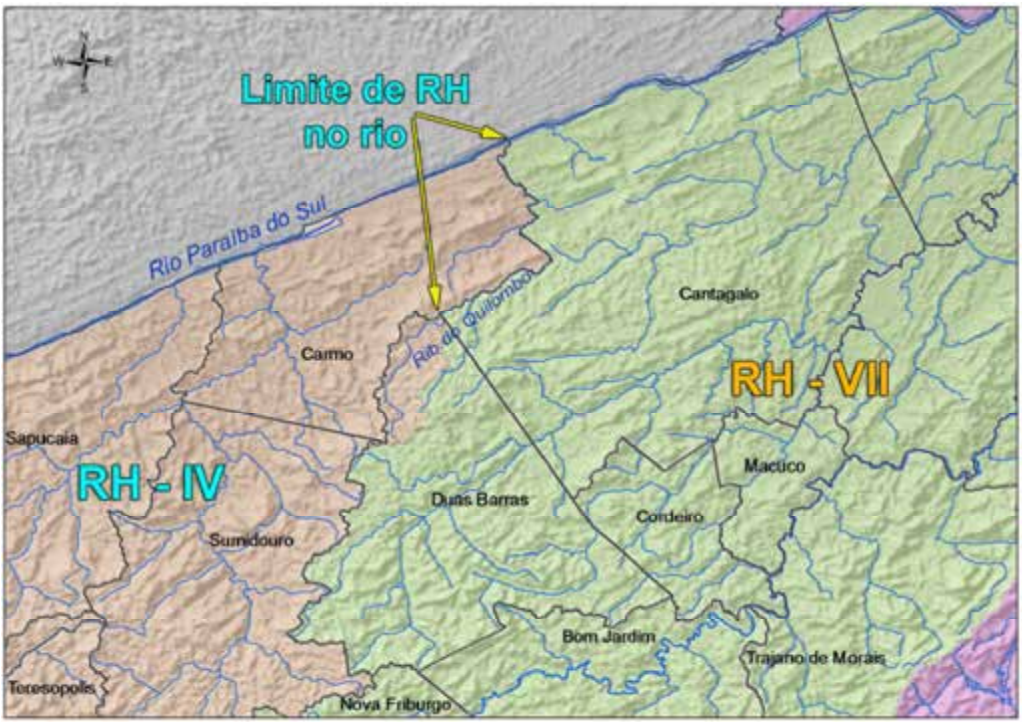


Figura 6.2 – Limites das regiões hidrográficas
Fonte: PERHI-RJ (2013)

6.3 Hidrografia

Estão listados abaixo os principais cursos d'água situados na bacia do rio Dois Rios:

- rio Negro;
- rio Grande;
- rio Macuco;
- rio da Bengala;
- rio do Colégio;

- ribeirão do Quilombo;
- ribeirão das Areias.

A Figura 6.3 apresenta a hidrografia da bacia do rio Dois Rios.

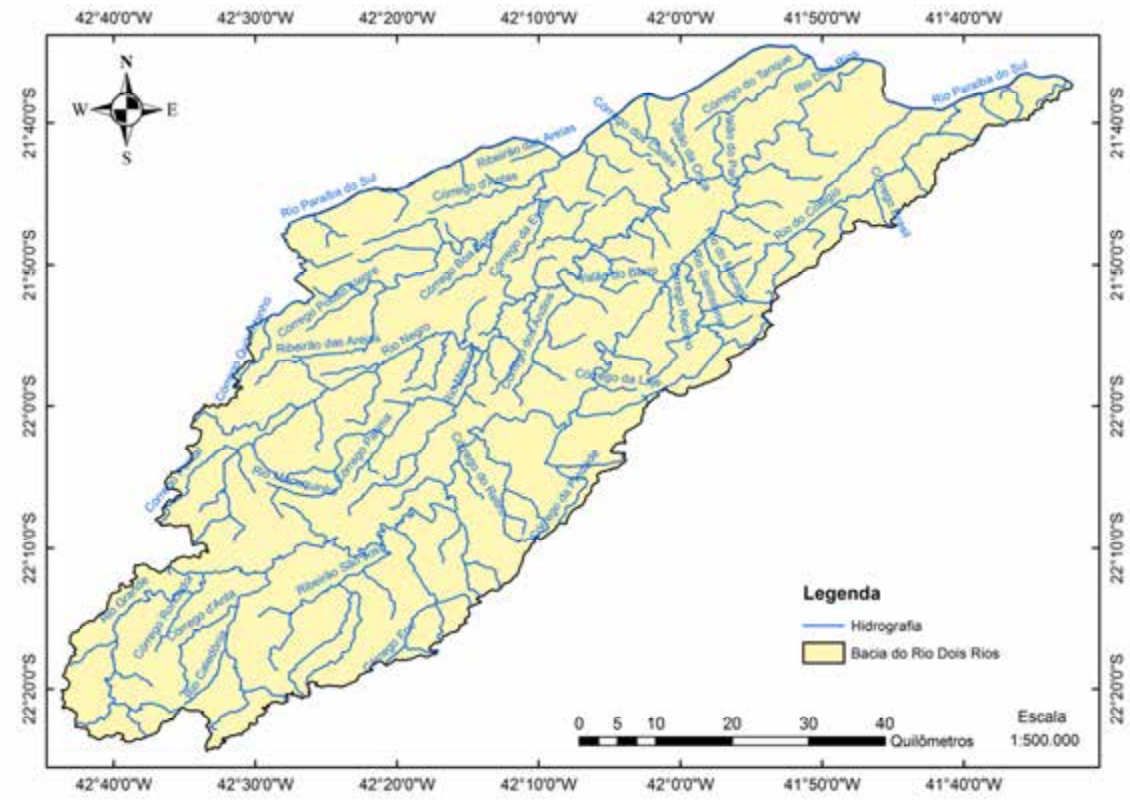


Figura 6.3 – Hidrografia da bacia do rio Dois Rios
Fonte: adaptado de INEA (2013)

Nos itens 6.3.1 e 6.3.2, serão abordados alguns aspectos relacionados à hidrografia da bacia do rio Dois Rios, dando destaque maior aos seus rios formadores, o rio Negro e o rio Grande, respectivamente.

6.3.1 Rio Negro

O rio Negro nasce na Serra do Paquequer, divisor de águas com a bacia do rio Paquequer do município de Sumidouro, e drena parte dos municípios de Duas Barras, Cantagalo, São Sebastião do Alto e Itaocara.

A bacia do rio Negro, apesar de ter uma extensão menor de terras em relação ao rio Grande, é considerada de alta vulnerabilidade à erosão, estando grande parte dessas terras situada na sub-bacia do rio Macuco, que ocupa 30% de sua área. Complementarmente, em que pese o bom percentual de cobertura florestal, com cerca

de 28%, essa abrangência não é suficiente para a proteção das águas do rio Macuco, utilizado como manancial do sistema integrado de abastecimento das cidades de Cordeiro e Cantagalo.

6.3.2 Rio Grande

O rio Grande nasce no reverso da Serra do Mar, no município de Nova Friburgo, drenando ainda os municípios de Bom Jardim, Cordeiro, Macuco, Trajano de Moraes, Santa Maria Madalena e parte do município de São Sebastião do Alto.

No curso superior da bacia do rio Grande, na sub-bacia do rio Bengalas, situa-se a cidade de Nova Friburgo. O sistema de abastecimento dessa cidade, que atende a uma população de mais de 180.000 habitantes, utiliza quatro mananciais, três a montante da cidade e um no rio Grande, a montante da confluência deste com o rio Bengalas. Somente um desses mananciais, o rio Debossan, aparenta melhores condições de proteção ambiental. Os outros dois mananciais, como estão muito próximos à cidade, e o ponto de captação do rio Grande situam-se em uma área de alta vulnerabilidade à erosão.

Reafirma-se que, apesar de possuir cerca de 29% de cobertura florestal, a bacia do rio Grande encontra-se em uma condição de fragilidade ambiental, desde seu curso superior, devido aos impactos da ocupação urbana sobre relevo e solos, com forte erodibilidade.

Ao longo do seu curso, o rio Grande sofre ainda com os impactos da atividade agrícola, mais expressiva nos municípios de Nova Friburgo, Bom Jardim e Trajano de Moraes.

6.4 Geologia

Nesta bacia, ocorre o predomínio de rochas paraderivadas representadas pela unidade São Fidélis, caracterizada por sillimanita, cordierita, muscovita, granada, biotita, ortoclásio, microclina, plagioclásio gnaisses e migmatitos, pela unidade Santo Eduardo, com milonitos gnaisses e blastomilonito, com intercalações de anfibólios, e migmatitos, constituídos, geralmente, de hiperstênio, feldspato, biotita, quartzo e gnaisses da unidade Bela Joana.

Ocorrem, também, rochas ortoderivadas, como os migmatitos predominantemente estromático com paleossoma de biotita – (anfibólio) gnaisses e neossoma granitóide da unidade Rio Negro e os granodioritos e leucogranitos, característicos do Batólito Serra dos Órgãos. Na região, ocorrem granitos homogêneos representados pelos granitos São José do Ribeirão e Nova Friburgo (SEA/INEA, 2010).

6.5 Geomorfologia

A bacia apresenta a maior variabilidade geomorfológica de todo o estado do Rio de Janeiro. A Serra dos Órgãos, sopé do Desengano, Serra do Desengano, Vale do médio Paraíba e Baixada Campista influenciam a região de maneira significativa.

Na bacia do rio Dois Rios, observam-se todas as classes geomorfológicas continentais. Porém, dois grandes domínios podem ser observados: ao sul e sudoeste, próximo ao divisor de águas central do estado do Rio de Janeiro, observam-se feições de maiores amplitudes altimétricas, serras e morros, enquanto que, ao norte, mais próximo do rio Paraíba do Sul, podem ser vistas planícies fluviais e colinas, feições com menores amplitudes altimétricas. Próximo ao limite com a bacia do baixo Paraíba do Sul (RH-IX), seguindo o alinhamento NE-SW do estado e no entorno do Parque Estadual do Desengano, encontra-se uma grande área de serras escarpadas (acima de 400 m).

6.6 Vegetação

As tipologias de vegetação potencial predominante são a floresta montana (desenvolve-se em áreas com elevações médias acima de 400 m de altitude) e a submontana (desenvolve-se em solos mais secos, nas regiões abaixo das montanhas), com predominância da floresta estacional semidecidual submontana (46,18%), seguida pela floresta estacional semidecidual montana (20,59%). A floresta ombrófila densa montana abrange cerca de 26% da área.

- floresta estacional semidecidual – constitui uma vegetação pertencente ao bioma da Mata Atlântica e condicionada a duas estações climáticas diferentes, uma estação com chuvas intensas de verão, seguida por um período de estiagem, é constituída por fanerófitos com gemas foliares protegidas da seca por escamas (catáfilos ou pêlos), tendo folhas adultas esclerófilas ou membranáceas deciduais;

- floresta ombrófila densa – é uma mata perenifólia, sempre verde com dossel de até 50 m, com árvores emergentes de até 40 m de altura; possui densa vegetação arbustiva, composta por samambaias, arborescentes, bromélias e palmeiras; as trepadeiras e epífitas (bromélias e orquídeas), cactos e samambaias também são muito abundantes.

6.7 Ocupação e Uso Antrópico do Solo

Na bacia do Dois Rios, a classe predominante é pastagem (69%), seguida de floresta (25%) e, em menor escala, de vegetação secundária em estágio inicial (2%), respectivamente. A bacia apresenta uma indústria leiteira significativa, o que pode justificar, em parte, a predominância da classe pastagem.

As principais atividades relacionadas com o uso da água na bacia são a indústria têxtil, metalurgia, moda íntima, mineração, agricultura familiar e turismo ecológico e rural.

Segundo o censo agropecuário de 2006 do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, os municípios que fazem parte dessa bacia têm mais de 45.000 ha ocupados com lavouras, com uso de irrigação em cerca de 13.500 ha (SEA/UFRJ, 2007).

Por sua vez, na bacia, localizam-se 51% das plantações de café do estado, especialmente no município de Duas Barras, conferindo à região considerável importância econômica.

Em relação à atividade mineral, os destaques na bacia são a extração de calcário para fabricação de cimento e a extração de pedra para brita, atividades classificadas como de alto potencial poluidor.

6.8 Clima

Nos itens 6.8.1, 6.8.2 e 6.8.3, serão apresentados alguns aspectos climáticos da bacia do rio Dois Rios, com foco principal na precipitação, temperatura e evapotranspiração, respectivamente.

6.8.1 Precipitação

A precipitação total é bem distribuída, com níveis altos, embora apresente taxas de concentração no verão, sendo o inverno seco.

De acordo com o PERHI-RJ (2013), a precipitação total anual na bacia do rio Dois Rios é de 1.331 mm, enquanto, nas bacias dos rios Negro e Grande, corresponde a 1.208 mm e 2.000 mm, respectivamente.

A Figura 6.4 apresenta a precipitação média anual para a bacia do rio Dois Rios no período de 1950 a 2000 com base nas estações disponíveis para a região, segundo publicação do estado do Rio de Janeiro (SEA/INEA, 2010).

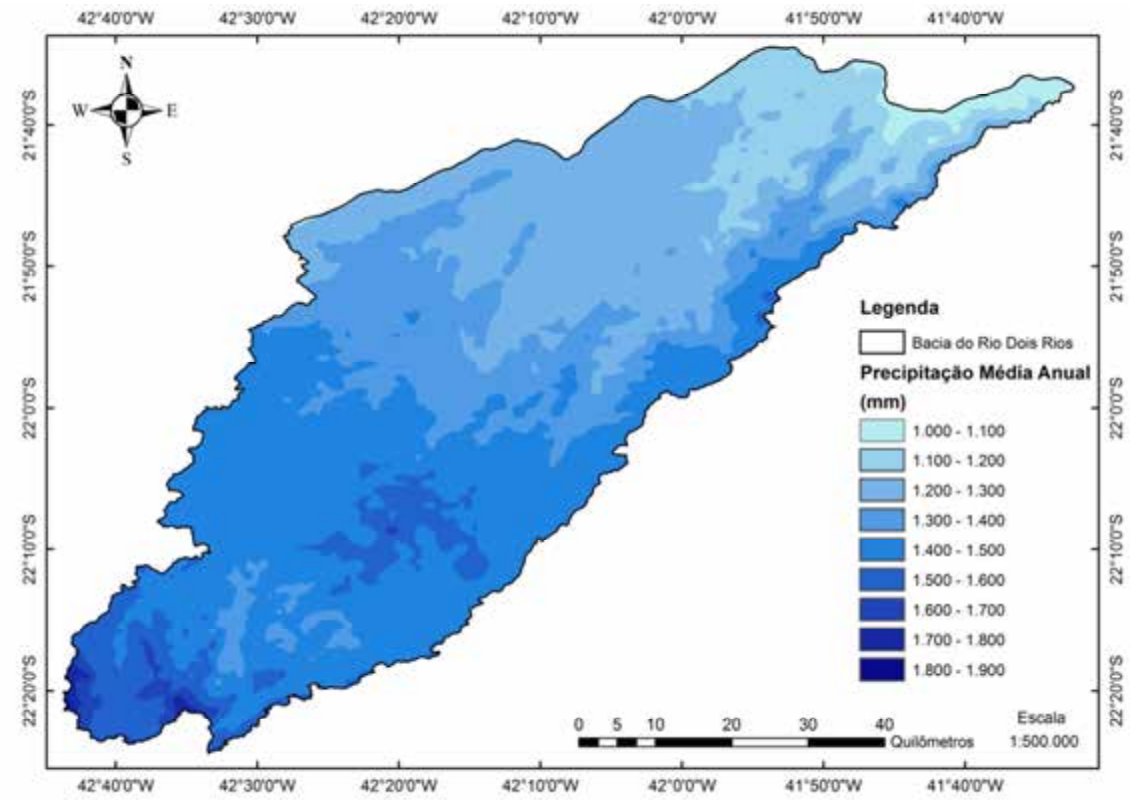


Figura 6.4 – Precipitação média anual para a bacia do rio Dois Rios (1950 a 2000)

Observando a Figura 6.4, nota-se que as precipitações são maiores na cabeceira da bacia.

Para ilustração da sazonalidade e da variação média mensal da precipitação na bacia do rio Dois Rios, foram escolhidas duas estações instaladas na bacia, sendo uma bem a montante (cabeceira) e uma bem a jusante (quase na foz), conforme mostrado na Figura 6.5.

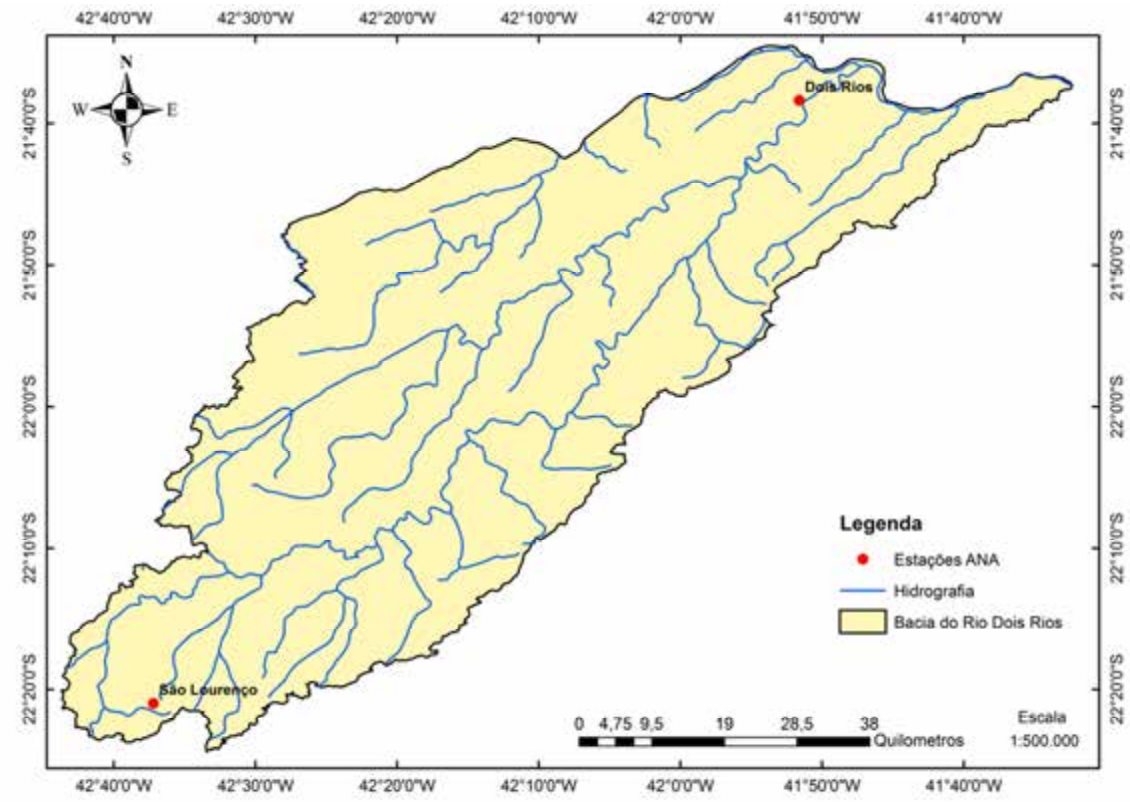


Figura 6.5 – Localização das estações Dois Rios e São Lourenço

A Figura 6.6 e a Figura 6.7 apresentam as precipitações medidas nas estações pluviométricas São Lourenço (montante da bacia) e Dois Rios (jusante), respectivamente, para o período de 2000 a 2013.

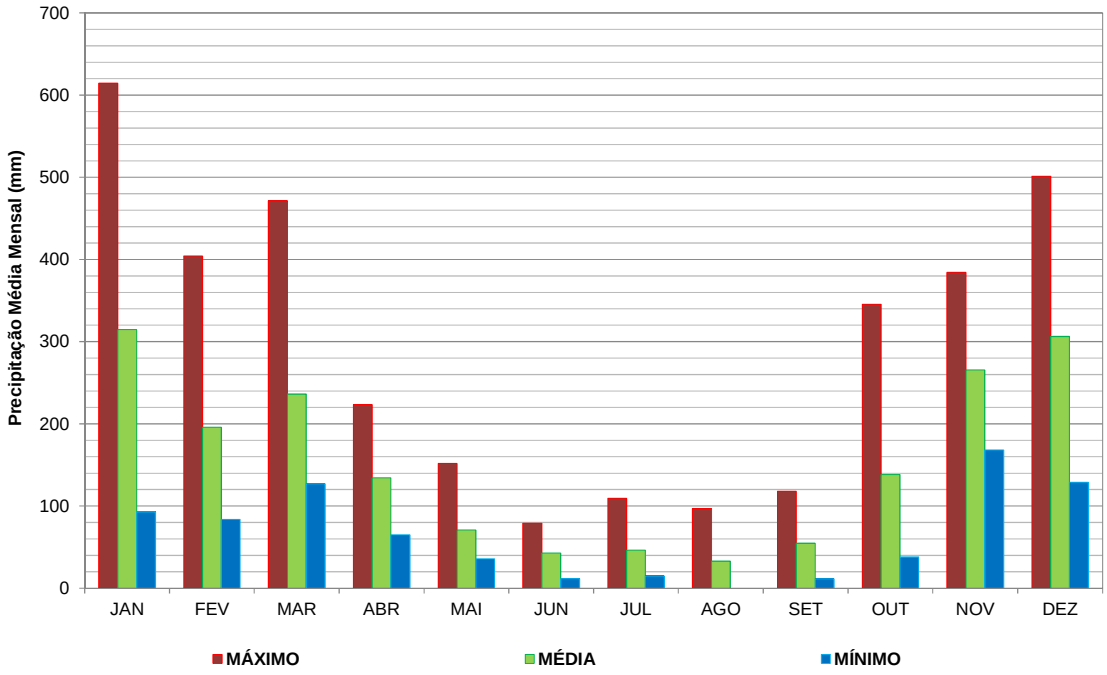


Figura 6.6 – Precipitações mensais – posto São Lourenço (montante) – período de 2000 a 2013

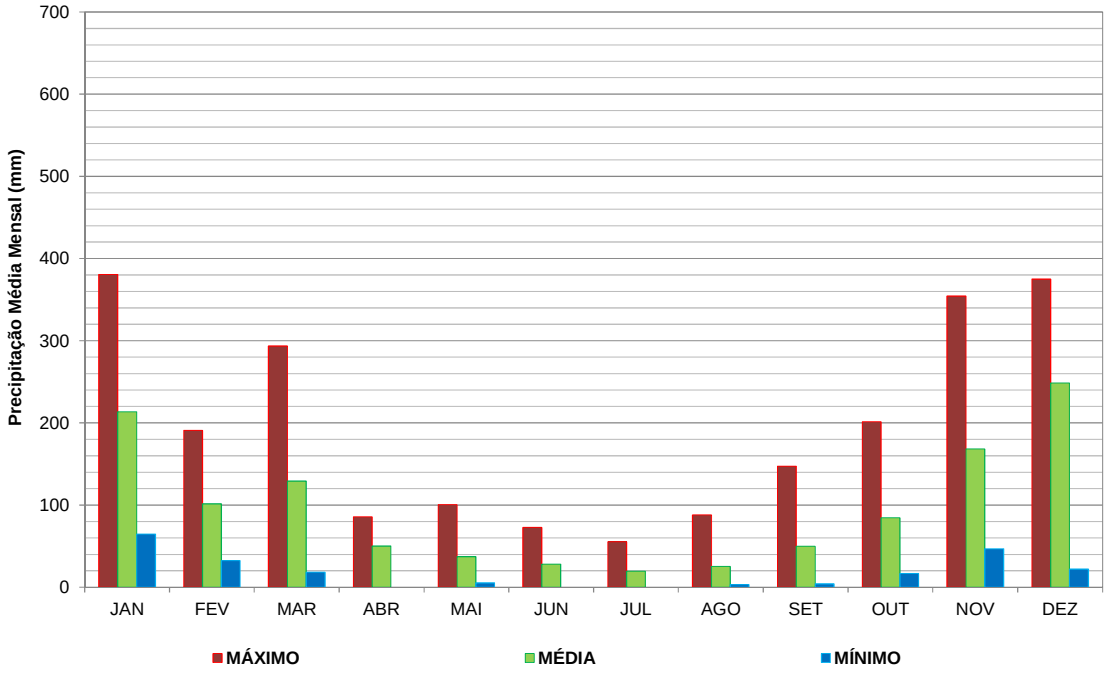


Figura 6.7 – Precipitações mensais – posto Dois Rios (jusante) – período de 2000 a 2013

Ao examinar a Figura 6.6 e a Figura 6.7, nota-se que elas mostram-se coerentes com o regime de precipitações mostrado na Figura 6.4, uma vez que as precipitações

são maiores na estação de montante. Além disso, é possível observar que, para ambas as estações, o regime pluviométrico da região é bem característico com inverno seco e verão chuvoso. Os meses de maiores precipitações são janeiro e dezembro, e os meses mais secos correspondem a julho e agosto.

6.8.2 Temperatura

A temperatura reflete as características geomorfológicas da área, com temperaturas amenas nas áreas de serra e topos de morro, que aumentam à medida que se aproximam da parte baixa da bacia (sentido noroeste). É importante notar que as temperaturas são elevadas no verão na área de baixada e estáveis nos sopés da serra e vales de morros.

6.8.3 Evapotranspiração

A evapotranspiração real também evidencia o relevo da região, com valores baixos nas serras, morros e colinas, que aumenta, por sua vez, nas áreas mais planas. Nas áreas de relevo acidentado, notam-se valores altos no verão, porém ainda baixos em relação ao resto da região.

6.9 Disponibilidade Hídrica

No item 5.6.1, foi abordado o conceito de disponibilidade hídrica, e, abaixo, são apresentadas informações a respeito da disponibilidade hídrica da bacia em estudo e como alguns fatores podem influenciar nessa disponibilidade.

A escassez de florestas em uma região de relevo acidentado como a bacia do rio Dois Rios resulta em maior risco de escassez de água. O clima e a vegetação natural, característicos de grande parte da área em estudo, proporcionam longos períodos de estiagem, e, associada a essa configuração, o desmatamento das florestas auxilia na diminuição da disponibilidade de água, principalmente para as lavouras.

Para analisar melhor a disponibilidade hídrica da bacia, no PERHI-RJ (2013), foram consideradas 4 (quatro) UHPs – unidades hidrológicas de planejamento, conforme apresentado na Figura 6.8 e na Tabela 6.2.

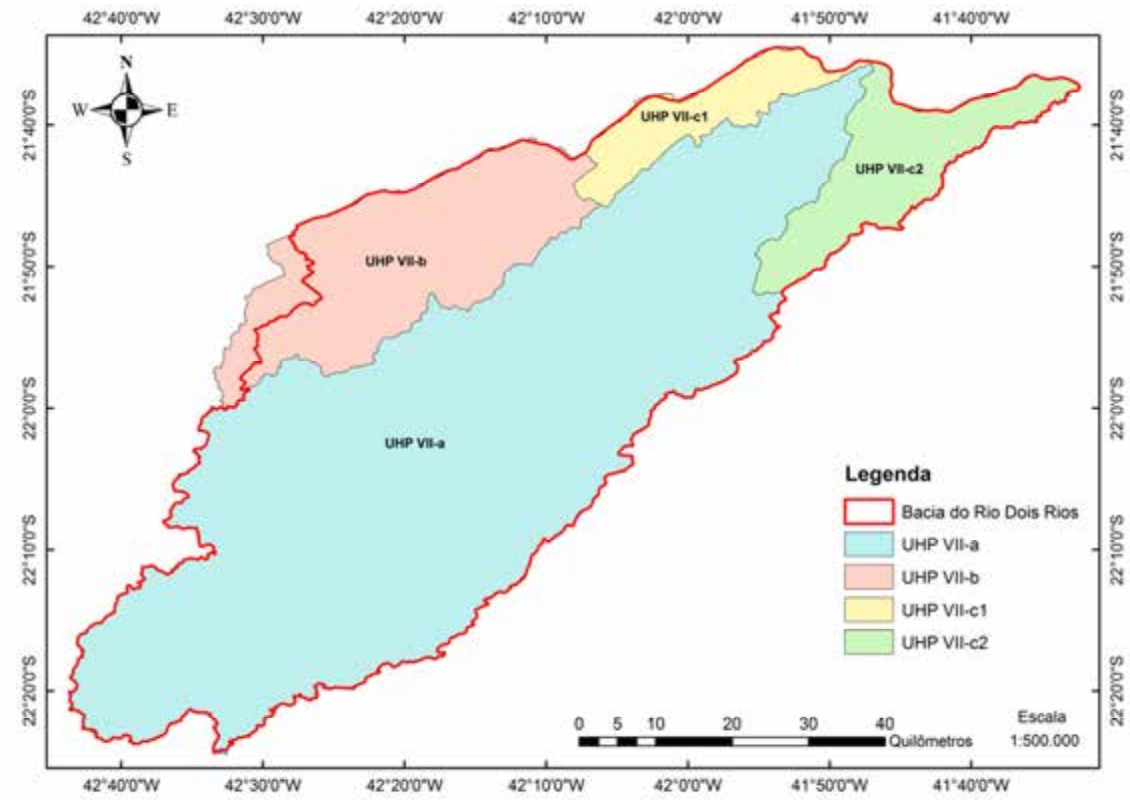


Figura 6.8 – Unidades hidrológicas de planejamento (UHP) na bacia do rio Dois Rios (RH VII)

Tabela 6.2 – Unidades hidrológicas de planejamento (UHP) na bacia do rio Dois Rios (RH VII)
Fonte: modificado de PERHI-RJ (2013)

UHP	Nome da UHP	Área (km^2)
VII-a	Rio Dois Rios	3.156,62
VII-b	Ribeirão das Areias e do Quilombo	725,65
VII-c1	Córrego do tanque e afluentes da MD do Paraíba do Sul	212,13
VII-c2	Rio do Colégio e afluentes da MD do Paraíba do Sul	367,97

De acordo com a Figura 6.8 e a Tabela 6.2 apresentadas, é possível observar que as UHPs consideradas para a RH VII abrangem uma área maior do que a própria região.

Nesse plano, foi calculada a disponibilidade hídrica para cada UHP a partir dos estudos de regionalização desenvolvidos pela CPRM em 2002. A Tabela 6.3 reúne a disponibilidade hídrica nas UHPs da bacia do Dois Rios. O plano destaca que a disponibilidade hídrica calculada reflete a base de dados disponíveis na época de desenvolvimento do estudo, caracterizada por uma grande escassez de informações.

Tabela 6.3 – Disponibilidade hídrica nas UHPs – bacia do rio Dois Rios (RH VII)
Fonte: adaptado de PERHI-RJ (2013)

UHP	**Chuva média anual (mm)**	**Vazões (m^3/s)**		
		$Q_{7,10}$	**$Q_{95\%}$**	**Q_{MLT}**
VII-a	1.331	13,0	16,0	45,8
VII-b	1.186	1,25	1,77	8,0
VII-c1	1.060	0,13	0,20	1,8
VII-c2	1.200	0,65	0,93	4,3

sendo:

$Q_{7,10}$ – vazão média mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos;

$Q_{95\%}$ - vazão associada à permanência de 95% do tempo;

Q_{MLT} – vazão média de longo termo.

6.10 Reservas e Áreas de Proteção

A bacia tem apenas 2% de florestas em áreas protegidas por unidade de conservação (UC), com uma pequena parte do Parque Estadual do Desengano e outra pequena parte do Parque Estadual dos Três Picos. A região apresenta altos índices de conectividade, apesar da fragmentação, e abrange fitofisionomias relevantes à preservação. Além disso, tais condições agravam o cenário de escassez de florestas no estado e de ameaças aos fragmentos de florestas que restam nessa região.

CAPÍTULO 7 – DEFINIÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO

A densidade de estações em uma bacia deve refletir as correspondentes condições físicas, climáticas e socioeconômicas. Para alcançar tal arranjo, após a aplicação de técnicas geoestatísticas e computacionais, com apoio de ferramentas geoespaciais, mediante os dados disponíveis, busca-se a otimização da rede atual para satisfazer necessidades específicas.

Almeja-se, neste capítulo, a definição de uma rede ótima de monitoramento da bacia do rio Dois Rios que atenda a diversos fins. Entretanto, para a definição de uma rede ótima, que se constitui em um conceito complexo, seria desejável que a região fosse dotada de uma quantidade considerável de estações para realização das técnicas empregadas anteriormente. Dessa afirmação, conclui-se que há um paradoxo na definição da rede ótima: se a bacia fosse bem monitorada, não seria necessário definir uma nova rede de monitoramento. No entanto, a bacia em estudo é carente de monitoramento, o que dificulta algumas das análises abordadas.

Para a definição da rede de monitoramento, finalidade deste estudo, algumas considerações precisam ser definidas, como os períodos de análise de aplicação da metodologia proposta, bem como as sub-bacias que podem auxiliar no desenvolvimento da proposição da rede.

Assim, o presente capítulo apresenta os resultados encontrados a partir da aplicação da metodologia delineada no Capítulo 5, bem como demarca o produto final desejado neste trabalho: a proposição de uma rede de monitoramento hidrometeorológica para a bacia do Dois Rios.

7.1 Análise Exploratória

7.1.1 Seleção dos Dados

Para a análise e validação dos dados disponibilizados, primeiramente, foram analisadas as séries de chuvas diárias e mensais de todas as estações com disponibilidade de dados entre os anos de 2000 e 2013, uma vez que, mesmo que as estações pluviométricas da ANA e INMET, muitas vezes, tenham períodos de dados desde 1921, os dados disponíveis do satélite TRMM datam do final de 1997, tendo sido possível obtê-los, mediante o produto 3B42, para a região, a partir do ano 2000.

Os dados disponíveis e utilizados ao longo deste trabalho foram retirados do HidroWeb, disponibilizados pela ANA, do banco de dados do INEA e do banco de dados do INMET, baixados em dezembro de 2013. Esses dados são relativos às estações reais, isto é, estações físicas dotadas de pluviômetros e/ou pluviógrafos, capazes de registrar as chuvas diariamente.

Ressalta-se, aqui, que, ao longo de todo o texto, os postos pluviométricos serão referidos também como postos, estações reais e estações físicas.

Como já foi mencionado, um dos maiores problemas, que, geralmente, surge na realização de estudos como este, é a quantidade e a qualidade de dados disponíveis, principalmente em zonas em que a densidade de estações não é adequada ou não se conta com registros suficientes quanto à série histórica disponível, dificultando bastante a análise e, por conseguinte, os resultados esperados. Nas próximas seções, esses dados são apresentados, analisados e consistidos de maneira a tratá-los e trabalhá-los para que se torne viável utilizá-los da melhor forma possível.

A análise pluviométrica é de significativa importância neste estudo, tendo em vista que são as chuvas intensas que acarretam o extravasamento da calha dos rios, causando as inundações e alagamentos; consequentemente, faz-se necessária uma avaliação detalhada desse aspecto. Além disso, conduz-se a análise do comportamento pluviológico, que auxiliará no processo de adequação e proposição de redes.

Para a bacia do rio Dois Rios, foram obtidas 48 estações pluviométricas, sendo que algumas delas não possuem registros disponibilizados. A Tabela 7.1 mostra as principais informações sobre essas estações.

Tabela 7.1 – Estações pluviométricas disponíveis na sub-bacia do rio Dois Rios

	Código	Nome	Responsável	Operadora	Coordenadas Geográficas		Período de Dados	
					Latitude (S)	Longitude (W)	Início	Fim
1	2141005	SÃO FIDELIS	ANA	CPRM	21º 38' 43"	41º 45' 08"	jan/1939	nov/2013
2	2141006	DOIS RIOS	ANA	CPRM	21º 38' 36"	41º 51' 31"	jan/1939	dez/2013
3	2141043	SÃO FIDELIS	INMET	INMET	21º 39' 00"	41º 45' 00"	jan/1975	dez/1998
4	2142016	SANTA MARIA MADALENA	ANA	ANA	21º 57' 00"	42º 01' 00"	dez/1965	jun/1980
5	2142022	ALDEIA	ANA	CPRM	21º 57' 09"	42º 21' 21"	jan/1939	dez/2013
6	2142023	MACUCO	ANA	ANA	21º 58' 00"	42º 15' 00"	-	-
7	2142047	PCH EUCLIDELÂNDIA	QUANTA	QUANTA	21º 54' 00"	42º 15' 00"	-	-
8	2142051	SANTA MARIA MADALENA	INMET	INMET	21º 57' 00"	42º 01' 00"	out/1921	dez/1998
9	2142078	CANTAGALO I	ANA	CPRM	21º 58' 48"	42º 21' 39"	dez/2006	dez/2013
10	2242009	SÃO LOURENÇO	ANA	CPRM	22º 20' 58"	42º 37' 27"	jul/2003	dez/2013
11	2242017	VISCONDE DE IMBE	ANA	CPRM	22º 04' 04"	42º 09' 36"	dez/1965	dez/2013
12	2242018	BARRA ALEGRE	ANA	CPRM	22º 14' 08"	42º 17' 09"	dez/1965	dez/2013
13	2242019	VARGEM ALTA	ANA	CPRM	22º 17' 58"	42º 24' 04"	dez/1965	dez/2013
14	2242020	VARGEM GRANDE	ANA	CPRM	22º 16' 36"	42º 30' 08"	dez/1965	nov/2013
15	2242021	BOM JARDIM	ANA	CPRM	22º 09' 25"	42º 24' 59"	jan/1941	dez/2013
16	2242022	FAZENDA MENDES	ANA	CPRM	22º 17' 09"	42º 39' 36"	jun/1949	dez/2013
17	2242023	CONSELHEIRO PAULINO	ANA	ANA	22º 13' 00"	42º 31' 00"	nov/1938	abr/1983
18	2242024	TEODORO DE OLIVEIRA	ANA	CPRM	22º 22' 38"	42º 33' 06"	dez/1965	dez/2013
19	2242025	CASCATINHA DO CONEGO	ANA	CPRM	22º 21' 00"	42º 34' 00"	set/1967	nov/2013
20	2242031	CORDEIRO	ANA	ANA	22º 02' 00"	42º 21' 00"	abr/1942	dez/1965
21	2242032	NOVA FRIBURGO	ANA	ANA	22º 17' 00"	42º 32' 00"	jan/1938	mai/1950
22	2242033	PONTE BERSOT	ANA	CPRM	22º 08' 06"	42º 21' 35"	jun/2003	dez/2013
23	2242069	NOVA FRIBURGO (GINÁSIO)	INMET	INMET	22º 17' 00"	42º 32' 00"	-	-
24	A624	NOVA FRIBURGO	INMET	INMET	22º 17' 00"	42º 32' 00"	fev/1961	dez/2013
25	83718	CORDEIRO	INMET	INMET	22º 02' 00"	42º 23' 00"	jan/1975	dez/2013
26	2242085	DOUTOR LORETTI	DNOS	DNOS	22º 02' 00"	42º 21' 00"	abr/1976	mar/1978

(Continuação)

	Código	Nome	Responsável	Operadora	Coordenadas Geográficas		Período de Dados	
					Latitude (S)	Longitude (W)	Início	Fim
27	2242106	TEODORO DE OLIVEIRA	INEA	INEA	22º 22' 45"	42º 33' 11"	-	-
28	2242107	TORRE	INEA	INFOPER	22º 21' 32"	42º 34' 00"	-	-
29	2242108	VENDA DAS PEDRAS	INEA	INEA	22º 16' 22"	42º 34' 47"	-	-
30	2242109	CONSELHEIRO PAULINO	INEA	INEA	22º 13' 32"	42º 31' 19"	-	-
31	2242120	NOVA FRIBURGO	INEA	INFOPER	22º 16' 43"	42º 32' 01"	-	-
32	2242124	CONSELHEIRO PAULINO	INEA	CPRM	22º 13' 37"	42º 31' 16"	-	-
33	2242125	YPU	INEA	INFOPER	22º 17' 44"	42º 31' 37"	-	-
34	2242126	OLARIA	INEA	INFOPER	22º 18' 31"	42º 32' 32"	-	-
35	2242127	SÍTIO SANTA PAULA	INEA	INFOPER	22º 16' 05"	42º 34' 21"	-	-
36	2242133	PCH SANTO ANTÔNIO	ENERGISA GERAÇÃO	ENERGISAGE RAÇÃO	22º 09' 56"	42º 22' 08"	-	-
37	2242134	PCH SANTO ANTÔNIO	ENERGISA GERAÇÃO	ENERGISAGE RAÇÃO	22º 10' 01"	42º 20' 53"	-	-
38	2242135	PCH SANTO ANTÔNIO	ENERGISA GERAÇÃO	ENERGISAGE RAÇÃO	22º 08' 13"	42º 21' 08"	-	-
39	-	PICO DO CALEDÔNIA	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 21' 33"	42º 34' 03"	nov/2008	dez/2013
40	-	CANTAGALO	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	21º 59' 47"	42º 21' 51"	mai/2012	dez/2013
41	-	BANQUETE	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 10' 39"	42º 28' 23"	jan/2012	dez/2013
42	-	SÃO JOSÉ DO RIBEIRÃO	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 12' 27"	42º 24' 01"	abr/2012	dez/2013
43	-	CONSELHEIRO PAULINO	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 13' 42"	42º 31' 13"	nov/2008	dez/2013
44	-	OLARIA	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 18' 32"	42º 32' 32"	nov/2008	dez/2013
45	-	PONTE ESTRADA DONA MARIANA	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 12' 57"	42º 34' 15"	abr/2012	dez/2013
46	-	SUSPIRO	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 16' 46"	42º 32' 05"	nov/2008	dez/2013
47	-	VENDA DAS PEDRAS	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 16' 42"	42º 34' 54"	nov/2012	dez/2013
48	-	YPU	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 17' 45"	42º 31' 35"	nov/2008	dez/2013

Somente serão consideradas, neste estudo, as estações com dados efetivamente disponíveis (a partir de 2000, devido ao período de dados disponíveis do TRMM) e as estações que estão em operação atualmente. Apesar de as estações do Sistema de Alerta de Cheias do INEA terem sido instaladas recentemente, apresentando no máximo 6 anos de dados, ainda assim essas serão consideradas na aplicação da metodologia. Todas as

estações empregadas da rede pluviométrica atual são apresentadas na Tabela 7.2, perfazendo um total de 25 estações.

Tabela 7.2 – Estações pluviométricas utilizadas

	Código	Nome	Responsável	Operadora	Coordenadas Geográficas		Período de Dados	
					Latitude (S)	Longitude (W)	Início	Fim
1	2141005	SÃO FIDELIS	ANA	CPRM	21º 38' 43"	41º 45' 08"	jan/1939	nov/2013
2	2141006	DOIS RIOS	ANA	CPRM	21º 38' 36"	41º 51' 31"	jan/1939	dez/2013
3	2142022	ALDEIA	ANA	CPRM	21º 57' 09"	42º 21' 21"	jan/1939	dez/2013
4	2142078	CANTAGALO I	ANA	CPRM	21º 58' 48"	42º 21' 39"	dez/2006	dez/2013
5	2242009	SÃO LOURENÇO	ANA	CPRM	22º 20' 58"	42º 37' 27"	jul/2003	dez/2013
6	2242017	VISCONDE DE IMBE	ANA	CPRM	22º 04' 04"	42º 09' 36"	dez/1965	dez/2013
7	2242018	BARRA ALEGRE	ANA	CPRM	22º 14' 08"	42º 17' 09"	dez/1965	dez/2013
8	2242019	VARGEM ALTA	ANA	CPRM	22º 17' 58"	42º 24' 04"	dez/1965	dez/2013
9	2242020	VARGEM GRANDE	ANA	CPRM	22º 16' 36"	42º 30' 08"	dez/1965	nov/2013
10	2242021	BOM JARDIM	ANA	CPRM	22º 09' 25"	42º 24' 59"	jan/1941	dez/2013
11	2242022	FAZENDA MENDES	ANA	CPRM	22º 17' 09"	42º 39' 36"	jun/1949	dez/2013
12	2242024	TEODORO DE OLIVEIRA	ANA	CPRM	22º 22' 38"	42º 33' 06"	dez/1965	dez/2013
13	2242025	CASCATINHA DO CONEGO	ANA	CPRM	22º 21' 00"	42º 34' 00"	set/1967	nov/2013
14	2242033	PONTE BERSOT	ANA	CPRM	22º 08' 06"	42º 21' 35"	jun/2003	dez/2013
15	83718	CORDEIRO	INMET	INMET	22º 02' 00"	42º 23' 00"	jan/1975	dez/2013
16	-	PICO DO CALEDÔNIA	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 21' 33"	42º 34' 03"	nov/2008	dez/2013
17	-	CANTAGALO	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	21º 59' 47"	42º 21' 51"	mai/2012	dez/2013
18	-	BANQUETE	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 10' 39"	42º 28' 23"	jan/2012	dez/2013
19	-	SÃO JOSÉ DO RIBEIRÃO	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 12' 27"	42º 24' 01"	abr/2012	dez/2013
20	-	CONSELHEIRO PAULINO	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 13' 42"	42º 31' 13"	nov/2008	dez/2013
21	-	OLARIA	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 18' 32"	42º 32' 32"	nov/2008	dez/2013
22	-	PONTE ESTRADA DONA MARIANA	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 12' 57"	42º 34' 15"	abr/2012	dez/2013
23	-	SUSPIRO	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 16' 46"	42º 32' 05"	nov/2008	dez/2013
24	-	VENDA DAS PEDRAS	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 16' 42"	42º 34' 54"	nov/2012	dez/2013
25	-	YPU	INEA (SIST. ALERTA)	INFOPER	22º 17' 45"	42º 31' 35"	nov/2008	dez/2013

Todas as estações mostradas na Tabela 7.2 estão contempladas na Figura 7.1.

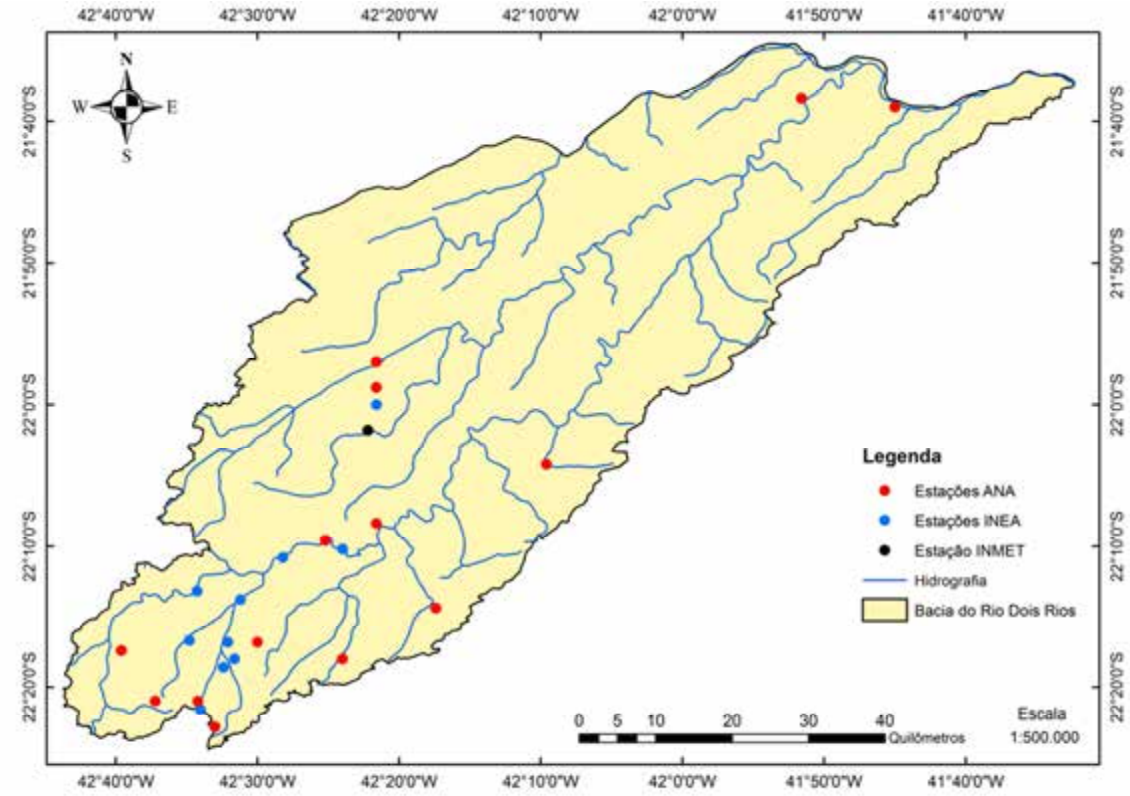


Figura 7.1 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo

Em relação aos dados espaciais de chuva, para a bacia do rio Dois Rios, foi possível obter, através das imagens do satélite TRMM, 13 blocos de imagens, conforme mostrados na Figura 7.2.

Figura 7.2 – Regiões de abrangência do TRMM na bacia do rio Dois Rios

A Figura 7.3 apresenta um exemplo da chuva distribuída diária para o satélite TRMM no dia 12/12/2013.

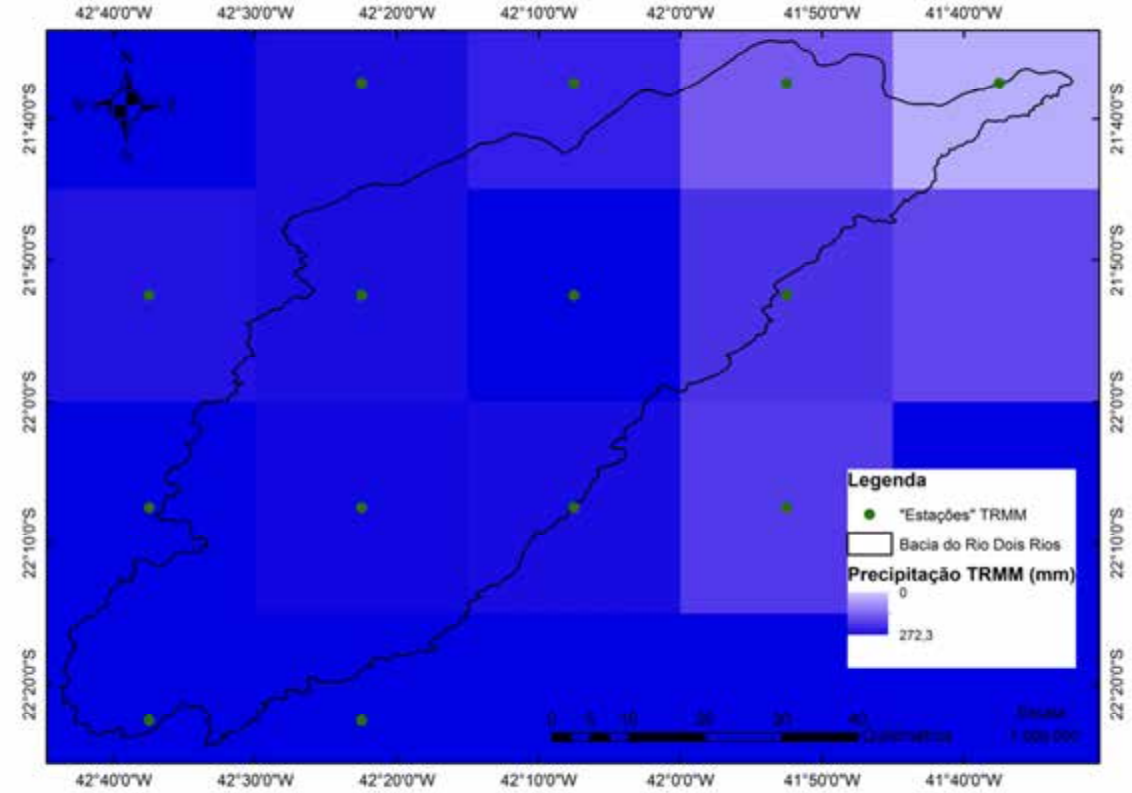


Figura 7.3 – Dados (diários) de precipitação TRMM para o dia 12/12/2013

Ao transformar a chuva espacial em chuva pontual (ponto médio do píxel), através da média das chuvas distribuídas, foram obtidas 7 estações virtuais de interesse dentro da bacia, isto é, a chuva espacial do TRMM, distribuída em uma área de 25 km x 25 km, foi transformada em uma chuva média situada no ponto central desse píxel.

7.1.1.1 Definição dos Períodos Chuvoso e Estiagem

O comportamento médio da bacia pode ser observado com base no seu comportamento hidrológico, analisando os diferentes regimes seco / chuvoso, e as distintas estações inverno / verão.

Para o desenvolvimento da metodologia para a definição de redes de monitoramento, foram utilizados dois períodos distintos quanto ao regime de precipitação, a saber, um chuvoso e um período de estiagem, sendo que, para o período chuvoso, foram consideradas duas situações diferentes: um período chuvoso extremo e um evento médio ou normal. A escolha dos dias / meses está justificada nos parágrafos seguintes.

A partir dessa observação, buscou-se, nessas séries, o dia mais chuvoso e, consequentemente, o mês mais chuvoso. Por outro lado, selecionou-se o mês mais seco, e, dentro desse mês, foi escolhido o dia mais seco. Observa-se que a obtenção do dia mais chuvoso é simples, entretanto a escolha do dia mais seco torna-se mais complexa porque, até mesmo em épocas chuvosas, é possível existir dias em que não ocorra precipitação. Essa é a razão de, para o período de estiagem, ter sido escolhido o mês mais seco, antes da escolha do próprio dia. Além dessas situações extremas de chuva e de seca, para o período chuvoso, também foi considerado, a título de aplicação na construção variográfica para os dados de precipitação, um período chuvoso médio nas séries históricas das estações, isto é, um dia / mês que estivesse próximo das médias diárias e mensais de precipitação para todo o período estudado.

Dessa forma, para o mês chuvoso, para a condição extrema, tem-se o mês de estudo definido como janeiro / 2011, e o dia mais chuvoso foi 12/01/2011. Esse dia não só foi o mais chuvoso como ainda se ressalta que, na madrugada desse dia, aconteceu a relativamente recente tragédia da região serrana do Rio de Janeiro. Para a condição de período chuvoso médio, foi selecionado o dia 26/01/2013 e, consequentemente, o mês de janeiro de 2013.

Para o mês mais seco, conforme mencionado anteriormente, é possível encontrar mais de um ao longo das séries, sendo assim optou-se por escolher o mês de julho /2011, no mesmo ano do período chuvoso, para análise dos dados, uma vez que o contraste das estações inverno / verão seria claramente evidenciado. Dentro do mês de julho / 2011, foi escolhido, como o dia mais seco, o dia 21/07/2011, com base nos dias anteriores e posteriores, em que ocorreram baixas e até mesmo não houve registro de precipitações.

Em relação às imagens de satélite, as composições diárias tendem a ser ruidosas, sendo comum vários pesquisadores utilizarem as composições de 8 (oito) dias, uma vez que contam com máscara de nuvem, filtragem de píxeis, correções de aerossol e geométrica, entre outros procedimentos de ajustamento. De acordo com as imagens MODIS disponíveis, foram escolhidos os períodos de 8 dias, levando-se em conta o dia mais chuvoso / seco.

A Tabela 7.3 apresenta os períodos de trabalho no nível diário, de 8 dias e mensal, tanto para o período chuvoso (extremo e médio) como para o período de estiagem.

Tabela 7.3 – Períodos de análises dos dados e aplicação das metodologias

Nível / Regime	Chuvoso Extremo	Chuvoso Médio[1]	Estiagem
Diário	12/01/2011	26/01/2013	21/07/2011
8 dias	09/01 a 16/01/2011	N.A.	20/07 a 27/07/2011
Mensal	jan/2011	jan/2013	jul/2011

N.A. - Não se aplica

[1] Destaca-se que o período chuvoso médio será utilizado na análise espacial quando da construção de variogramas de precipitação.

7.1.1.2 Definição das Sub-bacias

Como as UHPs apresentadas no item 6.9 apresentam uma delimitação maior do que a própria bacia do rio Dois Rios, para desenvolvimento dos procedimentos adotados na definição da rede hidrometeorológica, foram definidas 4 sub-bacias de acordo com os seus maiores e principais rios, Negro e Grande, formadores do rio que dá nome à bacia, o Ribeirão das Areias e o rio do Colégio, conforme mostrado na Figura 7.4.

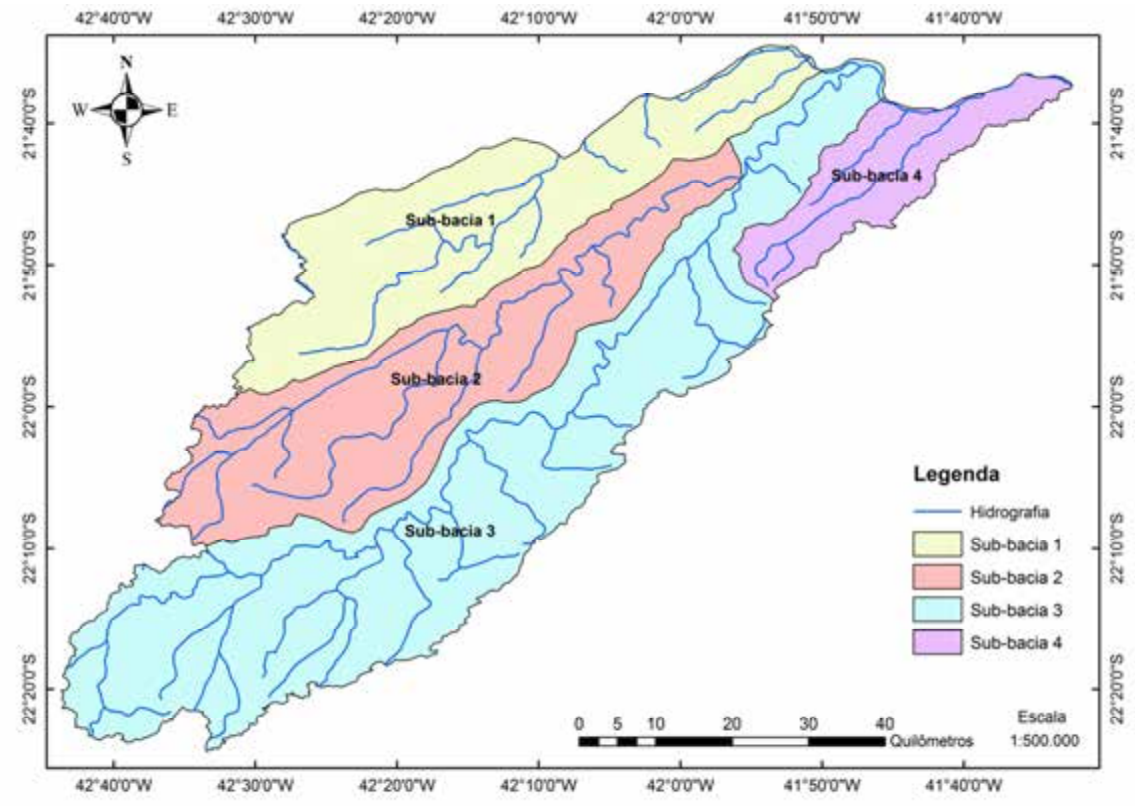


Figura 7.4 – Sub-bacias da bacia do rio Dois Rios

Observando a Figura 7.4 e a Figura 6.8 (UHPs), nota-se que a UHP VII-a é praticamente coincidente com áreas das sub-bacias 2 e 3, a VII-c2 praticamente coincidente com a sub-bacia 4 e as UHPs VII-b e VII-c1 são praticamente coincidentes com a sub-bacia 1, exceto que a primeira ultrapassa os limites da bacia.

Os rios principais de cada sub-bacia bem como a área de drenagem de cada uma delas são mostrados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Rios principais e áreas de drenagem das sub-bacias

Sub-bacia	Rio	Área (km^2)
1	Ribeirão das Areias	961
2	Rio Negro	1.082
3	Rio Grande	1.972
4	Rio do Colégio	361

7.1.2 Verificação da Qualidade e da Representatividade dos Dados

A análise e validação dos dados obtidos a partir do TRMM serão realizadas através de postos pluviométricos, instalados na bacia, que medem chuva diária. Desse modo, nesta seção, serão avaliados os dados TRMM com base nos dados obtidos nas estações pluviométricas próximas e com disponibilidade de dados no período citado anteriormente.

Para essa avaliação, foram escolhidos 6 (seis) postos pluviométricos da ANA que apresentavam maior disponibilidade de dados, além da proximidade com as estações chamadas virtuais ou fictícias (pontos médios dos píxeis) dos dados TRMM. A Figura 7.5 e a Tabela 7.5 mostram a localização, os dados dos postos e as distâncias das estações do TRMM e os postos utilizados nas análises dos itens a seguir.

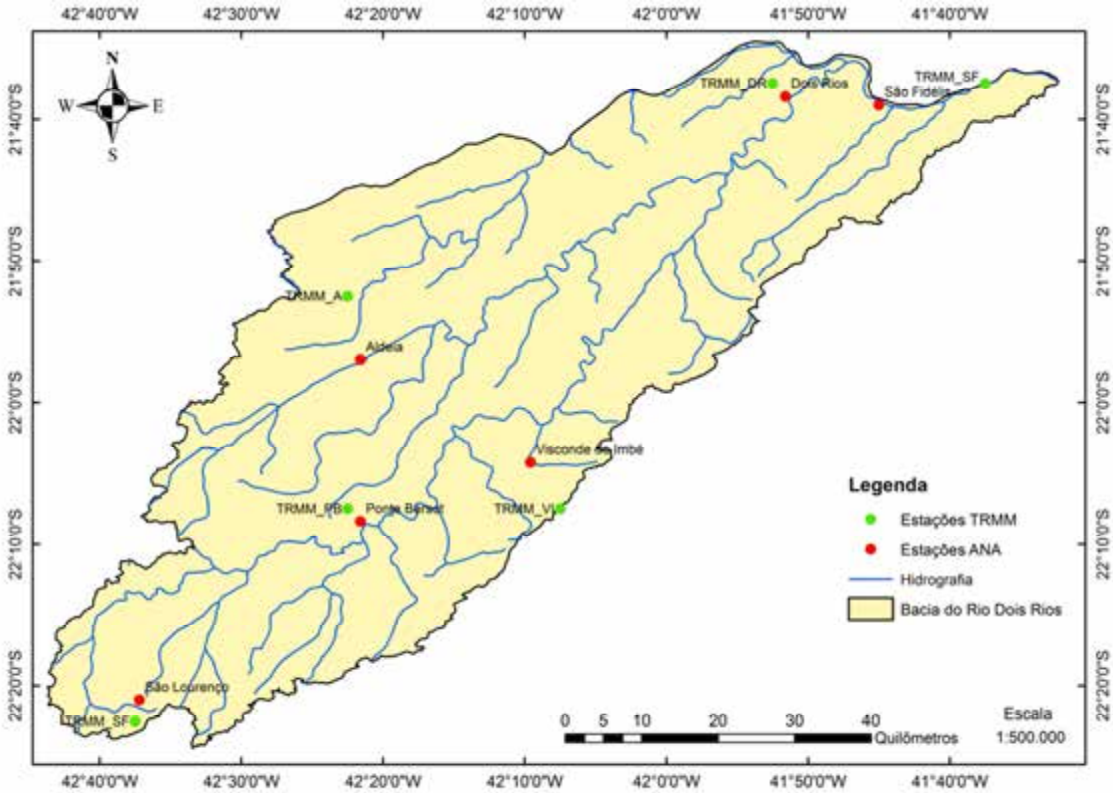


Figura 7.5 – Localização dos postos pluviométricos e estações virtuais do TRMM

Tabela 7.5 – Dados dos postos pluviométricos e estações virtuais do TRMM

Estação ANA			Estação TRMM			Período Comum	Distância (km)
Nome	**Latitude (S)**	**Longitude (W)**	**Nome**	**Latitude (S)**	**Longitude (W)**		
Dois Rios	-21,64º	-41,86º	TRMM_DR	-21,625º	-41,875º	01/03/00 a 31/12/13	2,23
Ponte Bersot	-22,14º	-42,36º	TRMM_PB	-22,125º	-42,375º	22/06/03 a 31/12/13	2,26
São Lourenço	-22,35º	-42,62º	TRMM_SL	-22,375º	-42,625º	07/07/03 a 30/11/13	2,83
Visconde de Imbé	-22,07º	-42,16º	TRMM_VI	-22,125º	-42,125º	01/03/00 a 31/12/13	7,10
Aldeia	-21,95º	-42,36º	TRMM_A	-21,875º	-42,375º	01/03/00 a 31/12/13	8,43
São Fidélis	-21,65º	-41,75º	TRMM_SF	-21,625º	-41,625º	01/03/00 a 30/11/13	13,24

Como os dados do TRMM são dados distribuídos em uma determinada área e foram transformados em dados pontuais (valores médios), dando origem às estações virtuais, essas estações não possuem nomes, sendo intituladas como TRMM associado à abreviação do nome do posto pluviométrico mais próximo.

7.1.2.1 Séries Temporais

Como os gráficos de séries diárias são computacionalmente pesados, e a densidade de informações é alta e difícil de analisar, são apresentadas apenas as séries temporais mensais dos postos e das estações virtuais TRMM.

Para análise da consistência dos dados TRMM, foram geradas, então, séries mensais, ressaltando que foram obtidas a partir da precipitação acumulada para o mês, isto é, a soma das chuvas diárias. Para elaboração dos gráficos, foram considerados apenas os meses que não apresentavam falhas. No caso de existir uma única falha em um mês, a chuva mensal não foi considerada nesse mês. Essa análise auxiliará na avaliação da qualidade dos dados do TRMM e das escalas diárias e mensais; mostrando-se consistentes ao final dessa análise, serão aplicadas nas próximas etapas da metodologia.

A Figura 7.6 mostra as séries mensais do posto Dois Rios e sua estação TRMM_DR mais próxima.

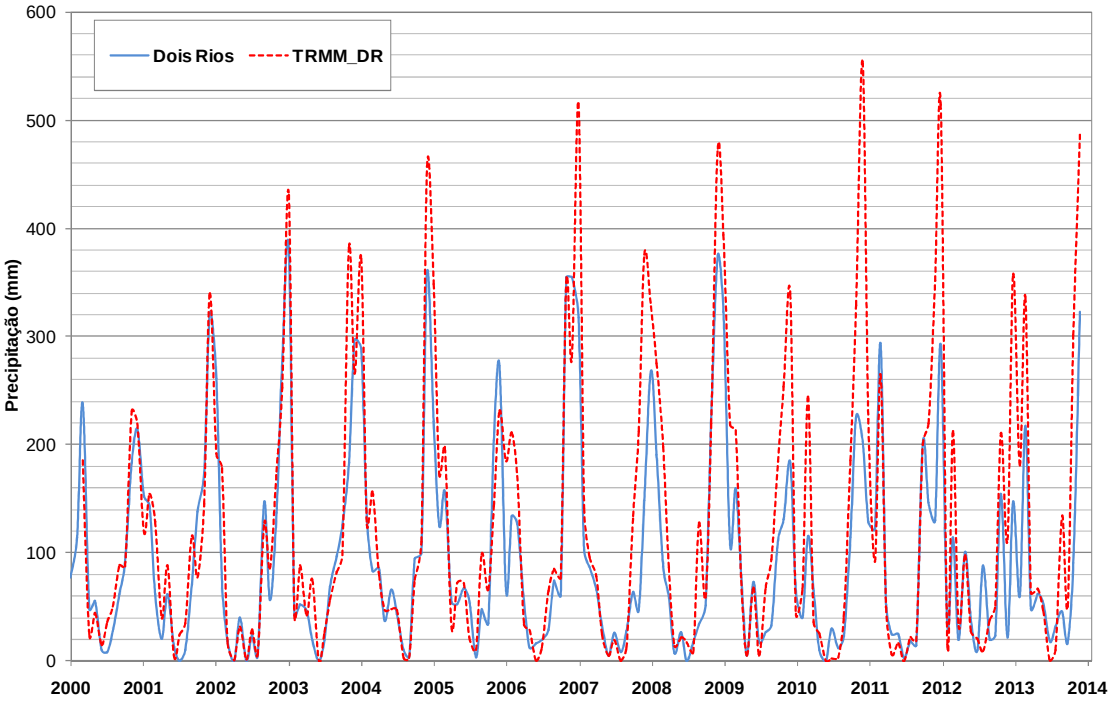


Figura 7.6 – Séries mensais – Dois Rios e TRMM_DR

Nota-se, na Figura 7.6, que, a estação Dois Rios apresenta valores acumulados mensais de precipitação menores que os valores obtidos pelo TRMM_DR.

A Figura 7.7 apresenta as séries mensais do posto pluviométrico Ponte Bersot e sua referida estação TRMM_PB.

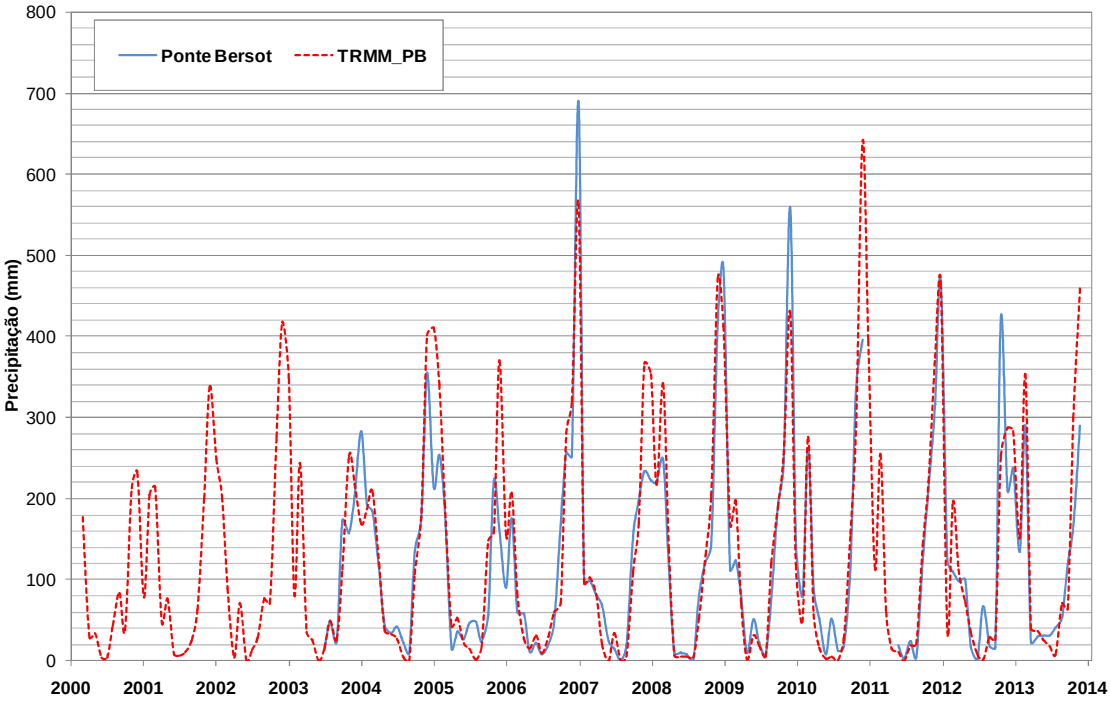


Figura 7.7 – Séries mensais – Ponte Bersot e TRMM_PB

Nota-se que, na Figura 7.7, ora os dados do posto Ponte Bersot são maiores que o do TRMM_PB e ora acontece o inverso.

Abaixo, são mostradas as séries mensais, para fins de comparação, dos dados do posto São Lourenço e TRMM_SL (Figura 7.8).

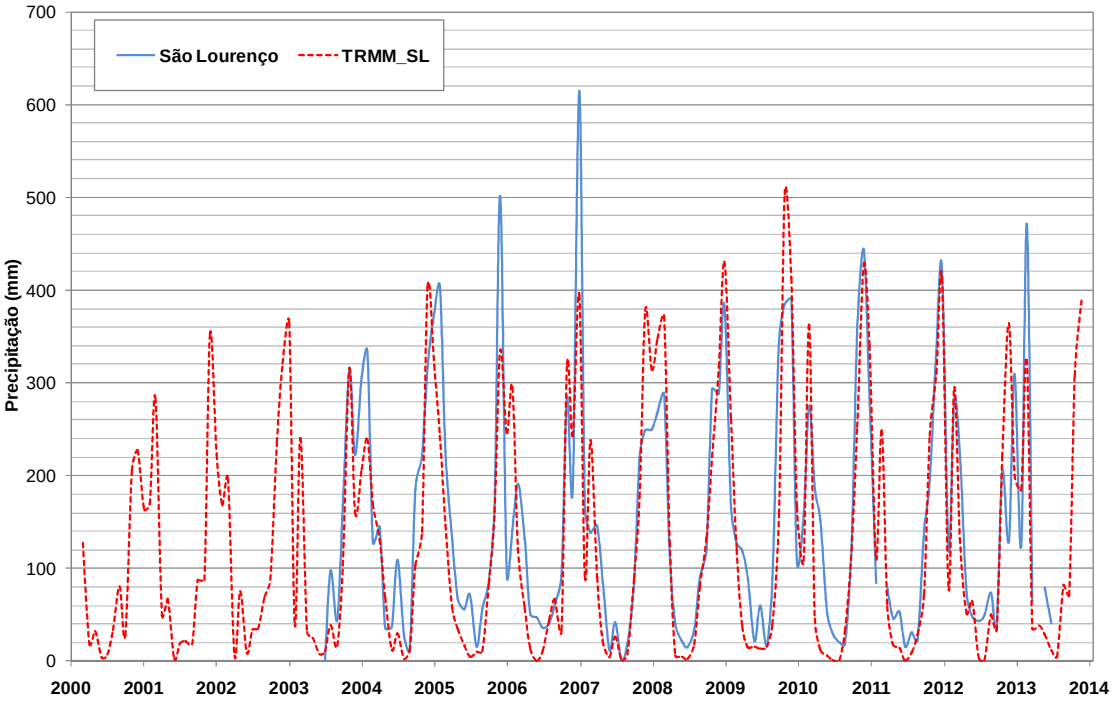


Figura 7.8 – Séries mensais – São Lourenço e TRMM_SL

No caso das estações São Lourenço e TRMM_SL, também são encontradas diferenças entre as séries, sendo que, na maioria das vezes, São Lourenço apresenta valores maiores.

Na Figura 7.9, podem ser verificadas as séries de Visconde de Imbé e TRMM_VI.

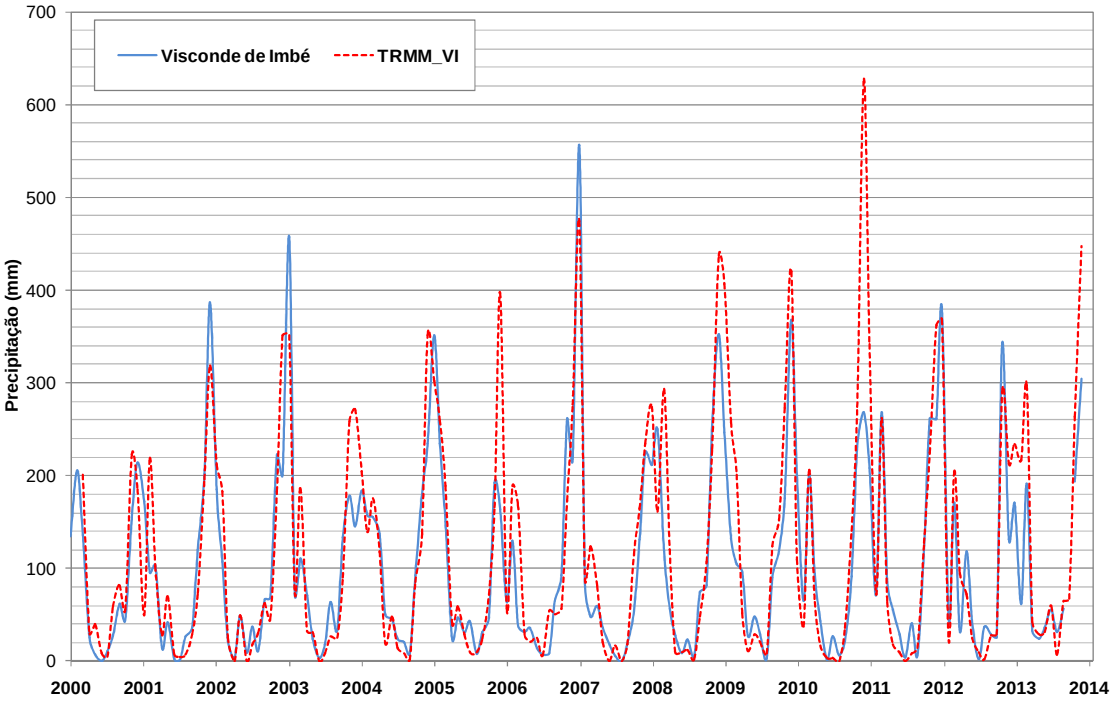


Figura 7.9 – Séries mensais – Visconde de Imbé e TRMM_VI

Ao observar as séries na Figura 7.9, percebe-se que, nos anos de 2002, 2003 e 2007, os valores de chuva mensais para o posto Visconde de Imbé são bem superiores aos obtidos para o TRMM_VI no mesmo período. Nos demais anos, o TRMM_VI mostra-se superior ou os valores das duas estações mostram-se bem próximos.

As séries mensais dos postos Aldeia e estação virtual TRMM_A são apresentadas na Figura 7.10.

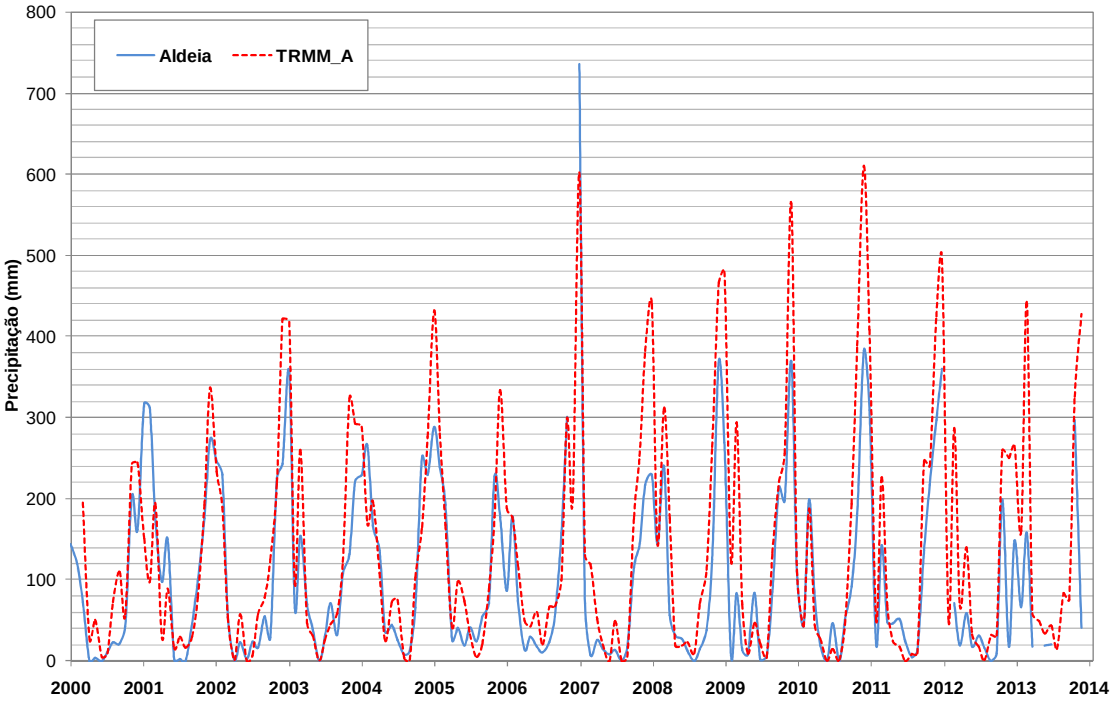


Figura 7.10 – Séries mensais – Aldeia e TRMM_A

Para a comparação entre Aldeia e TRMM_A, somente nos anos de 2001 e 2007, os valores medidos no posto pluviométrico foram maiores que os obtidos para a estação TRMM_A.

Por último, são mostradas, na Figura 7.11, as séries mensais para as estações São Fidélis e TRMM_SF.

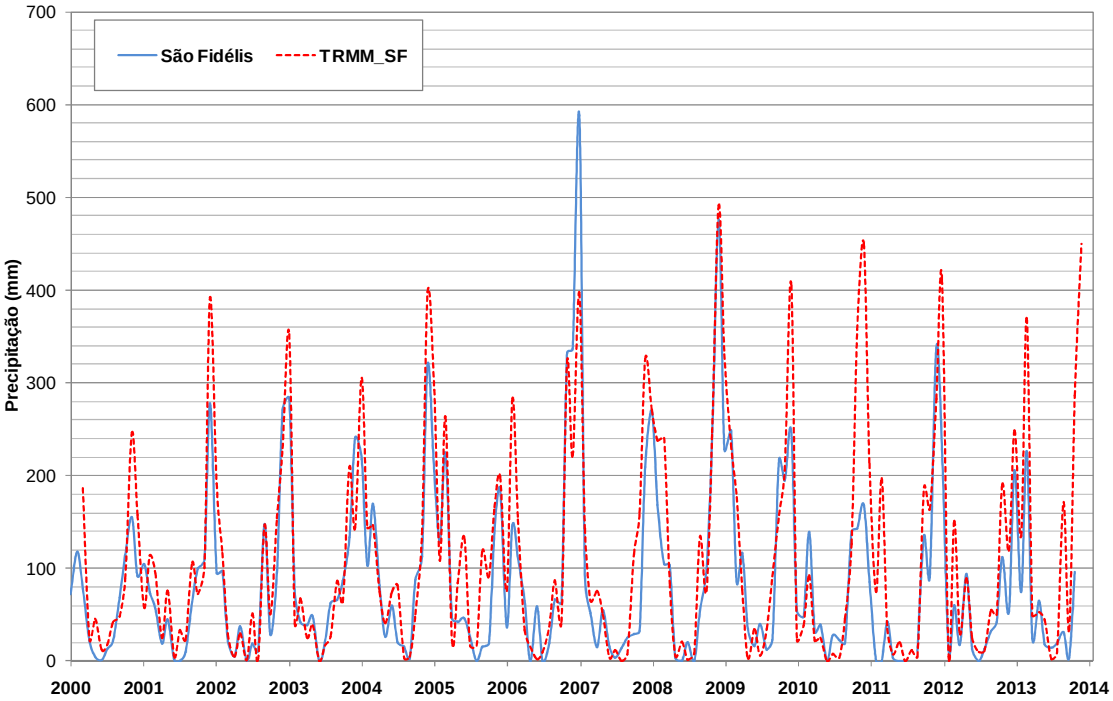


Figura 7.11 – Séries mensais – São Fidélis e TRMM_SF

De acordo com as séries apresentadas na Figura 7.11, somente no ano de 2007, as chuvas do posto São Fidélis foram superiores que o da referida estação TRMM.

De modo geral, pode-se afirmar que as séries obtidas para os postos pluviométricos e suas estações virtuais TRMM mais próximas são consistentes em relação à ocorrência dos picos de chuva, apresentando poucas defasagens. Entretanto, as séries, comparadas entre si, apresentam diferenças de amplitude, na maioria dos casos. Esse fato pode ser justificado pela distância entre as estações e também pela própria obtenção dos dados do TRMM, uma vez que foram obtidos através da média dos valores espaciais medidos em uma área de 625 km^2 (cada estação TRMM), área muito superior à área de influência dos postos pluviométricos.

O próximo passo corresponde ao cálculo das correlações entre os pares de estações (postos x TRMM) para averiguar o nível de consistência entre elas, de maneira que seja possível validar os dados do TRMM para utilizá-los na metodologia proposta neste trabalho.

7.1.2.2 Correlações

Os gráficos apresentados a seguir foram configurados no código computacional MS Excel (versão 2007), e as correlações foram calculadas utilizando a função "CORREL" do referido programa.

A Figura 7.12 e a Figura 7.13 apresentam as correlações diária e mensal, respectivamente, entre o posto Dois Rios e a estação fictícia TRMM_DR.

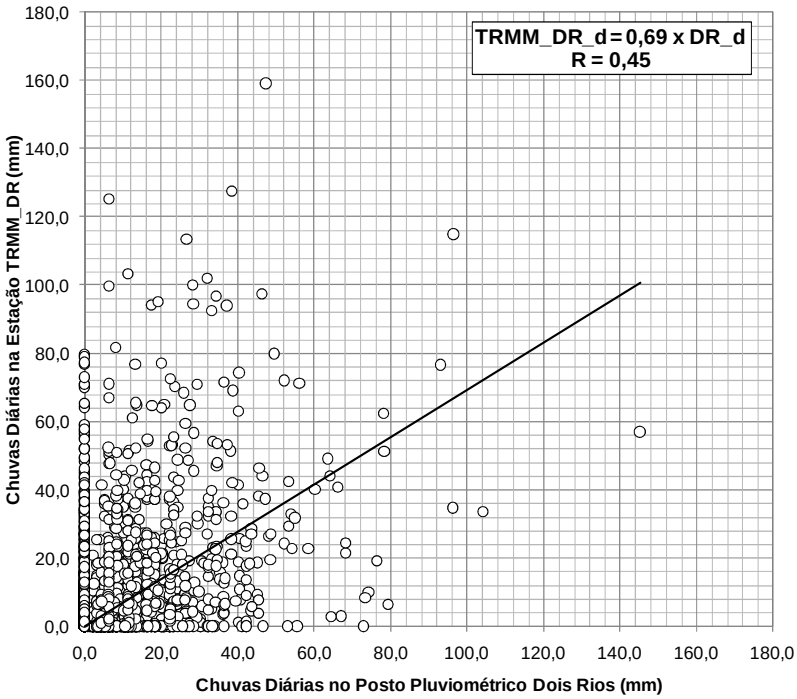


Figura 7.12 – Correlação diária entre o posto pluviométrico Dois Rios e a estação virtual TRMM_DR

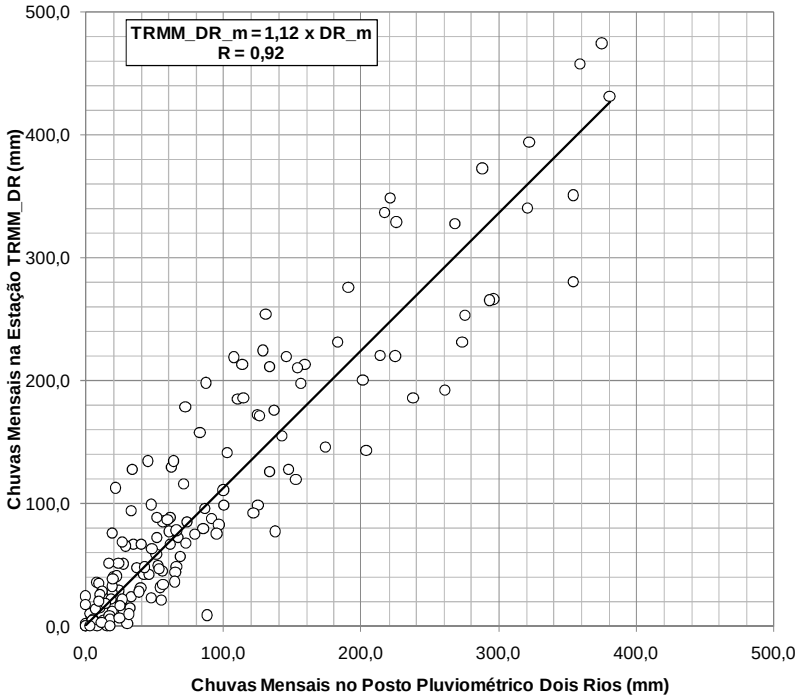


Figura 7.13 – Correlação mensal entre o posto pluviométrico Dois Rios e a estação virtual TRMM_DR

A Figura 7.14 e a Figura 7.15 apresentam a correlação diária e a correlação mensal, respectivamente, entre o posto Ponte Bersot e a estação virtual TRMM_PB.

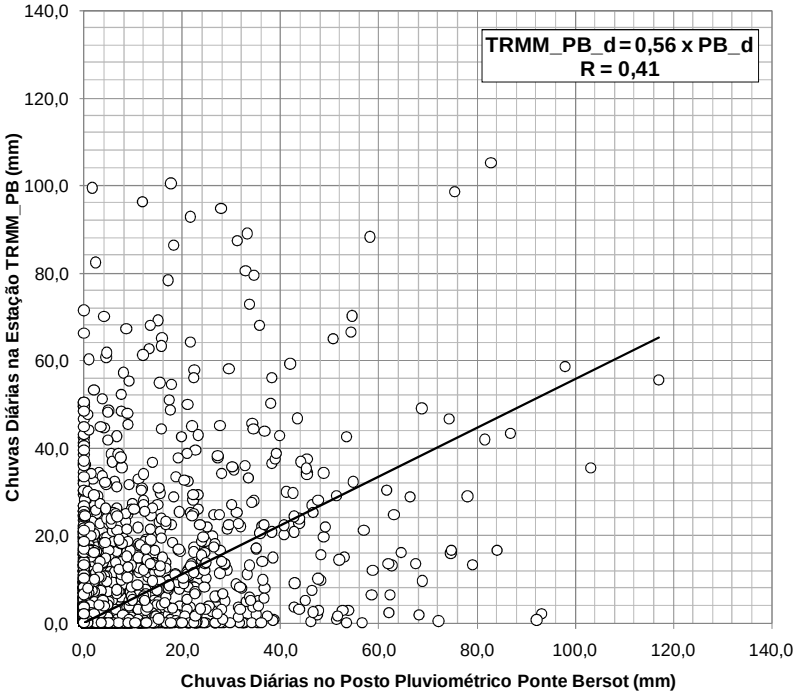


Figura 7.14 – Correlação diária entre o posto Ponte Bersot e a estação virtual TRMM_PB

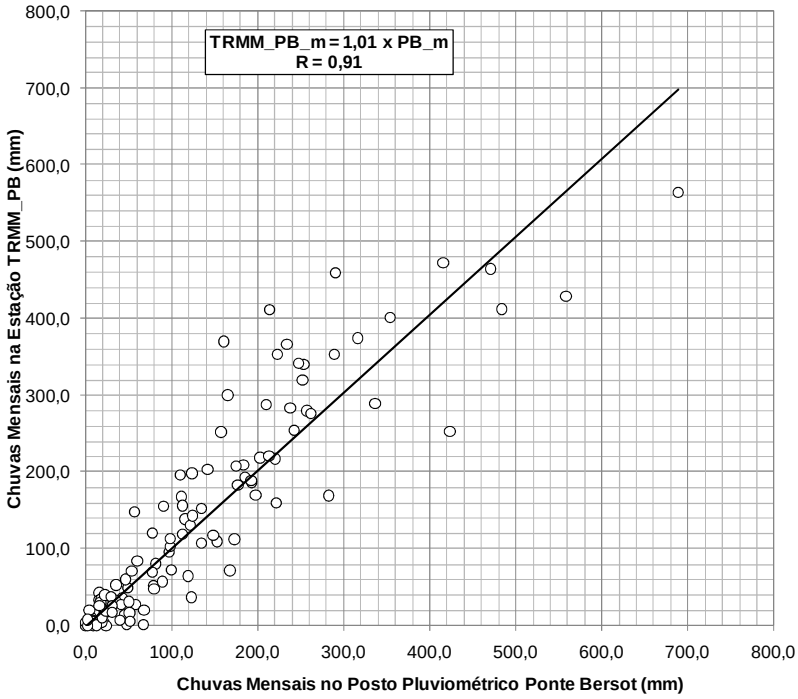


Figura 7.15 – Correlação mensal entre o posto Ponte Bersot e a estação virtual TRMM_PB

A Figura 7.16 e a Figura 7.17 apresentam a correlação diária e a correlação mensal, respectivamente, entre o posto São Lourenço e a estação fictícia TRMM_SL.

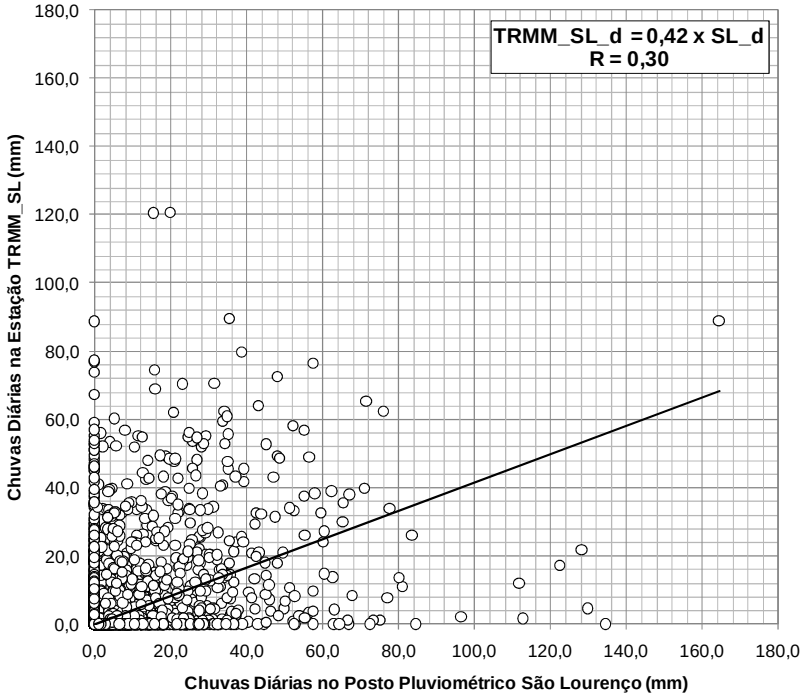


Figura 7.16 – Correlação diária entre o posto São Lourenço e a estação virtual TRMM_SL

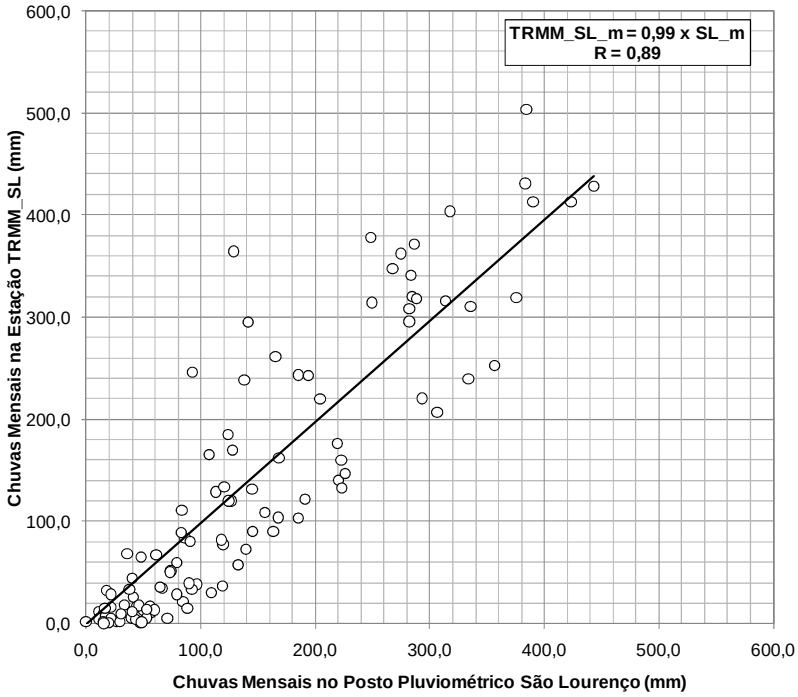


Figura 7.17 – Correlação mensal entre o posto São Lourenço e a estação virtual TRMM_SL

A Figura 7.18 e a Figura 7.19 apresentam as correlações diária e mensal, respectivamente, entre o posto Visconde de Imbé e a estação virtual TRMM_VI.

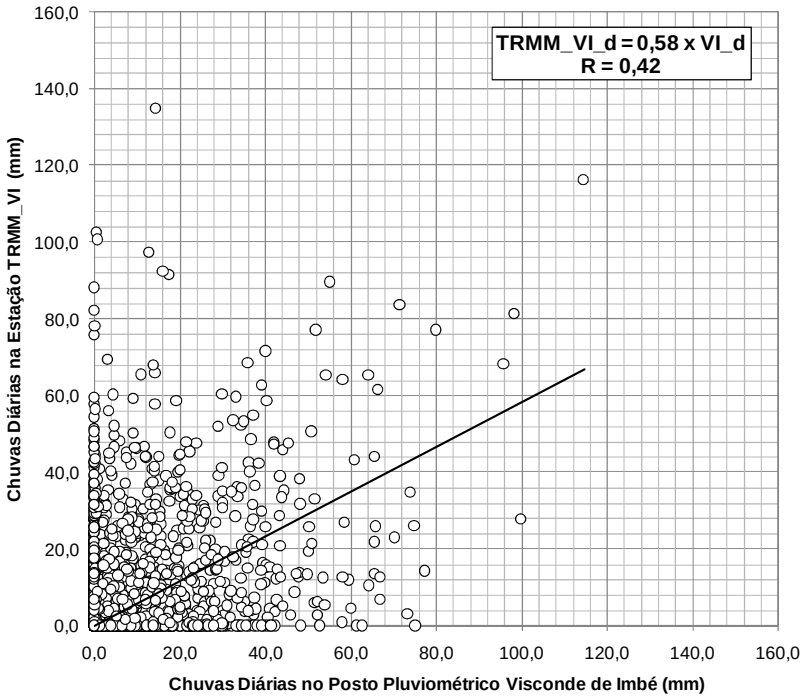


Figura 7.18 – Correlação diária entre o posto Visconde de Imbé e a estação virtual TRMM_VI

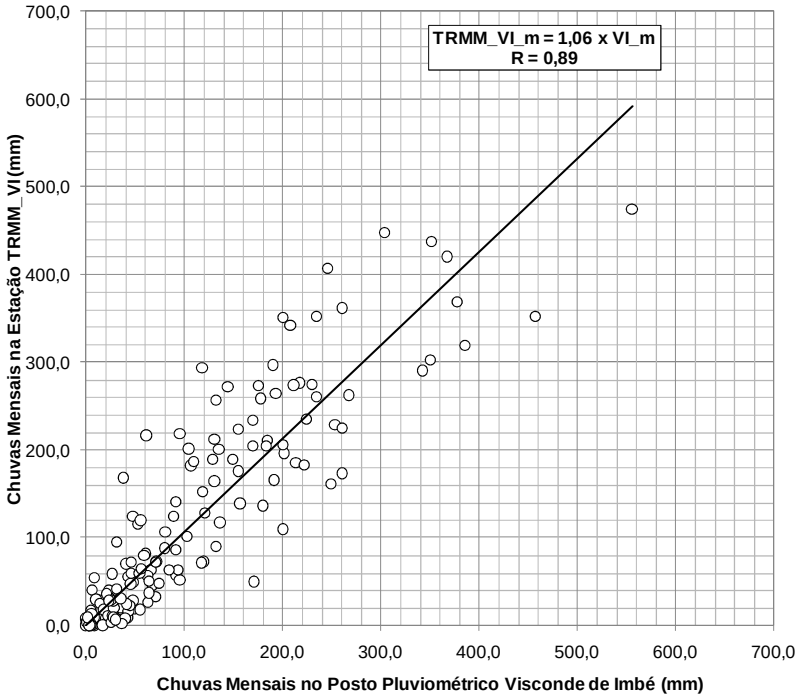


Figura 7.19 – Correlação mensal entre o posto Visconde de Imbé e a estação virtual TRMM_VI

A Figura 7.20 e a Figura 7.21 apresentam as correlações diária e mensal, respectivamente, entre o posto Aldeia e a estação fictícia TRMM_A.

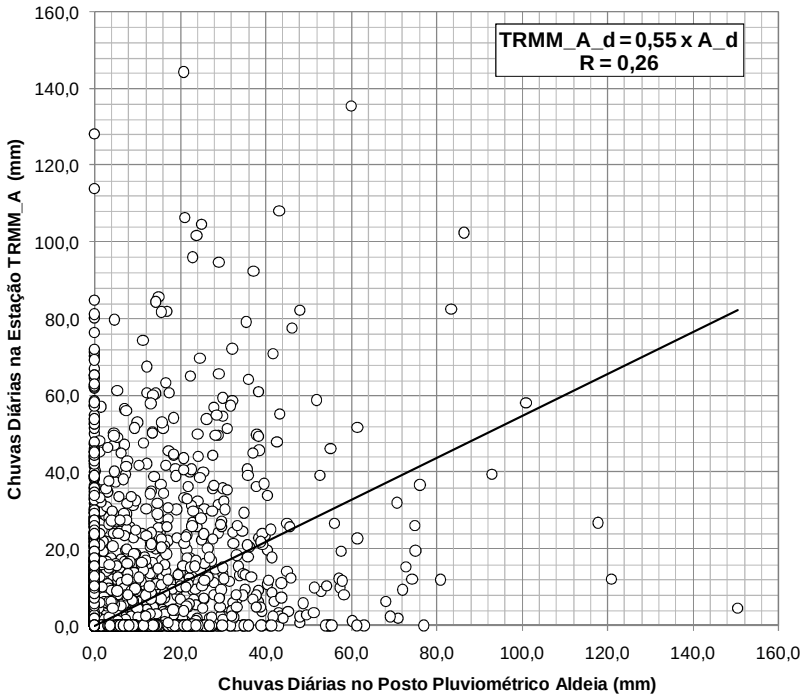


Figura 7.20 – Correlação diária entre o posto Aldeia e a estação virtual TRMM_A

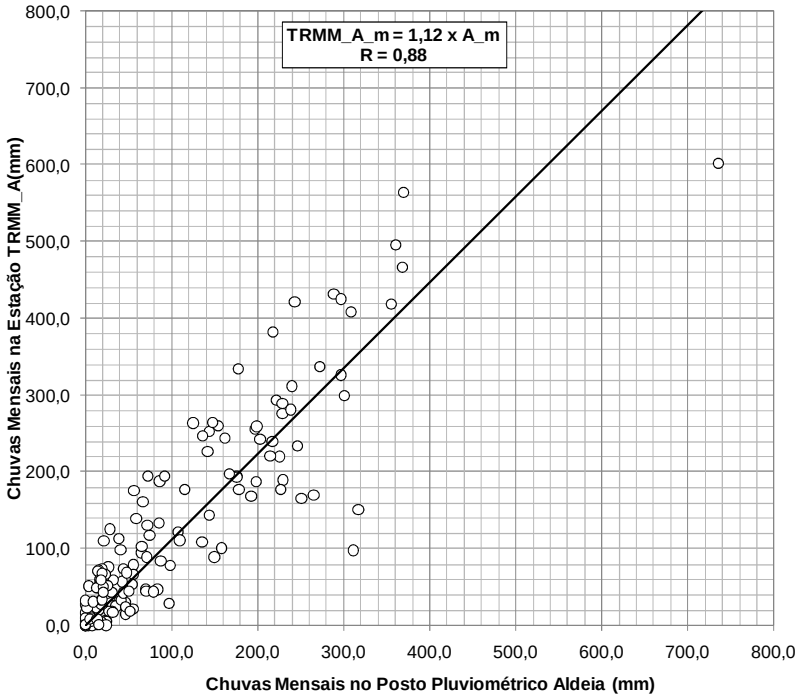


Figura 7.21 – Correlação mensal entre o posto pluviométrico Aldeia e a estação virtual TRMM_A

A Figura 7.22 e a Figura 7.23 apresentam as correlações diária e mensal, respectivamente, entre o posto São Fidélis e a estação virtual TRMM_SF.

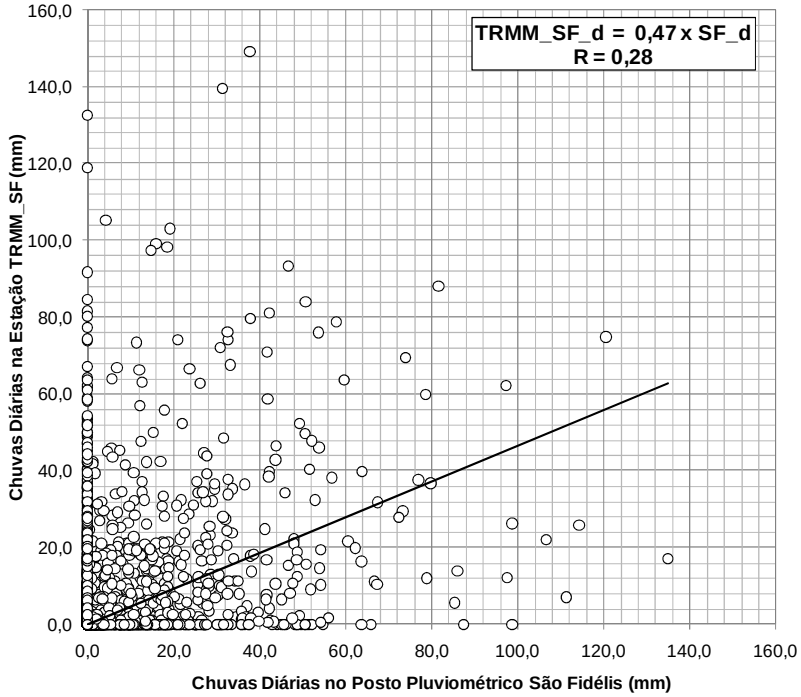


Figura 7.22 – Correlação diária entre o posto pluviométrico São Fidélis e a estação virtual TRMM_SF

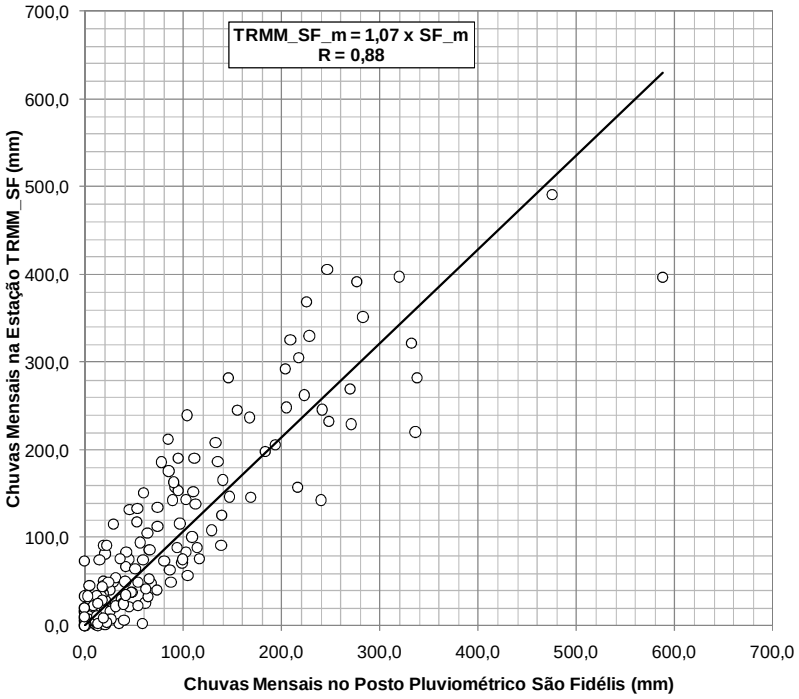


Figura 7.23 – Correlação mensal entre o posto São Fidélis e a estação virtual TRMM_SF

A Tabela 7.6 apresenta um resumo dos coeficientes de correlação apresentados nos gráficos acima (Figura 7.12 a Figura 7.23).

Tabela 7.6 – Resumo dos coeficientes de correlação (R) e dos coeficientes angulares (A) das correlações diárias e mensais entre os postos pluviométricos e as estações virtuais do TRMM

Correlação	**Coeficientes de Correlação**		**Coeficientes Angulares**	
	Diária	**Mensal**	**Diária**	**Mensal**
Dois Rios x TRMM_DR	0,45	0,92	0,69	1,12
Ponte Bersot x TRMM_PB	0,41	0,91	0,56	1,01
São Lourenço x TRMM_SL	0,30	0,89	0,42	0,99
Visconde de Imbé x TRMM_VI	0,42	0,89	0,58	1,06
Aldeia x TRMM_A	0,26	0,88	0,55	1,12
São Fidélis x TRMM_SF	0,28	0,88	0,47	1,07
Média	**0,35**	**0,90**	**0,55**	**1,06**

Analisando os resultados apresentados na Tabela 7.6, nota-se que as correlações mensais apresentaram melhores resultados que as correlações diárias, o que era

esperado, uma vez que os ruídos são mais significativos quando são utilizados os dados diários. Observa-se, também, que as piores correlações, tanto diária quanto mensal, foram aquelas em que os postos pluviométricos e as estações do TRMM encontravam-se mais distantes (Aldeia e São Fidélis).

Ao analisar os coeficientes angulares das correlações, verifica-se que, na média, para os dados diários, os valores dos dados do TRMM encontram-se abaixo dos valores medidos nos postos pluviométricos. Já para as correlações mensais, na média, os valores obtidos nas estações fictícias do TRMM são superiores, sendo 6% maiores. É possível notar que os melhores coeficientes angulares (correlação mensal) encontrados referem-se às correlações entre os postos Ponte Bersot e São Lourenço e suas respectivas estações TRMM, sendo praticamente equivalente a 1 (correlação perfeita).

Conforme apresentado nas conclusões a respeito da análise das séries temporais (item 7.1.2.1), as diferenças encontradas também nas correlações podem ser justificadas, *a priori*, pelos seguintes fatores:

- distância entre as estações;
- valores de precipitação obtidos pelo TRMM correspondem ao valor médio de uma área, transformando valores distribuídos em valores pontuais.

Cabe ressaltar, aqui, alguns tópicos relevantes quanto aos dados do TRMM e correspondente validação.

Uma característica interessante e importante da chuva é sua intermitência tanto no espaço quanto no tempo. É frequentemente observado que os pluviômetros (volumes pequenos de amostragem), muitas vezes, indicam precipitação zero, enquanto que os satélites e/ou radares (volumes de amostragem muito maiores) relatam estimativas diferentes de zero. Sendo assim, segundo HABIB e KRAJEWSKI (2002), há dificuldade em definir chuva em ambas as observações de pluviômetros e radar.

Em um estudo inicial e antigo a respeito de dados espaciais de precipitação, ZAWADZKI (1975) argumentou que as medidas de radar, na comparação com pluviômetros, são de caráter diferente: pluviômetros fornecem uma taxa quase pontual de chuva, enquanto as estimativas de radar correspondem a uma taxa de precipitação de volume médio. O autor sugeriu a busca de um tempo médio ideal de aferição da chuva

no pluviômetro que correspondesse à suavização espacial dos dados de radar para que as diferenças fossem minimizadas. Dado que as medidas de satélite e radar da precipitação são realizadas a uma significativa altura acima do chão, ZAWADZKI (1975) também demonstrou que considerar um tempo de atraso entre os dados do satélite e/ou radar e as observações do pluviômetro pode melhorar a comparação. No presente estudo, a análise dos dados de precipitação espacial (TRMM) não considera esse atraso, podendo esta ser uma justificativa em relação aos baixos coeficientes de correlação diária encontrados.

Além da variabilidade espacial, também é válido examinar a variabilidade no sentido vertical. Vários estudos, como, por exemplo, WILLIAMS *et al.* (1995) e GAGE *et al.* (1994), analisaram as medidas de perfis verticais de refletividade e sinais de velocidade Doppler, e esses estudos mostraram que a variabilidade vertical pode ser significativa. Desse modo, a variabilidade em altitudes inferiores a altura típica do feixe do satélite e/ou radar pode provocar incertezas nas estimativas de chuva. No entanto, a quantificação das incertezas provenientes da variabilidade vertical está além do escopo deste estudo.

Numerosos estudos, antes até da implantação da missão do satélite TRMM, compararam os dados de satélite e radar com dados observados nos pluviômetros e mostraram-se significativamente discordantes.

AUSTIN (1987) constatou que, para eventos chuvosos individuais, as diferenças entre os valores obtidos pelo radar e pluviômetros correspondiam a um fator de 2 ou mais, evidenciando que essa discrepância não era incomum. Só quando eram agrupados 20 ou mais eventos, que as diferenças entre pluviômetros e radar eram reduzidas para cerca de 10%. WOODLEY *et al*. (1975) e WILSON e BRANDES (1979) relataram resultados semelhantes para comparações radar-pluviômetros. BRANDES *et al*. (1999), a partir de técnicas de integração de dados, constataram que a proporção de chuvas totais entre radares e pluviômetros estavam na faixa de 0,70 a 1,90. Em um estudo baseado em eventos chuvosos ocorridos na Florida, durante o verão, HABIB e KRAJEWSKI (2002) distinguiram os erros de radar das diferenças entre os dados espaciais e os dos pluviômetros, considerando o efeito da variabilidade natural espacial da precipitação. Como resultado, eles concluíram que a variabilidade entre radar e pluviômetros, expressa em razão de variância, contribuiu com cerca de 30 a 45% para

chuvas leves e 40 a 75% para chuvas intensas. De forma equivalente, o erro intrínseco do radar, expresso pela razão do seu desvio padrão em relação à média, era muito elevado para chuvas leves (90 a 120%) e mais baixo para chuvas intensas (20 a 40%).

Os produtos obtidos do satélite TRMM foram utilizados em alguns estudos mais recentes em diferentes áreas. SU *et al*. (2008) avaliaram o produto TRMM 3B42 V6 na bacia do rio Prata, e os resultados mostraram que os dados do TRMM 3B42 concordaram bem com a grade de postos pluviométricos em escalas de tempo mensais, mas as diferenças na comparação entre TRMM 3B42 e postos nas estimativas de precipitação foi reduzida para escalas diárias de tempo, especialmente para os eventos de precipitações intensas. ZENG *et al*. (2012) avaliaram o produto TRMM 3B43 V6 em relação ao monitoramento da seca na bacia chinesa do rio Lancang. Sua validação sugeriu que o produto TRMM 3B43 V6 teve boa precisão e potencial para monitoramento da seca em regiões com dados esparsos. DUAN *et al*. (2012) avaliaram os produtos do TRMM 3B42 e 3B43 na região do Mar Caspian no Irã, usando dados das estações pluviométricas nas escalas mensais e anuais. Nesse estudo, eles avaliaram esses produtos como não confiáveis; segundo eles, a precipitação estimada do TRMM apresentava elevado erro quadrático médio para a maioria dos meses e anos analisados. LIU *et al*. (2012) compararam os produtos V7 e V6 do TRMM em estudo para uma bacia na China e observaram que, na escala diária, ambos não eram confiáveis, superestimando a precipitação. Já para escalas temporais maiores (mensal e anual), os dados dos produtos V6 e V7 estavam em excelente concordância com os dados de pluviômetros, afirmando que os dados eram confiáveis e tinham um bom potencial em aplicações hidrológicas, quando utilizados em escalas mensais ou anuais.

FRANCHITO *et al*. (2009) compararam os dados do TRMM com os dados de precipitação da ANEEL para 5 regiões no Brasil, e os resultados mostraram que a precipitação sazonal do TRMM estava bem correlacionada com a precipitação observada pela ANEEL em quase todas as cinco regiões, contudo os erros aleatórios e sistemáticos mostraram-se sensíveis às diferenças regionais e sazonais.

As estimativas de precipitação fornecidas pelo satélite TRMM foram consideradas consistentes no estudo realizado por COLLISCHONN *et al*. (2006), conseguindo reproduzir, com bastante fidelidade, o regime de chuvas da bacia do Alto Paraguai até Descalvados. Além disso, eles afirmam que as variações sazonais da chuva são bem

representadas, sendo que, em alguns casos, pode subestimar ou superestimar, mas que, quando ponderados sobre a bacia, apresentaram resultados similares àqueles obtidos por interpolação de pluviômetros.

Sete anos mais tarde, CURTARELLI *et al*. (2013) avaliaram as estimativas de precipitação do produto TRMM 3B42 diário sobre a região hidrográfica do Tocantins-Araguaia através da comparação com dados de precipitação obtidos *in situ*, encontrando dados semelhantes. Eles concluíram que as estimativas fornecidas pelo produto TRMM 3B42 apresentaram fraca correlação linear com as estimativas obtidas com os dados observados dos postos, entretanto foram capazes de reproduzir o regime de precipitação na região de maneira razoável. Segundo eles, as estimativas TRMM 3B42 apresentaram uma tendência em superestimar a precipitação durante os meses chuvosos e subestimar nos meses secos. Adicionalmente, a agregação das estimativas diárias de precipitação para totais semanais, quinzenais e mensais melhorou a qualidade das estimativas, apesar dos erros elevados. Assim como na presente dissertação, eles alertam para o fato de que devem ser desconsideradas as incertezas inerentes aos dados coletados pelos pluviômetros e ao baixo número de postos utilizados na análise.

Ao observar os diversos estudos já realizados em relação ao desempenho dos dados oriundos do TRMM, conclui-se que ele pode variar de região para região. Por essa razão, é necessária a avaliação do desempenho e precisão desses produtos em comparação com os dados de pluviômetros disponíveis na região, conforme foi feito nesta dissertação.

Neste trabalho, ao realizar as análises das séries temporais e das correlações mensais entre os dados espaciais do TRMM e os dados provenientes dos pluviômetros, foi verificada uma boa relação entre eles, com altos coeficientes de correlação (acima de 0,88) e também com diferenças média dos dados TRMM de 6% acima dos dados medidos nos postos pluviométricos comparados (variação da razão entre dados TRMM e pluviômetros na faixa de 0,99 a 1,12). Foram também verificadas que as correlações mensais se apresentaram melhores que as correlações diárias, que se mostraram muito ruidosas. Além disso, ao comparar as séries mensais, foi observada coerência dos dados dos produtos TRMM ao representar as diferenças sazonais ao longo dos anos.

Portanto, para a proposição e definição de uma rede de monitoramento para a bacia do rio Dois Rios, os dados obtidos através do satélite TRMM foram considerados

consistentes e coerentes com o comportamento dos dados dos postos, fundamentando o correspondente emprego no desenvolvimento da metodologia proposta nesta dissertação, em especial pelo fato do monitoramento da bacia ser precário, considerando as estações reais dotadas de pluviômetros.

7.1.3 Avaliação da Rede Existente

7.1.3.1 Rede Mínima

Segundo a tabela da WMO (Tabela 5.1), para a bacia do rio Dois Rios, que está localizada em uma região montanhosa, e considerando que não há monitoramento na região, seriam necessárias, no mínimo, 18 estações.

Conforme mencionado no item 7.1.1, a bacia em estudo possui 48 estações pluviométricas, num total de 32 estações na bacia, sendo que 25 possuem dados disponíveis nos últimos 13 anos (2000 a 2013). Sendo assim, seria correto dizer que a bacia tem uma rede suficientemente adequada para o monitoramento de precipitações.

Entretanto, a distribuição dessas estações que não está adequada. Na parte alta da bacia, existe um número muito grande de estações concentradas em uma pequena região, e, nas demais áreas, a densidade de estações é muito baixa, conforme pode ser visto na Figura 7.24.

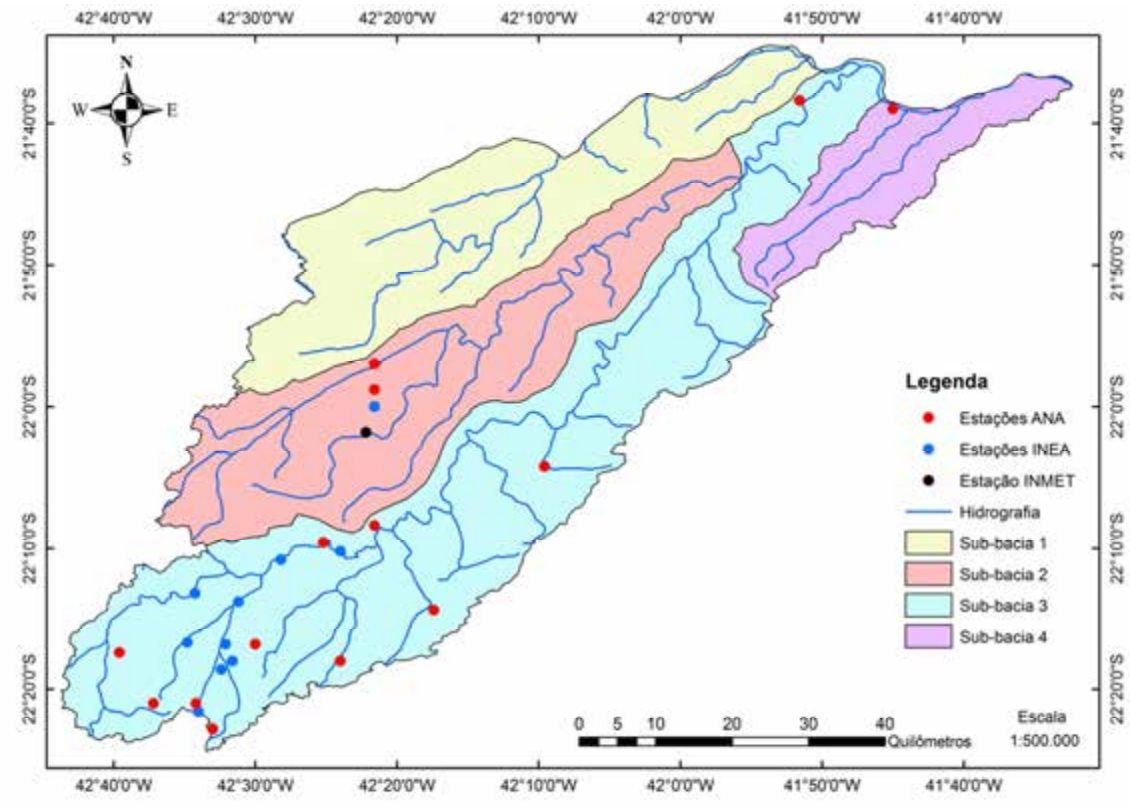


Figura 7.24 – Estações pluviométricas e as sub-bacias

A Tabela 7.7 mostra a quantidade atual de estações em cada sub-bacia, bem como a quantidade mínima recomendada segundo a WMO.

Tabela 7.7 – Quantidade de estações nas sub-bacias

Sub-bacia	**Rio**	**Área (km^2)**	**Quantidade Atual**	**Mínimo Recomendado (WMO)**
1	Ribeirão das Areias	961	0	4
2	Rio Negro	1.082	3	5
3	Rio Grande	1.972	28	8
4	Rio do Colégio	361	1	2

Analisando a Tabela 7.7, somente a sub-bacia 3 (bacia do rio Grande) estaria em conformidade com as recomendações da WMO, enquanto as demais estariam com um número abaixo do mínimo recomendado.

Se a sub-bacia do rio Grande fosse dividida em 3, seria possível afirmar que existe uma concentração muito grande de estações próximo à nascente do rio, tendo na parte média e baixas (foz) apenas uma estação pluviométrica em cada região.

Assumindo que os relevos e comportamento hidrometeorológico variam nessas 3 regiões da sub-bacia do rio Grande, nota-se uma distribuição inadequada das estações. Sendo assim, essa metodologia é útil para referência, entretanto é muito simples para estimar uma rede de monitoramento adequada para uma região e fins específicos.

De modo geral, analisando a Tabela 7.7, seria necessário instalar, no mínimo, mais 7 estações na bacia do rio Dois Rios, considerando as sub-bacias individualmente.

7.1.3.2 Análise de Componentes Principais

As análises de componentes principais foram feitas para todos os postos pluviométricos com dados mensais disponíveis a partir de 2000 e também para as estações virtuais do TRMM. Após a análise preliminar dos dados diários brutos, os dados foram agregados na escala mensal e, posteriormente, na escala anual.

Na Figura 7.25, é apresentado o gráficos da análise de componentes principais considerando somente os dados dos postos pluviométricos (ao todo, 25).

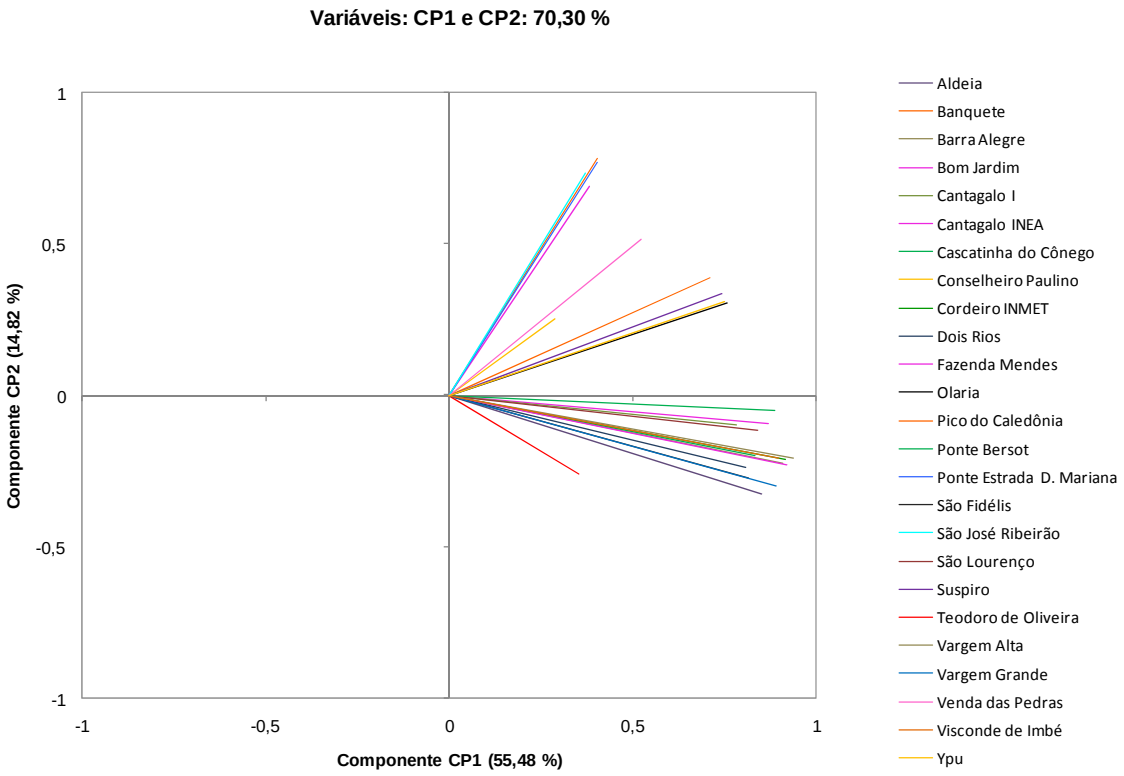


Figura 7.25 – ACP considerando somente os postos pluviométricos (mensal)

Analisando a Figura 7.25, é possível notar que existe certo grau de redundância na observação dos dados por meio da disposição dos postos pluviométricos. Essa disposição concentrada em alguns dos quadrantes indica que algumas estações estão contribuindo, de forma limitada, com informações complementares adicionais para explicar a variabilidade da precipitação na bacia em estudo. Destaca-se, ainda, que as estações mais a jusante da bacia encontram-se na parte de baixo do gráfico, como, por exemplo, as estações pluviométricas Dois Rios e São Fidélis.

Além disso, observa-se, também, na Figura 7.25, que as componentes CP1 e CP2 determinadas nos eixos das abscissas e ordenadas, respectivamente, conseguem explicar 70,3% da variabilidade da precipitação observada segundo as estações avaliadas. Como foram analisadas 25 estações, ao todo, tem-se 25 componentes principais. Sendo assim, as 23 demais componentes principais juntas conseguem explicar os 29,7% restantes, sendo as componentes CP3 e CP4 as mais significantes desse grupo, com 7,3% e 3,7%, respectivamente.

A Figura 7.26 apresenta as mesmas informações do gráfico anterior, entretanto de uma maneira que auxilie na compreensão de quais estações poderiam ser consideradas redundantes.

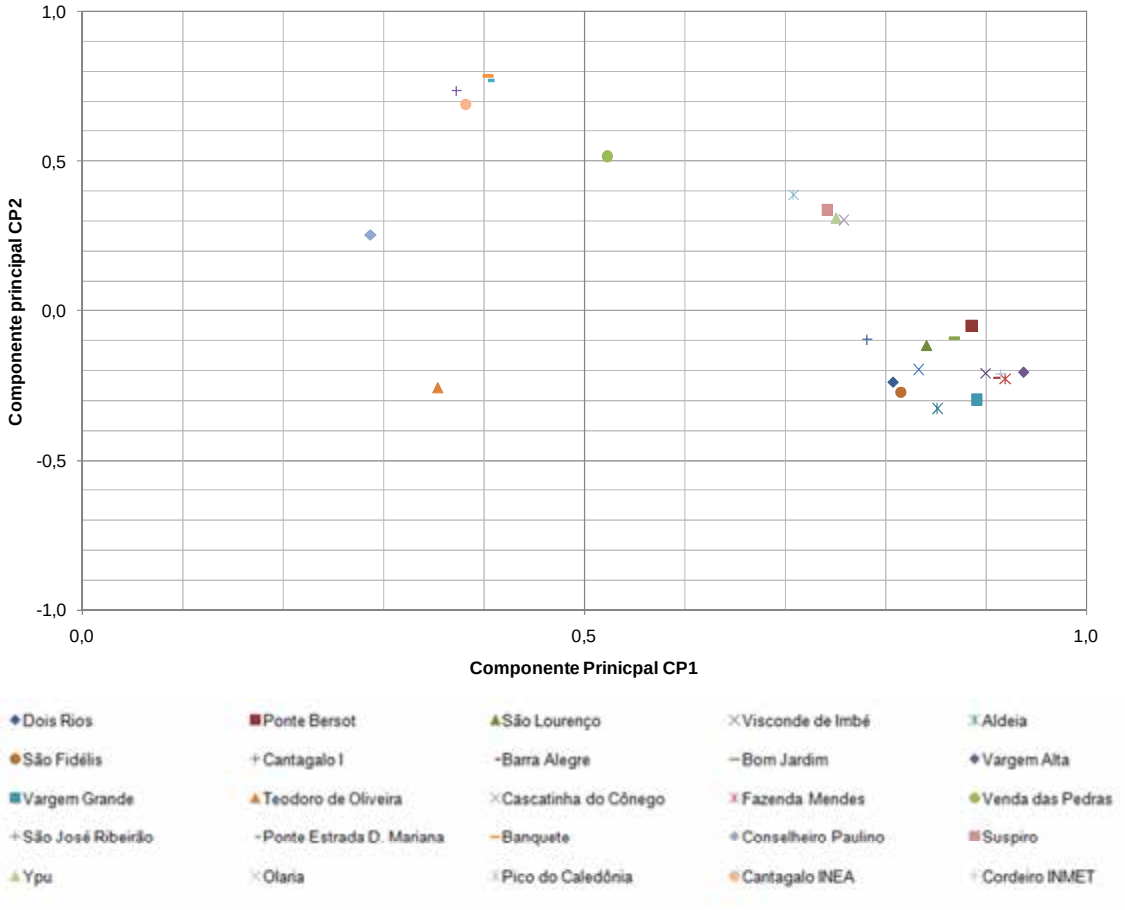


Figura 7.26 – ACP considerando somente os postos pluviométricos (identificação de cada posto)

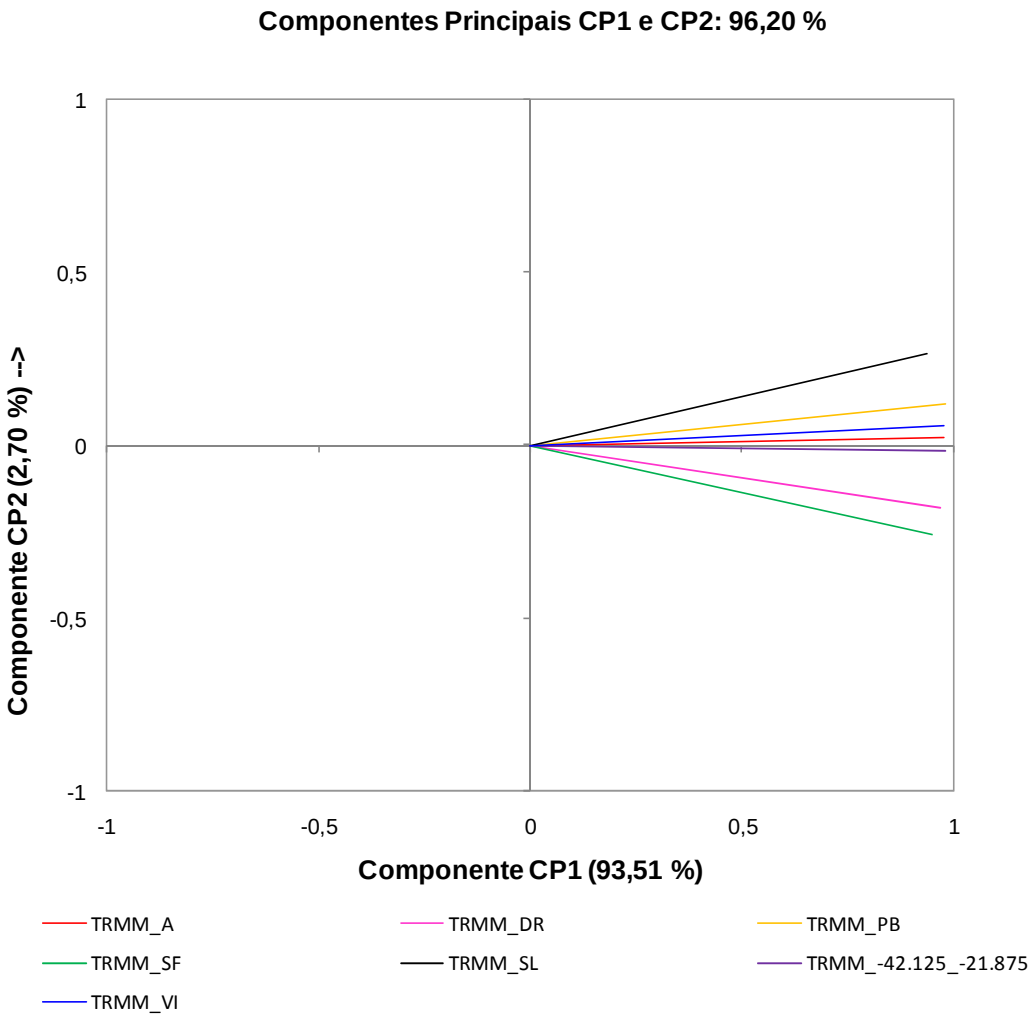
Observando a Figura 7.26, é possível notar 4 grupos de estações que apresentam resultados da análise qualitativa (ACP) dos dados de precipitação dos postos com observações similares:

- Banquete e Ponte Estrada Dona Mariana;
- Cantagalo I, Cantagalo INEA e Cordeiro (INMET);
- Suspiro, Ypu e Olaria;
- Barra Alegre e Fazenda Mendes.

Essa primeira análise exploratória da rede atual reforça a sensação visual de má distribuição das estações pluviométricas, uma vez que alguns postos instalados

apresentam informações redundantes, sendo necessária a realização de uma avaliação mais aprofundada da rede e um possível remanejamento das estações supracitadas para outros locais sem monitoramento.

A Figura 7.27 apresenta a mesma análise considerando somente os dados do TRMM (ao todo, 7) na escala mensal.



c

Figura 7.27 – ACP considerando somente as estações virtuais do TRMM (mensal)

Em contraposição, a Figura 7.27, que apresenta somente as componentes principais para as estações fictícias do TRMM, é possível notar que as estações não são redundantes, sendo que cada uma delas contribui com informações de chuva diferente para a bacia. Da mesma forma, como foi feito para a análise das componentes considerando somente os postos pluviométricos, as estações do TRMM mais a jusante encontram-se na parte inferior do gráfico.

Como as estações virtuais estão melhor distribuídas ao longo da bacia, observa-se que as componentes CP1 e CP2 juntas conseguem explicar 96,2% das variáveis analisadas (estações TRMM) , sendo as demais componentes insignificantes para esse tipo de análise.

A seguir, são apresentados os gráficos de análise de componentes principais na escala anual considerando os postos pluviométricos (Figura 7.28) e os dados do TRMM (Figura 7.29). Destaca-se que, devido às lacunas nas séries anuais de algumas estações pluviométricas, a ACP conta, para essa escala, com apenas 19 estações no total.

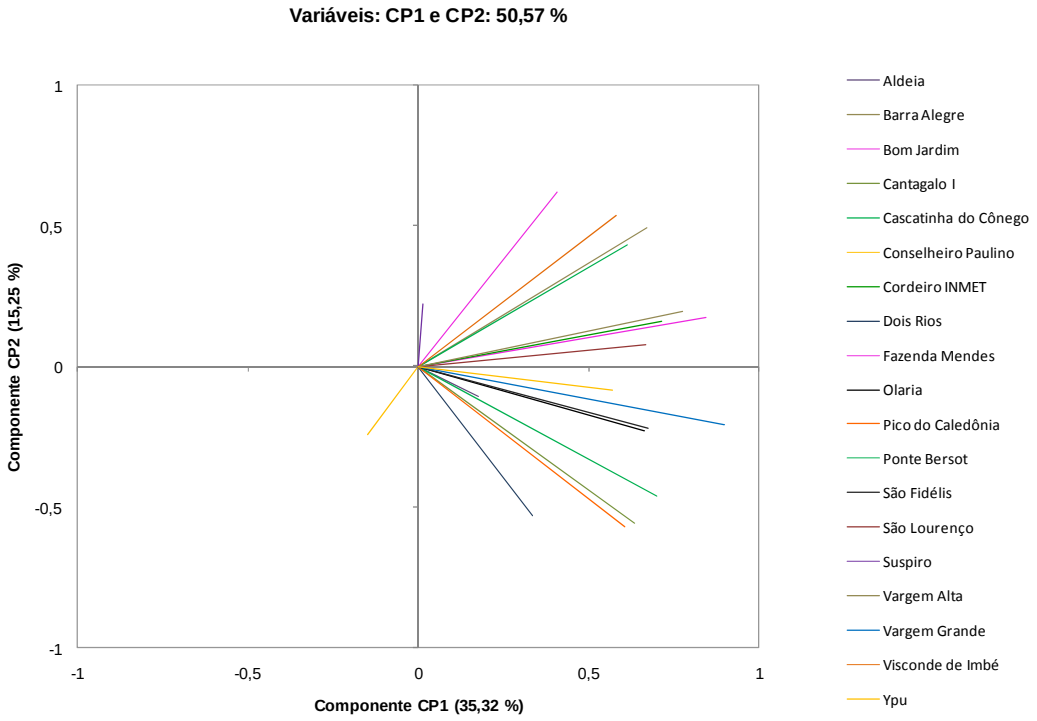


Figura 7.28 – ACP considerando somente os postos pluviométricos (anual)

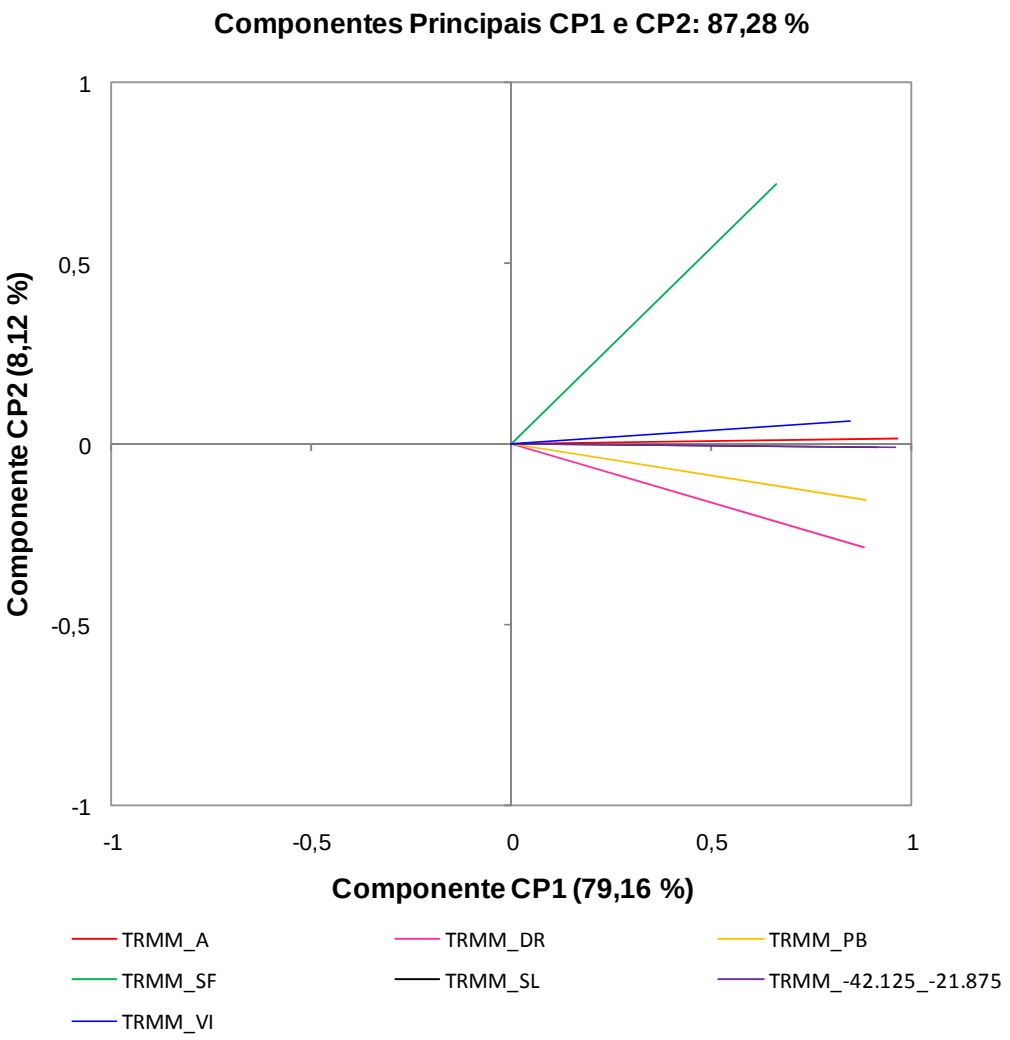


Figura 7.29 – ACP considerando somente as estações virtuais do TRMM (anual)

Considerando a escala anual, observa-se que, para ambas as configurações de análise, postos e TRMM, considerando somente as componentes principais CP1 e CP2, juntas eles conseguem explicar uma porcentagem menor do fenômeno, em relação à escala mensal.

Para ACP dos postos, a comparação mais específica em relação às redundâncias torna-se um pouco mais complicada, uma vez que 6 estações não estão representadas na Figura 7.28. Entretanto, mesmo assim, é possível identificar estações com observações similares devido à proximidade das mesmas:

- Suspiro, Ypu e Olaria;
- Barra Alegre e Fazenda Mendes.

Para a ACP do TRMM anual, os valores acumulados em um ano compensam algumas variações para mais ou menos acima da média, estando os valores anuais das 7 estações virtuais do TRMM mais próximos do que para a ACP mensal.

Sendo assim, a rede atual, com base na análise exploratória por meio do emprego do método de componentes principais, apresenta estações que pouco agregam na explicação da variabilidade da chuva na bacia, sugerindo a possibilidade de remanejamento de alguns postos atualmente instalados. Por outro lado, uma análise mais detalhada precisa ser baseada em diferentes aspectos da bacia como será apresentado no item 7.4.

7.2 Análise Temporal

Neste item, busca-se encontrar o valor da frequência de monitoramento das variáveis hidrometeorológicas nas estações a serem instaladas na bacia do rio Dois Rios, conforme proposta da rede de monitoramento que será definida no item 7.5.

Para a realização da análise através da função de autocorrelação (ACF), é necessário que se disponha de séries de dados medidos em curtos intervalos de tempo, da ordem de minutos. Infelizmente, somente os dados de precipitação das estações do INEA fornecem dados de chuva de 15 em 15 minutos. Portanto, nesta abordagem, será somente avaliada a frequência de monitoramento da precipitação. Para as demais variáveis hidrometeorológicas, serão considerados os tempos já pré-definidos nos sensores de medição dessas variáveis das estações já existentes, conforme apresentado no item 7.5.

A Tabela 7.8 mostra as estações que serão consideradas nesta análise, tendo em vista a disponibilidade de dados no ano de 2011, ressaltando que os períodos de análise correspondem aos períodos definidos no item 7.1.1.1 (diário, 8 dias e mensal). Entretanto as análises somente serão feitas para o período chuvoso, tendo em vista que, no período de estiagem, a quantidade de chuva é muito pequena ou nula, quase sempre equivalente a zero durante os períodos contemplados.

Tabela 7.8 – Estações considerada nos cálculos de ACF

Estação	Latitude (S)	Longitude (W)	Disponibilidade de Dados
Suspiro	-22,28º	-42,54º	01/11/2008 a 31/12/2013
Ypu	-22,30º	-42,53º	01/11/2008 a 31/12/2013
Olaria	-22,31º	-42,54º	01/11/2008 a 31/12/2013
Pico do Caledônia	-22,36º	-42,57º	01/11/2008 a 31/12/2013

Antes de apresentar os gráficos, cabe destacar que foram configurados com limites superiores e inferiores, considerando-se 95% de significância.

Primeiramente, serão apresentadas as autocorrelações para os postos mencionados na Tabela 7.8 a partir da série de dados de 15 em 15 minutos considerando somente o dia 12/01/2011 (Figura 7.30 a Figura 7.33).

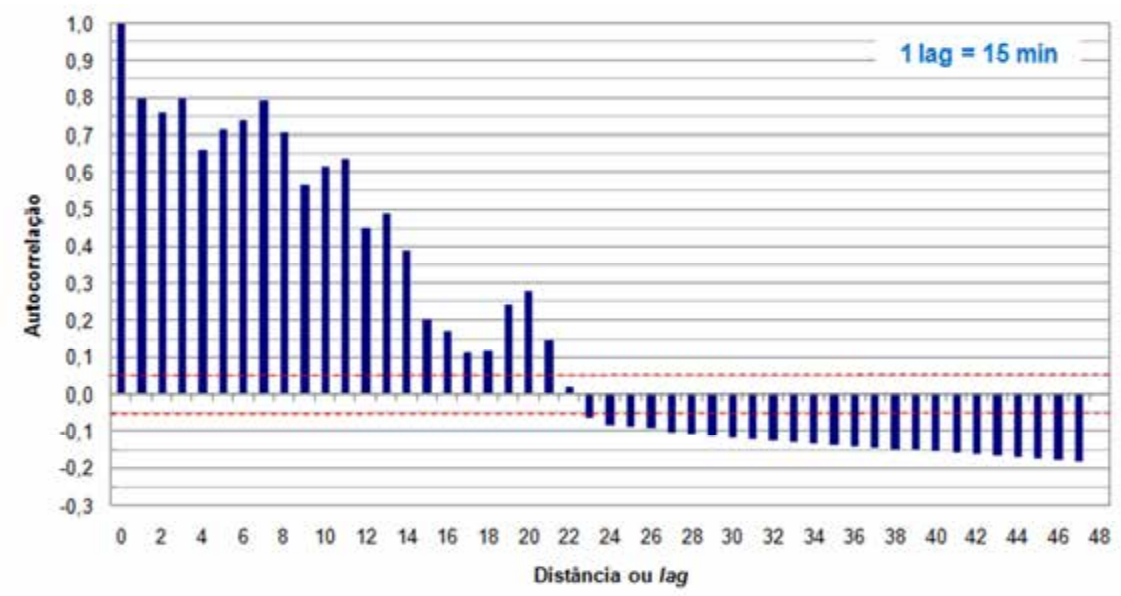


Figura 7.30 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro em 12/01/2011

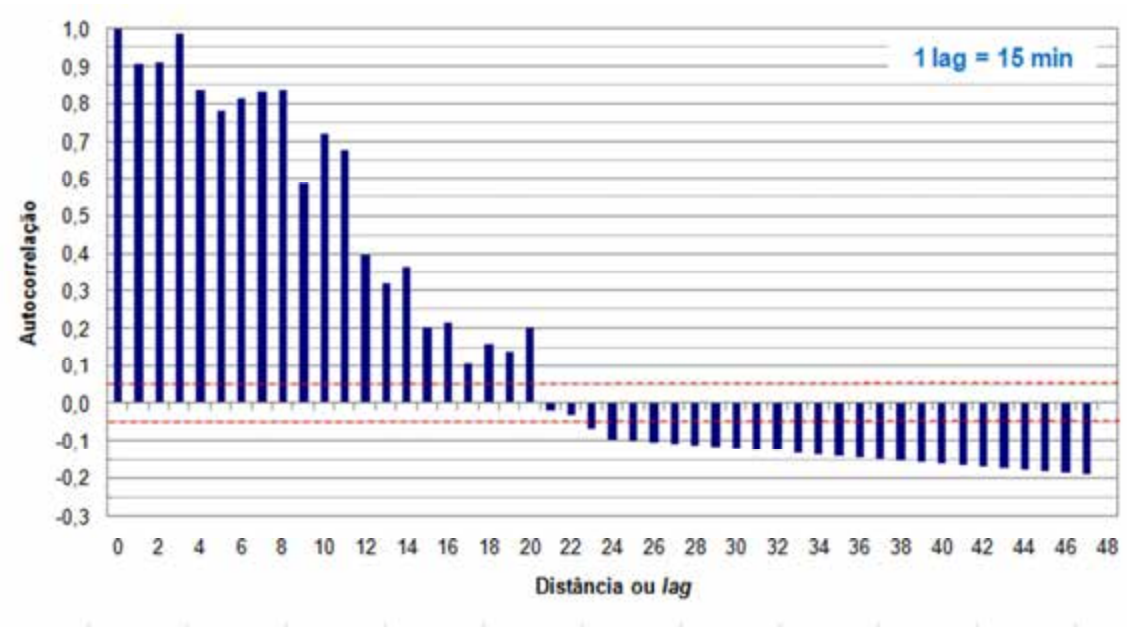


Figura 7.31 – Função de autocorrelação para o posto Ypu em 12/01/2011

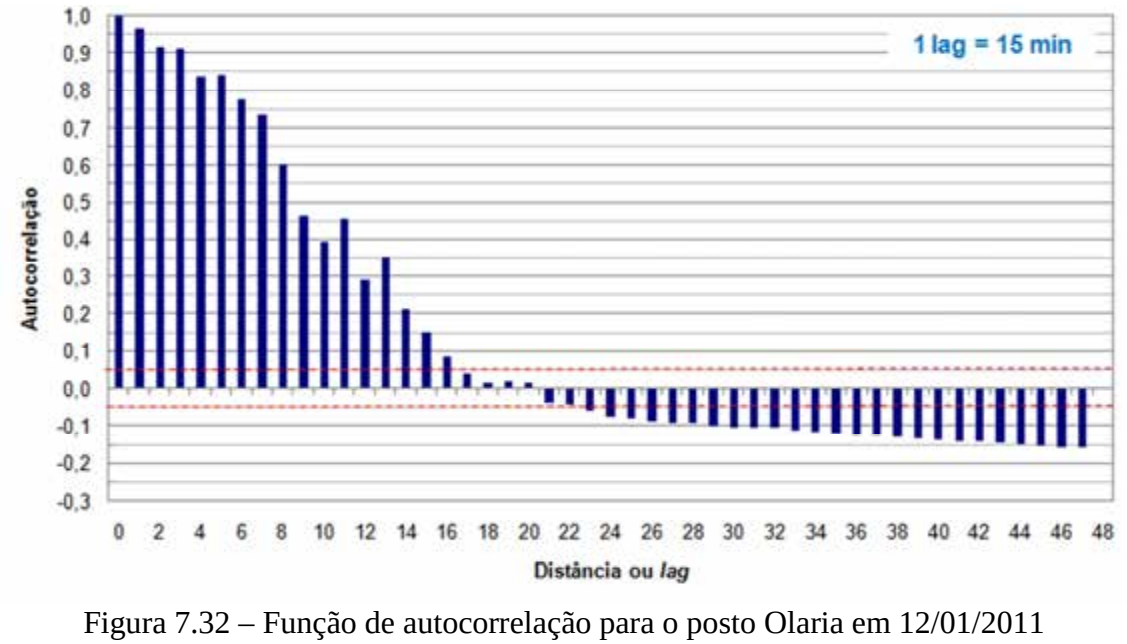


Figura 7.32 – Função de autocorrelação para o posto Olaria em 12/01/2011

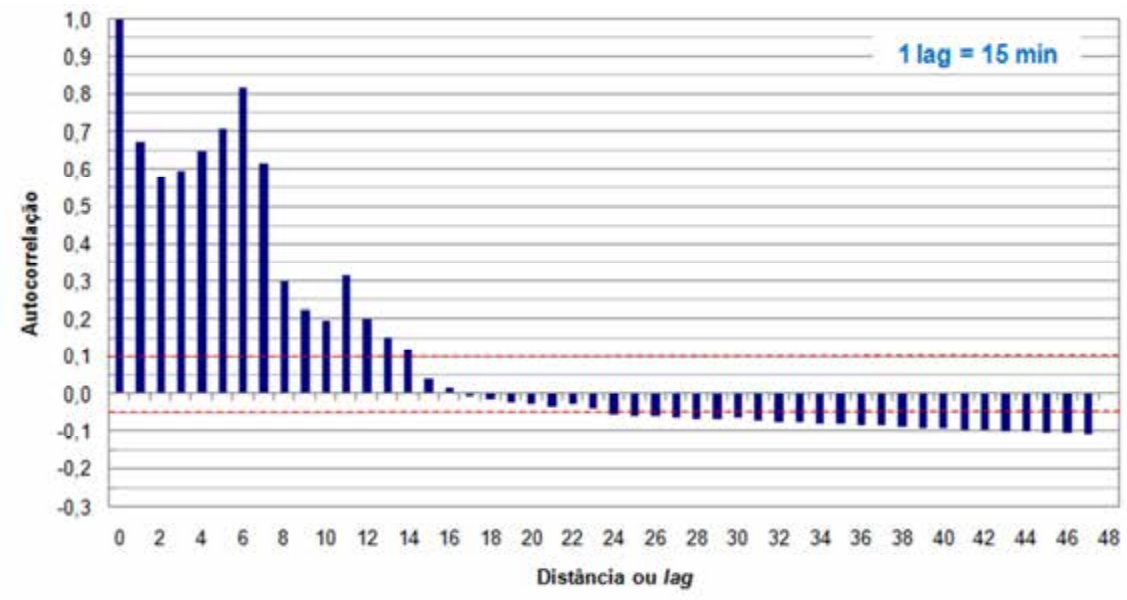


Figura 7.33 – Função de autocorrelação para o posto pluviométrico Pico do Caledônia em 12/01/2011

Da Figura 7.34 até a Figura 7.41, são mostradas as ACFs para as 4 estações consideradas no período de 09/01 a 16/01/2011. Destaca-se que, para cada posto, são apresentados dois (2) gráficos, uma vez que a resolução considerando todas as distâncias (ou *lags*) para o período de 8 dias não apresenta boa visualização.

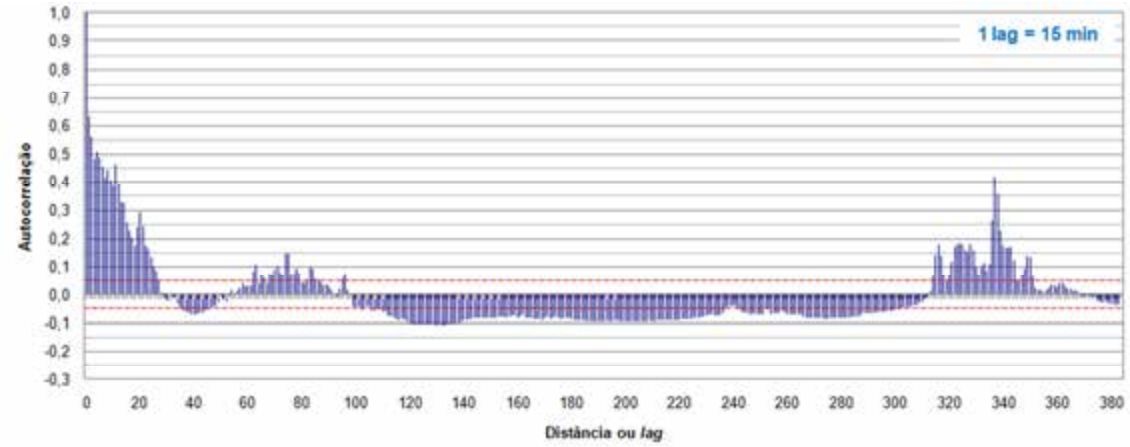


Figura 7.34 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro no período de 09/01/2011 a 16/01/2011

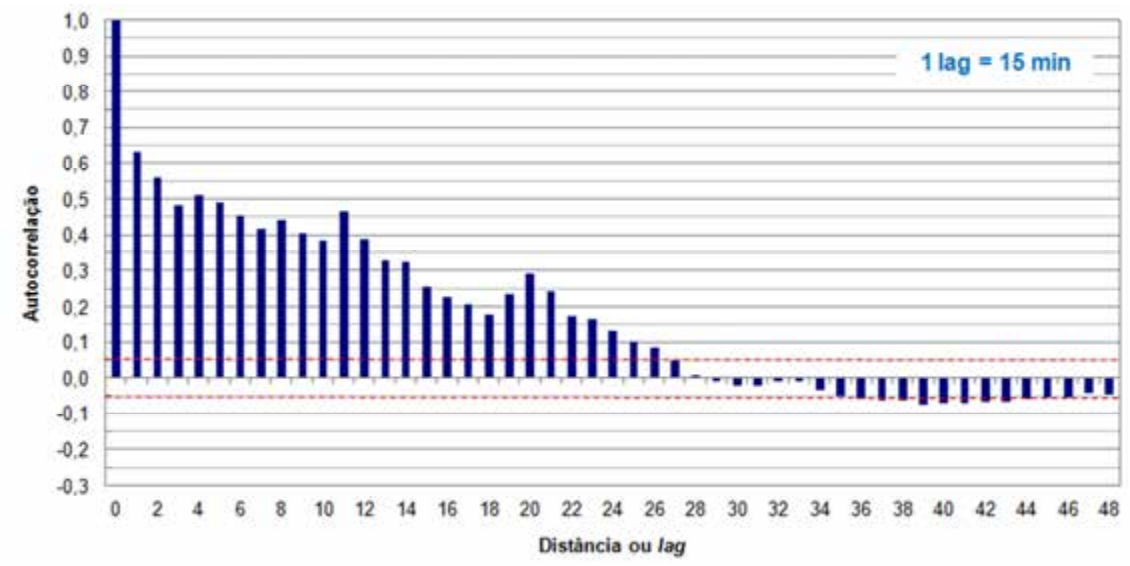


Figura 7.35 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 (somente os 48 primeiros *lags*)

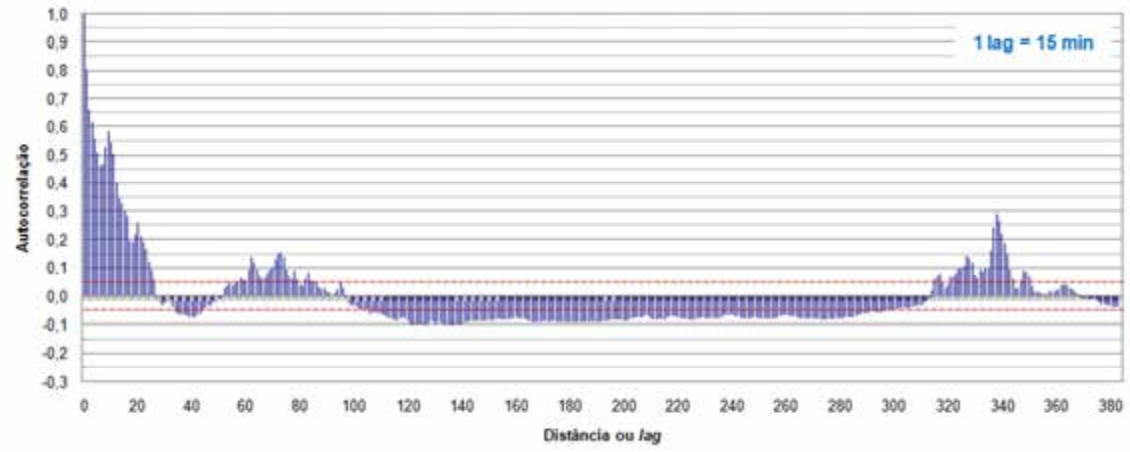


Figura 7.36 – Função de autocorrelação para o posto Ypu no período de 09/01/2011 a 16/01/2011

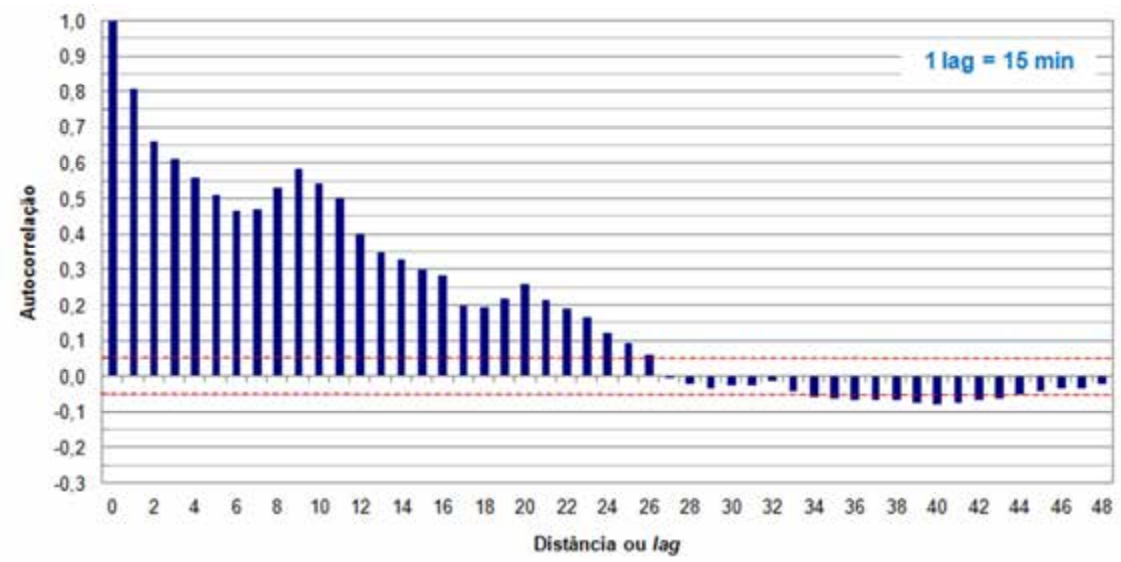


Figura 7.37 – Função de autocorrelação para o posto Ypu no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 (somente os 48 primeiros *lags*)

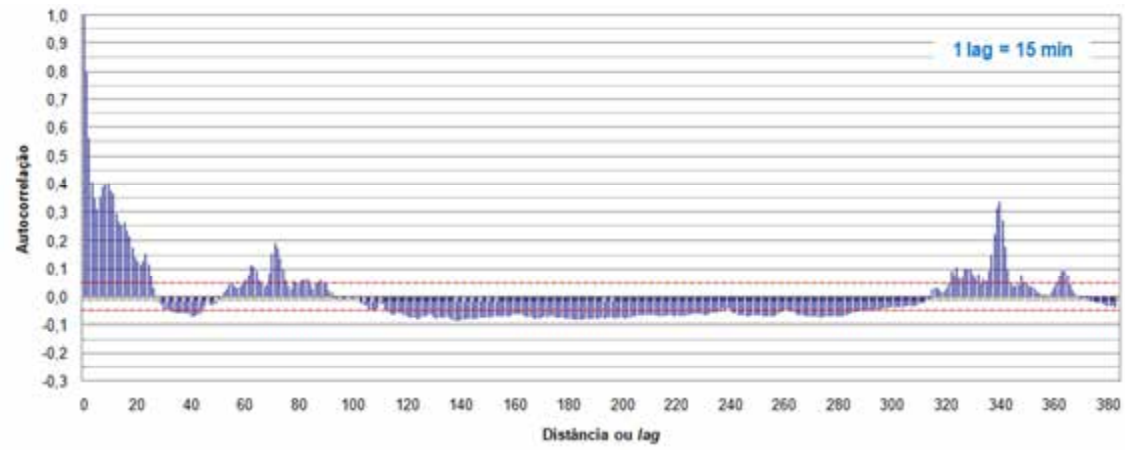


Figura 7.38 – Função de autocorrelação para o posto Olaria no período de 09/01/2011 a 16/01/2011

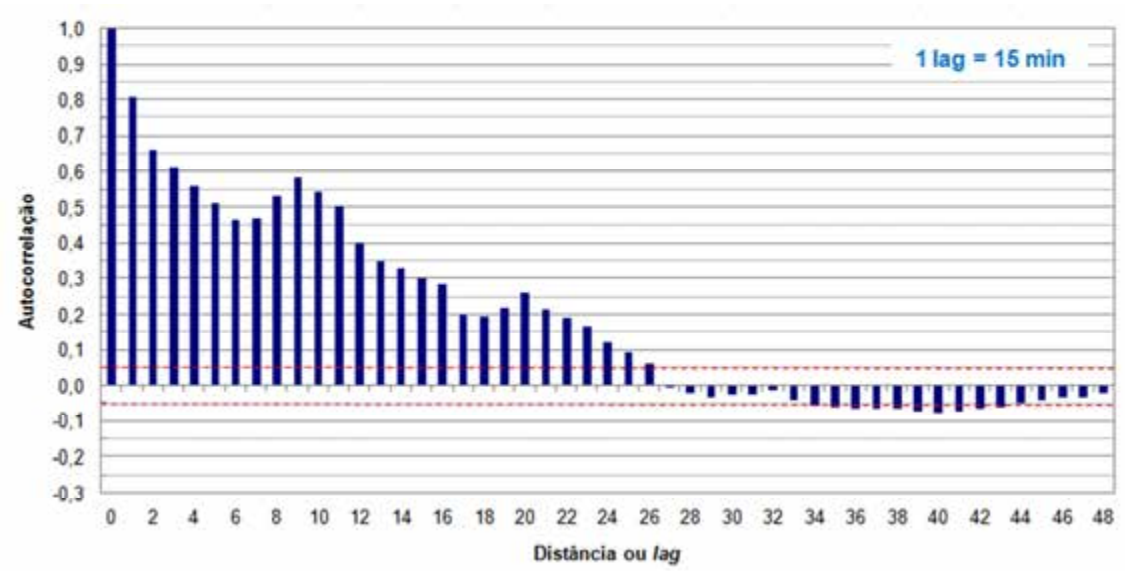


Figura 7.39 – Função de autocorrelação para o posto Olaria no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 (somente os 48 primeiros *lags*)

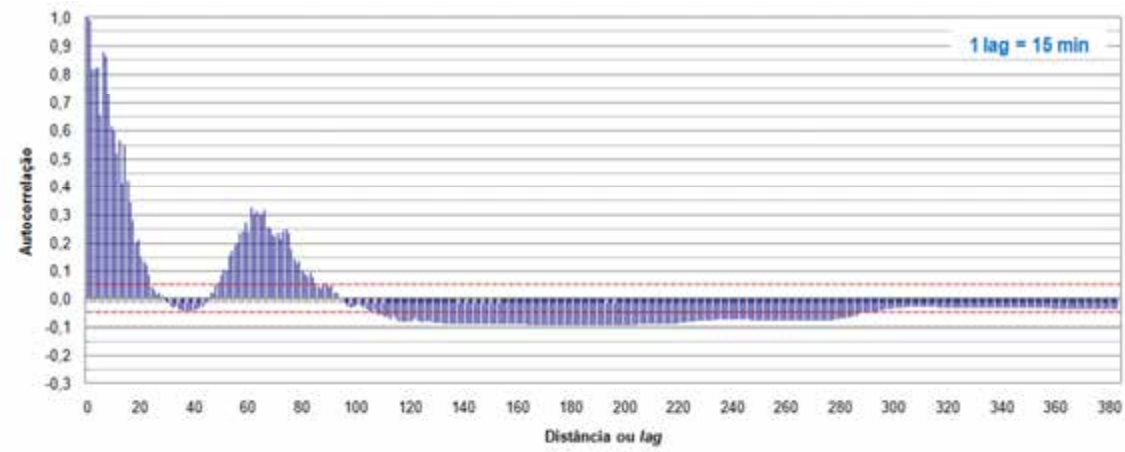


Figura 7.40 – Função de autocorrelação para o posto Pico do Caledônia no período de 09/01/2011 a 16/01/2011

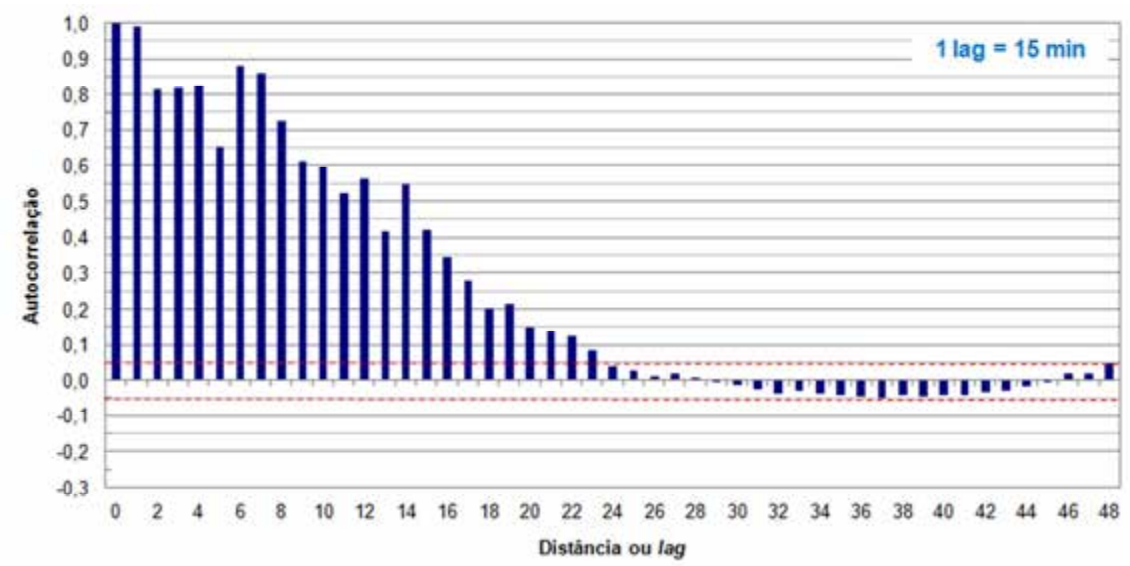


Figura 7.41 – Função de autocorrelação para o posto Pico do Caledônia no período de 09/01/2011 a 16/01/2011 (somente os 48 primeiros *lags*)

Abaixo (Figura 7.42 a Figura 7.47), são apresentadas as funções de autocorrelação considerando todos os registros a cada 15 minutos do mês de janeiro de 2011, apresentando defasagens (*lags*) equivalentes a 380 e 48 para melhor visualização. Ressalta-se que, para a estação Pico do Caledônia, não foi possível calcular a função de autocorrelação devido a inconsistências nos dados do referido mês.

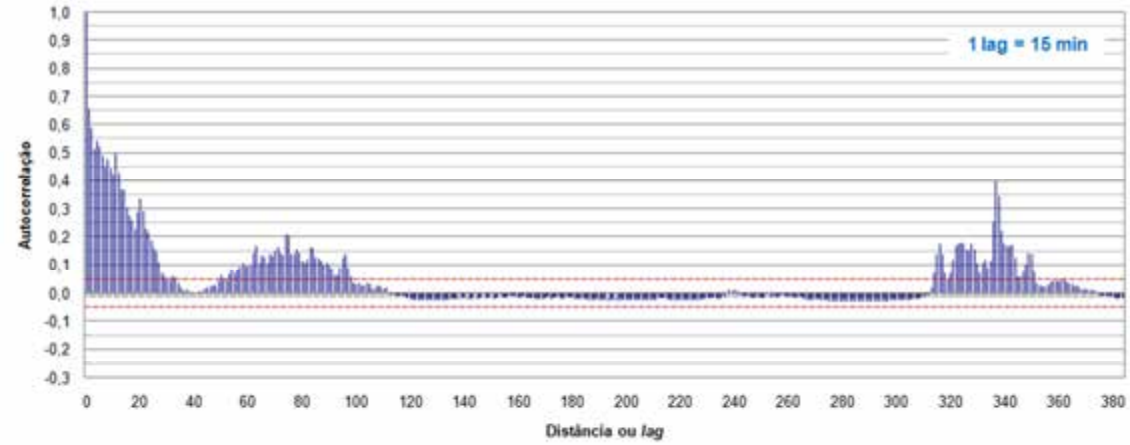


Figura 7.42 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro no período para o mês de jan/2011 (somente os 380 primeiros *lags*)

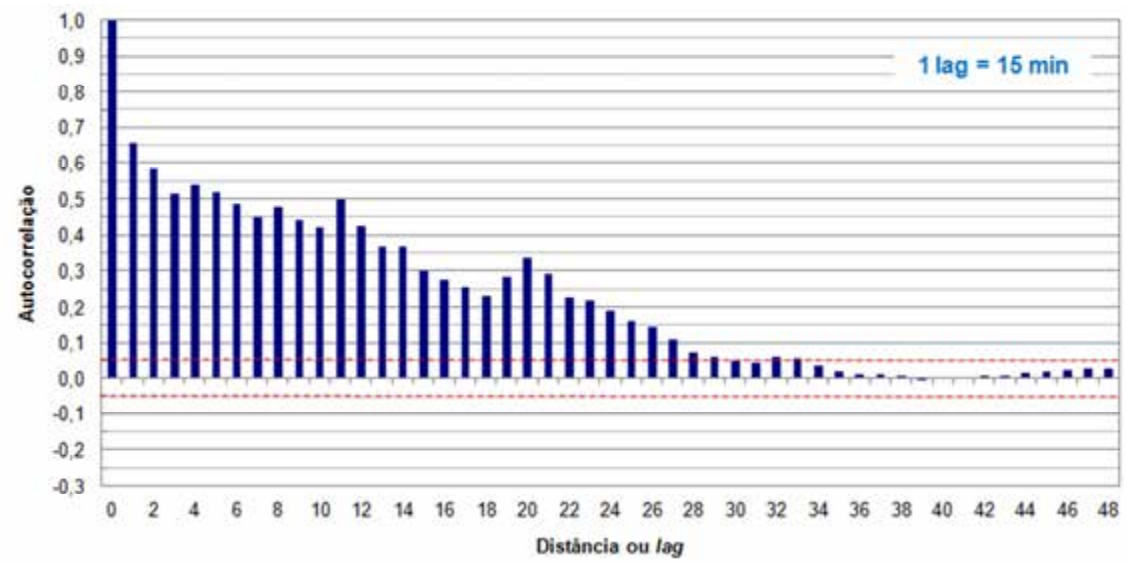


Figura 7.43 – Função de autocorrelação para o posto Suspiro no período para o mês de jan/2011 (somente os 48 primeiros *lags*)

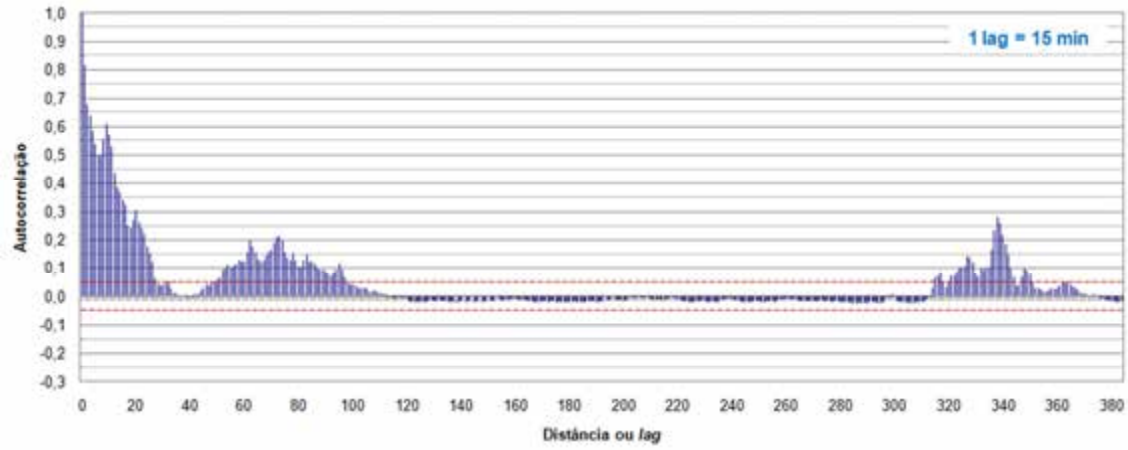


Figura 7.44 – Função de autocorrelação para o posto Ypu no período para o mês de jan/2011 (somente os 380 primeiros *lags*)

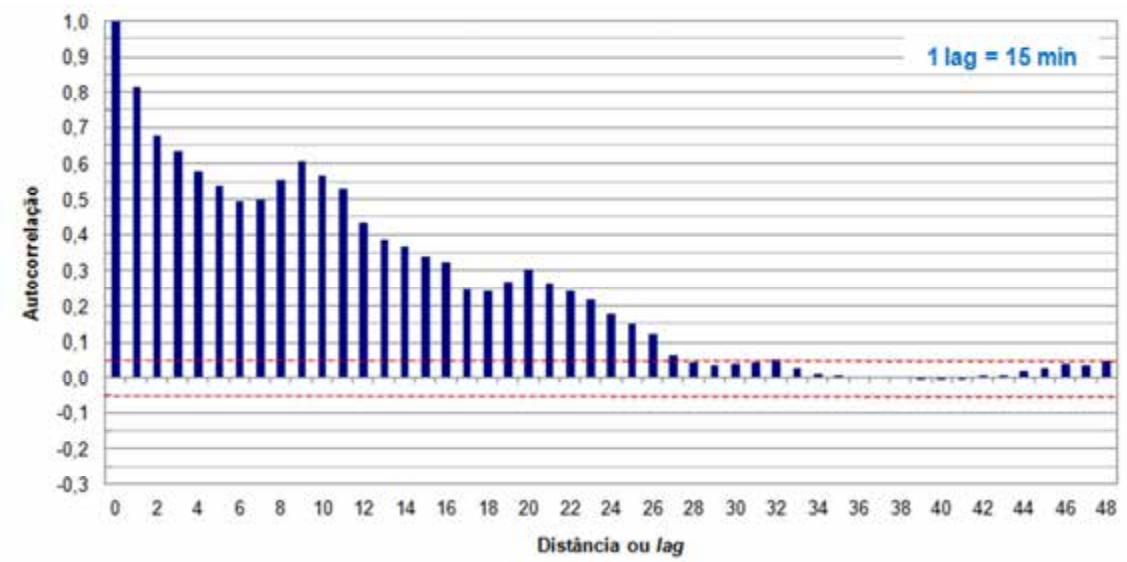


Figura 7.45 – Função de autocorrelação para o posto Ypu no período para o mês de jan/2011 (somente os 48 primeiros *lags*)

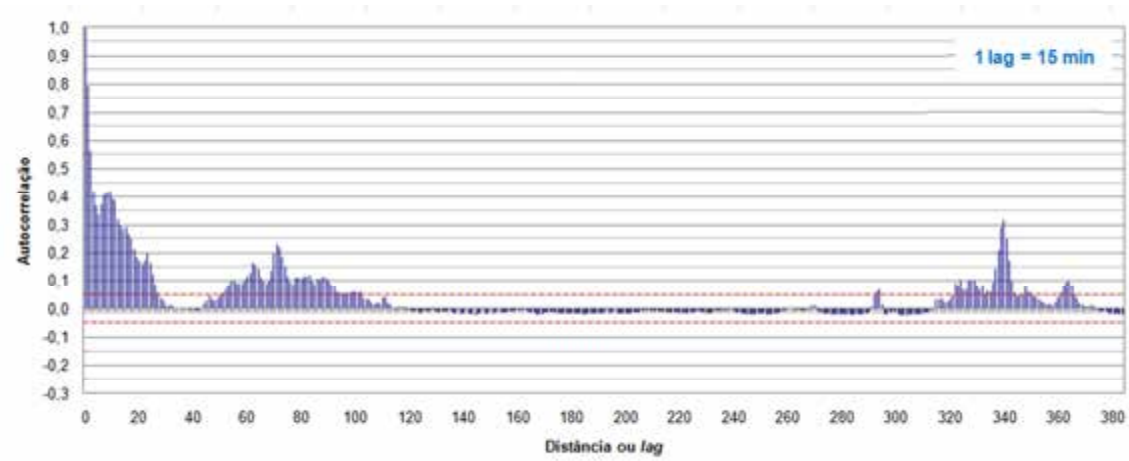


Figura 7.46 – Função de autocorrelação para o posto Olaria no período para o mês de jan/2011 (somente os 380 primeiros *lags*)

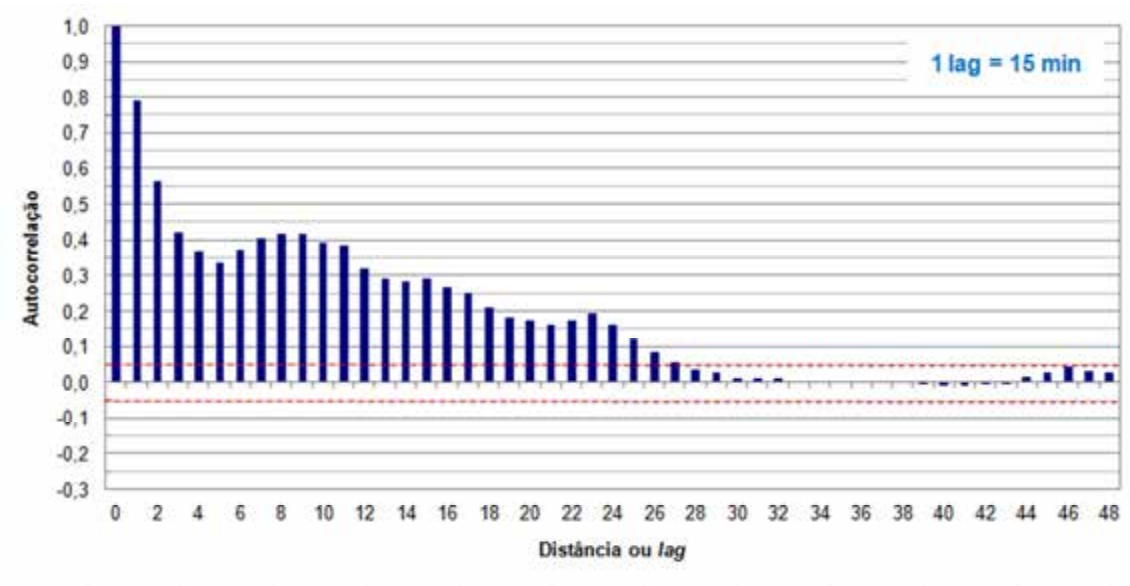


Figura 7.47 – Função de autocorrelação para o posto Olaria no período para o mês de jan/2011 (somente os 48 primeiros *lags*)

A Tabela 7.9 apresenta um resumo dos valores dos *lags* encontrados, identificando a primeira vez em que a função de autocorrelação alcança o valor zero.

Tabela 7.9 – Quadro-resumo do número de *lags* para ACF = 0

Posto Pluviométrico	**Número de lags**		
	Diário	**8 dias**	**Mensal**
Suspiro	23	29	39
Ypu	21	27	35
Olaria	21	27	33
Pico do Caledônia	17	29	-

É possível observar, ao analisar a Tabela 7.9, que o *lag* mínimo encontrado equivale a 17, correspondendo a 4 horas e 15 min. Dessa forma, essa seria a frequência máxima para registro dos dados de precipitação das estações. Assim sendo, o registro horário de dados de precipitação seria suficiente para atender as amostragens de precipitação nas estações.

Observa-se que as distâncias (*lags*) encontradas são da mesma ordem quando comparados os mesmos períodos para os quatro postos, por exemplo, média de 20,5 para o diário, 28,0 para o período de 8 dias e 36,3 para as autocorrelações mensais. No entanto, o fato das distâncias (*lags*) aumentarem conforme o aumento do período de

agregação dos dados de precipitação (1 dia → 8 dias → 30 dias) pode ser justificado pelo fato das correlações mensais serem melhores que as diárias (coeficientes de correlação mais próximos de 1 para correlações mensais), conforme visto em outra análise neste trabalho no item 7.1.2.2.

Conforme já citado anteriormente, serão monitoradas, na bacia, outras variáveis hidrometeorológicas, entretanto, para essas demais variáveis, já que não foi possível analisar o tempo máximo ideal entre uma observação e outra. Assim, serão observadas de acordo com o que já é largamente utilizado nas estações já instaladas. Dessa forma, para as variáveis pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento, os registros serão horários. Ressalta-se, ainda, que, para a pressão, temperatura e umidade relativa do ar, é usual a obtenção de três valores no registro horário: a medição instantânea e os valores máximos e mínimos medidos no período (intervalo de 1 hora).

No caso dos níveis de água, serão monitorados de 15 em 15 minutos, que, para estações automáticas, trata-se do intervalo de amostragem normalmente usado, uma vez que o controle e previsão de cheias também é uma das finalidades desta rede. Vale destacar que, em todas essas estações dotadas de linímetro, serão realizadas campanhas de medição de vazão no mínimo mensais, o que é usual, para que viabilizem o estabelecimento de curvas-chaves (relação nível x vazão), componentes fundamentais para a elaboração de estudos hidrológicos.

7.3 Análise Espacial – Posicionamento das Estações

Os variogramas apresentados aqui foram calculados com base nos dados de precipitação (obtidos para os postos pluviométricos) e de temperatura (obtidos do MODIS), considerando-se um processo estacionário, isto é, assumindo que o valor esperado de todas as características que controlam o comportamento dos fenômenos não sofrem alterações ao longo do tempo.

A análise dos variogramas de precipitação foi realizada para os períodos (chuvoso extremo, chuvoso médio e estiagem extremo) apresentados no item 7.1.1.1 (diários e mensais). Os dados mensais foram analisados considerando valores acumulados.

Além dos períodos indicados, os variogramas (precipitação) foram calculados para diferentes configurações de estações, considerando:

- toda a bacia:
- para a sub-bacia 3:
- região mais povoada ou com a maior concentração de estações (Figura 7.48).

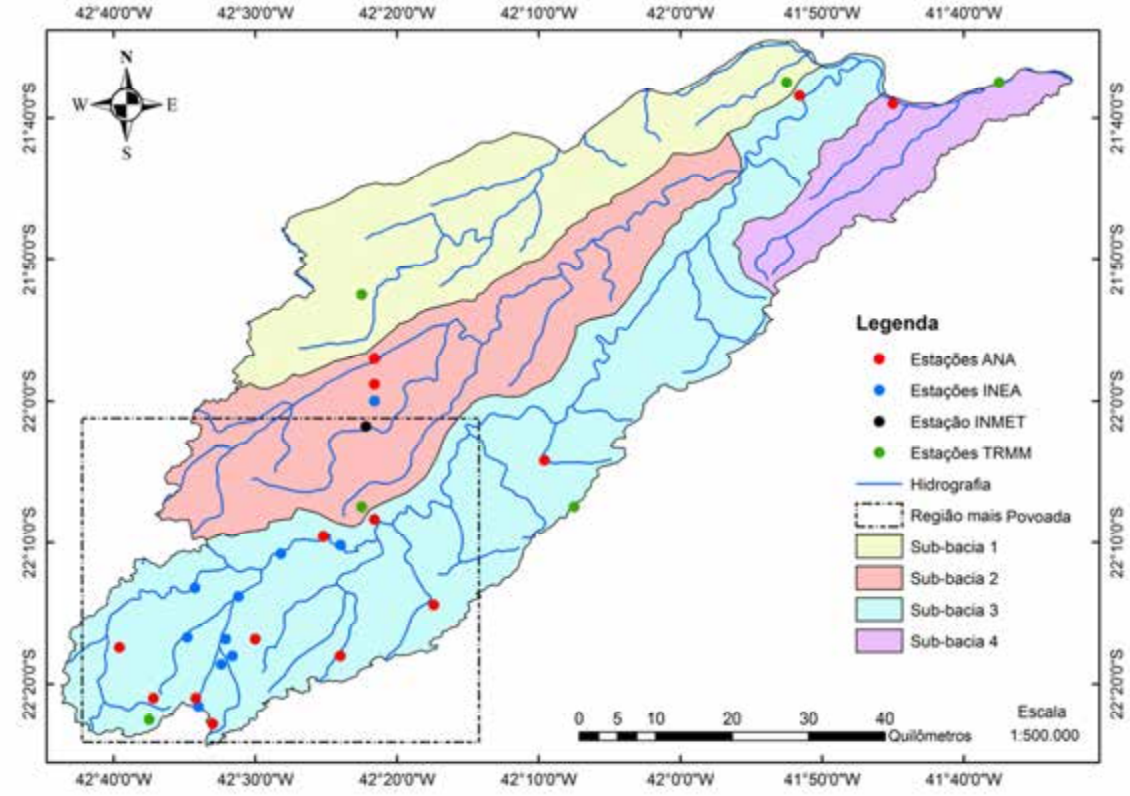


Figura 7.48 – Região mais densamente monitorada ou com maior concentração de estações na bacia do Dois Rios

O fato de considerar somente a região com maior concentração de estações na parte alta da bacia, possivelmente, proporcionará resultados mais consistentes, uma vez que a região de abrangência dessas estações é menor. Pode-se dizer que, nessa região selecionada, a bacia é bem monitorada, o que com certeza auxiliará na decisão final.

A proposta inicial era analisar também os variogramas considerando somente as estações virtuais do TRMM, entretanto, para esse tipo de análise, em virtude da pequena quantidade (no total 7), a construção dos variogramas gerou um número insuficiente de pontos. O mesmo acontece para a construção de variogramas para as outras três sub-bacias. As sub-bacias 1 e 4 possuem 2 estações cada (considerando estações reais e virtuais) e a sub-bacia 2, mesmo tendo um número maior de estações (ao todo 6) que as

outras duas sub-bacias, ao construir os referidos variogramas, os mesmos apresentam 1 ou 2 pares de pontos, o que inviabiliza o ajuste dos modelos variográficos.

Já para os variogramas de temperatura, somente foram considerados os períodos de 8 dias (chuvoso e estiagem), uma vez que as imagens MODIS trabalhadas foram compostas para essa janela de tempo.

Para a análise geoestatística a partir da construção de variogramas, além do variograma omnidirecional, no presente trabalho também foram avaliados os variogramas direcionais para as direções 0°, 45º, e 90º, com ângulo de tolerância de 45º. Entretanto, ao realizar as análises variográficas, foi constatado que não existe anisotropia nem nos dados de precipitação nem nos de temperatura, o que significa a inexistência de uma direção preferencial. Dessa forma, os variogramas direcionais não foram apresentados, exceto para a simulação do período chuvoso (diário), considerando toda a bacia, apenas para ilustrar que não é significativa a anisotropia nos fenômenos estudados.

Destaca-se que a distância *h* máxima de todos os variogramas construídos e apresentados neste item foi equivalente a metade da distância entre o par de estações mais distantes, que é variável para cada região considerada.

Sendo assim, foram elaborados 23 variogramas, dispostos em 19 gráficos para precipitação e em 2 gráficos para temperatura.

7.3.1 Precipitação

Nesta seção, serão apresentados os variogramas elaborados com os dados de precipitação nas diferentes configurações apresentadas anteriormente, ressaltando que os modelos foram ajustados segundo o melhor auto-ajuste.

Período Chuvoso Extremo

Inicialmente, serão apresentados os variogramas obtidos considerando os postos pluviométricos de toda a bacia, na escala de dados diários (12/01/2011), conforme mostram a Figura 7.49 e a Figura 7.50.

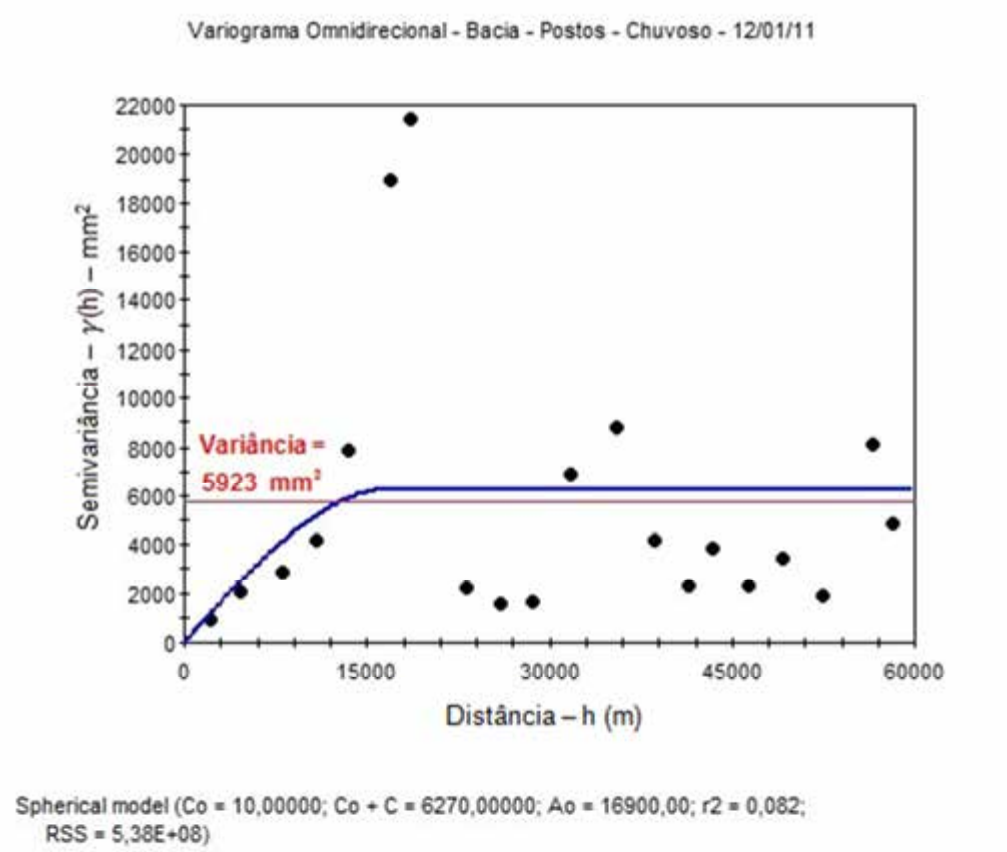


Figura 7.49 – Variograma omnidirecional para toda a bacia – período chuvoso extremo – diário (12/01/2011)

Observando o gráfico acima, obteve-se o ajuste de um modelo esférico para o variograma omnidirecional com alcance de 16,9 km. O coeficiente *CEP* para o variograma omnidirecional é igual a 0,002, indicando alta dependência espacial.

Os dois pontos mais distantes na parte superior do variograma acima correspondem aos pares de pontos dos variogramas com base nas estações Vargem Alta e Fazenda Mendes, uma vez que os valores de precipitação diária para essas estações estão muito acima da média de todas as estações (107,1 mm), equivalentes a 271,5 mm e 225,4 mm, respectivamente. Essa observação poderá ser identificada nas demais análises variográficas quando considerada a escala diária.

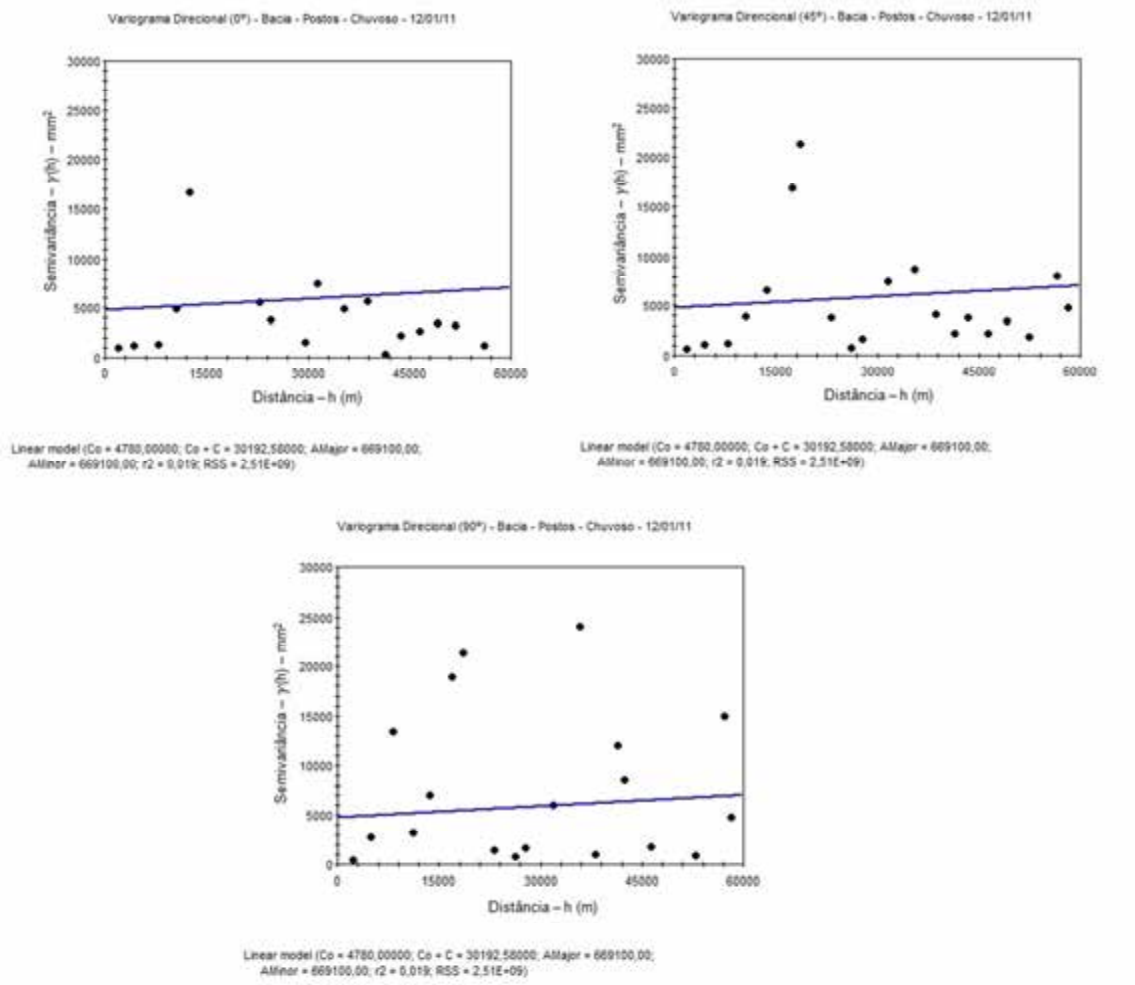


Figura 7.50 – Variogramas direcionais (0º, 45º e 90º) para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso extremo – diário (12/01/2011)

Ao observar os variogramas direcionais, é possível notar que eles são muito ruidosos, além de não ser possível realizar o ajuste variográfico através de modelos com patamar, tendo sido ajustados pelo modelo linear. Desse ponto em diante, somente serão apresentados os variogramas omnidirecionais.

Abaixo, é apresentado o variograma (Figura 7.51) obtido considerando os postos de toda a bacia para escala de dados mensais (jan/2011).

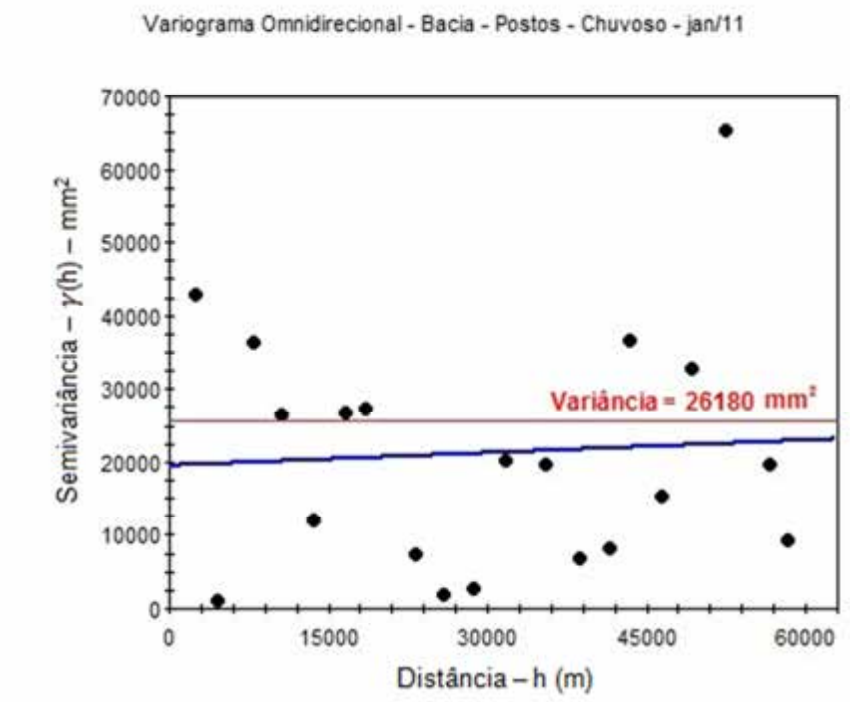


Figura 7.51 – Variograma omnidirecional para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso extremo – mensal (jan/2011)

Analisando o último gráfico apresentado, nota-se que o variograma omnidirecional foi ajustado segundo o modelo linear. Para esse modelo, sem patamar, não é possível analisar o modelo através do cálculo do CEP. Além disso, como o alcance é dado como o ponto máximo onde existe correlação, no caso do modelo linear, o alcance é definido a partir dos pontos mais longínquos do ajuste em relação à equação ajustada. Sendo assim, para o variograma omnidirecional considerando apenas os postos pluviométricos do período chuvoso para o mês de janeiro de 2011, tem-se 58,1 km.

O variograma para o dia 12/01/2011, na sub-bacia 3, considerando apenas os postos nessa área, é apresentado na Figura 7.52.

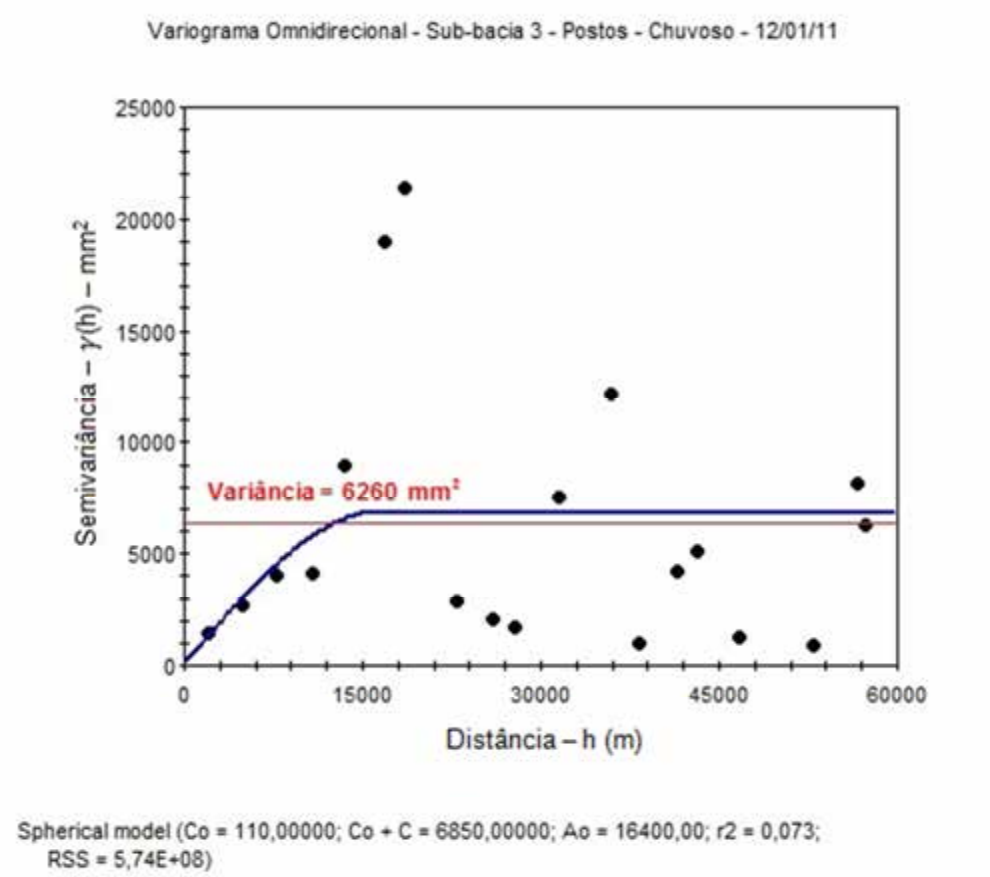


Figura 7.52 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso extremo – diário (12/01/2011)

Observando a Figura 7.52, verifica-se que o modelo ajustado foi o esférico, sendo o alcance encontrado de 16,4 km. Em relação ao CEP, foi encontrado o valor de 0,016, indicando que a componente aleatória é pequena.

O variograma para o mês de jan/2011, na sub-bacia 3 pode ser verificado na Figura 7.53.

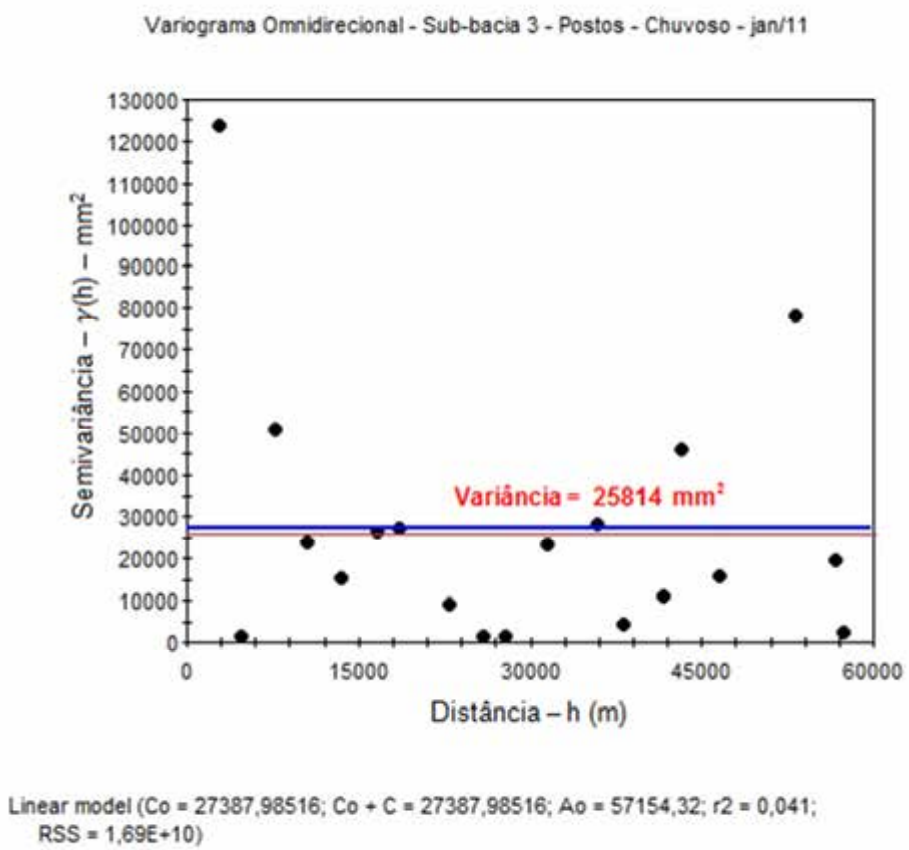


Figura 7.53 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso extremo – mensal (jan/2011)

Assim como para o caso do modelo linear, o alcance para o modelo aleatório é calculado da mesma maneira. Nota-se, na Figura 7.53, um alcance de 57,2 km para o variograma omnidirecional, ajustado pelo modelo aleatório.

Para finalizar a apresentação dos variogramas do período chuvoso extremo, serão mostrados os gráficos obtidos para a região mais densamente ocupada, começando pelos dados do dia 12/01/2011 (Figura 7.54).

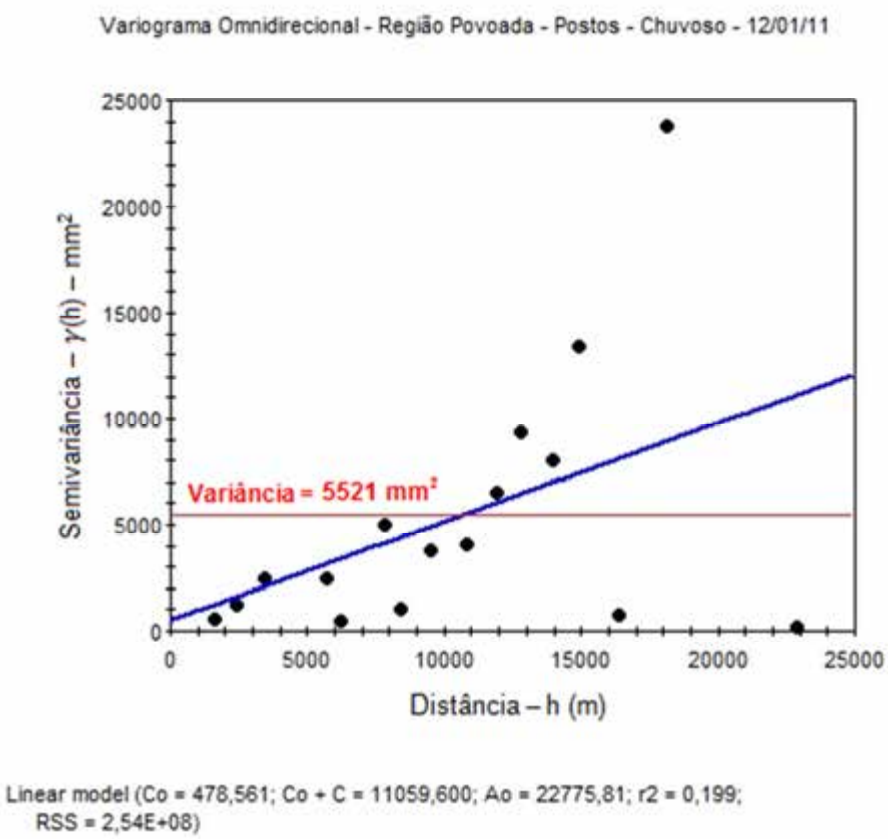


Figura 7.54 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período chuvoso extremo – diário (12/01/2011)

O variograma omnidirecional foi ajustado segundo o modelo linear com alcance de 22,8 km.

A seguir (Figura 7.55), será apresentado o variograma construído para o mês de janeiro de 2011, considerando a região mais densamente ocupada.

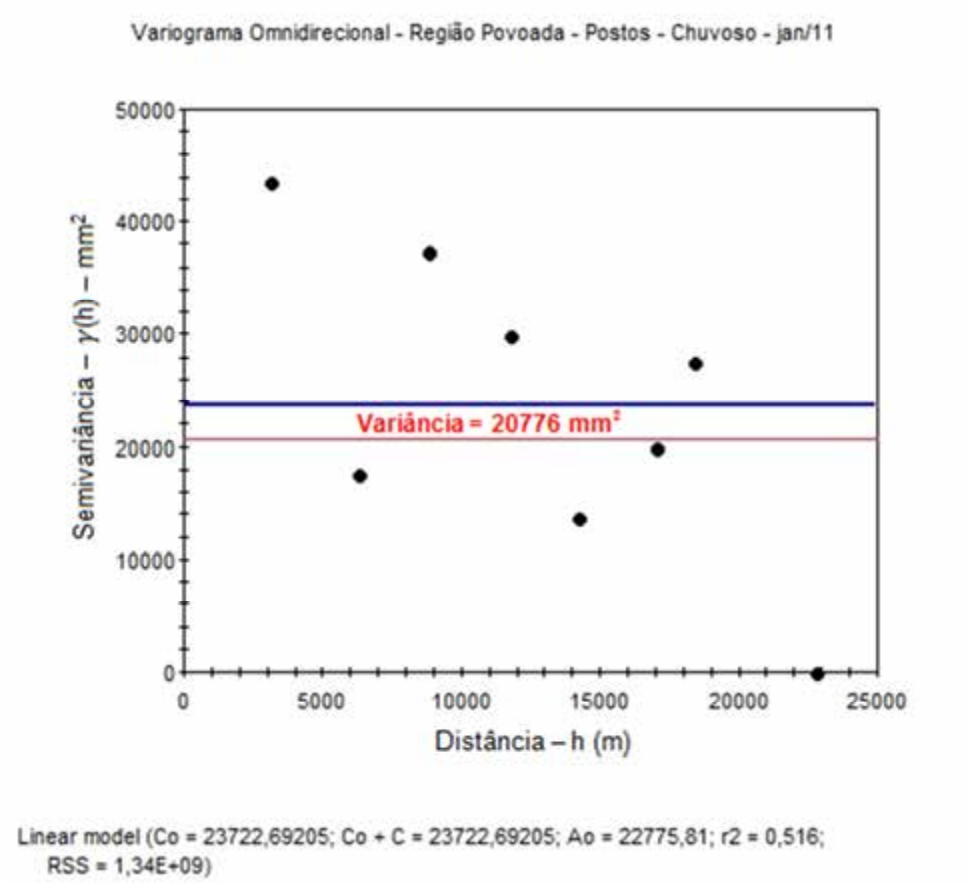


Figura 7.55 – Variograma omnidirecional para a região povoada considerando somente os postos – período chuvoso extremo – mensal (jan/2011)

Nesse último variograma (Figura 7.55), nota-se que o omnidirecional foi ajustado de acordo com o modelo aleatório, atingindo um alcance de 22,8 km.

<u>Período Chuvoso Médio</u>

A seguir, são apresentados os variogramas obtidos considerando os postos pluviométricos de toda a bacia, na escala de dados diários (26/01/2013), para o período chuvoso médio, conforme mostra a Figura 7.56.

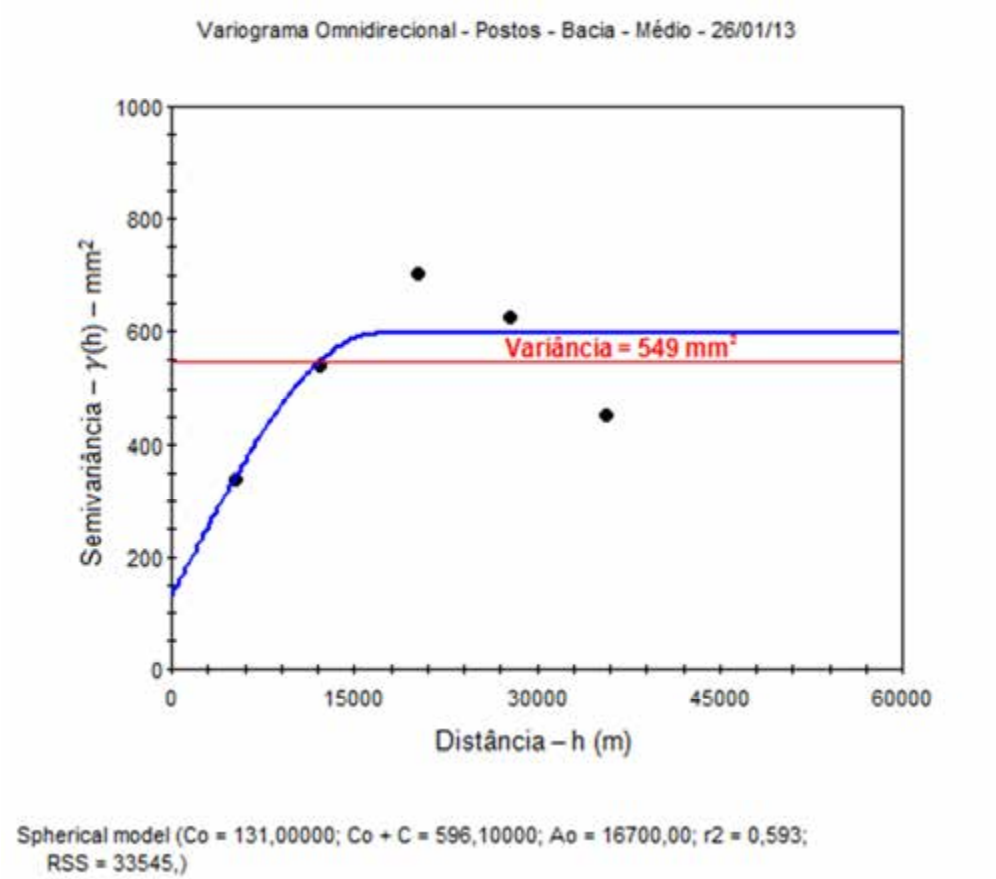


Figura 7.56 – Variograma omnidirecional para toda a bacia – período chuvoso médio – diário (26/01/2013)

Observando a Figura 7.56, obteve-se o ajuste de um modelo esférico para o variograma omnidirecional com alcance de 16,7 km. O coeficiente *CEP* para esse variograma é igual a 0,220, indicando alta dependência espacial dos dados.

Abaixo, é apresentado o variograma (Figura 7.57) obtido considerando os postos de toda a bacia para escala de dados mensais (jan/2013).

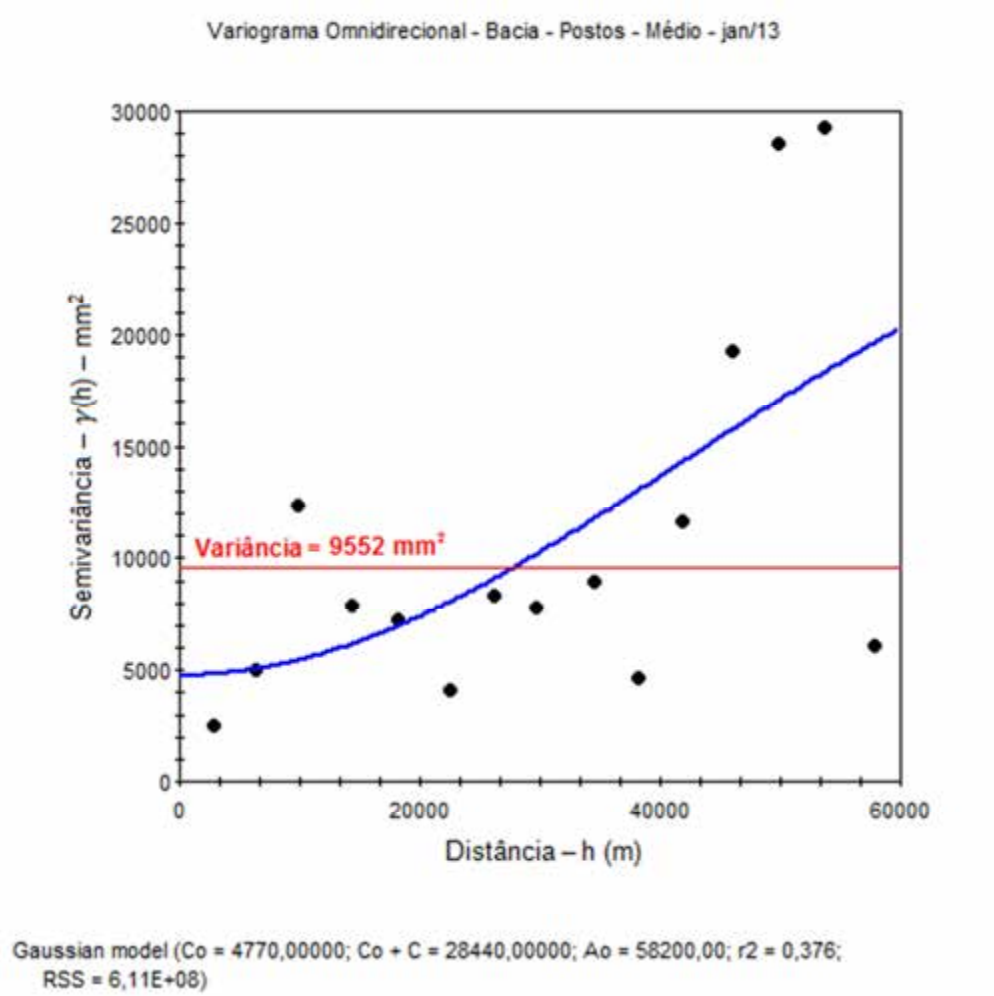


Figura 7.57 – Variograma omnidirecional para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso médio – mensal (jan/2013)

Analisando o último gráfico apresentado (Figura 7.57), nota-se que o variograma omnidirecional foi ajustado segundo o modelo gaussiano, com alcance equivalente a 58,2 km e CEP igual a 0,168, indicando também alta dependência espacial, o que significa que a componente aleatória é pequena nesse caso.

O variograma para o dia 26/01/2013, na sub-bacia 3, considerando apenas os postos nessa área, é apresentado na Figura 7.58.

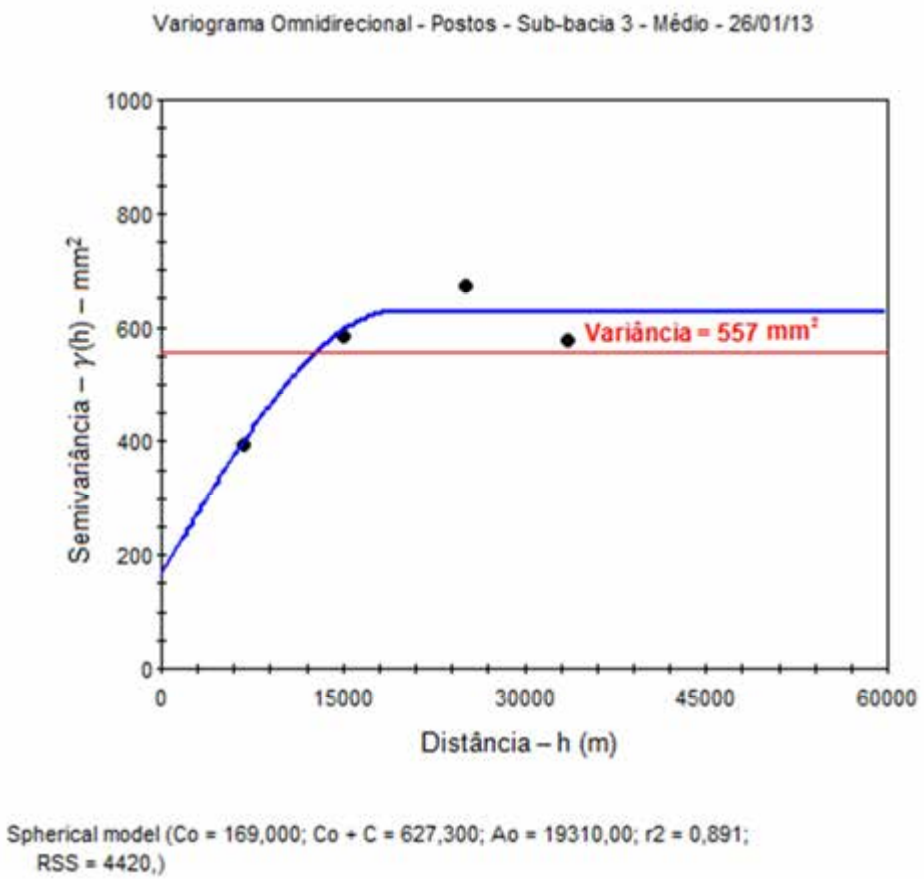


Figura 7.58 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso médio – diário (26/01/2013)

Observando a Figura 7.58, verifica-se que o modelo ajustado foi o esférico, sendo o alcance encontrado equivalente a 19,3 km. Em relação ao CEP, obteve-se o valor de 0,269, indicando dependência espacial moderada.

O variograma para o mês de jan/2013, na sub-bacia 3 pode ser verificado na Figura 7.59.

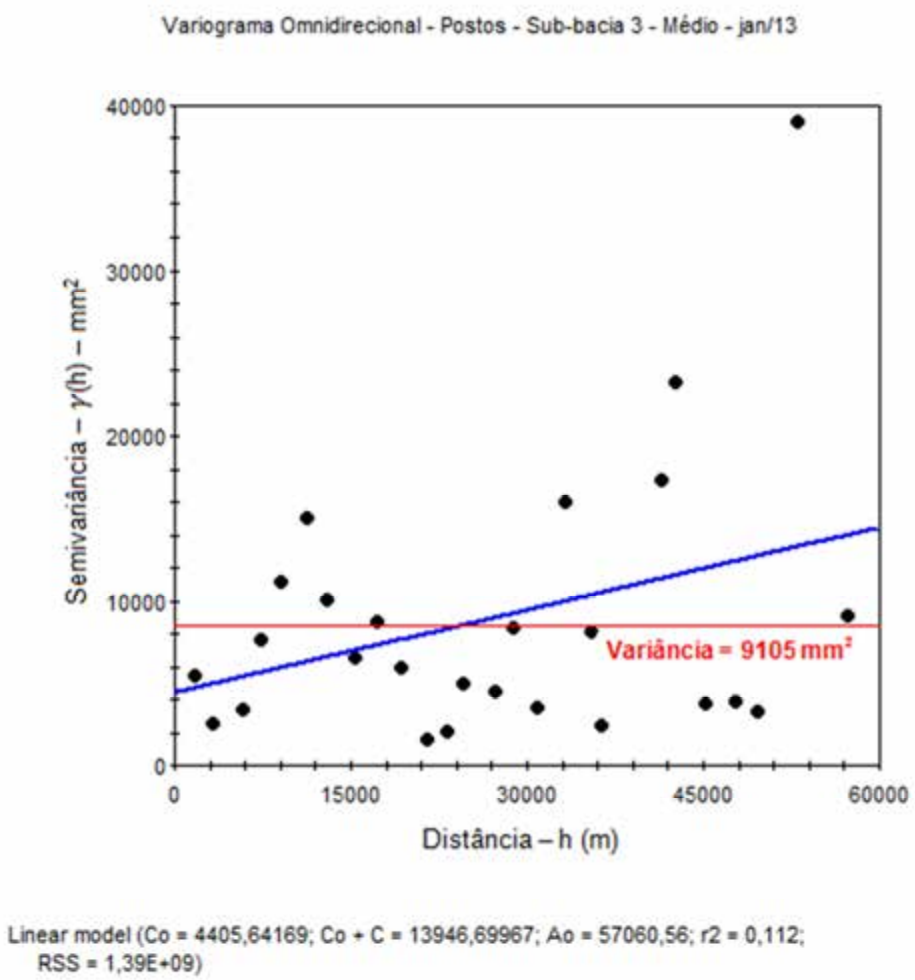


Figura 7.59 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período chuvoso médio – mensal (jan/2013)

O variograma omnidirecional para o mês de jan/2013 considerando a sub-bacia 3 foi ajustado pelo modelo linear com alcance de 57,1 km.

Para finalizar a apresentação dos variogramas do período chuvoso médio, serão mostrados os gráficos obtidos para a região mais povoada, começando pelos dados do dia 26/01/2013 (Figura 7.60).

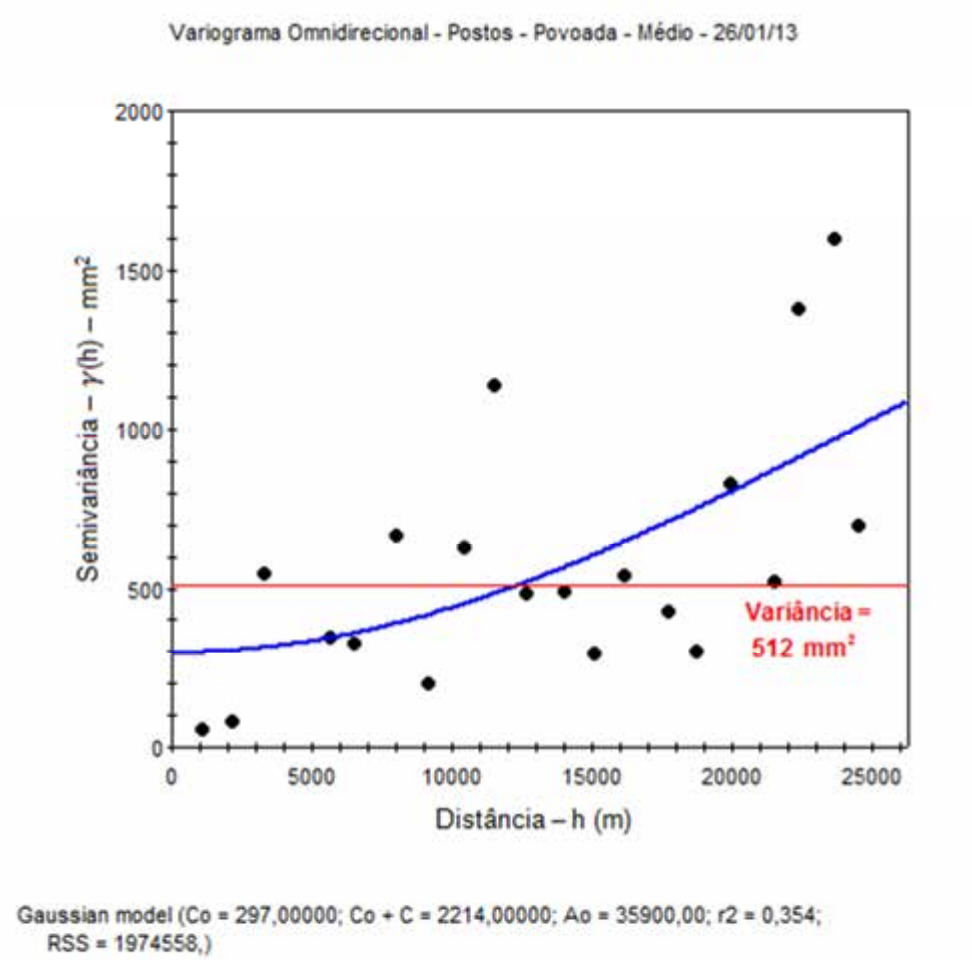


Figura 7.60 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período chuvoso médio – diário (26/01/2013)

O variograma omnidirecional foi ajustado segundo o modelo gaussiano com alcance de 35,9 km e CEP igual a 0,134, o que indica alta dependência espacial dos dados de chuva.

Na Figura 7.61, será apresentado o variograma construído para o mês de janeiro de 2013, considerando a região mais povoada.

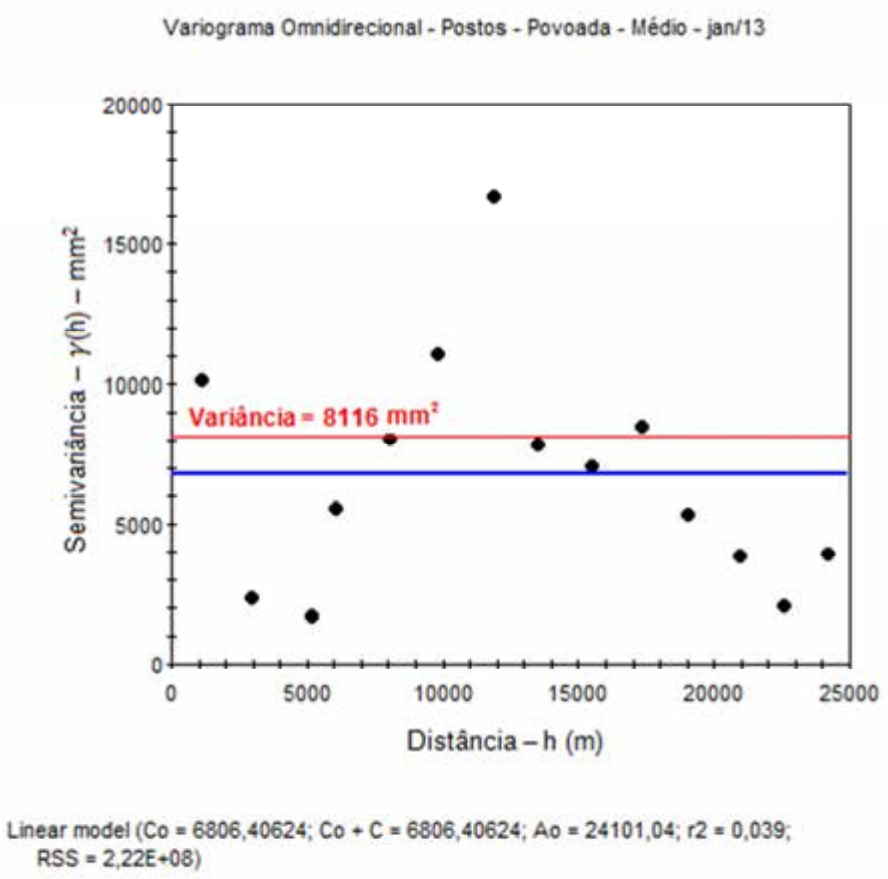


Figura 7.61 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período chuvoso médio – mensal (jan/2013)

Nesse último variograma (Figura 7.61), nota-se que o omnidirecional foi ajustado de acordo com o modelo aleatório, atingindo um alcance de 24,1 km.

Período de Estiagem

Serão apresentados agora os variogramas obtidos para o período de estiagem, tendo início com os resultados obtidos para toda a bacia, considerando os dados do dia 21/07/2011, de acordo com a Figura 7.62.

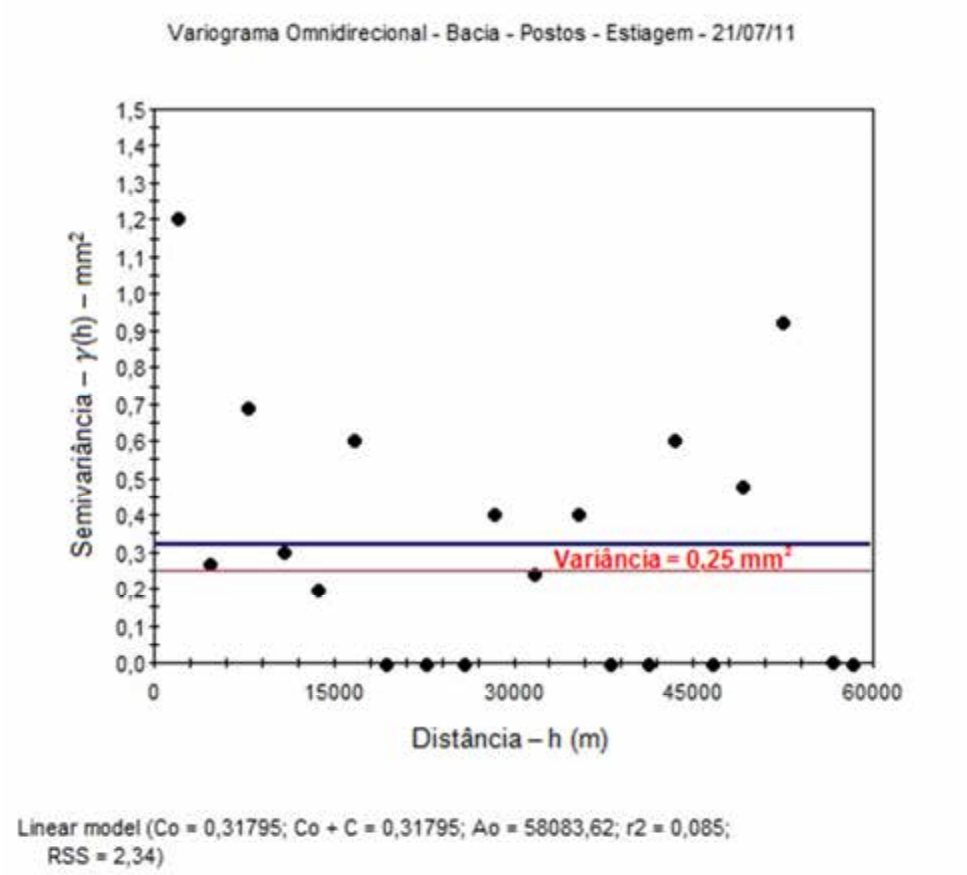


Figura 7.62 – Variograma omnidirecional para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período de estiagem – diário (21/07/2011)

O mesmo aconteceu para o variograma da Figura 7.62, que foi ajustado pelo modelo aleatório, com alcance equivalente a 58,1 km.

Abaixo, é mostrado o variograma construído considerando os postos pluviométricos de toda a bacia, para o mês de jul/2011, de acordo com a Figura 7.63.

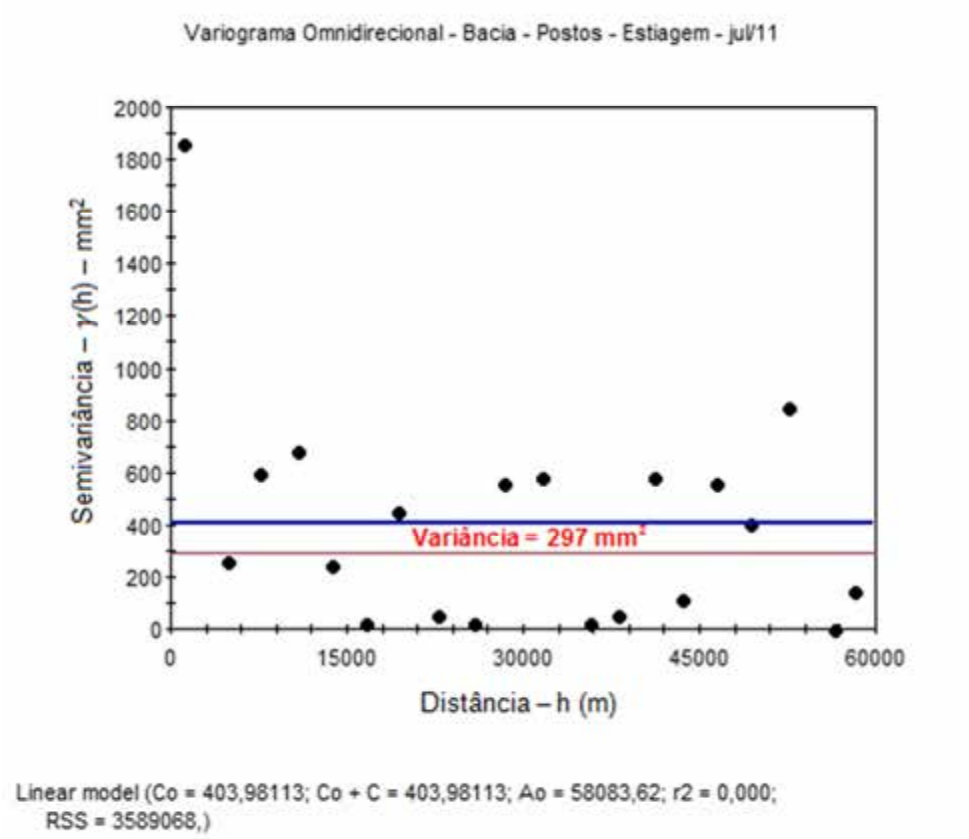


Figura 7.63 – Variograma omnidirecional para toda a bacia considerando somente os postos pluviométricos – período de estiagem – mensal (jul/2011)

O gráfico do variograma omnidirecional (Figura 7.63) foi ajustado pelo modelo aleatório, obtendo-se um alcance de 58,1 km.

Na Figura 7.64, é mostrada a análise geoestatística por meio da construção do variograma para a sub-bacia 3, considerando os dados do dia 21/07/2011.

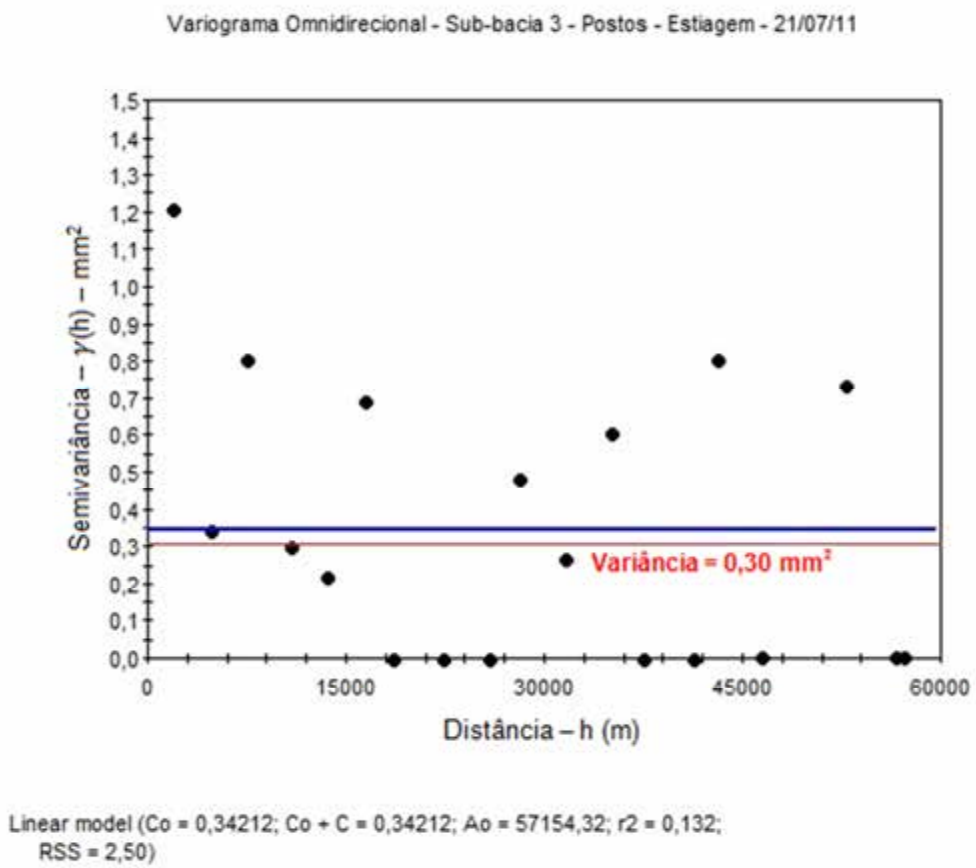


Figura 7.64 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período de estiagem – diário (21/07/2011)

O modelo ajustado ao variograma omnidirecional (Figura 7.64) foi o aleatório, com alcance de 57,2 km.

Na Figura 7.65, é apresentado o variogramas para o mês de jul/2011, com os dados dos postos pluviométricos situados na sub-bacia 3.

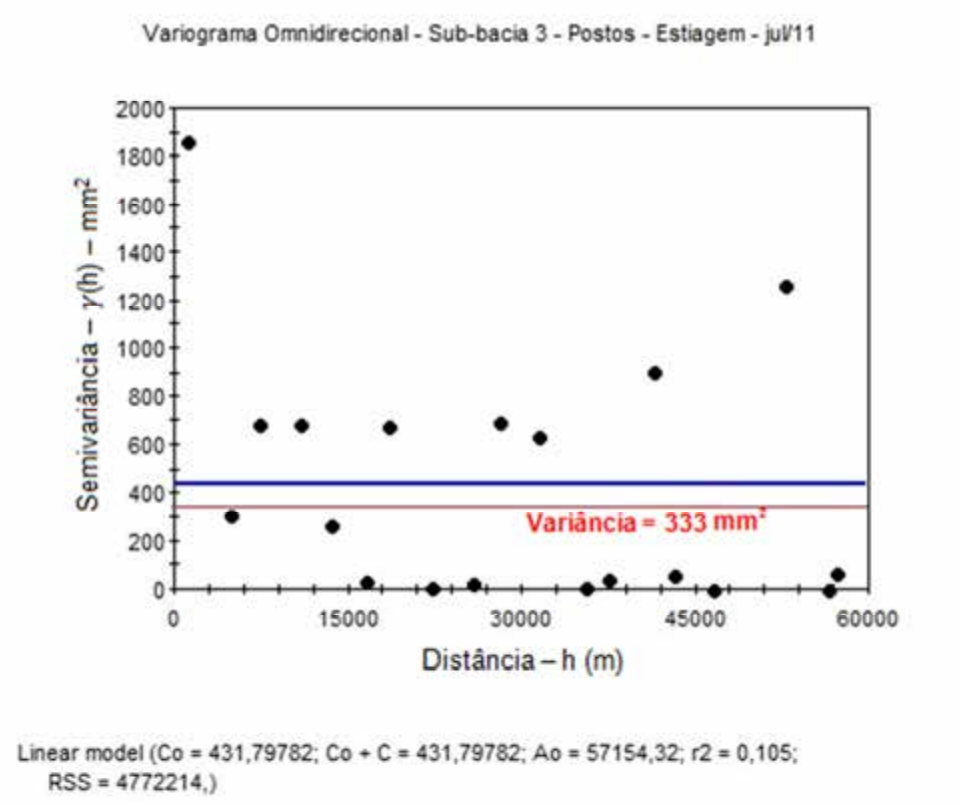


Figura 7.65 – Variograma omnidirecional para a sub-bacia 3 considerando somente os postos pluviométricos – período de estiagem – mensal (jul/2011)

O gráfico da Figura 7.65 foi ajustado pelo modelo aleatório. O alcance encontrado foi de 57,2 km.

Finalizando a apresentação dos variogramas do período de estiagem, serão apresentados os gráficos obtidos para a região mais povoada, começando com os resultados para os dados do dia 21/07/2011, de acordo com a Figura 7.66.

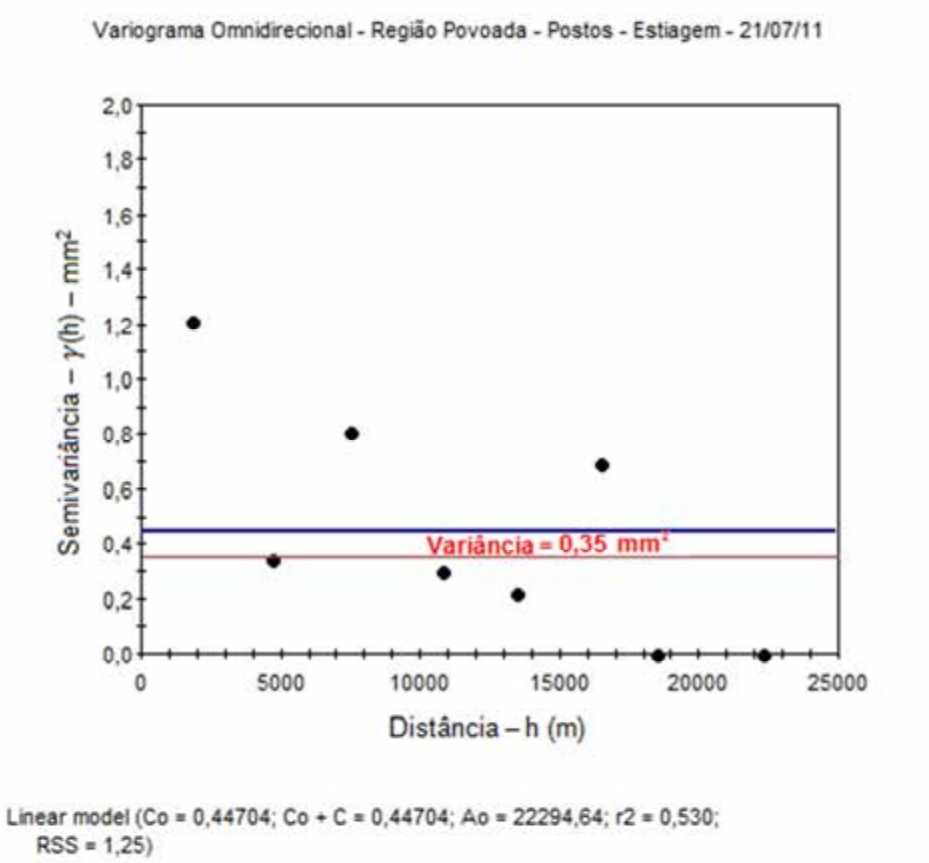


Figura 7.66 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período de estiagem – diário (21/07/2011)

Do mesmo modo, o variograma apresentou comportamento aleatório e alcance da ordem de 22,3 km.

A Figura 7.67 mostra o variograma construído para o mês de julho de 2011, considerando os postos pluviométricos da região mais povoada.

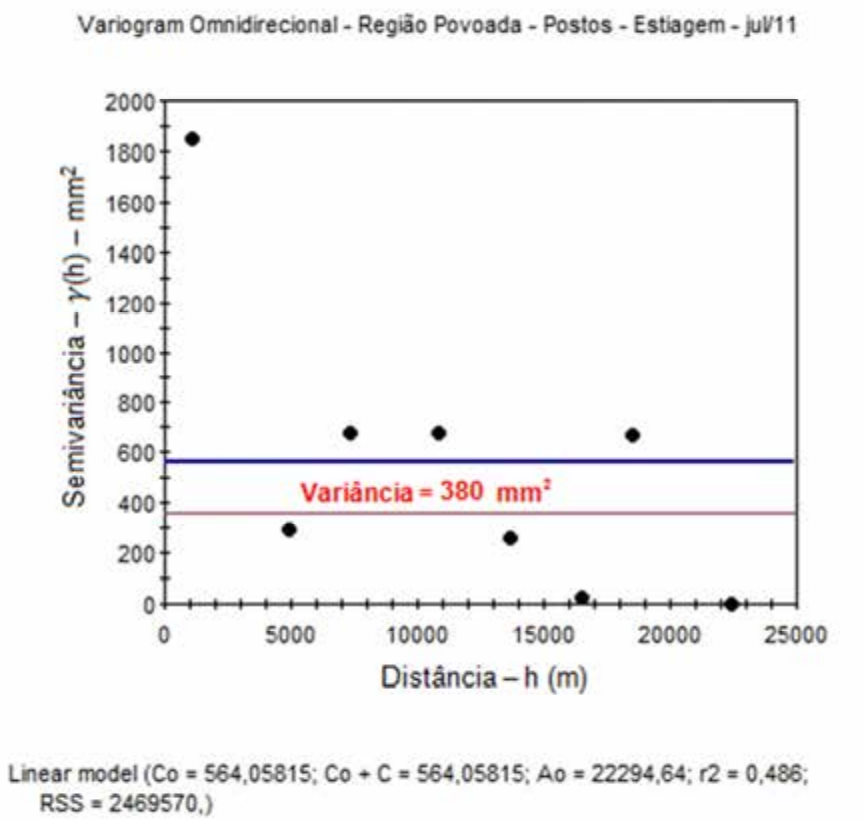


Figura 7.67 – Variograma omnidirecional para a região mais povoada considerando somente os postos – período de estiagem – mensal (jul/2011)

A Figura 7.67 apresentada indica que o variograma omnidirecional foi ajustado pelo modelo aleatório, com alcance de 22,3 km.

<u>Análise dos Variogramas de Precipitação</u>

A seguir, serão apresentados quadros-resumo para os tipos de ajustes, os valores dos coeficientes de efeito pepita e alcances encontrados nas simulações de variogramas realizadas anteriormente, para o período chuvoso e de estiagem.

A Tabela 7.10 apresenta o quadro-resumo para o período chuvoso.

Tabela 7.10 – Resumo dos resultados dos variogramas para o período chuvoso

Área de Abrangência / Condição	Diário			Mensal		
	Modelo	CEP	Alcance (km)	Modelo	CEP	Alcance (km)
Bacia (extremo)	Esférico	0,002	16,9	Linear	-	58,1
Bacia (médio)	Esférico	0,220	16,7	Gaussiano	0,168	58,2
Sub-bacia 3 (extremo)	Esférico	0,016	16,4	Aleatório	-	57,2
Sub-bacia 3 (médio)	Esférico	0,269	19,3	Linear	-	57,1
Região mais Povoada (extremo)	Linear	-	22,8	Aleatório	-	22,8
Região mais Povoada (médio)	Gaussiano	0,134	35,9	Aleatório	-	24,1

Observando a Tabela 7.10, nota-se que os coeficientes de efeito de pepita calculados, quando possível, foram inferiores a 0,25, indicando alta dependência espacial dos dados, representando aleatoriedade pequena dos dados de precipitação. A única exceção deu-se para a configuração da sub-bacia 3, para o período chuvoso médio e uso de dados diários, o que indica moderada dependência dos dados.

Quanto aos alcances encontrados, observa-se que, em todos os casos, exceto para a escala diária em que se consideram todos os postos da bacia e para a escala mensal em que se consideram os dados dos postos da sub-bacia 3, os alcances encontrados para o período chuvoso extremo são menores do que os alcances obtidos para o período chuvoso médio, o que era esperado, uma vez que o período chuvoso extremo é mais crítico, e as interfaces de variabilidade da precipitação tendem a ser maiores para distâncias menores. Sendo assim, os alcances encontrados nas análises variográficas para o período chuvoso variam de 16,4 km ao máximo de 58,2 km.

Na Tabela 7.11 pode ser verificado o quadro-resumo para o período estiagem.

Tabela 7.11 – Resumo dos resultados dos variogramas para o período de estiagem

Área de Abrangência	Diário			Mensal		
	Modelo	**CEP**	**Alcance (km)**	**Modelo**	**CEP**	**Alcance (km)**
Bacia	Aleatório	-	58,1	Aleatório	-	58,1
Sub-bacia 3	Aleatório	-	57,2	Aleatório	-	57,2
Região mais Povoada	Aleatório	-	22,3	Aleatório	-	22,3

Na Tabela 7.11, observa-se que todos os alcances ficaram na faixa de 57,2 a 58,1 km, à exceção dos variogramas construídos considerando apenas a região com concentração de estações, que apresentaram valores de alcance de 22,3 km, muito próximos dos resultados obtidos para a mesma região quando considerados os dados relativos ao período chuvoso.

Para ambos os períodos, observa-se que, mesmo que a sub-bacia 3 e a região mais povoada apresentem configurações semelhantes, os resultados encontrados foram diferentes, indicando, aproximadamente, de modo geral, que os alcances obtidos para a sub-bacia 3 eram o dobro dos alcances calculados para a região mais povoada. Esse fato era esperado, uma vez que, na configuração da sub-bacia 3, são incluídos os dados de duas (2) estações que estão mais distantes, principalmente a estação Dois Rios que, comparada às outras, na sub-bacia 3, está praticamente isolada. As análises para a sub-bacia 3 reafirmam que as correlações pioram ou são inexistentes para distâncias superiores à metade da máxima distância entre o par de estações mais distantes ($\bar{h}$, conforme explicado no item 5.3). Os resultados mostram que essas duas configurações apresentam resultados distintos em relação aos alcances encontrados, justificados não somente pela diferença quanto ao número de estações consideradas, mas juntamente com o regime de precipitação, uma vez que a variabilidade da precipitação é mais evidenciada quando se analisa a sub-bacia 3. Além disso, ao analisar a sub-bacia 3 e a região povoada, nota-se que os alcances são menores em função do relevo, mostrando que esse fator é bastante influente na determinação dos alcances nas análises variográficas.

Observa-se, também, que os modelos ajustados para o período de estiagem apresentaram alcances superiores aos encontrados para as análises do período chuvoso

na maioria das simulações. Essa constatação pode ser atribuída ao fato de que os variogramas construídos considerando os dados do período de estiagem apresentam, muitas vezes, valores nulos (precipitação zero) ou muito próximos de zero, indicando a dificuldade em obter correlações no caso da não ocorrência de chuvas.

Com base nas simulações efetuadas, a distância máxima a partir da qual se pode dizer que não existe mais correlação entre os dados corresponde a 16,4 km. Nota-se que esse menor valor encontrado é referente ao variograma de dados diários, considerando todos os postos da bacia, mostrando que, quanto maior a quantidade de estações de monitoramento consideradas, melhor é a avaliação da sua distribuição. Desse modo, a distância dita ideal para o posicionamento das estações pluviométricas é inferior a esse valor, sendo adotado, neste trabalho, uma distância equivalente a 15,0 km.

Os alcances encontrados nos dados diários são menores possivelmente devido ao fato de que, para um dia, os postos mais próximos registrarão valores de precipitação mais similares, indicando, para um único dia, uma correlação melhor, ainda mais levando em consideração que os dias escolhidos (12/01/2011 e 21/07/2011) foram justamente escolhidos por indicarem, nas séries de precipitação dos postos, o dia mais chuvoso e o dia mais seco, respectivamente, sendo essa situação observada em todas as estações, conforme visto em 7.1.1.1. Já para o mês, como é considerado o valor acumulado, as diferenças entre os valores observados em alguns dias podem influenciar no valor total.

Esse espaçamento entre as estações é justificado não somente pelos resultados dos variogramas construídos como também por informações obtidas junto à população das localidades de Santa Rita da Floresta e Taquara (entre os municípios de Cantagalo e Carmo), com altitude aproximada de 600 m, que apresenta seca pronunciada nos meses de inverno e época chuvosa típica em fevereiro e março. Já a localidade de Barra Alegre (município de Bom Jardim), altitude aproximada de 700 m, sendo uma região que apresenta vegetação verde, produção agrícola normal e chuvas frequentes, está distante de Santa Rita da Floresta e Taquara cerca de 40 km.

Dessa forma, é proposto, inicialmente, o seguinte arranjo para a bacia do rio Dois Rios, com estações equidistantes de 15,0 km, o que pode ser verificado na Figura 7.68.

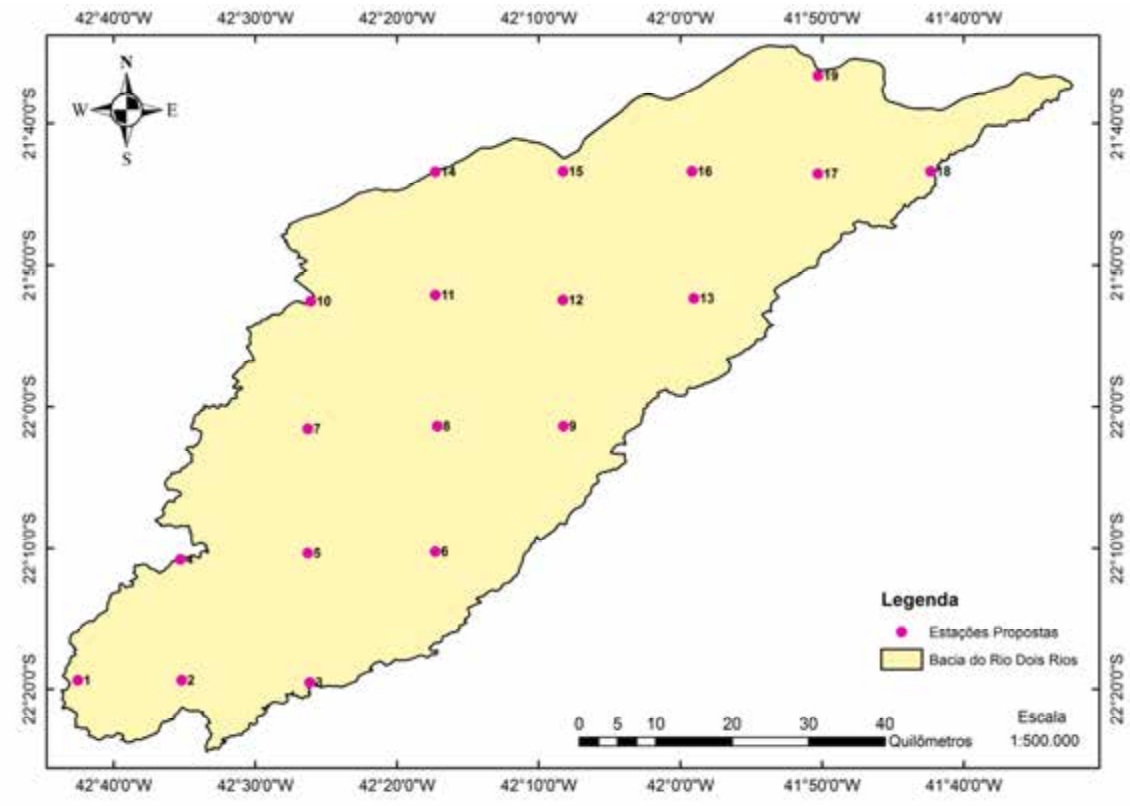


Figura 7.68 – Rede hidrometeorológica – proposta 1

Na Figura 7.68, propõe-se a instalação de 19 estações na bacia do rio Dois Rios, igualmente distribuídas por toda a bacia, de modo que todas as regiões estejam amparadas com uma estação.

7.3.2 Temperatura

No caso da temperatura da superfície terrestre continental, no âmbito da análise geoestatística, elaboraram-se variogramas com base em píxeis do MODIS, tendo sido possível trabalhar com a resolução original das imagens de temperatura (1 km). Similarmente ao que foi verificado quando da análise dos dados de precipitação, optou-se pela construção de variogramas omnidirecionais para os dados de temperatura, que se mostraram mais representativos e consistentes, sendo, por essa razão, que os variogramas direcionais de temperatura não são apresentados.

No caso desses variogramas, foram calculados apenas para os períodos de 8 dias (chuvoso e estiagem) para toda a bacia, sendo essa análise menos densa do que a de precipitação até mesmo devido à forma como os dados são disponibilizados.

Período Chuvoso

A Figura 7.69 apresenta o variograma para toda bacia, obtido por meio dos dados de temperatura, período chuvoso, conforme a imagem MODIS composta de 8 dias (09/01/2011 a 16/01/2011).

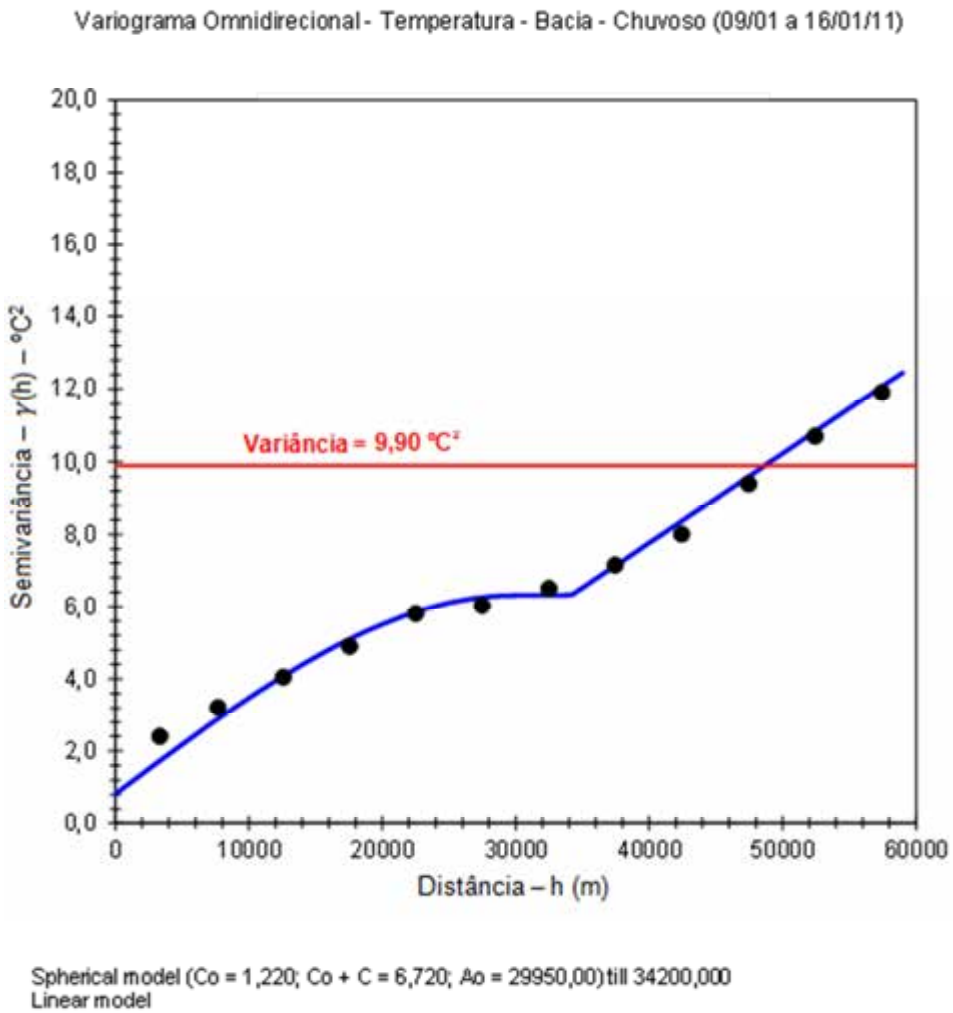


Figura 7.69 – Variograma omnidirecional para a temperatura considerando o período chuvoso (09/01/2011 a 16/01/2011)

O variograma da Figura 7.69 foi ajustado segundo a combinação de dois modelos (*nested models*), esférico (h ≤ 34,2 km) e linear (h > 34,2 km). Observando esse variograma, nota-se que a correlação entre os dados se dá até a distância de 29,95 km, onde esse modelo atinge o seu patamar. O CEP para esse modelo variográfico ajustado equivale a 0,182, indicando alta dependência espacial.

Período de Estiagem

A Figura 7.70 mostra o variograma construído para a imagem de temperatura com composição de 8 dias (20/07/2011 a 27/07/2011).

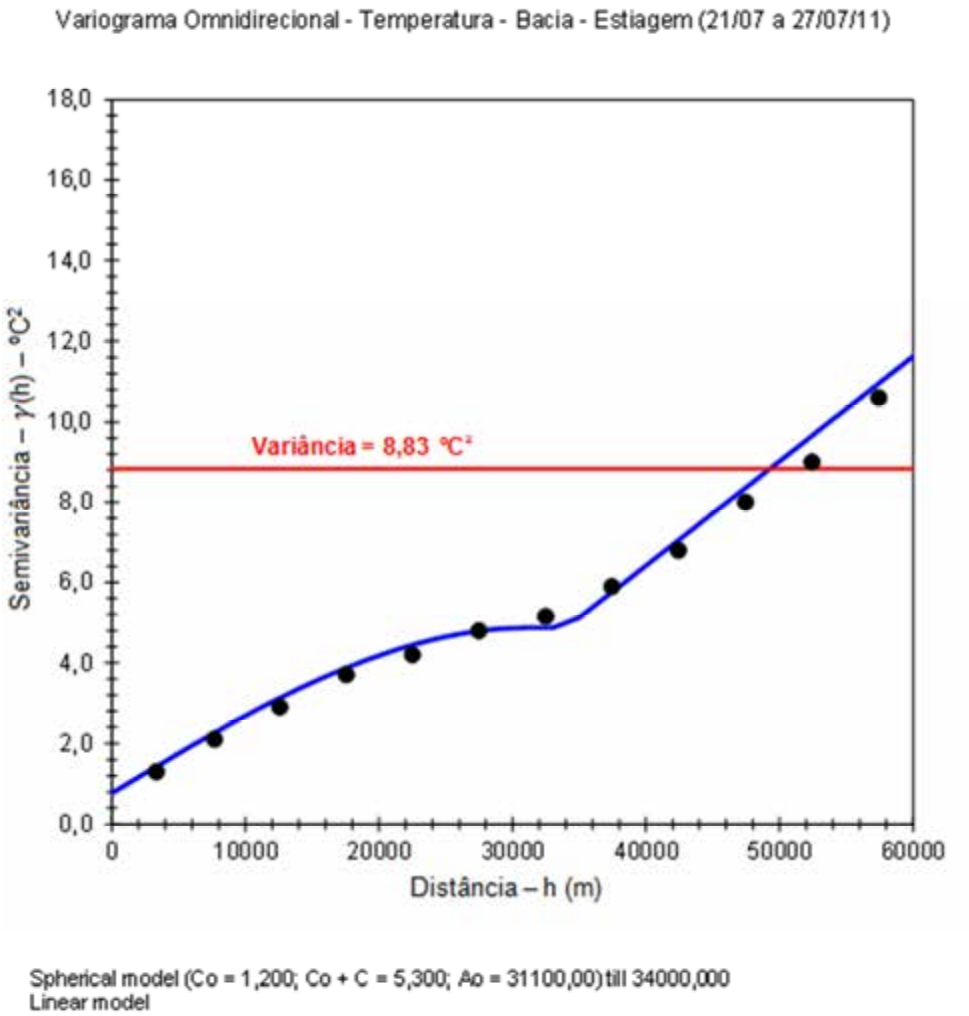


Figura 7.70 – Variograma omnidirecional para a temperatura considerando o período de estiagem (20/07/2011 a 27/07/2011)

Observa-se que o variograma omnidirecional para toda a bacia no período de estiagem foi ajustado segundo a combinação do modelo esférico (h ≤ 34,0 km) e linear (h > 34,0 km), sendo que até o alcance de 31,1 km é possível observar a correlação entre os dados (função atinge seu patamar), com CEP igual a 0,226, indicando que a componente aleatória é pequena.

Análise dos Variogramas de Temperatura

A análise dos variogramas de temperatura foi similar à realizada para os variogramas de precipitação, conforme item 7.3.1. Apresentaram um comportamento mais regular dos dados, em comparação aos construídos para a precipitação, isto é, com dados não esparsos, reflexo de diversos fatores, como relevo e vegetação, entre outros.

A boa qualidade dos ajustes de modelos variográficos aos variogramas de temperatura se dá com base no fato de que, para sua construção, dispunha-se de valores médios de vários dias (8 dias) e muitos pontos ao longo da bacia (resolução espacial de 1 km em uma bacia com 4.376 km^2). Além disso, mostrou-se um fenômeno mais bem comportado em termos de continuidade espacial.

Em relação aos alcances, foram encontrados valores próximos nas simulações para os períodos chuvoso e de estiagem, equivalente a 30,0 km e 31,1 km, respectivamente. A análise indica que os sensores de temperatura na estação hidrometeorológica podem ter um espaçamento máximo duas vezes maior do que os sensores de precipitação, ou seja, de 30,0 km. Esse resultado implica que nem todas as 19 estações propostas precisam de sensores para medição de temperatura, ou seja, a cada duas estações com medição de chuva, pode ser instalado um sensor de temperatura, indicando que a variabilidade espacial da temperatura é menor do que a precipitação.

Como a proposta desta dissertação é a definição de uma rede de monitoramento hidrometeorológico, esta não pode ser definida com apenas duas variáveis, precipitação (P) e temperatura (T), necessitando a inclusão de sensores que meçam outras variáveis, como, por exemplo, pressão atmosférica (PA), umidade relativa do ar (UR), radiação solar (RS), velocidade e direção do vento (VDV).

Portanto, exceto no caso do nível de água (e, consequentemente, vazão), variáveis que serão avaliadas logo a seguir, tendo em vista que não foi viável realizar as mesmas análises variográficas para as demais variáveis hidrometeorológicas devido à carência desses tipos de dados na bacia, todas as 19 estações propostas serão dotadas de sensores específicos para medir umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade e direção do vento.

Dessa forma, a Figura 7.71 apresenta uma nova proposta das estações que devem ser instaladas na bacia.

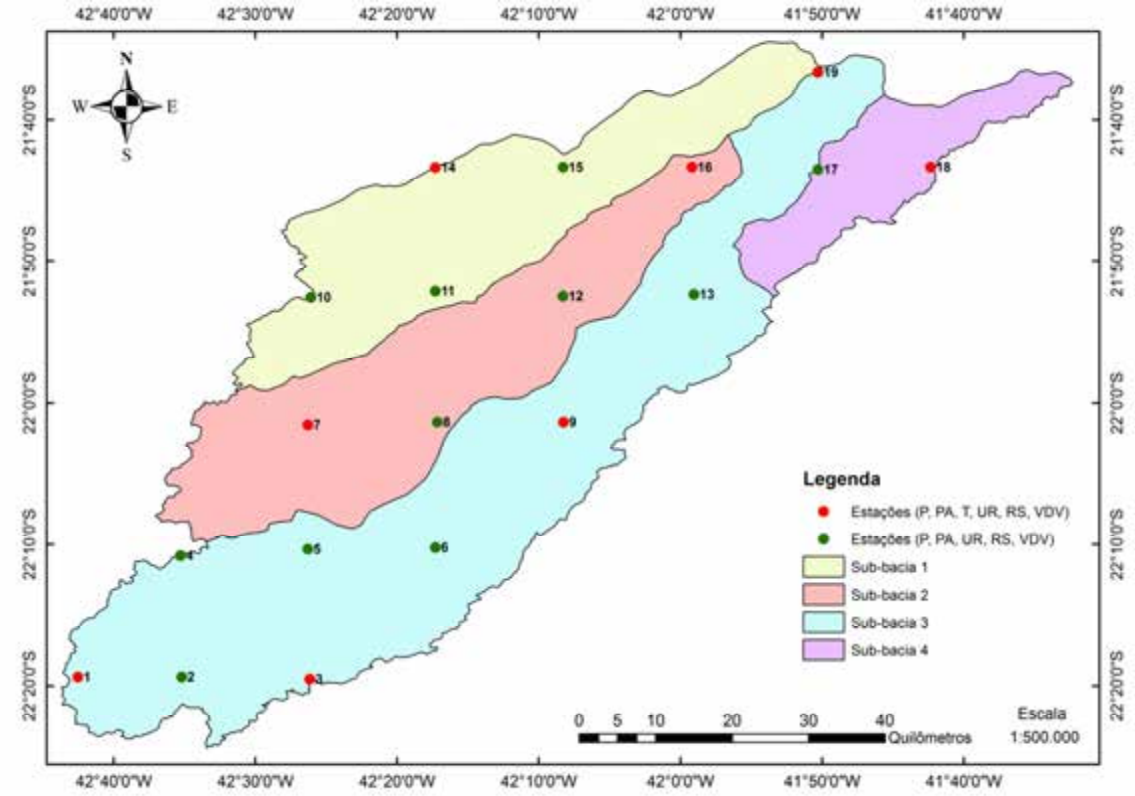


Figura 7.71 – Rede hidrometeorológica – proposta 2

É possível observar na Figura 7.71, que a estação número 19, na parte mais baixa da bacia, apesar de ter uma distância inferior a 30,0 km das outras (mais próximas), medirá, além de precipitação, temperatura. Essa consideração é conservadora, de modo a garantir o acompanhamento da variação de temperatura no limiar da bacia (deságue). Assim sendo, configura-se a segunda proposta da rede hidrometeorológica na bacia, contando com 19 estações ao todo, sendo que todas serão dotadas de pluviômetros e apenas 8 dotadas de sensores de registro de temperatura.

7.4 Análise dos Aspectos Físico-Hídricos da Bacia – Reposicionamento das Estações

Conforme explicado no item 5.4, é necessário avaliar se as estações estão posicionadas em locais adequados considerando diversos aspectos como hidrografia, relevo, uso e ocupação do solo e a existência de áreas protegidas. Dessa forma, esta seção apresenta uma análise detalhada da localização das estações propostas tal qual

constam da Figura 7.71, analisando e justificando os eventuais reposicionamentos de modo que seja definida a melhor localização para cada estação.

7.4.1 Hidrografia

Nesta etapa, serão estudadas as possibilidades de deslocamento das estações, de modo que se aproximem dos principais cursos de água.

Primeiramente, será apresentada a hidrografia da bacia, de modo a definir em quais estações serão monitorados os níveis de água. A Figura 7.72 mostra a bacia, com a hidrografia e a localização das estações até então, destacando que elas foram numeradas de 1 a 19 para facilitar a compreensão das considerações que serão apresentadas.

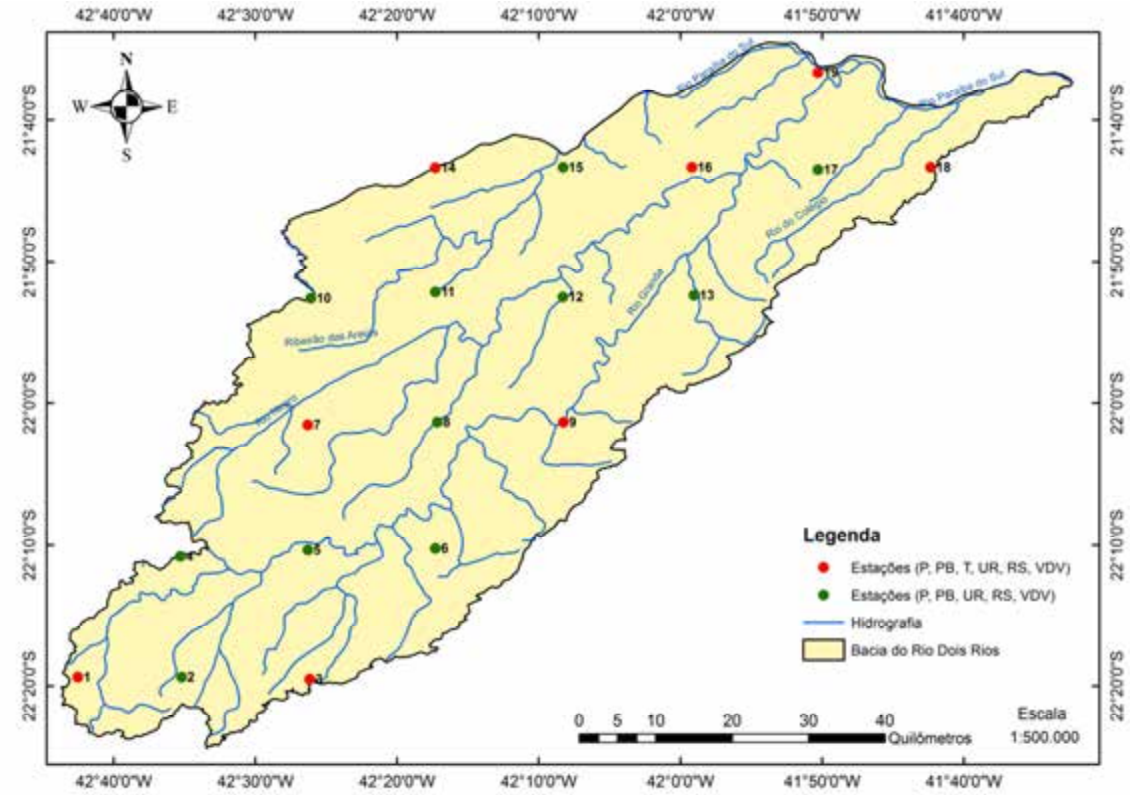


Figura 7.72 – Hidrografia e rede hidrometeorológica – proposta 2

Conforme a Figura 7.72, com o objetivo de monitorar os níveis dos principais e rios e alguns afluentes, têm-se as seguintes considerações em relação ao deslocamento de algumas estações:

- as estações 1 e 2 serão deslocadas aproximadamente 3 km para a direita (cada), a fim de acompanhar as vazões na cabeceira do rio Grande e seu afluente, rio Caledônia, respectivamente;
- a estação 5, por sua vez, será deslocada cerca de 860 m ao norte para monitoramento do nível no trecho médio do rio Grande;
- a estação 7 será deslocada aproximadamente 4,5 km para esquerda, para que seja possível acompanhar os níveis no trecho alto do rio Negro;
- a estação 8, que já está localizada no rio Macuco, afluente do rio Negro, permanecerá nesse local e será dotada também de um linímetro para medir os níveis desse rio em seu trecho médio;
- a estação 9 também continuará no mesmo local, para que sejam monitorados os níveis nesse trecho do rio Grande;
- a estação 11 será deslocada cerca de 7 km para a esquerda, com o propósito de medir os níveis do trecho alto do Ribeirão das Areias;
- a estação 12 será deslocada aproximadamente 4,8 km para esquerda, para monitorar os níveis do rio Negro em seu trecho médio;
- cerca de 640 m para a direita, a estação 13 passará a monitorar os níveis do rio Santíssimo, afluente do rio Grande;
- a estação 15 será deslocada aproximadamente 1,2 km no sentido noroeste, para que sejam obtidos os níveis quase na foz do Ribeirão das Areias no rio Paraíba do Sul;
- a estação 16 será deslocada para a direita cerca de 6,6 km para que possa ser dotada de linímetro e medir os níveis do rio Dois Rios, logo após a confluência dos rios Negro e Grande;
- a estação 18 sofrerá um deslocamento para oeste de 3,5 km de modo a monitorar os níveis de água do rio do Colégio;
- por fim, a estação 19 será deslocada 2,5 km para leste para acompanhar os níveis do rio Dois Rios um pouco antes da sua foz (deságue no rio Paraíba do Sul).

Assim, serão instalados linímetros em 13 estações das 19 propostas para a bacia do rio Dois Rios.

Conforme o exposto acima, a nova configuração da rede, considerando 4 tipos de estações hidrometeorológicas, consiste em:

- tipo 1 – estações dotadas de sensores de medição de chuva, nível de água (consequentemente, vazão), pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento;
- tipo 2 – estações equipadas com sensores de medição de chuva, nível de água (consequentemente, vazão, essencial para estabelecimento de curva-chave), pressão atmosférica, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento;
- tipo 3 – estações com equipamentos para monitoramento de chuva, pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento;
- tipo 4 – estações dotadas de sensores que medem chuva, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento.

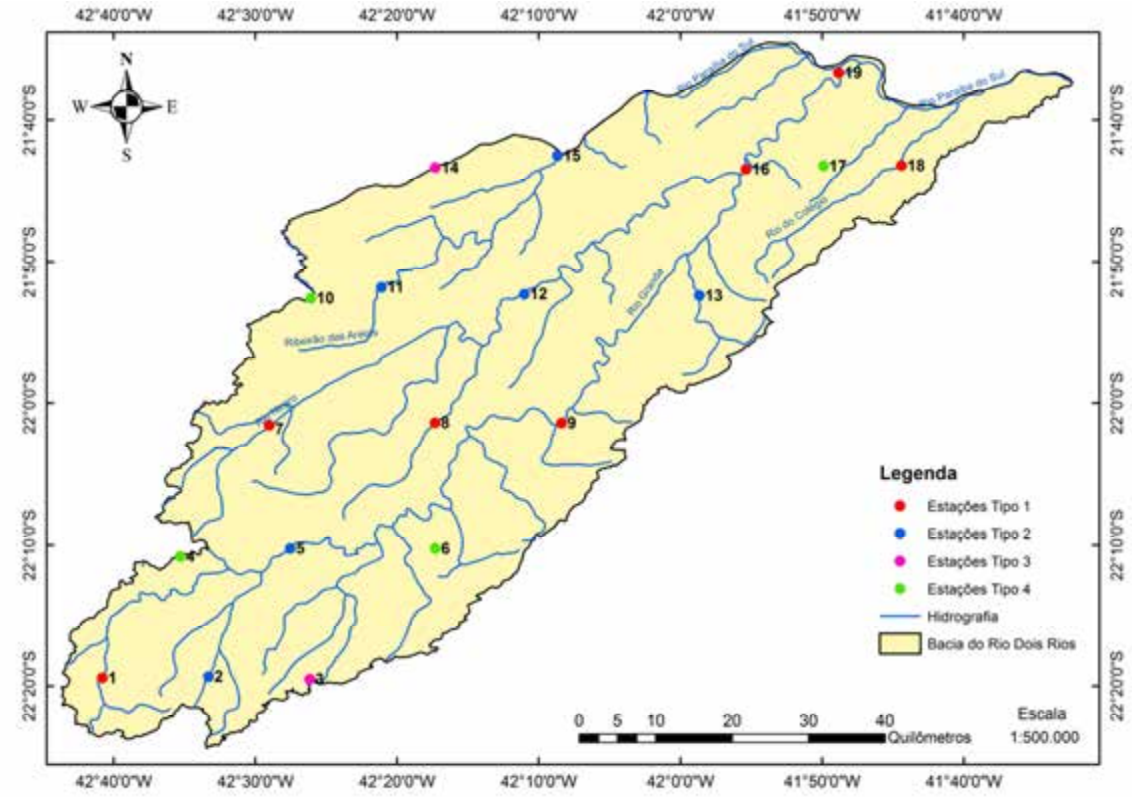


Figura 7.73 – Rede hidrometeorológica – proposta 3

7.4.2 Relevo, Uso e Ocupação do Solo e Áreas Protegidas

As alterações realizadas somente indicam a quantidade de estações que serão equipadas com linímetros, no entanto não significa ainda que essa configuração é a mais apropriada. Nesse sentido, será analisada a localização das estações segundo os resultados das análises do relevo (Figura 7.74), do uso e ocupação do solo (Figura 7.75 a Figura 7.94) e de áreas protegidas (Figura 7.96).

Como a imagem de uso e ocupação do solo perde a resolução ao ser mostrada para o nível da bacia, da Figura 7.76 a Figura 7.94, serão detalhados o uso e ocupação do solo para cada estação.

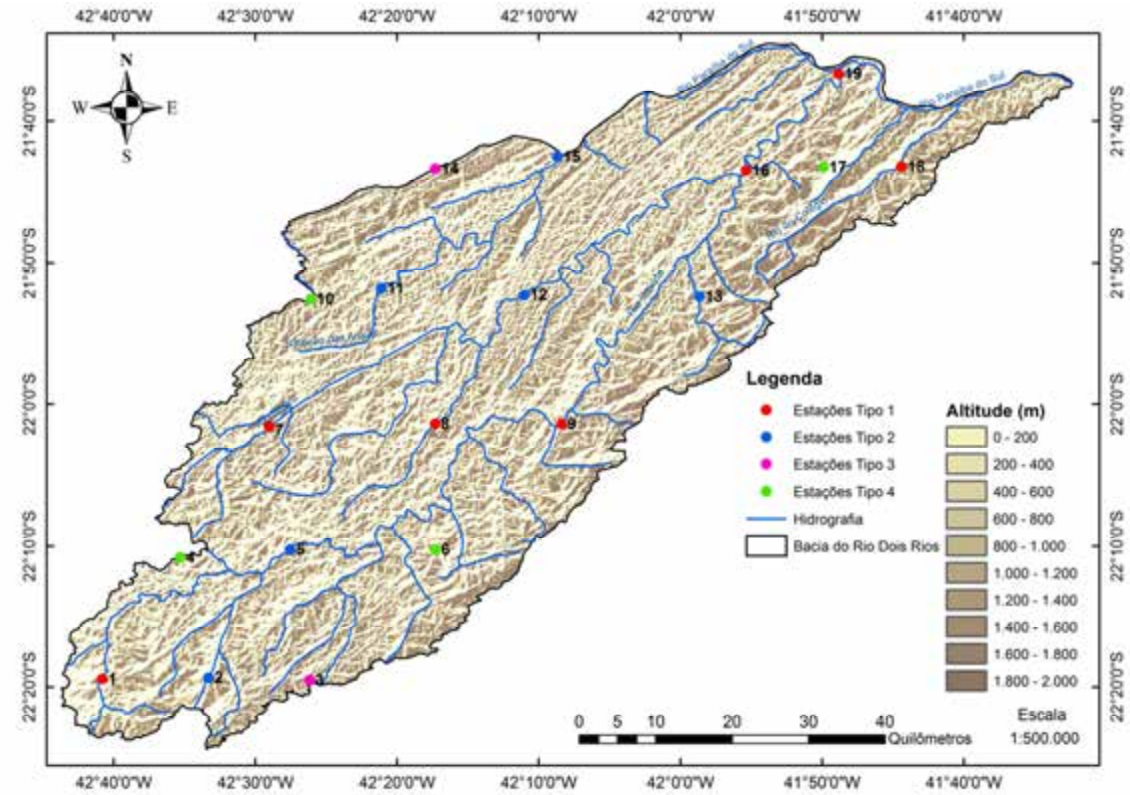


Figura 7.74 – Relevo e rede hidrometeorológica – proposta 3

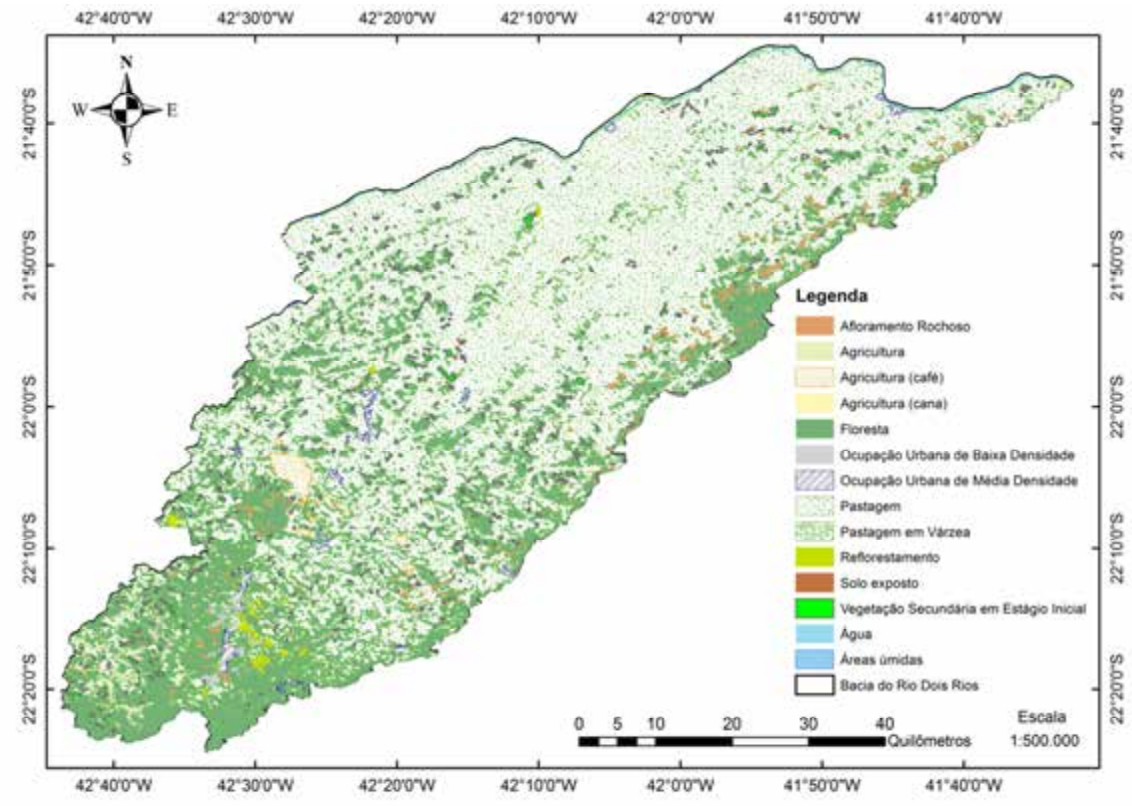


Figura 7.75 – Uso e ocupação do solo na bacia do rio Dois Rios

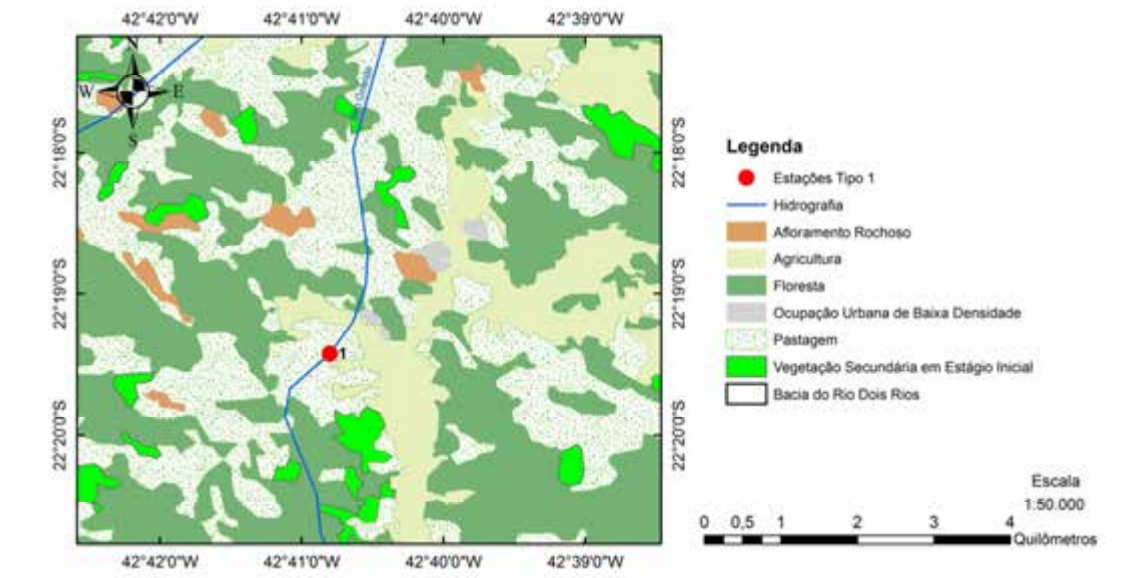


Figura 7.76 – Detalhe: estação 1 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

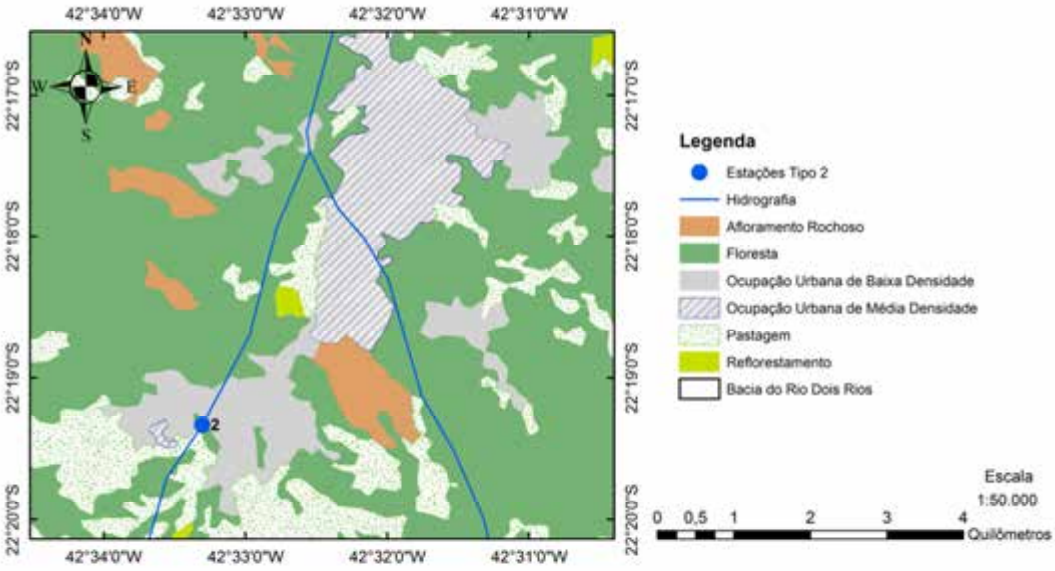


Figura 7.77 – Detalhe: estação 2 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

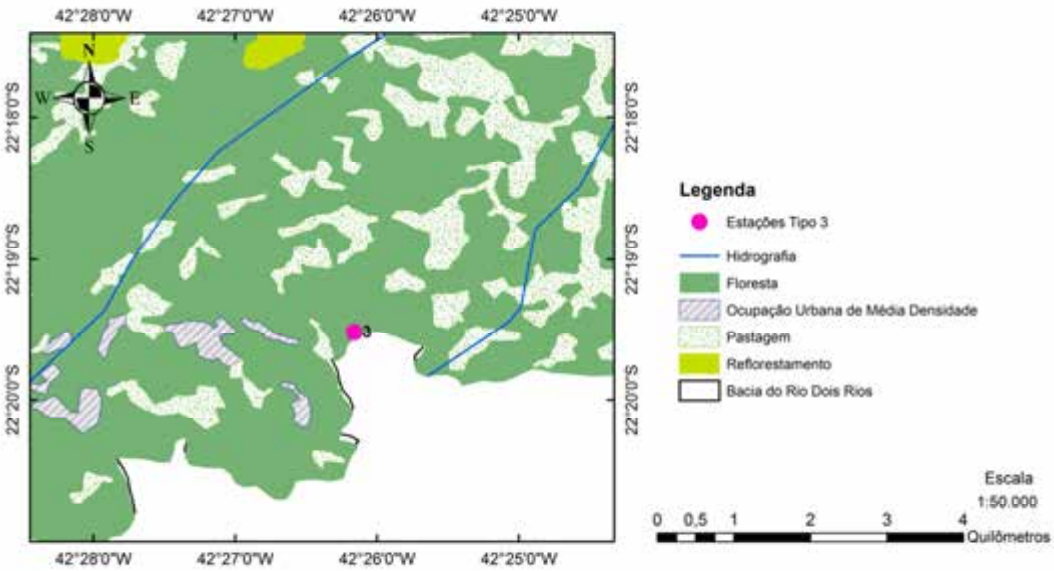


Figura 7.78 – Detalhe: estação 3 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

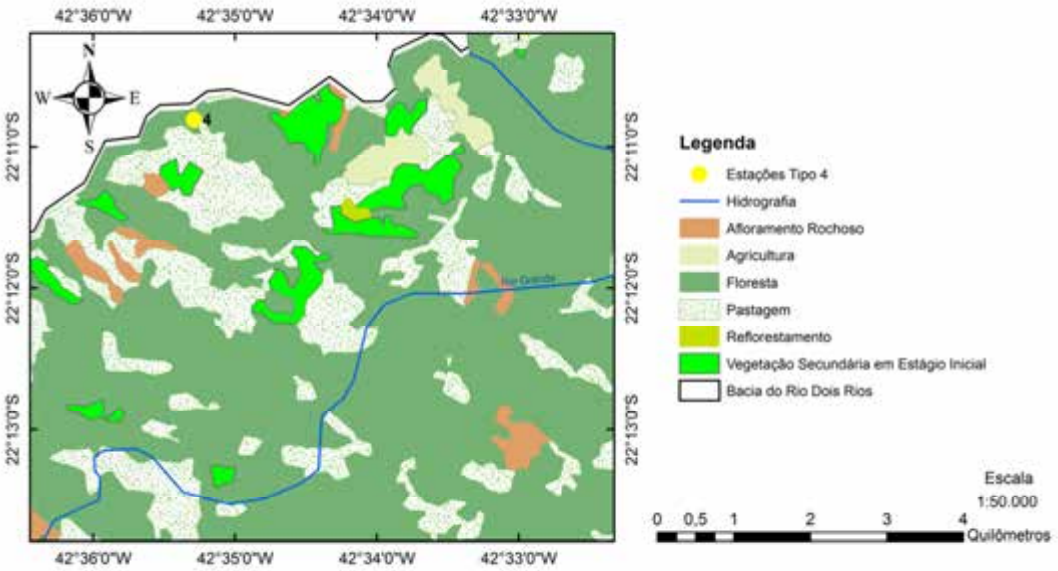


Figura 7.79 – Detalhe: estação 4 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

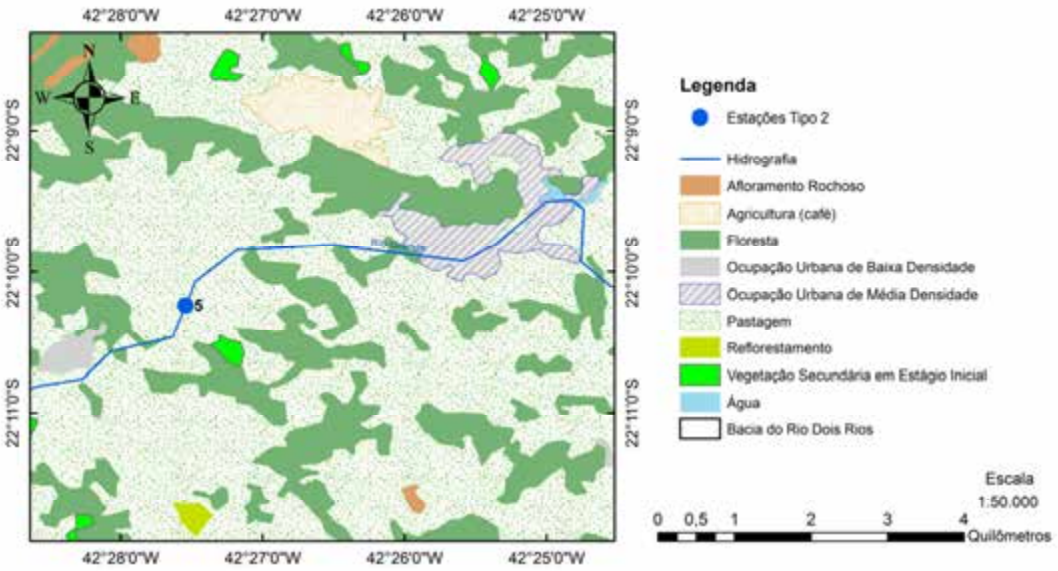


Figura 7.80 – Detalhe: estação 5 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

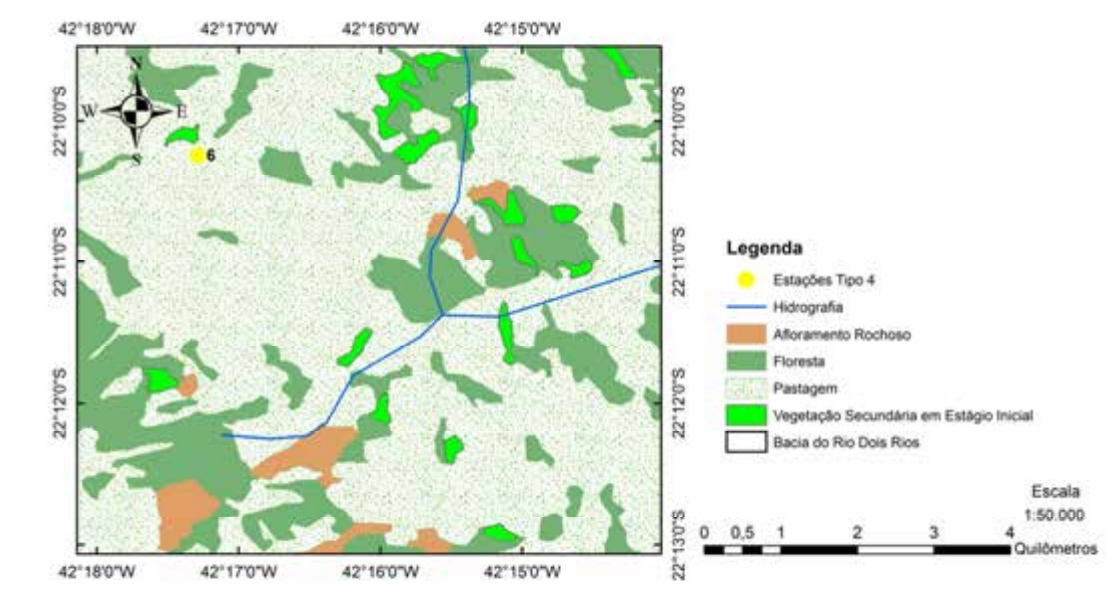


Figura 7.81 – Detalhe: estação 6 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

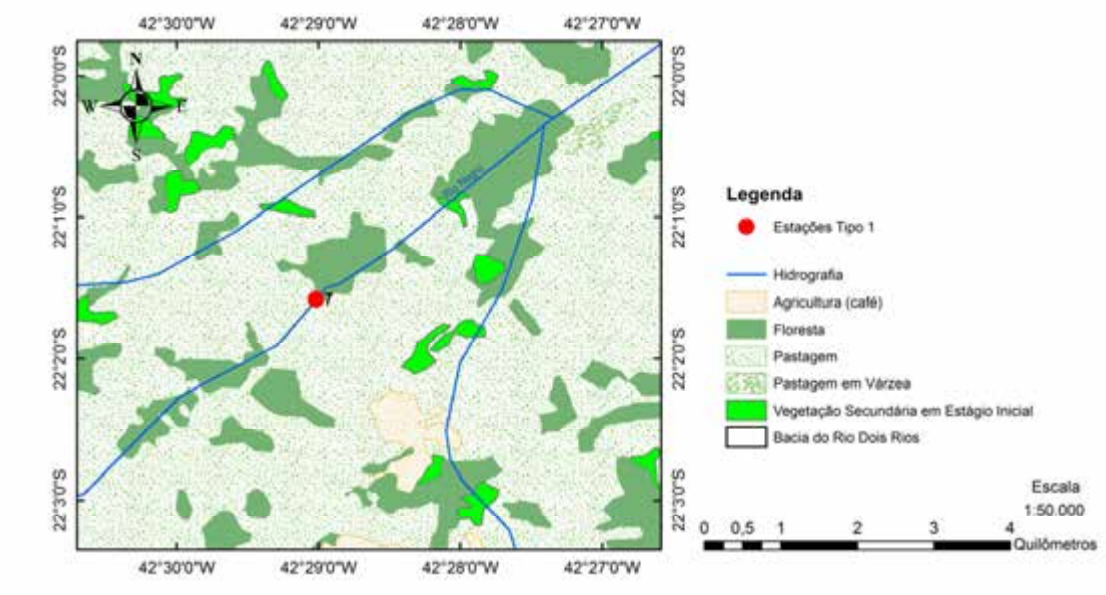


Figura 7.82 – Detalhe: estação 7 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

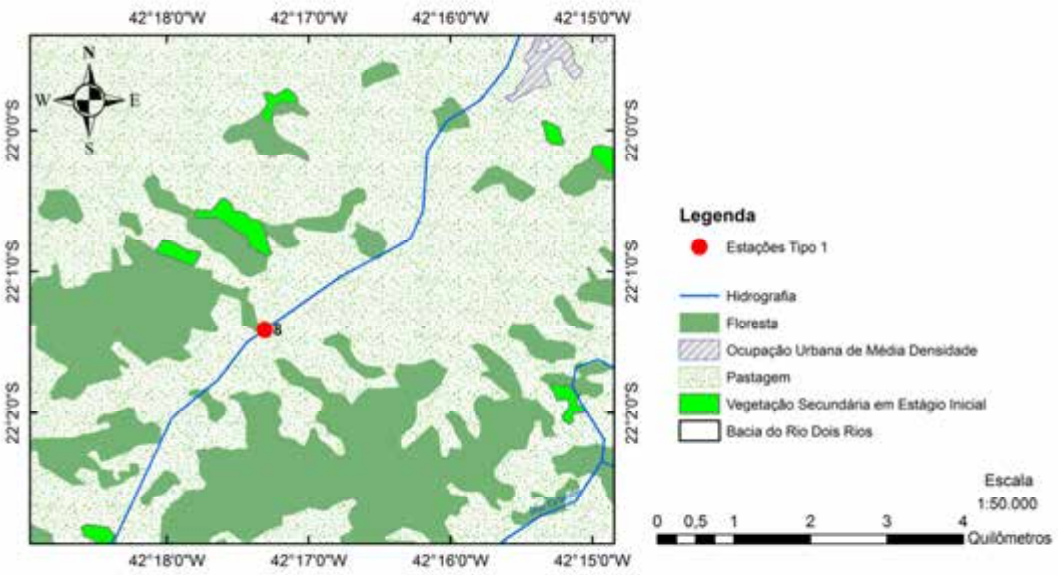


Figura 7.83 – Detalhe: estação 8 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

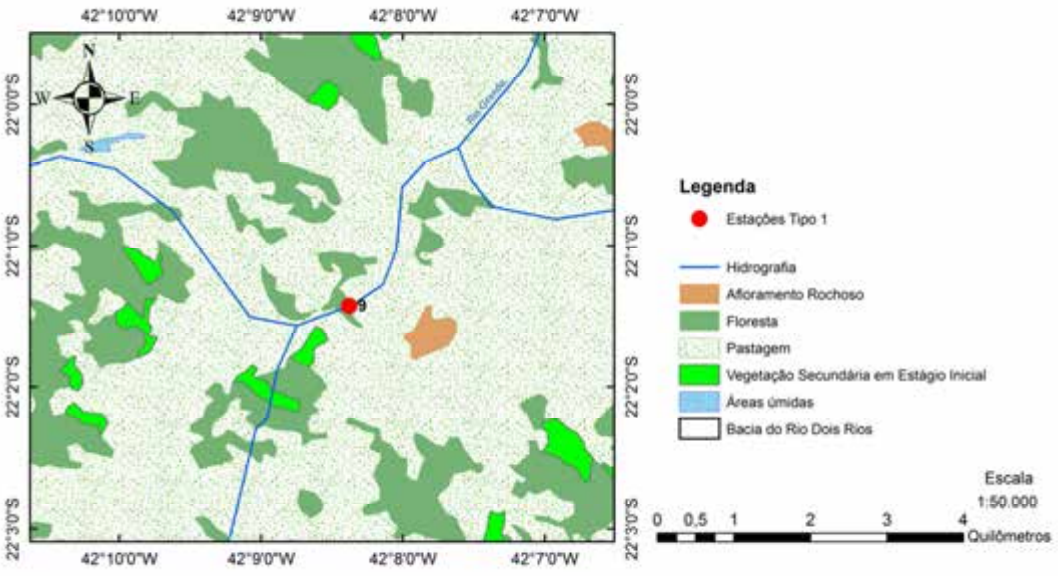


Figura 7.84 – Detalhe: estação 9 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

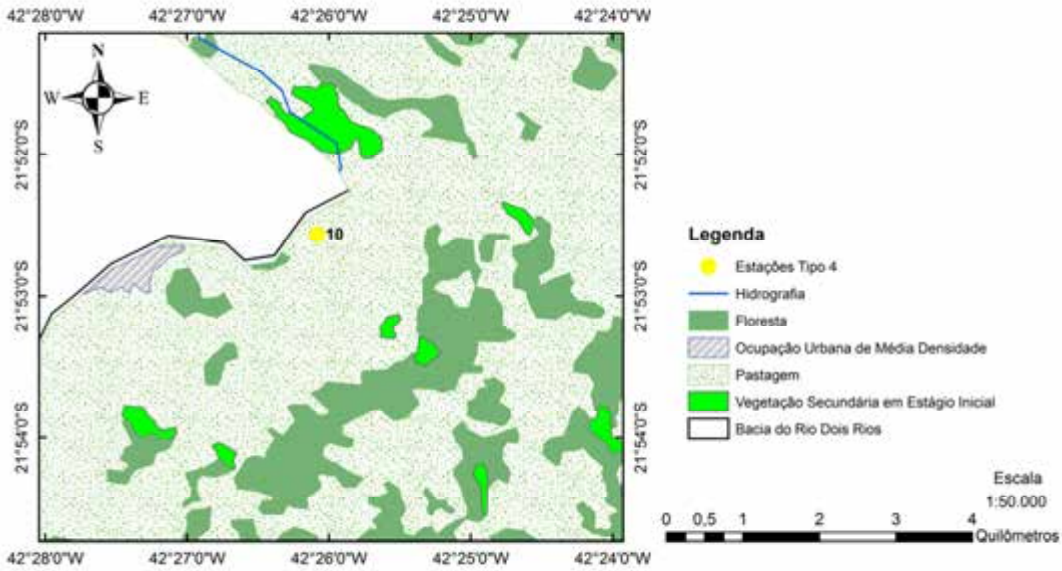


Figura 7.85 – Detalhe: estação 10 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

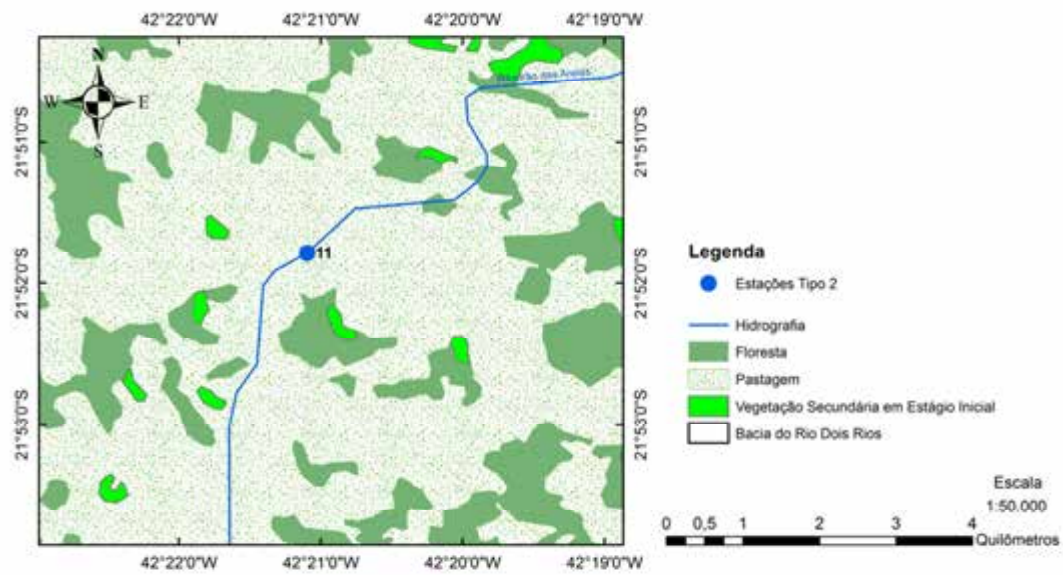


Figura 7.86 – Detalhe: estação 11 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

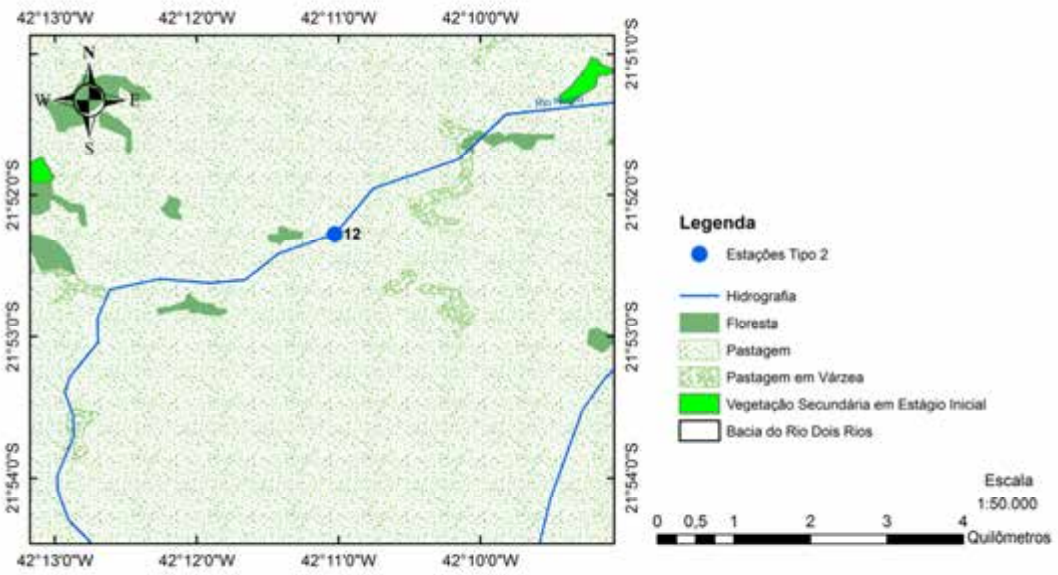


Figura 7.87 – Detalhe: estação 12 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

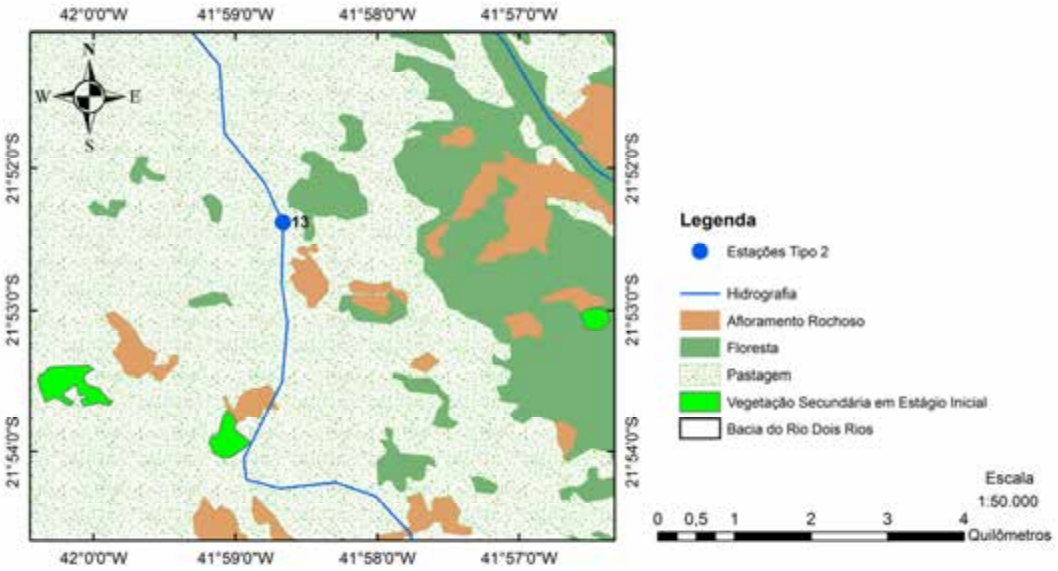


Figura 7.88 – Detalhe: estação 13 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

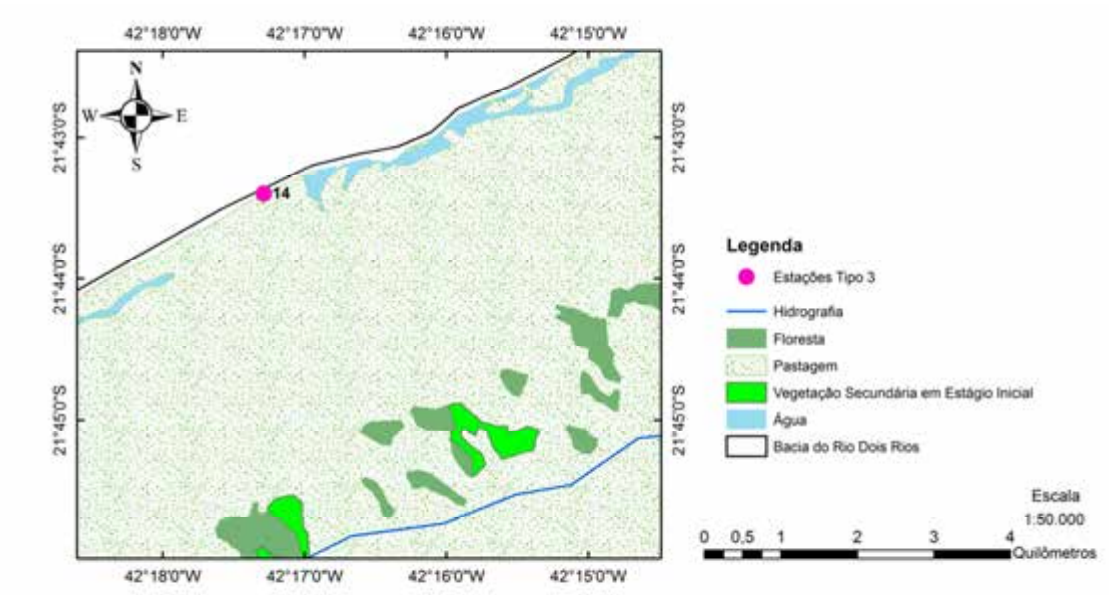


Figura 7.89 – Detalhe: estação 14 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

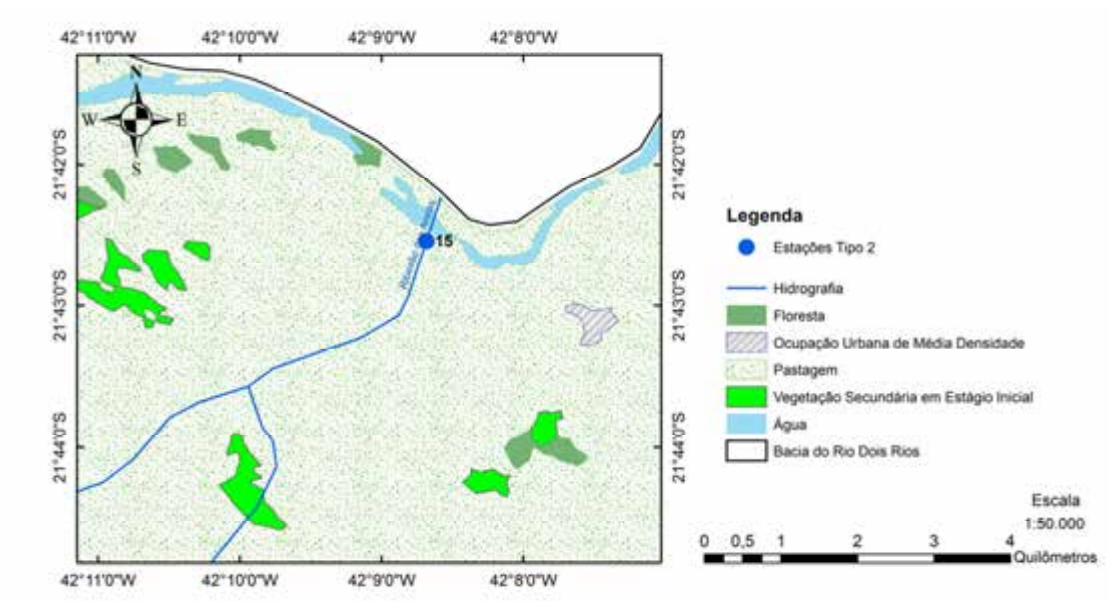


Figura 7.90 – Detalhe: estação 15 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

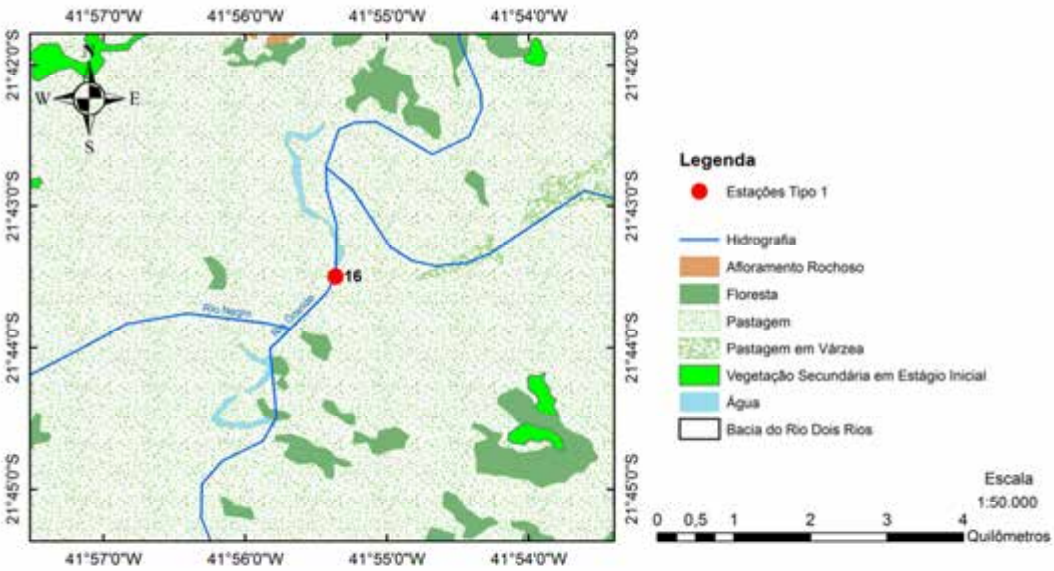


Figura 7.91 – Detalhe: estação 16 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

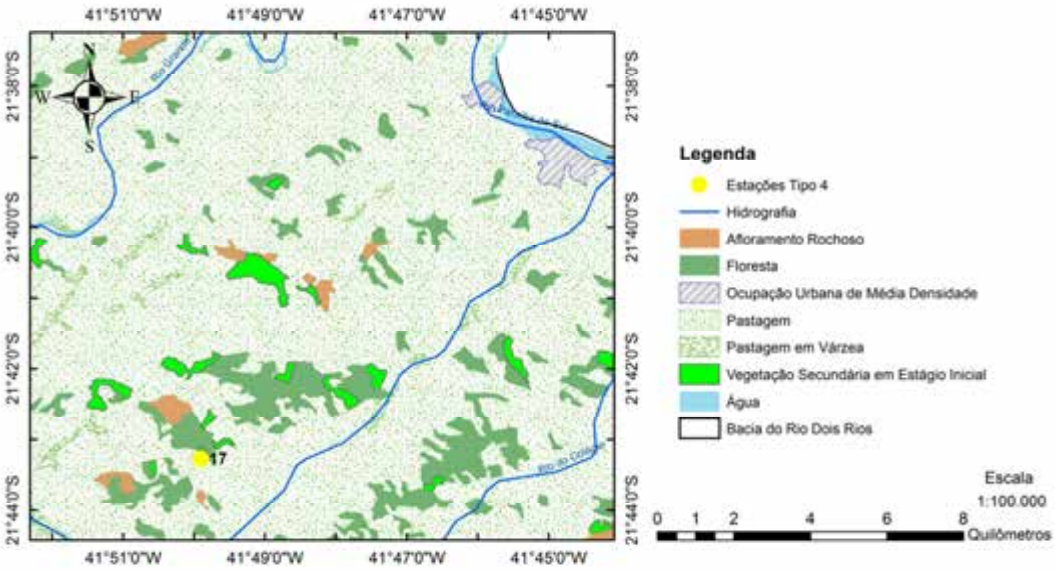


Figura 7.92 – Detalhe: estação 17 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

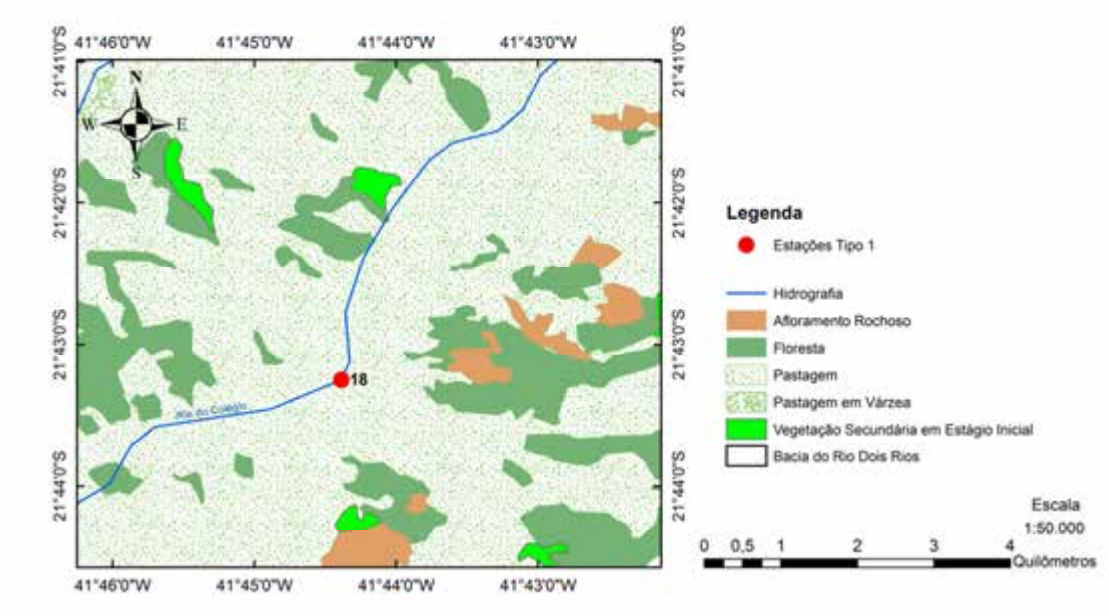


Figura 7.93 – Detalhe: estação 18 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

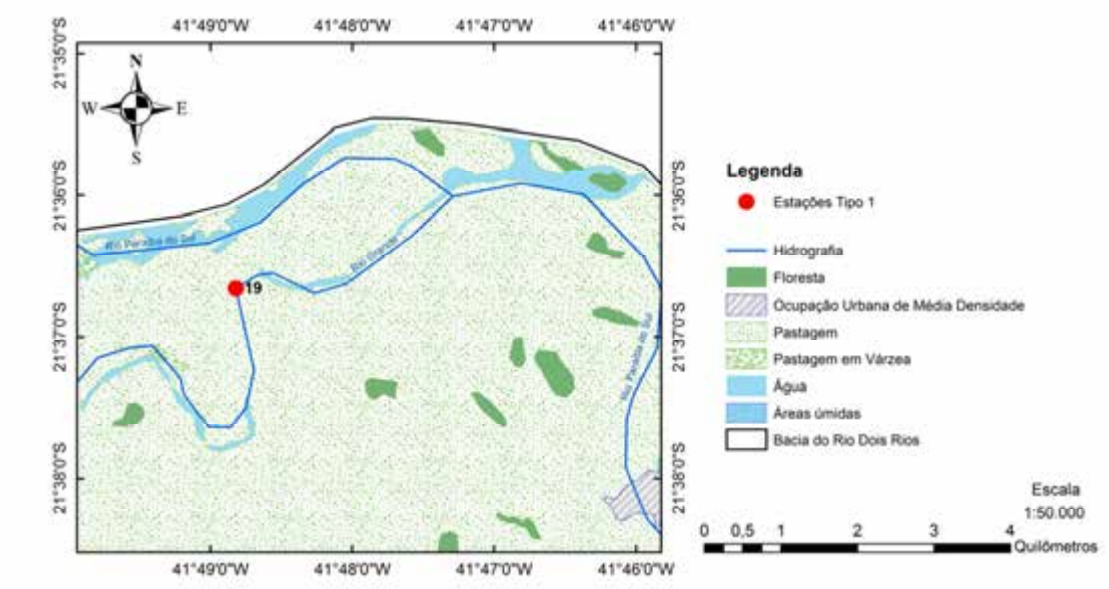


Figura 7.94 – Detalhe: estação 19 (proposta 3) e o uso e ocupação do solo

Com base no relevo e uso e ocupação do solo e também em análises de imagens de satélite (*Google Earth*), foram feitas as seguintes alterações:

- a estação 1 será deslocada cerca de 560 m a jusante para ficar localizada em uma região de menor altitude (Santa Cruz, município de Nova Friburgo), em uma área aberta, próximo a uma aglomeração urbana de baixa densidade;

- a estação 2 sofrerá um reposicionamento de 680 m a jusante, altitude um pouco mais baixa, além de ficar próxima a uma clareira no limiar de uma região ocupada (bairro Cônego, em Nova Friburgo) e floresta, em um local protegido;
- a estação 3 estava localizada em uma floresta densa, sendo necessário movê-la; será deslocada, aproximadamente, 1,0 km para leste, de maneira a ficar localizada próxima a uma rodovia (RJ-142) e a um aglomerado urbano (município de Nova Friburgo);
- a estação 4 sofreu um deslocamento de cerca 4,3 km para nordeste, evitando a localização indevida, alto de uma floresta montanhosa, transferindo a localização para uma clareira na floresta, na beira da rodovia RJ-148, quase na divisa entre os municípios de Nova Friburgo e Duas Barras, facilitando o acesso à estação;
- a estação 5 será reposicionada em torno de 1,5 km a montante de maneira a ficar situada no distrito de Banquete (Bom Jardim);
- a estação 6, até então, está situada em um local de difícil acesso, inclusive sem estradas perto; dessa forma, será deslocada para sudeste um pouco mais de 6 km de maneira a se situar em uma região aberta nas margens de uma rodovia (RJ-146), próxima à região conhecida como Doutor Elias, município de Trajano de Morais;
- as estações 7 (distante cerca de 4,5 km da região central do município de Duas Barras), 8 (aproximadamente 4,5 km de Macuco) e 9 (cerca de 600 m da pequena localidade de Manuel de Morais, em Trajano de Morais) já estão posicionadas em locais adequados, em regiões abertas de floresta e próximas a estradas, facilitando o acesso;
- a estação 10 sofrerá um deslocamento para sudoeste de, aproximadamente, 1 km, de maneira a se localizar em uma região mais protegida e próxima a uma aglomeração urbana de média densidade (Cantagalo);
- a estação 11 permanecerá no mesmo local, uma vez que se encontra distante cerca de 3 km de uma saída da rodovia RJ-170, em Cantagalo;
- a estação 12 está localizada em uma região que apresenta uma ou duas residências isoladas, entretanto está em um local adequado, situada no

município de São Sebastião do Alto, quase na divisa com Cantagalo; a localidade mais próxima é Valão do Barro (São Sebastião do Alto), distante cerca de 12 km;

- localizada no município de Santa Maria Madelena, a estação 13 não apresenta necessidade de deslocamento, uma vez que está em uma área aberta nas margens da rodovia RJ-146;
- a estação 14 permanecerá no mesmo local, uma vez que está em uma região plana, fácil de instalar e também cerca de 150 m da rodovia RJ-158 em Cantagalo;
- a estação 15 também continuará no local previamente indicado, uma vez que está situada em uma região plana, quase no deságue do rio Paraíba do Sul e também distante cerca de 1 km da localidade de Batatal em Itaocara;
- também não foi necessário alterar a localização da estação 16, uma vez que o local se mostrava apropriado, estando a estação aproximadamente 1,3 km a montante da ponte da BR-492, em São Fidélis;
- a estação 17, por conta de ter sido previamente alocada região de floresta montanhosa com mais de 1.000 m de altitude e difícil acesso, será deslocada cerca de 6,7 km no sentido nordeste de maneira que seja alocada em uma região mais plana e acessível (beira da Estrada da Esperança); dessa forma, essa estação ficará aproximadamente 3 km da região central de São Fidélis;
- a estação 18 será instalada 1,6 km para jusante, de modo a ficar em uma região com vegetação menos densa nas margens e próxima a algumas casas isoladas (São Fidélis);
- por fim, a estação 19, muito importante por ser completa (medir todas as variáveis hidrometeorológicas e também medir os níveis e vazões praticamente na foz do rio que dá nome à bacia em estudo), será deslocada 1,5 km para jusante, para não ser instalada em uma curva acentuada, uma vez que essa estação também monitora nível de água, além de ter sido localizada em uma região mais plana e mais acessível.

A Figura 7.95 apresenta a rede proposta 4 com base nos aspectos de relevo e uso e cobertura do solo, conforme discutidos logo acima.

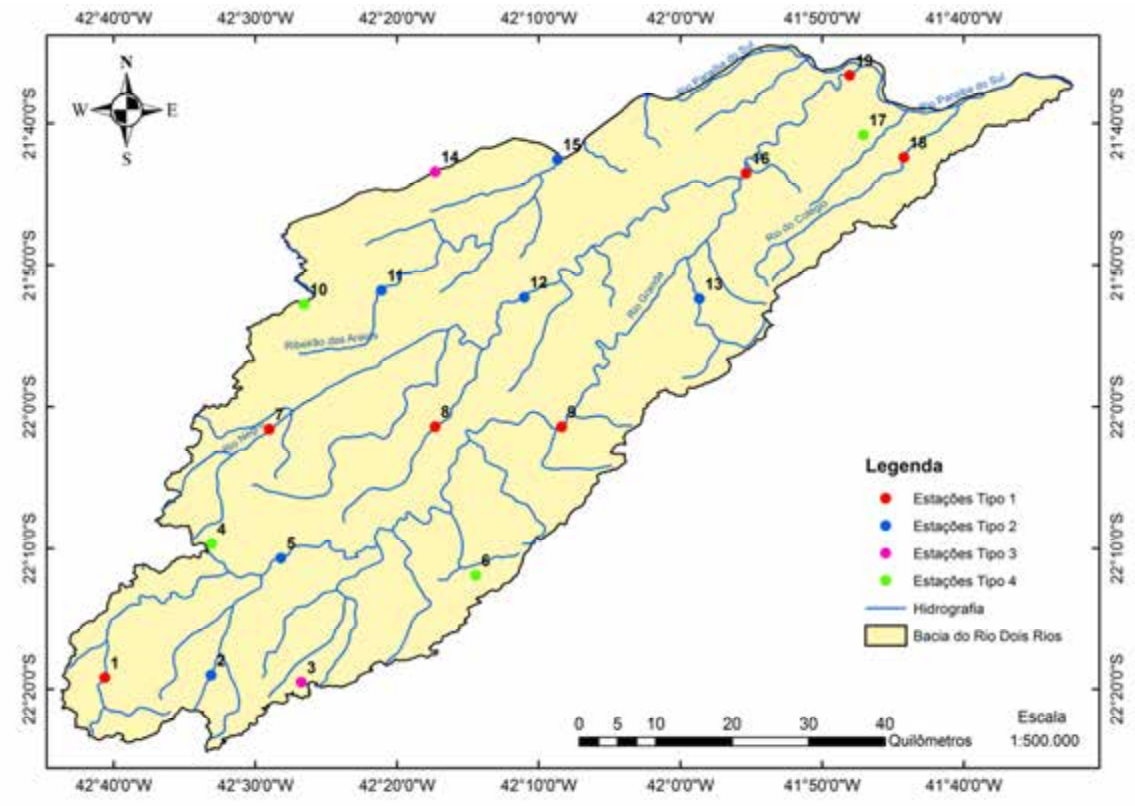


Figura 7.95 – Rede hidrometeorológica – proposta 4

Conforme mencionado no item 6.10, a bacia do rio Dois Rios, apresenta uma pequena porcentagem de sua área (2%) em áreas protegidas (Parque Estadual do Desengano e o Parque Estadual dos Três Picos). Como essas áreas são áreas de proteção integral, é vedada a realização de qualquer tipo de atividade e, no caso específico da rede, a instalação, operação e manutenção de uma estação hidrometeorológica dentro desses parques tornam-se inviáveis.

Assim sendo, será verificado abaixo (Figura 7.96) se a proposta 4 da rede apresenta alguma estação dentro de um desses parques estaduais. Vale a pena destacar que, no mapa, somente são apresentadas as áreas dos parques situadas dentro da bacia, isto é, os parques são maiores abrangendo áreas de outras regiões hidrográficas.

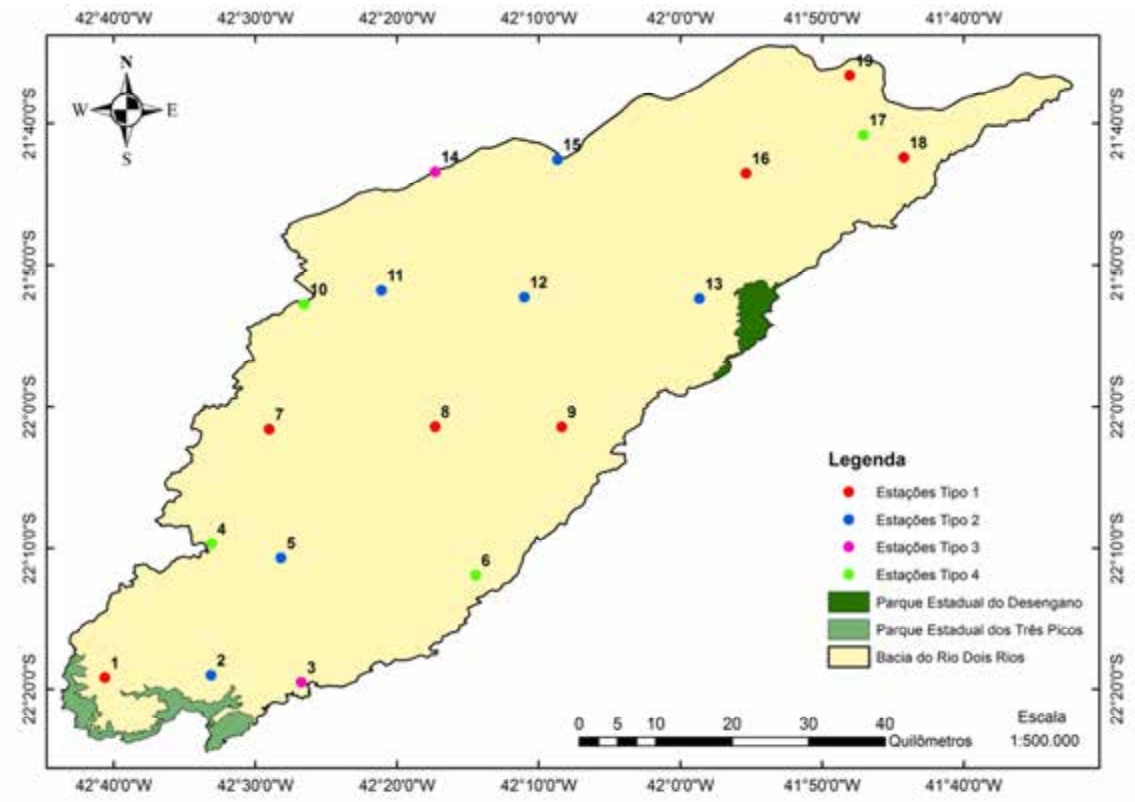


Figura 7.96 – Áreas de proteção e a rede hidrometeorológica (proposta 4)

É possível notar que a configuração da rede 4, previamente definida, não conta com qualquer estação instalada em área de proteção integral. Portanto, a rede proposta no presente item, considerando os aspectos de hidrografia, relevo, uso e cobertura do solo e áreas protegidas, mantém-se como apresentada na Figura 7.96.

7.5 Rede Final Proposta

Neste item será verificada a rede proposta anteriormente e definida a rede final para a bacia do rio Dois Rios. Para tal, será primeiramente analisada a rede da proposta 4 juntamente com as 4 sub-bacias principais apresentadas no item 7.1.1.2, conforme pode ser verificado na Figura 7.97.

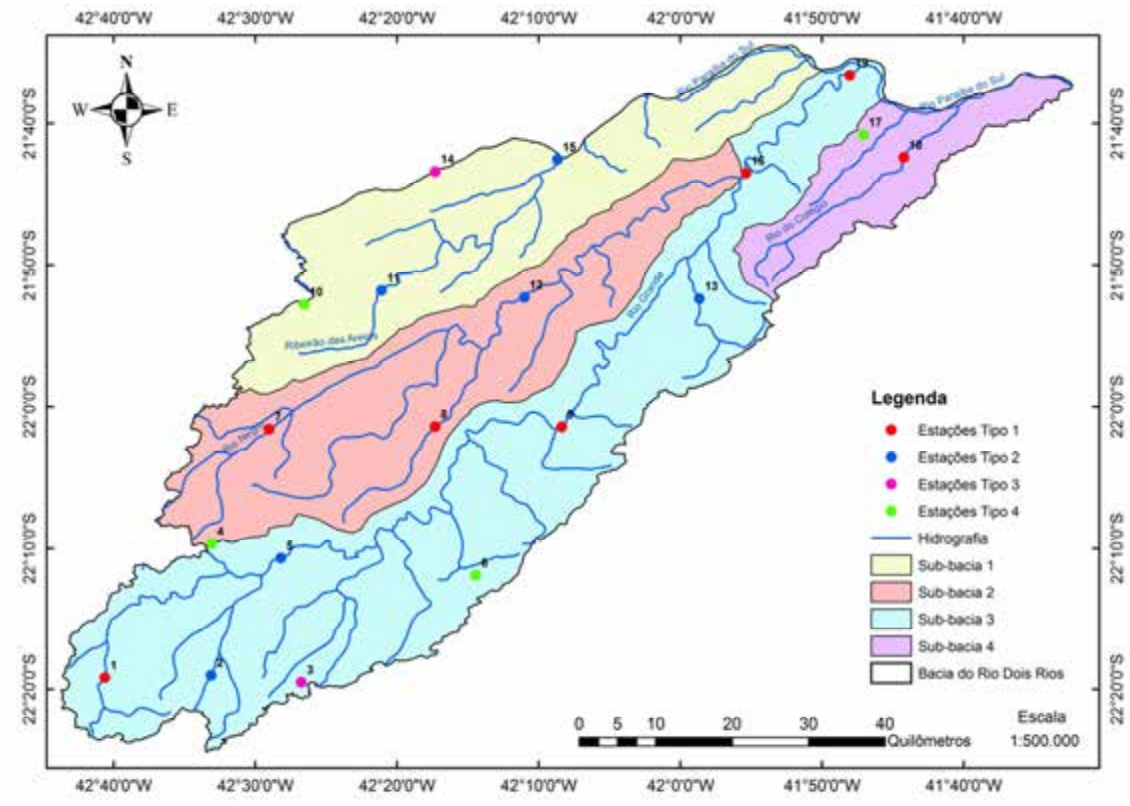


Figura 7.97 – Rede proposta 4 e as sub-bacias principais

Observando a Figura 7.97, é possível notar que nenhuma sub-bacia ficou sem monitoramento. Além das 4 sub-bacias, serão dispostas graficamente as estações também conforme a proposta 4, juntamente com a delimitação das unidades hidrológicas de planejamento (UHPs), com o intuito de avaliar se alguma dessas unidades não possui qualquer estação prevista até o momento, de acordo com a Figura 7.98.

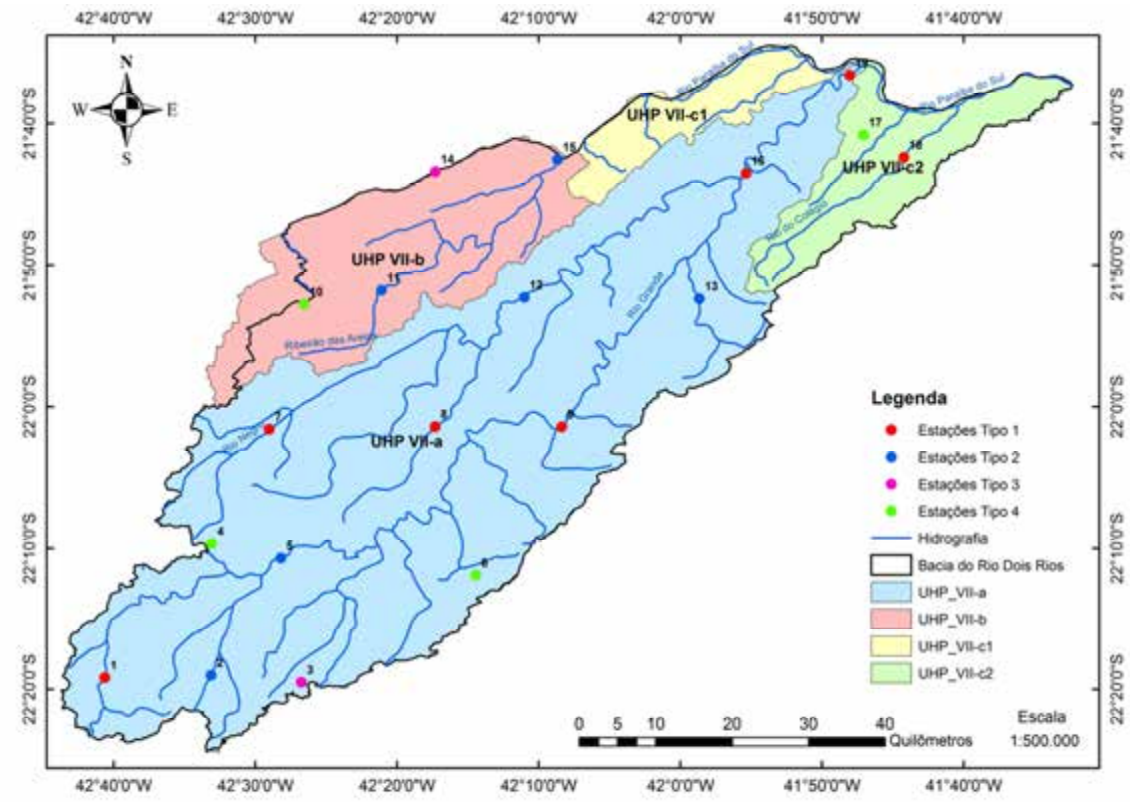


Figura 7.98 – Rede proposta 4 e as unidades hidrológicas de planejamento

Ao observar a Figura 7.98, é possível notar que UHP VII-c1 não tem qualquer estação prevista. Por essa razão, será instalada uma nova estação, do tipo 4 (chuva, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento), conforme mostra a Figura 7.99, ressaltando que os demais aspectos já apresentados até aqui (hidrografia, relevo, uso e cobertura do solo e áreas de proteção) foram devidamente analisados na escolha do posicionamento dessa estação.

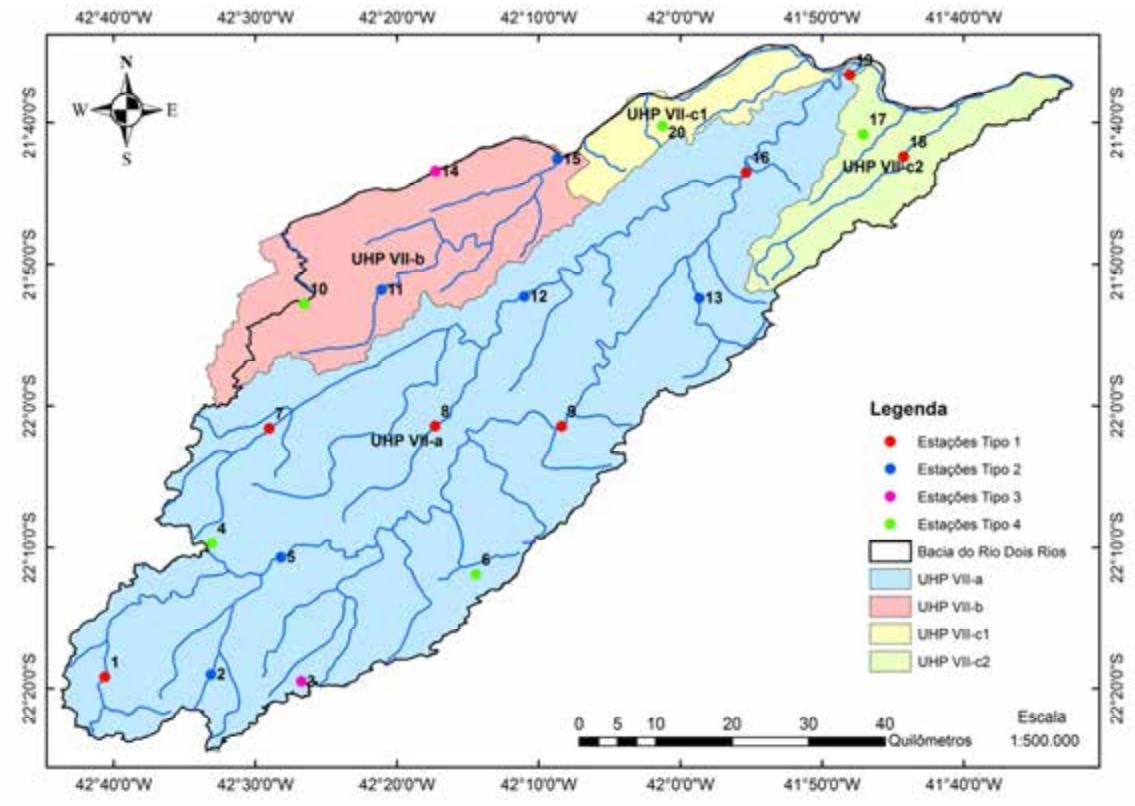


Figura 7.99 – Rede hidrometeorológica – proposta 5

Observando a configuração da proposta 5, propõe-se, ainda, a instalação de mais uma estação do tipo 4 (chuva, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento), próxima à cabeceira do rio do Colégio, de modo a auxiliar os estudos e projetos na UHP VII-c2 (coincidente com a sub-bacia 4). Apesar das dificuldades encontradas no local proposto (região isolada e florestas densas), a localização dessa estação adicional já foi pensada buscando as melhores condições em relação ao relevo, uso do solo e áreas protegidas, disponibilidade e estresse hídrico, estando situada em uma região mais baixa, próximo de estradas e residências esparsas.

Dessa maneira, tem-se a proposta final para a rede hidrometeorológica na bacia do rio Dois Rios, com 21 estações, juntamente com a delimitação das 4 sub-bacias principais (Figura 7.100).

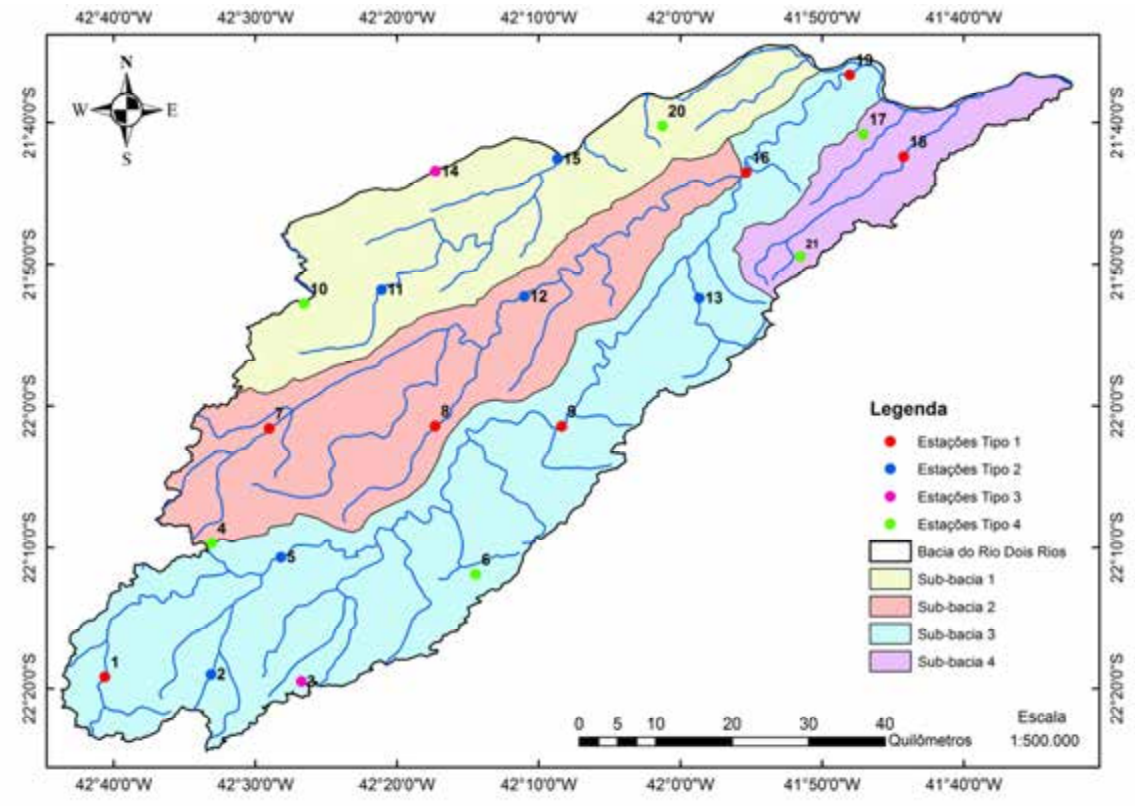


Figura 7.100 – Rede hidrometeorológica – proposta final

O reposicionamento das estações respeitou as distâncias determinadas na análise geoestatística, de 15,0 km para precipitação e de 30,0 km para a temperatura, variando muito pouco em alguns casos, conforme devidamente justificados nos itens 7.4.1 e 7.4.2. Cabe destacar aqui que a quantidade de estações propostas (ao todo, 21) vem ao encontro do recomendado pela WMO em relação ao tamanho da bacia (18).

As estações propostas serão automáticas, isto é, compostas de uma unidade de memória central, chamada *data logger*, ligada a vários sensores dos parâmetros hidrometeorológicos (precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar, direção e velocidade do vento e nível de água), transmitindo, em tempo real, os dados, via satélite, rádio ou celular, em intervalos de minutos ou horas, a ser escolhida de acordo com a taxa de aquisição dos dados.

A medição de vazão líquida, por ser realizada em intervalos maiores de tempo (mensal), será efetuada pelo método convencional, em que apenas uma equipe de hidrometristas vai ao rio dotado de barco e molinete para efetuar a medição da vazão, conforme mostrado na Figura 7.101.

Figura 7.101 – Exemplo de molinete e medição convencional de vazão
Fontes: www.leb.esalq.usp.br e www.sthidro.com.br

Além dos sensores apresentados e do sub-sistema de armazenamento (composto pelo *data logger*), faz-se necessário ter, nas estações, outros dois sub-sistemas, o de energia, que inclui as baterias e, às vezes, um painel solar que as alimenta, e o de comunicação, que é responsável pela transmissão dos dados coletados, armazenados na memória do dispositivo de gravação (*data logger*).

7.6 Análise Crítica

Segundo KAMEL *et al.* (2010), a otimização de uma rede é necessária e essencial, eliminando eventuais redundâncias; por outro lado, é difícil definitivamente otimizar uma rede devido às dificuldades em prever os usos futuros.

Nesse sentido, a presente dissertação discute a proposição de uma rede de monitoramento face à incorporação de uma nova visão, que pressupõe princípios dinâmicos e adaptativos dc funcionamento do sistema físico-social que constitui uma bacia hidrográfica. Segundo essa diretriz, leva-se em conta não somente os métodos tradicionais e baseados apenas em análises matemático-estatísticas, mas também diversos fatores e aspectos da bacia, como, por exemplo, disponibilidade e demanda hídrica, indicadores de estresse hídrico, alterações climáticas e no uso e na ocupação do solo, crescimento da população, características populacionais (Figura 7.102), entre outras.

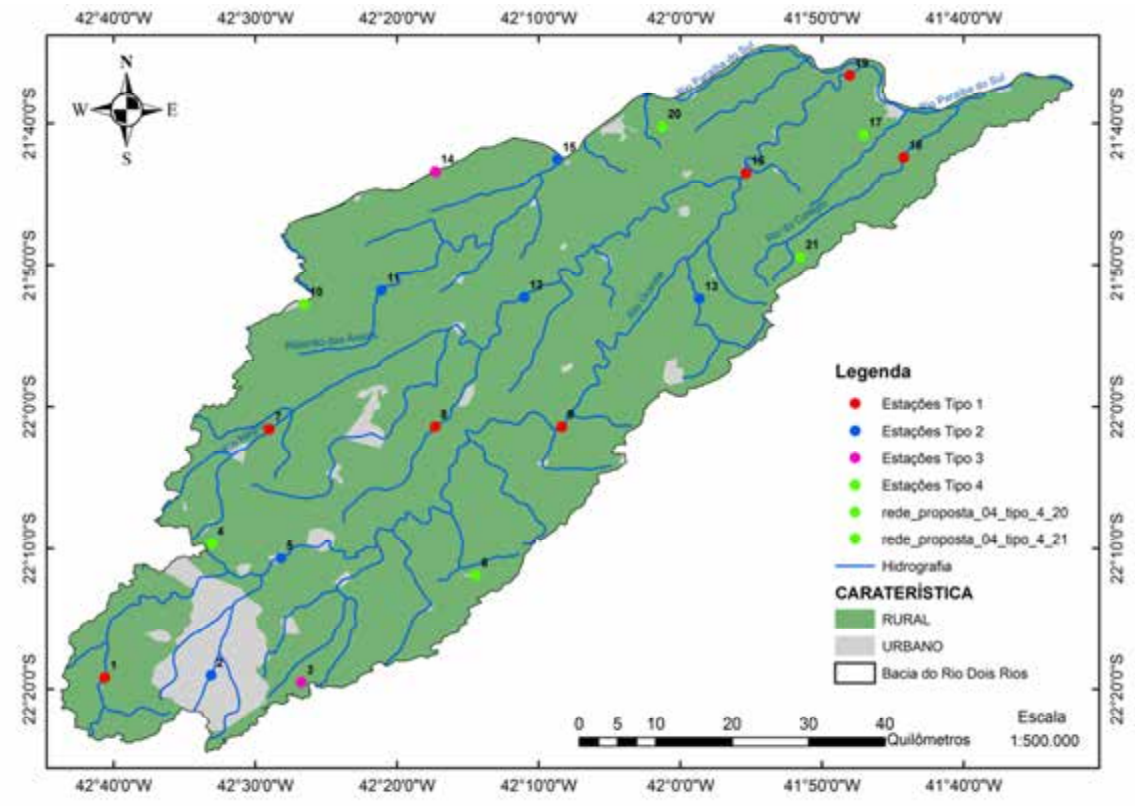


Figura 7.102 – Características populacionais e a rede final proposta

As seções anteriores do trabalho mostraram procedimentos que incorporam a diretriz de conciliar a abordagem matemática-estatística com o suporte de sensoriamento remoto e medições *in situ* a partir de uma concepção de proposição evolutiva da rede meteorológica, consolidando-se, então, na proposta final ilustrada na Figura 7.100. Por outro lado, é percepção desta pesquisa que novos passos podem ser dados com vistas a gerar um referencial de avaliação crítica permanente da rede de monitoramento proposta. Diante desse contexto, construiu-se esta seção final para o presente capítulo, permitindo exercer um poder de crítica social com aderência ao monitoramento físico estabelecido.

Na Figura 7.102, é possível, então, notar, consoante já apresentado anteriormente no âmbito da apresentação das características da bacia em estudo, que a densidade populacional é maior no município de Nova Friburgo e que a bacia do rio Dois Rios tem uma baixa taxa de urbanização. Primeiramente, observa-se que, conforme visto anteriormente, as maiores precipitações tendem a ocorrer nas regiões mais altas da bacia, que é também a região mais densamente ocupada. Além disso, a maior concentração de estações também situa-se nessa mesma região (montante), ilustrando o

critério de instalação das agências de monitoramento, quanto à logística e à facilidade de acesso, priorizando as regiões urbanas e densamente ocupadas.

Essa análise é importante na definição de uma rede de monitoramento, quando avaliada em conjunto com os vetores populacionais de crescimento, identificando as regiões que futuramente estarão ocupadas, uma vez que a urbanização provoca diversas alterações no solo, como a impermeabilização, e essa, por sua vez, altera os regimes do ciclo hidrológico, como infiltração e escoamento. Essas observações indicam que a rede deve ser considerada evolutiva, isto é, cada nova ocupação ou variação na ocupação do solo, incluindo, por exemplo, a instalação de uma nova indústria, enquadrada em um processo crescente de urbanização, influencia a concepção de uma rede de monitoramento.

A disponibilidade hídrica para a bacia foi apresentada no item 6.9. Nesta seção, explora-se o procedimento para obtenção do estresse hídrico, indicador hídrico com viés social, potencialmente passível de ser obtido por sensoriamento remoto e particularmente proposto, nesta dissertação, para ser integrado na avaliação ou na formulação de uma rede de monitoramento. Cabe ressaltar que as análises apresentadas, a seguir, foram baseadas nos produtos MODIS em composições de 8 dias, a saber: 09/01/2011 a 16/01/2011, caracterizando o período chuvoso, e 20/07/2011 a 27/07/2011, caracterizando o período de estiagem.

A Figura 7.103 e a Figura 7.104 mostram as imagens NDVI obtidas para os períodos chuvoso e de estiagem, respectivamente, após os ajustes e correções, indicados no item 5.6.1.

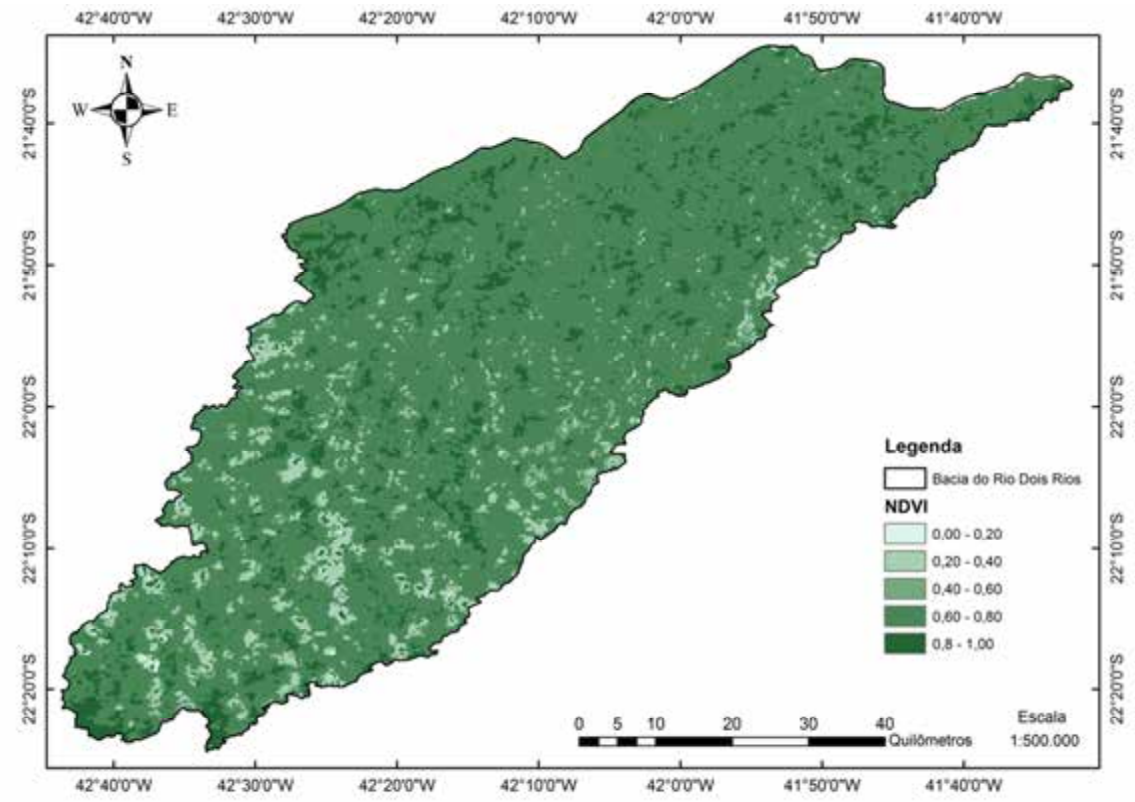


Figura 7.103 – NDVI obtido para o período chuvoso (09/01/2011 a 16/01/2011)

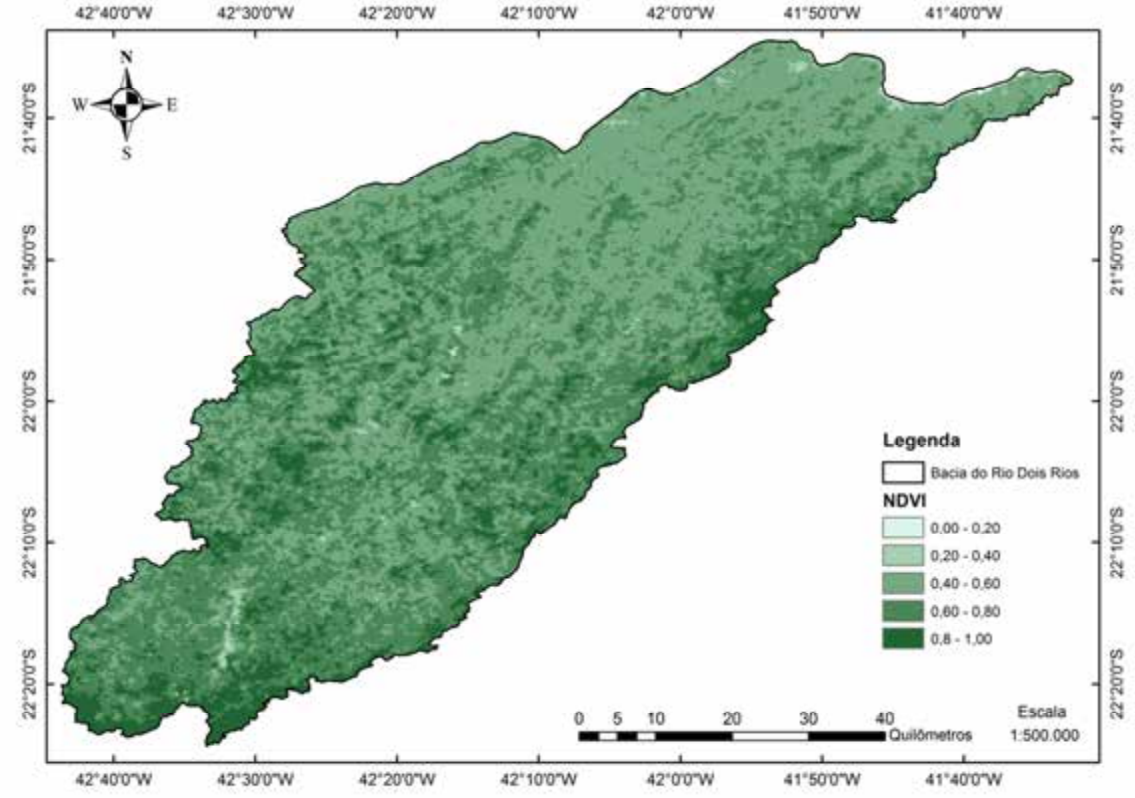


Figura 7.104 – NDVI obtido para o período de estiagem (20/07/2011 a 27/07/2011)

Logo em seguida ao cálculo do NDVI, as imagens de temperatura foram ajustadas, conforme correção indicada na tabela do produto, além da conversão da unidade (Kelvin para Celsius), como pode ser visto na Figura 7.105 (período chuvoso).

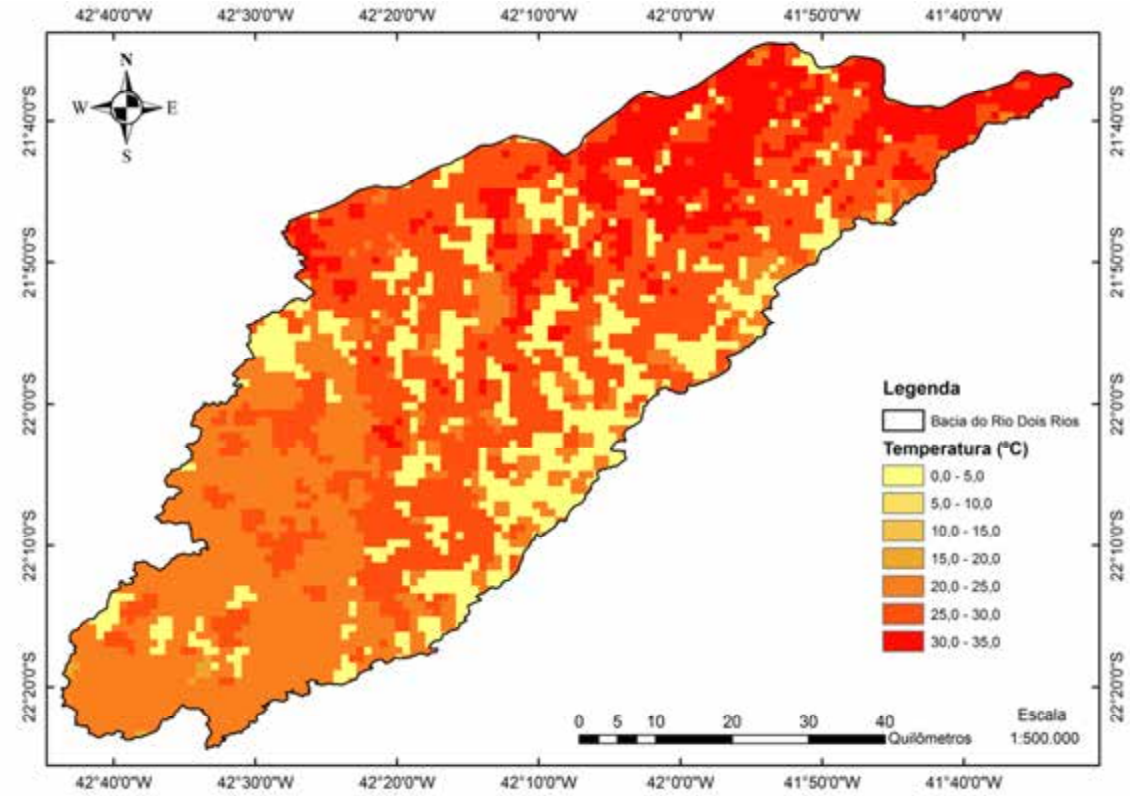


Figura 7.105 – Temperatura obtida para o período chuvoso extremo (09/01/2011 a 16/01/2011)

É possível notar que a imagem de temperatura relativa ao período chuvoso apresenta algumas falhas, que podem ser decorrentes de nuvens durante a passagem do satélite e precisam ser trabalhadas. Sendo assim, conforme explicado no Anexo D, essa imagem foi trabalhada, e as falhas foram preenchidas. Portanto, a Figura 7.106 mostra o resultado dessa interpolação.

Já para a imagem de temperatura referente ao período de estiagem não foi necessária nenhum tipo de interpolação, sendo apresentada na Figura 7.107.

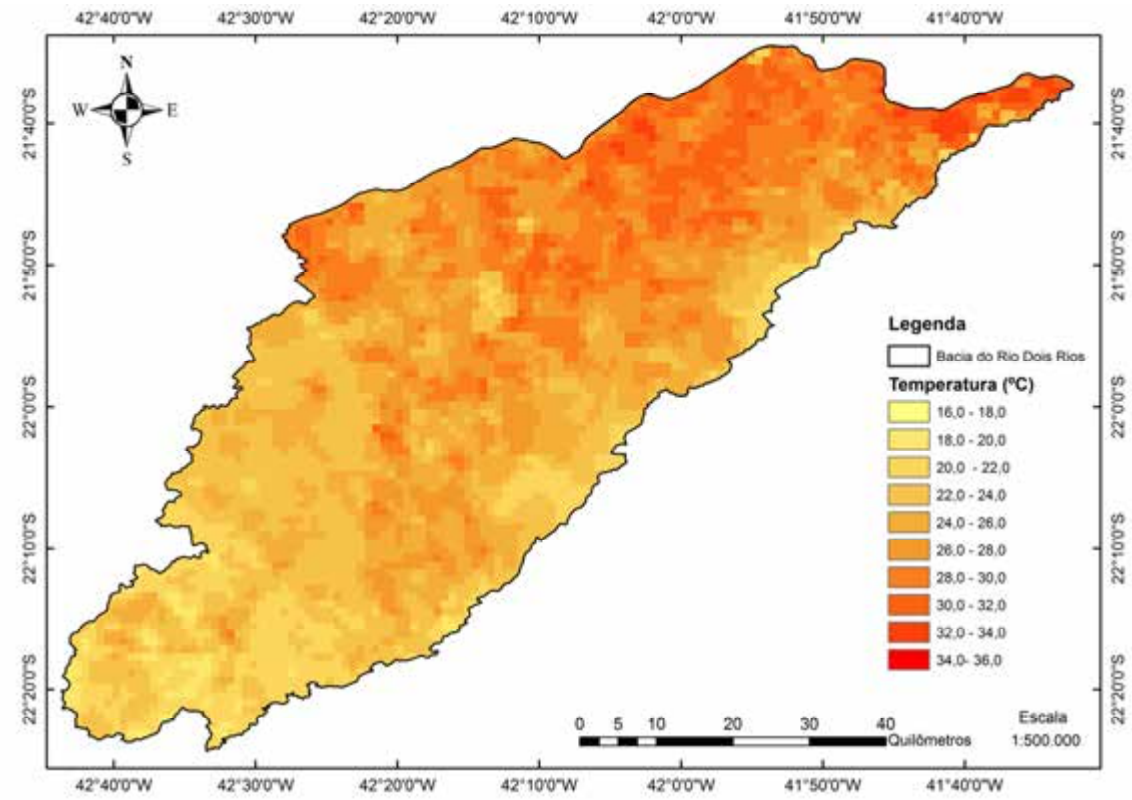


Figura 7.106 – Imagem de temperatura para o período chuvoso (09/01/2011 a 16/01/2011) após a interpolação

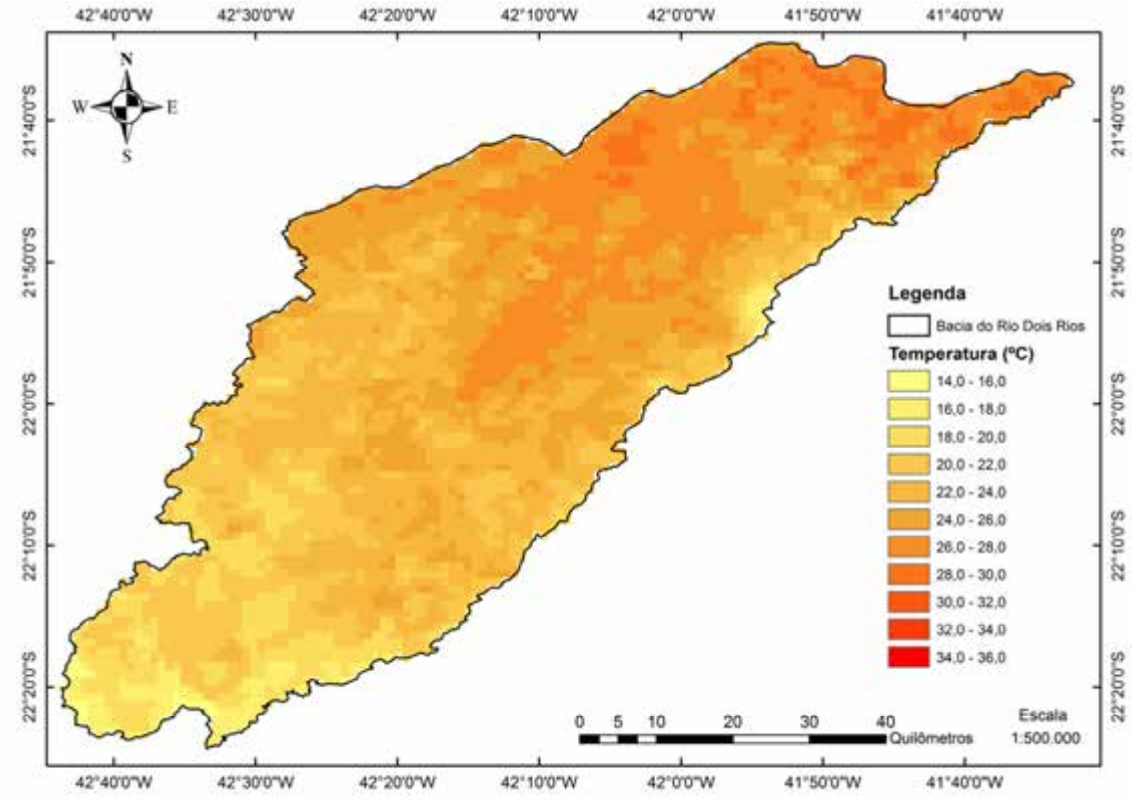


Figura 7.107 – Temperatura obtida para o período de estiagem (20/07/2011 a 27/07/2011)

Cabe registrar que o estresse hídrico, quando baixo, indica que a escassez de água é alta. Finalmente, para a obtenção do estresse hídrico, foram combinadas as imagens de NDVI e de temperatura de cada período, apresentados na Figura 7.108 e na Figura 7.109 (chuvoso e estiagem, respectivamente).

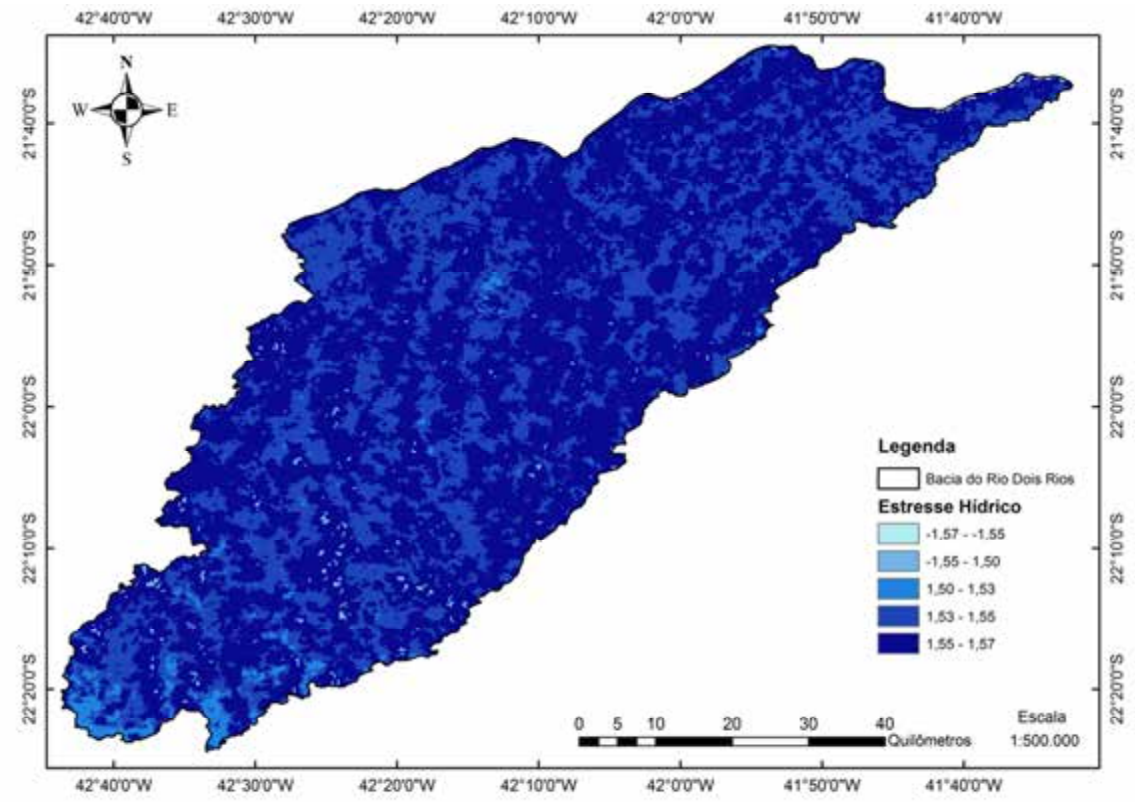


Figura 7.108 – Estresse hídrico obtido para o período chuvoso (09/01/2011 a 16/01/2011)

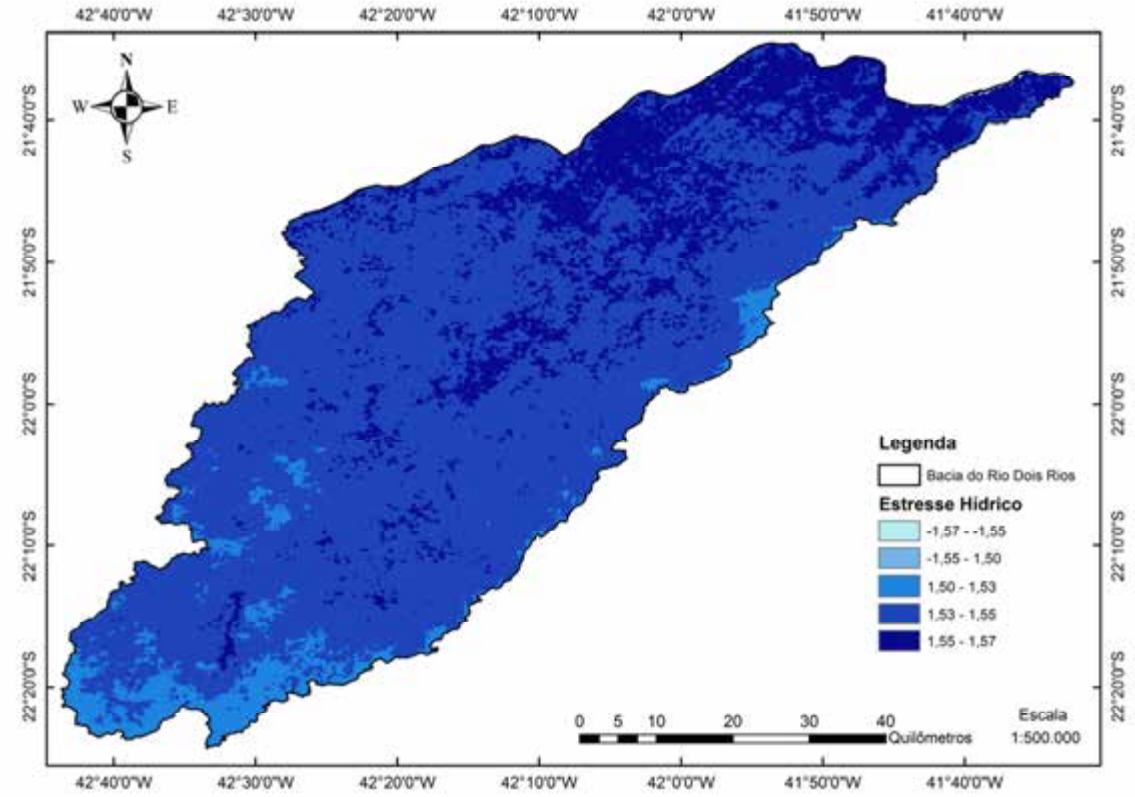


Figura 7.109 – Estresse hídrico obtido para o período de estiagem (20/07/2011 a 27/07/2011)

Analisando o estresse hídrico para o período chuvoso, é possível notar que, de modo geral, a bacia não sofre de estresse devido dos valores de precipitação serem altos, exceto em pontos concentrados que podem estar associados ao uso e ocupação do solo.

Já o estresse hídrico para o período seco evidencia que existem três (3) regiões distintas, mostrando que a cabeceira dos rios sofre mais com a falta de água e possivelmente maior demanda.

Na Figura 7.108 e na Figura 7.109, foram traçados mapas de estresse hídrico que podem ser entendidos como ferramentas para compreensão da escassez hídrica, isto é, da influência da natureza através do tipo de vegetação e do clima (temperatura) na disponibilidade de água no solo. Esse conceito é intrinsecamente dependente da ação do homem e articula-se com a ideia de vulnerabilidade ambiental, uma questão relevante associada diretamente aos riscos ambientais, que também devem ser considerados quando da definição de redes de monitoramento. Os mapas de temperatura e estresse hídrico auxiliam na compreensão dos padrões espaciais de variabilidade do sistema físico e social, o que evidencia que, quanto maior a temperatura, maior é o valor do estresse hídrico.

É preciso readequar a visão tradicional, que teve início no século XX, em que as estações foram sendo instaladas basicamente em função das necessidades predominantes do setor elétrico, ampliando-a no sentido de propor uma rede a partir de novos critérios que relacionem a natureza (características do solo, climáticas, aspectos fisiográficos e outros) e a ocupação humana, contemplando as demandas e a ocupação do solo.

Visando responder as questões apresentadas ao final do item 5.6.1, ao observar as variações de estresse hídrico para os períodos estudados, pode-se concluir que a rede proposta é capaz de acompanhar os eventos extremos. Devido ao aumento da frequência e intensidade de eventos desse tipo, a rede de monitoramento proposta preocupa-se com a percepção da carência hídrica nessas interfaces, buscando monitorar o que está acontecendo na epiderme terrestre. Pode-se, ainda, avaliar as situações de conforto térmico e tentar conduzir a ocupação humana baseando-se na resiliência dessas regiões e na capacidade de enfrentamento a esses eventos. A partir dessa análise, é possível identificar, nos mapas apresentados, os locais mais vulneráveis à ocorrência de eventos extremos, por exemplo, suscetíveis aos maiores índices de precipitação, conjugando-os

com os locais de maior estresse hídrico, permitindo acompanhar e identificar a capacidade do próprio sistema em restabelecer seu equilíbrio e redirecionando as ocupações e desenvolvimento das atividades para esses locais menos vulneráveis e mais resilientes.

A partir de todas as análises realizadas até aqui, pode-se dizer que a rede definida no item 7.5 é iterativa. Necessita-se avaliar a rede proposta por no mínimo 2 ou 3 anos e, posteriormente, após a obtenção das séries de dados de todas as variáveis hidrometeorológicas, pode-se realizar algumas verificações como, por exemplo:

- redundância – estações próximas que fornecem resultados similares, por questões financeiras e de operação e manutenção, poderiam ser removidas ou realocadas;
- frequência de monitoramento dos dados – de posse de uma série maior para todas as variáveis hidrometeológicas da rede, as análises de autocorrelação podem ser refeitas, e a frequência de medição de cada uma delas pode ser maior ou menor;
- espaçamento entre as estações – uma vez que se disponha de monitoramento contínuo de dados e também de estações com melhor distribuição na bacia, é possível refazer as análises variográficas para todas as variáveis monitoradas e verificar se o espaçamento pode ser maior ou menor e também se as variáveis não analisadas (pressão atmosférica, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento) precisam ser medidas em todas as 21 estações da rede proposta;
- variabilidade temporal do uso e ocupação do solo – pode ser que, quando a rede proposta estiver em operação, verifique-se que um ou outro local em que uma estação foi instalada não seja mais adequado;
- disponibilidade hídrica, o estresse hídrico e demandas específicas – podem ser acompanhados, e, caso seja necessário, as estações podem ser deslocadas, tendo também a possibilidade de inserir novas estações.

CAPÍTULO 8 – ESTIMATIVA DE CUSTOS DA REDE

Neste capítulo, serão estimados os custos de instalação, operação e manutenção da rede proposta no item 7.5 a partir de valores obtidos em estimativas de custos de outros estudos semelhantes, mais especificamente dedicados à aquisição de estações hidrometeorológicas.

Desse modo, os custos serão apresentados subdivididos em duas partes:

- aquisição, instalação e implementação;
- operação e manutenção.

Recentemente, a Agência Nacional de Águas (ANA) instituiu alguns critérios a respeito da instalação de estações, como referido na Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 03, de 10/08/2010, que estabelece as condições e procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas e de qualidade da água associadas aos aproveitamentos hidrelétricos.

Ao final, serão estimados os custos totais de implantação da rede proposta e também serão feitas algumas considerações em relação às estações já existentes, que podem refletir na minimização do custo total estimado, uma vez que essas estações já estão equipadas com alguns dos instrumentos necessários, buscando-se, assim, a redução e a otimização desses custos por meio da transferência de sensores de uma estação já existente para uma nova em outro local.

8.1 Aquisição, Instalação e Implementação

Iniciando com os custos de aquisição e instalação, conforme supracitado, as estações propostas serão de 4 tipos (Tipo 1 = 7 estações; Tipo 2 = 6 estações; Tipo 3 = 2 estações; Tipo 4 = 6 estações), sendo apresentados na Tabela 8.1, os sensores que compõem cada um desses tipos.

Tabela 8.1 – Variáveis e sensores para cada tipo de estação

Variável Hidrometeorológica	**Sensores**	**Tipos de Estação**				**Quantidade Total de Sensores**
		1	**2**	**3**	**4**	
Precipitação	Pluviômetro	x	x	x	x	21
Pressão Atmosférica	Barômetro	x	x	x	x	15
Temperatura do Ar	Termômetro	x		x		15
Umidade Relativa do Ar	Higrômetro	x	x	x	x	21
Radiação Solar (ondas curtas)	Piranômetro	x	x	x	x	21
Radiação Solar (ondas longas)		x	x	x	x	21
Vento	Anemômetro	x	x	x	x	21
Nível de água	Sensor de Nível	x	x			13
Vazão líquida	-	x	x			-

De acordo com a Tabela 8.1, nota-se que a vazão líquida não dispõe de qualquer sensor específico, conforme citado anteriormente. Os custos referentes à medição de vazão nas estações tipo 1 e 2 somente serão calculados no âmbito da operação e manutenção da rede, tendo em vista que as medições serão mensais e será necessário, no mínimo, um hidrometrista e equipamentos específicos para realização dessa atividade.

A Tabela 8.2 mostra o valor em dólar (US$) do custo estimado somente para a aquisição dos sensores nas 21 estações propostas, de acordo com o tipo de cada uma delas, baseado em valores obtidos em outros estudos.

Tabela 8.2 – Custo total estimado dos sensores

Sensores	Preço Unitário (US$)	Custo por Tipo de Estação (US$)				Custo Total por Sensor (US$)
		1 (7 estações)	2 (6 estações)	3 (2 estações)	4 (6 estações)	
Pluviômetro	1.200,00	8.400,00	7.200,00	2.400,00	7.200,00	25.200,00
Barômetro	1.100,00	7.700,00	6.600,00	2.200,00	6.600,00	23.100,00
Termômetro	250,00	1.750,00	1.500,00	500,00	1.500,00	5.2520,00
Higrômetro	1.000,00	7.000,00	6.000,00	2.000,00	6.000,00	21.000,00
Piranômetro (ondas curtas)	2.500,00	17.500,00	15.000,00	5.000,00	15.000,00	52.500,00
Piranômetro (ondas longas)	2.100,00	14.700,00	12.600,00	4.200,00	12.600,00	44.100,00
Anemômetro	2.100,00	14.700,00	12.600,00	4.200,00	12.600,00	44.100,00
Sensor de Nível	5.000,00	35.000,00	30.000,00	10.000,00	30.000,00	105.000,00
Custo Total (US$)		**106.750,00**	**91.500,00**	**30.500,00**	**91.500,00**	**320.250,00**

A partir da Tabela 8.2, observa-se que o custo total de aquisição dos sensores que comporão as 21 estações é de US$ 320.250,00 (trezentos e vinte mil e duzentos e cinquenta dólares).

No entanto, como já existem estações pluviométricas instaladas na bacia em estudo, os custos relativos à aquisição dos sensores de precipitação poderiam ser reduzidos se os aparelhos já instalados fossem transferidos para a nova rede proposta de estações. Nesse caso, considerando somente as estações da ANA que operam atualmente (14 no total, conforme pode ser visto na Tabela 7.2, na página 116), os custos de aquisição de pluviômetros reduziriam US$ 8.400,00 (referente a 7 estações), isto é, cairiam de US$ 25.200,00 (referente às 21 estações) para US$ 16.800,00, resultando em uma redução de aproximadamente 3,3 % do valor total dos custos estimados para aquisição, instalação e implantação da rede hidrometeorológica proposta. Desse modo, os custos totais estimados para aquisição dos sensores seriam de US$ 311.850,00 (trezentos e onze mil e oitocentos e cinquenta dólares).

Entretanto, existem custos adicionais de aquisição de outros equipamentos (aparelhos de armazenamento, alimentação e transmissão dos dados) e também de instalação (estruturas de proteção dos instrumentos). Estima-se que cada estação será

composta pelos aparelhos e/ou estruturas apresentados na Tabela 8.3 juntamente com seus preços unitários.

Tabela 8.3 – Custos adicionais de aquisição e instalação para cada estação

Aparelhos e/ou Estruturas	**Preço Unitário (US$)**
Data logger	3.800,00
Fonte de alimentação	650,00
Modem e antena	1.000,00
Estrutura de proteção	600,00
Torre / suporte	3.200,00
Custo total por estação (US$)	**9.250,00**

Portanto, cada estação teria um custo adicional, além dos custos de aquisição dos sensores de US$ 9.250,00 (nove mil e duzentos e cinquenta dólares). O custo total (todas as 21 estações) dos aparelhos que compõem os sistemas de armazenamento, alimentação, transmissão e equipamentos adicionais para medição de vazão é de R$ 194.250,00 (cento e noventa e quatro mil e duzentos e cinquenta dólares).

Para realização das medições de vazão, é necessário computar os custos com os molinetes e acessórios, além do barco com motor de popa. Por meio de pesquisas em lojas que vendem esses produtos, estima-se um custo de US$ 32.000,00 (trinta e dois mil dólares).

Os custos de instalação contariam com a mobilização de uma única equipe para transporte e instalação dos equipamentos; assim, seriam considerados os seguintes custos:

- técnicos – profissionais especializados, competentes e com experiência na montagem e teste dos equipamentos; assumindo que, para execução de tal atividade, sejam necessários 2 (dois) dias de trabalho em cada estação (jornada de 8 horas), contando com 4 (quatro) técnicos, esse trabalho seria realizado em 42 dias; entretanto, considerando as eventuais dificuldades nesse processo e também os tempos de deslocamento, serão computados no cálculo 60 dias (dois meses);
- veículo de transporte – valor estimado em relação aos gastos com o veículo utilizado pelos profissionais (60 dias);

- diárias – valor estimado das despesas dos profissionais responsáveis pela instalação das 21 estações (hotel e alimentação), sendo considerado um total de 240 diárias (60 dias, 4 técnicos);
- materiais de construção da infraestrutura das estações.

O custo estimado para realização da instalação dos sensores e das estações é em torno de US$ 32.500,00 (trinta e dois mil e quinhentos dólares).

Além dos dados mencionados, considera-se um custo de implantação da rede e o processamento dos dados observados, sendo necessário incluir os custos com o código computacional que receberá esses dados. Estima-se o valor de US$ 6.500,00 (seis mil e quinhentos dólares) para a compra de um código computacional com essa finalidade.

Dessa forma, os custos totais de aquisição, instalação e implantação são de US$ 577.100,00 (quinhentos e setenta e sete mil e cem dólares).

8.2 Operação e Manutenção

A seguir, serão apresentados os custos estimados relativos à operação e à manutenção da rede, com base em valores obtidos em outros estudos e também em orçamentos elaborados pelo estado do Rio de Janeiro em suas licitações e contratos.

Os custos de operação referem-se às medições de vazões efetuadas nas 13 estações que contam com o monitoramento fluviométrico da rede proposta, conforme consta a seguir:

- hidrometrista – profissional competente e com experiência em medição de vazão; como as estações têm espaçamento médio de 15 km, estima-se que seja possível efetuar a medição de vazão em 2 estações em um dia; considerando uma jornada de 8 horas, seria possível realizar esse trabalho em torno de 7 dias de um mês;
- ajudante – profissional responsável por acompanhar o hidrometrista durante o processo de medição de vazão; sendo assim, o tempo total de trabalho em um mês do ajudante é igual ao do hidrometrista;
- veículo de transporte – valor estimado em relação aos gastos com o veículo utilizado pelos profissionais (7 dias/mês);

- diárias – valor estimado das despesas dos profissionais responsáveis pelas medições de vazão nas 13 estações (hotel e alimentação), sendo considerado um total de 14 diárias (hidrometrista e ajudante).

Os custos de operação (medição de vazões), conforme mostrados acima, são estimados em US$ 8.000,00 (oito mil dólares) por mês.

Os custos de manutenção estão associados a diversos aspectos que podem interferir no bom funcionamento das estações hidrometeorológicas, a saber:

- crescimento de vegetação ou qualquer outra obstrução próxima às estações que atrapalhem no desempenho dos aparelhos, afetando os resultados obtidos;
- danos nos instrumentos, que podem ser inerentes ao próprio instrumento ou por ações de vandalismo;
- desnivelamento dos aparelhos, que, com o tempo, podem sofrer desníveis significativos, a ponto de afetarem a obtenção dos dados;
- problemas associados aos dispositivos de registro de dados (*data loggers*) em relação à capacidade de armazenamento (a memória pode ficar cheia e não armazenar os próximos dados, por exemplo);
- falhas e interrupções nos sistemas de comunicação, por exemplo, na comunicação via celular; se não for feita a recarga, os dados ficam armazenados, mas a transmissão dos mesmos pára;
- problemas associados com as fontes de alimentação dos sensores.

Nesse sentido, os custos foram estimados considerando-se as seguintes despesas:

- eletrotécnico – profissional responsável por vistoriar as estações mensalmente e identificar os problemas técnicos associados ao mau funcionamento dos sensores, fontes de alimentação e transmissão de dados (estima-se que, considerando uma jornada de 8 horas e espaçamento entre as estações aproximado de 15 km, seja possível vistoriar 3 estações em um mesmo dia, totalizando 7 dias em um mês);
- ajudante – profissional responsável por acompanhar o eletrotécnico nas vistorias e ser responsável pela manutenção da estação (remoção da vegetação ou obstrução, nivelamento dos aparelhos, entre outros);

estima-se, também, que o ajudante vistorie 3 estações em um dia, trabalhando 7 dias por mês nesta atividade;

- veículo de transporte – valor estimado em relação aos gastos com o veículo utilizado pelo eletrotécnico e pelo ajudante (7 dias/mês);
- diárias – valor estimado das despesas dos profissionais responsáveis pelas vistorias e manutenção das estações (hotel e alimentação), sendo considerado um total de 14 diárias (dois profissionais);
- transmissão de dados – custos relativos à continuidade da transmissão dos dados, por exemplo, no caso de transmissão via celular, a recarga dos *chips* (de todas as 21 estações).

Os custos de manutenção conforme explicitados acima são estimados em US$ 6.500,00 (seis mil e quinhentos dólares) mensais.

Diante do exposto, o custo total mensal estimado de operação e manutenção da rede é de R$ 14.500,00 (quatorze mil e quinhentos dólares).

8.3 Custos Totais Estimados

Com base no que foi apresentado, o custo inicial total estimado da rede proposta associado à aquisição de equipamentos, instalação e implantação da rede hidrometeorológica proposta, composta de 21 estações, com 4 diferentes configurações de sensores é de US$ 577.100,00 (quinhentos e setenta e sete mil e cem dólares). Os custos anuais relacionados à operação e manutenção são de US$ 174.000,00 (cento e setenta e quatro mil dólares).

Estes valores não são considerados grandes montantes se a rede for instalada, por exemplo, pelo governo, uma vez que uma bacia bem monitorada é capaz de auxiliar em diversos projetos e estudos em desenvolvimento e futuros, minimizando, assim, outros gastos despendidos por conta da insuficiência de dados hidrometeorológicos.

CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de definir uma rede de monitoramento hidrometeorológico ótima para a bacia do rio Dois Rios, localizada na região serrana do estado do Rio de Janeiro, de modo que se atendesse a diversas finalidades, entre elas, prevenção de eventos extremos e desastres e estimativas dos balanços hídricos e de energia nas escalas diária e mensal.

Para cumprir o escopo proposto, empregaram-se dados pontuais de precipitação, obtidos *in situ* por meio de postos pluviométricos instalados na bacia, e dados espaciais de chuva, temperatura e vegetação, adquiridos através de imagens provenientes de técnicas de sensoriamento remoto, a partir dos produtos TRMM (precipitação) e MODIS (temperatura da superfície terrestre continental e vegetação). Para a aplicação dos dados de precipitação na metodologia proposta, conduziram-se análises de consistência e co-validação entre os dados das estações pluviométricas e os dados espaciais das estações virtuais definidas por meio do satélite TRMM mediante elaboração de séries temporais e extração das correspondentes correlações na escala do dia e na escala do mês. Nesse exame, verificou-se consistência bastante satisfatória quando utilizados ambos os tipos dados de precipitação na escala mensal, sendo encontrados coeficientes de correlação iguais ou superiores a 0,88.

Complementarmente, efetuou-se a caracterização físico-hídrica da bacia e do comportamento das variáveis estudadas. Em particular, observou-se que a região de estudo apresenta formato alongado, com relevo bem acentuado na parte de montante e áreas mais planas a jusante, sendo os regimes hidrológicos bem caracterizados, como, por exemplo, verão chuvoso e inverno seco, além de maiores precipitações e menores temperaturas na porção de montante e o oposto na porção mais a jusante.

Na literatura, não são encontradas muitas iniciativas desse tipo, ou seja, são encontrados relativamente poucos trabalhos e estudos que se dispõem a desenvolver uma metodologia para instalação de uma rede monitoramento, embora a relevância do assunto. Por outro lado, há o reconhecimento dessa necessidade na produção de diversas pesquisas na área de regionalização de informações hidrometeorológicas, que constituem importante suporte teórico para a concepção e formulação de uma rede de monitoramento.

Em função dos poucos estudos disponíveis concentrarem-se predominantemente na questão de avaliação da qualidade das redes atualmente instauradas nas bacias, propôs-se uma metodologia que busca a definição de rede de monitoramento hidrometeorológico a partir de uma visão nova, adaptativa e evolutiva, contando com seis etapas, começando pelo acesso da qualidade e da representatividade dos dados e da rede atualmente instalada, incluindo estudo de séries temporais e correlações, avaliação de implementação de rede mínima de observações, aplicação do método de componentes principais e uma análise temporal referente à cadência de amostragem da precipitação, que se revelou variável adequada para o propósito da pesquisa.

Nas demais etapas, quantificaram-se as estações necessárias para composição da rede proposta e estudou-se o posicionamento mais adequado, de maneira distribuída na bacia, dessas estações. Para o espaçamento apropriado, optou-se por uma abordagem geoestatística mediante a construção de variogramas para os dados de precipitação e de temperatura. A partir da definição desse espaçamento ideal, o posicionamento das estações foi reavaliado com base nas análises dos aspectos físico-hídricos da bacia em estudo, como a hidrografia, o relevo, o uso e ocupação do solo e áreas protegidas, de maneira a evitar que as estações fossem alocadas em locais que fossem inviáveis sob o ponto de vista da instalação, da operação e da manutenção. Ao final, na perspectiva de contribuição adicional deste trabalho no tocante ao estudo de implantação de redes de monitoramento, foi feita uma análise crítica da rede proposta baseada em fatores como, por exemplo, a disponibilidade hídrica, o estresse hídrico, a distribuição populacional e a influência das demandas nos regimes hidrometeorológicos da bacia com especial suporte de geotecnologias, notadamente sensoriamento remoto.

Para desenvolvimento dessa metodologia, como uma das finalidades da rede proposta é a prevenção de eventos extremos e desastres naturais, foram definidos os períodos de amostragem, buscando-se caracterizar dois regimes distintos, sendo um período chuvoso e outro de estiagem. Além desses períodos, para a análise do posicionamento e da distância mais apropriada para a instalação das estações propostas, foi definido também um período chuvoso considerado de regime médio ou normal. A escolha desses períodos foi baseada na análise dos meses e dias mais chuvosos e secos das séries de dados disponíveis de precipitação, considerando os dados das estações pluviométricas e os dados do TRMM, que, por sua vez, também permitiram a escolha de um mês e dia de um período chuvoso normal, isto é, dentro da média para a bacia.

Mais especificamente, identificou-se, como período chuvoso extremo, o mês de janeiro de 2011, enquanto o dia 12/01/2011 recebeu atenção especial na medida em que foi evidenciado como de chuva extrema no evento da relativamente recente tragédia na região serrana do estado do Rio de Janeiro. Como período chuvoso médio, foi selecionado o mês de janeiro de 2013 e o dia 26/01/2013, enquanto, como período de estiagem, escolheu-se o mês de julho de 2011 e o dia 21/07/2011. Cabe destacar que, por conta da disponibilidade dos produtos MODIS para temperatura e vegetação, a escala de 8 dias foi adicionalmente considerada, sendo analisados os períodos extremos de chuva e de estiagem, tendo sido considerados os seguintes intervalos dentro dos meses escolhidos: 09/01/2011 a 16/01/2011 e 20/07/2011 a 27/07/2011, respectivamente.

Algumas conclusões importantes, ou mesmo informações já apresentadas anteriormente no documento, que merecem um destaque especial para melhor compreensão do tema apresentado, seguem relacionadas na sequência do texto, discriminadas segundo as diferentes etapas no processo de desenvolvimento da dissertação.

9.1 Quanto ao diagnóstico da rede

Uma análise exploratória quali-quantitativa da rede atualmente instalada na bacia do Dois Rios foi efetuada através da análise de componentes principais, que fornece subsídios na compreensão de grande quantidade de dados. Os resultados revelaram que algumas estações fornecem dados de precipitação com padrões similares, podendo ser consideradas, em certo grau, redundantes, com indicativos de que, eventualmente, possam ser removidas ou remanejadas.

9.2 Quanto ao processo de posicionamento das estações

Para definição da disposição geográfica das estações, primeiramente, foi realizada uma análise geoestatística por meio da construção de variogramas com os dados de precipitação dos postos pluviométricos e com os dados de temperatura da superfície terrestre continental obtidos a partir dos produtos MODIS. No âmbito dessa definição do espaçamento máximo entre as estações, foi determinado um espaçamento de 15,0 km entre as estações com monitoramento de precipitação e de 30,0 km para o monitoramento de temperatura. Após a definição dessa configuração inicial da rede, foi

proposta a inclusão de sensores para monitoramento de outras variáveis hidrometeorológicas, a saber, pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, direção e velocidade do vento, nível de água e vazão líquida, sendo essas últimas duas variáveis definidas a partir de análise detalhada da hidrografia da bacia.

Para o reposicionamento das estações, foram analisados outros aspectos físico-hídricos da bacia do rio Dois Rios, como o relevo, a ocupação e o uso do solo e a existência de áreas protegidas, a fim de sugerir o local mais adequado de instalação e implantação de cada uma das estações propostas. A rede final proposta, com os mínimos custos de implementação, conta com um total de 21 estações, divididas em 4 (quatro) tipos de configuração das variáveis monitoradas, a saber:

- tipo 1 – estações dotadas de sensores de medição de chuva, nível de água (consequentemente, vazão), pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento;
- tipo 2 – estações equipadas com sensores de medição de chuva, nível de água (consequentemente, vazão, essencial para estabelecimento de curva-chave), pressão atmosférica, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento;
- tipo 3 – estações com equipamentos para monitoramento de chuva, pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento;
- tipo 4 – estações dotadas de sensores que medem chuva, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento.

9.3 Quanto à disponibilidade hídrica e ao estresse hídrico

Foram incorporados, na metodologia de definição de redes de monitoramento hidrometeorológico, indicadores de disponibilidade hídrica e de avaliação do estresse hídrico, com o intuito de inovar na abordagem desse tema. Nesse sentido, avalia-se a rede de monitoramento proposta de modo que esteja consistente com a dinâmica físico-social da bacia hidrográfica em estudo, sendo denominada de análise crítica e que buscou refletir sobre as seguintes questões:

- a rede proposta atende ao monitoramento de eventos extremos?
- como ponderar a ocupação populacional com a avaliação da resiliência de bacias hidrográficas no enfrentamento de eventos extremos?
- o monitoramento de eventos extremos permite delimitar limiares de disponibilidade hídrica e de ocupação em uma região?
- como a rede pode adequadamente monitorar processos de alterações ou mudanças climáticas e correspondentes impactos nos ecossistemas presentes em uma bacia hidrográfica?

A partir dessa análise, foi possível identificar, nos mapas elaborados (item 7.6), os locais mais vulneráveis à ocorrência de eventos extremos. Conjugando essas informações com os locais de maior estresse hídrico, pode-se melhor acompanhar e identificar a capacidade do próprio sistema em re-estabelecer seu equilíbrio, orientando a condução das ocupações e o desenvolvimento das atividades para os locais menos vulneráveis e mais resilientes.

9.4 Quanto ao custo de implantação da rede

O custo estimado inicial, que corresponde à aquisição de sensores, instalação e implementação da rede, é de US$ 577.100,00 (quinhentos e setenta e sete mil e cem dólares). Já os custos de operação e manutenção são muito menores quando comparados aos custos iniciais, entretanto são extremamente importantes, sendo da ordem de R$ 14.500,00 (quatorze mil e quinhentos dólares) por mês. Os custos de operação apresentados acima são referidos à transmissão de dados via celular e, no caso de locais que não apresentam condições satisfatórias de cobertura GSM (*Global System for Mobile*), a rede proposta pode ser composta com equipamentos de transmissão via rádio.

Em relação à rede atualmente instalada, destaca-se ainda uma economia de US$ 8.400,00 (oito mil e quatrocentos dólares) para implantação da nova rede, uma vez que foi proposta a transferência de equipamentos de monitoramento de precipitação de 7 (sete) estações consideradas redundantes, isto é, estações que estavam muito próximas de outras e que não forneciam informações adicionais.

9.5 Quanto à implementação de uma rede ótima

Conforme exposto previamente, o conceito de ótimo, quando utilizado para definição de rede de monitoramento, é complexo e paradoxal, uma vez que, para a aplicação da metodologia proposta, é necessária a ampla disponibilidade dos dados referentes às variáveis hidrometeorológicas que se propõe monitorar nas estações da rede. O paradoxo surge justamente no fato de que, se a bacia fosse bem monitorada, não haveria a necessidade de proposição de uma rede adequada. Portanto, neste trabalho, buscou-se, a partir dos dados disponíveis, a definição de uma rede adequada e bem distribuída para a bacia do rio Dois Rios com a finalidade de prevenção de eventos extremos e balanço hídrico e de energia nas escalas do dia e do mês.

9.6 Quanto aos pontos fortes e fracos da metodologia

Os pontos fortes da metodologia proposta estão associados, primeiramente, ao fato de ser uma metodologia de fácil aplicação e que pode ser desenvolvida a partir de dados provenientes de diversas formas de aquisição, sejam eles de monitoramento *in situ* ou ainda oriundos de sensoriamento remoto ou radar. Outra vantagem dessa metodologia, na linha da aquisição dos dados para aplicação das análises exploratória, temporal e espacial, diz respeito ao potencial emprego em bacias sem monitoramento, isto é, em bacias que não possuem qualquer estação física, seja ela convencional ou automática. Para aplicação dessa metodologia, os dados de sensoriamento remoto e de radar oriundos de bases globais seriam suficientes para desenvolvimentos das análises.

Talvez a maior dificuldade de aplicação da metodologia esteja associada à questão do reposicionamento das estações e análise crítica, uma vez que se faz necessário o conhecimento da bacia em estudo, exigindo informações sobre o relevo, o uso e ocupação do solo e áreas protegidas em escalas adequadas, bem como dados sobre disponibilidade hídrica e demandas futuras, que, por vezes, podem estar indisponíveis em bacias ainda pouco ou não exploradas.

9.7 Recomendações para trabalhos futuros

O estudo efetuado neste trabalho esteve submetido a uma série de limitações dissecadas ao longo do texto, intrinsecamente e diretamente conectadas a incentivos para a condução de novas pesquisas, que serão novamente revisitadas, sem esgotá-las, destacadas a seguir.

A fim de resolver ou suprir, em parte, a escassez de dados sobre grandes regiões, os dados de sensoriamento remoto são de importância primordial, mesmo que essas fontes devam ser sempre regionalmente validadas, isto é, confrontadas com dados observados *in situ* ou dados estimados a partir de observações. Quanto aos dados espaciais de precipitação, levando-se em conta que os dados do TRMM têm resolução equivalente a 25 km e com base nos resultados obtidos ao realizar este estudo, verificou-se que a obtenção de resultados mais precisos requer maior resolução espacial dos dados de chuva para superar as dificuldades encontradas na análise da bacia do rio Dois Rios. Para bacias de similar porte, recomenda-se a aplicação dos procedimentos adotados para proposição de redes de monitoramento hidrometeorológico apresentadas nesta dissertação, utilizando, alternativamente, os dados espaciais de precipitação com uma resolução maior, que é o caso do CMORPH (CPC *Morphing Technique*), um produto disponibilizado pelo NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* da NOAA. O CMORPH tem resolução espacial de 8 km, sendo derivado basicamente de sensores que operam na faixa de micro-ondas a partir de satélites de órbita polar, complementados, no tempo e no espaço, por meio de sensores infravermelhos. Com essa resolução, a título de ilustração, o emprego dos dados do CMORPH geraria, aproximadamente, o dobro de pontos na bacia do rio Dois Rios, ou seja, de 14 a 15 estações virtuais em contraposição aos 7 obtidos no presente estudo.

Ainda associada à questão dos dados de precipitação, vale citar aqui a possibilidade da utilização de dados de radar meteorológico, em que são empregadas ondas eletromagnéticas de alta energia para alcançar grandes distâncias, para avaliação da distribuição e análise do regime de chuvas, bem como aplicação, principalmente, na terceira etapa da metodologia proposta, que se refere à construção de variogramas para definição das distâncias entre as estações. Dessa forma, é possível a utilização dos dados de radar meteorológico, com certo cuidado, uma vez que o radar não mede diretamente chuva. O radar recebe um determinado nível de retorno dos alvos de chuva denominado de refletividade, que possui relação física com o espectro de gotas observado. Assim, pode-se determinar, a partir desse espectro, uma relação entre a refletividade do radar e a taxa de precipitação correspondente.

Como não foi possível construir variogramas para as demais variáveis hidrometeorológicas devido à insuficiência de séries significativas de dados, é recomendável que, posteriormente, sejam analisadas as demais variáveis para avaliação

mais precisa a respeito da necessidade ou não de monitoramento dessas variáveis em todas as estações da rede proposta nesta dissertação. Ressalta-se, ainda, que, as estações hidrometereológicas aqui propostas estão associadas aos dados meteorológicos e hidrológicos, entretanto, esses últimos estão associados apenas à quantidade de água (precipitação, nível de água e vazão), não sendo analisadas as variáveis associadas à qualidade da água (temperatura, condutividade, turbidez e pH). Além disso, também não faz parte do escopo desta dissertação as questões hidrossedimentológicas. Dessa forma, recomenda-se que os próximos estudos de implantação de redes de monitoramento hidrometeorológico levem em consideração também essas variáveis ou que sejam realizados estudos específicos para a definição de redes de monitoramento da qualidade da água e do ar, por exemplo.

Outras variáveis que poderiam ser incorporadas à rede de monitoramento e que não foram estudadas no âmbito deste trabalho, são aquelas associadas ao solo, como a umidade do solo e a produção de nutrientes e sedimentos na escala da bacia, variáveis extremamente importantes para usos da água relacionados à irrigação, por exemplo. No entanto, como não havia estações que monitorassem esse tipo de dados, essas variáveis também não foram diretamente consideradas. Por essa razão, também não foi possível avaliar a precisão necessária para cada variável hidrometeorológica das estações. Desse modo, é recomendado que, para a efetiva instalação dos sensores de cada estação, seja analisada a precisão de cada instrumento.

É recomendado, ainda, que a avaliação da rede através da análise de componentes principais (ACP), proposta neste trabalho, seja realizada após 2 ou 3 anos de sua operação, de modo a otimizar a rede de monitoramento na bacia em estudo, auxiliando no refinamento para definição da rede ótima.

Cabe destacar que, inicialmente, a concepção inicial metodológica deste trabalho contava com mais uma etapa, que diz respeito à modelagem hidrológica chuva-vazão como forma de validação da rede proposta. Essa modelagem auxiliaria na definição do que aqui está a se denominar de estimativa da chuva correta, buscando ainda analisar a sensibilidade dos dados *in situ* e de satélite, com potencial de aplicação em bacias com ou sem monitoramento, na perspectiva de uma gestão de recursos hídricos dinâmica e adaptativa, levando-se em consideração a escala e a dimensão da bacia. Recomenda-se,

assim, que a proposição e definição de uma rede de monitoramento seja acompanhada de uma modelagem hidrológica.

Como comentários finais, enfatiza-se que a definição de rede de monitoramento é uma atividade fundamental para o bom desempenho de estudos e projetos de engenharia. Todavia é necessária uma constante reavaliação e redefinição durante todo o período de operação dessa rede, de maneira a viabilizar remanejamentos de estações e até mesmo instalação de novas, além de acompanhar continuamente as alterações na bacia, como clima e uso e ocupação do solo, que podem refletir significativamente nas variáveis hidrometeorológicas observadas. Somente será possível obter uma rede ótima de monitoramento hidrometeorológico aplicando a metodologia proposta neste trabalho se as análises realizadas forem constantemente refeitas, isto é, se houver o acompanhamento de todos os fatores que influenciam o regime hidrometeorológico na bacia e também o acompanhamento de todas as variáveis monitoradas, avaliando a necessidade de adição ou remoção das estações propostas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACQUAAH, F. A. A. & DANKWA, J. B. "Ghana Meteorogical Networks". In: **Symposium Desing of Hydrological Networks – Planification des Réseaux Hidrologiques**, Quebec, Canadá, pp. 158 – 161, 1965.

AL-ZAHRANI, M. & HUSAIN, T. "An algorithm for designing a precipitation network in the south-eastern region of Saudi Arabia". **Journal of Hydrology**, vol. 205, pp. 205–216, 1998.

ALVES, A. V.; SOUZA, I. A.; LACERDA, F. F.; SOUZA, W. M.; CORREIA, A. M.; FERREIRA, M. A. F. "Análise Preliminar da Rede Pluviométrica de Pernambuco". In: **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu – PR, 2002.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Evolução da Rede Hidrometeorológica Nacional**. Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica. – V. 1, n. 1, Brasília, DF – Brasil, 2007.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Notas de Geoestatística**. Acta Geologica Leopoldensia, XXV (55), pp. 3-14, 2002.

ARAÚJO, A. N. & GUETTER, A. K. "Validação da Chuva Estimada por Satélite "CMORPH" na Modelagem Hidrológica do Alto Iguaçu". In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Volume 12, n. 3, Jul/Set 2007, pp. 189-198, 2007.

AUSTIN, P. M. "Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall". **Monthly Weather Review**, v. 115, pp. 1053–1070, 1987.

AWADALLAH, A. G. "Selecting Optimum Locations of Rainfall Stations Using Kriging and Entropy". **International Journal of Civil & Environmental Engineering** IJCEE-IJENS Vol. 12, No. 1, pp. 36-41, 2012.

BAERISWYL, P. A. & REBETEZ, M. "Regionalization of precipitation in Switzerland by means of principal component analysis". **Theoretical and Applied Climatology**, v. 58, n. 1-2, pp. 31-41, 1997.

BARBOSA, M. C. D. **Geoestatística Aplicada a Dados de Radar Meteorológico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2000.

BARKER, J. L., HARDEN, M. K., ANUTA, E. A., SMID, J., HOUGT, D. **MODIS spectral sensivity study: requirements and characterization**. Washington: Nasa, 84p. Oct, 1992,

BARNES, W.L., XIONG, X., SALOMONSON, V.V. "Status of Terra MODIS and Aqua MODIS". **Advanced Space Research**, v. 32, pp. 2099-2106, 2003.

BARRERA, D. F. "Precipitation estimation with the *hydro-estimator* technique: its validation against raingage observations". In: **VII Congresso da IAHS**, Foz do Iguaçu, 2005.

BASTIN, G., LORENT, B., DUNQUÉ, C., GEVERES M. "Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations". **Water Resources Research**, 20(4), pp. 463-70, 1984.

BECKER, A. & SERBAN, P. **Hydrological models for water – resources system design and operation**. In: Operational Hydrology Report, v. 34, Geneva, WMO, 80 p, 1990.

BEESLEY, C., FROST, A., & ZAJACZKOWSKI, J. "A comparison of the BAWAP and SILO spatial interpolated daily rainfall datasets". In: **18th World IMACS/MODSIM Congress**, Cairns, Australia, 13–17 July, 2009.

BELETE, A. B. "To upgrade the hydrometeorological network in Ethiopia". In: **25th WEDC Conference, Integrated Development for Water Supply and Sanitation**. Addis Ababa, Ethiopia, 1999.

BETTÚ, D. F. & SOARES, P. C. "Interpretação Geomorfológica de Parâmetros Variográficos do Relevo". **Geociências**, v. 32, n° 1, São Paulo – SP, 2013.

BLÖSCHL, G. & SIVAPALAN, M. "Scale Issues in Hydrological Modelling: A Review". **Hydrological Processes**, v. 9, pp. 251-290, 1995.

BOGARDI, I. & BARDOSSY, A. Multicriterion network deseign using geoestatistics. **Water Resources Research**, 21(2), pp. 199-208, 1985.

BRANDES, E. A., VIVEKANANDAN, J., WILSON, J. W. "A comparison of radar reflectivity estimates of rainfall from collocated radars". **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 16, pp. 1264–1272, 1999.

BROCK, F. V., CRAWFORD, K. C., ELLIOTT, R. L., CUPERUS, G. W., STADLER, S. J., JOHNSON, H. L., EILTS, M. D. “The Oklahoma Mesonet: A Technical Overview”. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 12, pp. 5-19, 1995.

BUARQUE, D. C., PAIVA, R. C. D. de, CLARKE, R. T., MENDES, A. B. “A comparison of Amazon rainfall characteristics derived from TRMM, CMORPH and the Brazilian national rain gauge network”. **Journal of Geophysical Research**, Volume 116, pp. 1984–2012, 2011.

CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURVO, R. F., KONOPA, A. E. “Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils”. **Soil Science Society of American Journal**, v.58, n.5, pp. 1501-1511, 1994.

CHEN, Y. C., WEI, C., YEH, H. C. **Rainfall network design using kriging and entropy**. Hydrological Processes, vol. 22, pp. 340–346, 2008.

COLLISCHONN, B., ALLASIA, D., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. “Estimativas de precipitação por sensoriamento remoto passivo: desempenho do satélite TRMM na bacia do alto Paraguai até Descalvados”. In: **Anais 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande**, Brasil, 11-15 novembro, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, pp.47-56, 2006.

COLLISCHONN, B., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. “Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates”. **Journal of Hydrology**, vol. 360, pp. 207–216, 2008.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IPH-UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2006.

COOPER, M. R. & Fernando, D. A. K. The effect of the rain-gauge distribution on storm water models. In: **Proceedings of the 18th World IMACS / MODSIM Congress**, Cairns, Australia, 13–17 July, pp. 3500–3506, 2009.

CPTEC/INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Estimativa de Precipitação por Satélite**. Parte I - Infravermelho e Visível. 2011. Disponível em: <http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/curso/daniel/precXsatelite1.pdf>. Acessado em 13 de agosto de 2014.

CRESSIE, N. "Fitting variogram models by weighted least squares". **Mathematical Geology**, v. 17, pp. 563-586. 1985.

CRESSIE, N. **Geostatistics**, 3 (2), pp. 1-17. 1989.

CURTARELLI, M. P., ALCÂNTARA, E. H. de, STECH, J. L., LORENZZETTI, J. A., KAMPEL, M. "Avaliação do produto TRMM 3B42 diário sobre a Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia até o reservatório de Tucuruí-PA". In: **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, INPE, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013.

DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**. Boca Raton: Prentice Hall, 646 p, 2002.

DINKU, T., CONNOR, S. J., CECCATO, P. "Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over Mountainous Regions of Africa and South America". In: Gebremichael, M., Hossaim, F. (eds), **Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology**, Chapter 2, USA, Springer Netherlands, 2010.

DUAN, Z., BASTIAANSSEN, W. G. M., LIU, J. Z. 2012. "Monthly and annual validation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) products in the Caspian Sea Region for the period 1999-2003". In: **Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, Munich, Germany, July 22-27: 3696-3699. 2012.

EGUCHI, E. S. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídrico de um solo hidromórfico no Município de Lavras – MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Fedral de Lavras, Lavras, MG, 2001.

FIOREZE, A. P.; OLIVEIRA, L. F. C.; FRANCO, A. P. B. "Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil". **Revista Água & Ambiente** – An Interdisciplinary Journal of Applied Science. v. 3, n. 2, pp. 62-67, 2008.

FLAMING, G. M. “Measurement of Global Precipitation”. In: **Publicação da Administração Aeroespacial dos EUA (NASA)**, 2004

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto. 2ª edição de imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

FRANCHITO, S. H. RAO, V. B., VASQUES, A. C., SANTO, C. M. E., CONFORTE, J. C. “Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil”. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, D02105, DOI: 10.1029/2007JD009580, 2009.

FREITAS, C. M. de, CARVALHO, M. L., XIMENES, E. F., ARRAES, E. F., GOMES, J. O. Vulnerabilidade socioambiental, redução de riscos de desastres e construção da resiliência – lições do terremoto no Haiti e das chuvas fortes na Região Serrana, Brasil. In: **Ciência & Saúde Coletiva**, 17(6):1577-1586, 2012.

FUNK, C., EDERER, G., PEDREROS, D. “Tropical Rainfall Measuring Mission”. In: **NIDIS Knowledge Assessment Workshop: Contributions of Satellite Remote Sensing to Drought Monitoring**. Feb 6-7. Boulder, CO, 2008.

GAGE, K. S., WILLIAMS, C. R., ECKLUND, W. L. “UHF Wind profilers: A new tool for diagnosing tropical convective cloud systems”. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 75, pp. 2289–2294, 1994.

GOMES, B. M. **Comportamento espacial do percentil 75 da precipitação decendial do estado de São Paulo**. Tese de Doutorado em Agronomia – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. 2001.

GONÇALVES, M. G. **Mapeamento automático de cicatrizes de deslizamentos em regiões montanhosas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

GONTIJO JR, W. C. **Avaliação e redimensionamento de redes para o monitoramento fluviométrico utilizando o método Sharp e o conceito de entropia**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2007.

GOODRICH, D. C., FAURES, J. M., WOOLHISER, D. A., LANE, L. J., SOROOSHIAN, S. “Measurements and analysis of small-scale convective storm rainfall variability”. **Journal of Hydrology**, vol. 173, pp. 283–30, 1995.

GOOVAERTS, P. “Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall”. **Journal of Hydrology**, vol. 228, pp. 113–129, 2000.

GUEDES, R. V. S., LIMA, F. J. L., AMANAJÁS, J. C., BRAGA, C. C. Análise em componentes principais da precipitação pluvial no estado do Piauí e agrupamento pelo método de Ward. **Revista de Geografia**, v. 27, n. 1 (jan/mar), pp. 218-233, 2010.

HABIB, E. & KRAJEWSKI, W. F. “Uncertainty Analysis of the TRMM Ground-Validation Radar-Rainfall Products: Application to the TEFLUN-B Field Campaign”. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, pp. 558-572, 2002.

HADDAD, Z., SMITH, E. A., KUMMEROW, C. D., IGUCHI, T., FARRAR, M., DARDEN, S. “The TRMM ‘Day-1’ radar/radiometer combined rain-profiling algorithm”. **Journal Meteorology Society Japan**, vol. 75, pp. 799–809, 1997.

HIROSHIMA, K. “Rainfall observation from Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite”. **Journal of Visualization**, v. 2, n. 1, pp. 93-98, 1999.

http://www.cbhriodoisrios.org.br/regiaohidro.php / Comitê Bacia Hidrográfica do Rio Dois Rios

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

http://hidroweb.ana.gov.br/ Banco de dados da Agência Nacional de Águas.

http://inea.infoper.net/inea/?p=ultimos/ Banco de Dados do INEA.

https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/ Tabela de Produtos MODIS.

http://science.nasa.gov/earth-science/ *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

http://trmm.gsfc.nasa.gov/data_dir/data.html/ Banco de Dados do TRMM

http://www.aeb.gov.br/ Informações sobre a Agência Espacial Brasileira (AEB)

http://www.envi.com.br/ *Environment for Visualizing Images*

http://www.eorc.jaxa.jp/en/index.html/ *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA)

http://www.esa.int/ Informações sobre a Agência Espacial Europeia (ESA)

http://www.hidro.ufrj.br/perhi/ Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro (PERHI-RJ)

http://www.inmet.gov.br/ Instituto Nacional de Meteorologia.

http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/ BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET).

http://www.noaa.gov/ *National Oceanic and Atmospherical Administration* (NOAA)

HUFFMAN, G. J., ADLER, R. F., ARKIN, P. A., CHANG, A., FERRARO, R., GRUBER, A. "The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation data set". **Bulletin of the American Meteorology Society**, vol. 78, pp. 5–20, 1997.

HUFFMAN, G. J., ADLER, R. F., BOLVIN, D. T., GU, G. "Improving the global precipitation record: GPCP version 2.1". In: **Geophysical Research Letters**, 36, L17808. doi:10.1029/2009GL040000, 2009.

HUFFMAN, G. J., ADLER, R. F., BOLVIN, D. T., GU, G. NELKIN, E. J., BOWMAN, K. P. HONG, Y. STOCKER, E. F. WOLFF, D. B. "The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale". **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, pp. 38–55, 2007.

HUFFMAN, G. J., ADLER, R. F. BOLVIN, D. T., NELKIN, E. J. "The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA)". In: **Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology**, Chapter 1, F. Hossain and M. Gebremichael, Eds. Springer Verlag, ISBN: 978-90-481-2914-0, 3-22, 2010.

HUFFMAN, G. J., ADLER, R. F., MORRISSEY, M. M., CURTIS, S., JOYCE, R. J., McGAVOCK, B. "Global precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations". **Journal of Hydrometeorology**, vol. 2, pp. 36–50, 2001.

HUGHES, D. A. “Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks”. **Journal of Hydrology**, vol. 327, pp. 399–410, 2006.

IGUCHI, T., KOZU, T., MENEGHINI, R., AWAKA, J., & OKAMOTO, K. “Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar”. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 39, pp. 2038–2052, 2000.

JEFFERY, S. J. “Error analysis for the interpolation of monthly rainfall used in the generation of SILO rainfall datasets”. In: **Technical report**, the Queensland Department of Natural Resources, 2006.

JIA, S., ZHU, W., LÜ, A., YAN, T. “A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China”. **Journal of Remote Sensing of Environment**, Vol. 115, pp. 3069-3079, 2011.

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

KAMEL, H. F., SLIMANI, M., CUDENNEC, C. “A comparison of three geostatistical procedures for rainfall network optimization”. In: **International Renewable Energy Congress**, November 5-7, Sousse, Tunisia. 2010.

KISHI, R .T. & CENTENO, J. A. S. “Avaliação da Rede Coletora de Dados Pluviométricos no Estado de Alagoas”. In: **Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, ABRH, Recife, PE, pp. 211-215, 1992.

KLEMEŠ, V. “Conceptualization and scale in hydrology”. **Journal of Hydrology**, v. 65, pp. 1–23, 1983.

KŘEČEK, J. & PUNČOCHÁŘ, P. “Design of climate station network in mountain catchments”. **Hungarian Geographical Bulletin**, Vol. 61, No. 1, pp. 19–29, 2012.

KRONBERG, P. **Photogeologie. Eine Einführung in die Grundlagen Und Methoden der geologischen Auswertung von Luftbildern**. 268 pp. Ferdinand Enke, Stuttgart, Germany, 1984.

KRSTANOVIC, P. F. & SINGH, V. P. “Evaluation of rainfall networks using entropy: II. Application”. In: **Water Resources Management**, vol. 6, pp. 295–314, 1992.

KUBOTA, T., SHIGE, S., HASHIZUME, H., AONASHI, K., TAKAHASHI, N., SETO, S. “Global precipitation map using satellitebome microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation”. In: **IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing**, vol. 45, pp. 2259–227, 2007.

KUMMEROW, C., BARNES, W., KOZU, T., SHIUE, J., SIMPSON, J. “The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package”. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Vol. 15, pp. 809-817, 1998.

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., HONG, Y., OKAMOTO, K., IGUCHI, T., KUROIWA, H., IM, E., HADDAD, Z., HUFFMAN, G., FERRIER, B., OLSON, W. S., ZIPSER, E., SMITH, E. A., WILHEIT, T. T., NORTH, G. KRISHNAMURTI, T., NAKAMURA, K. “The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission after two years in orbit”. **Journal of Applied Meteorology**, Vol. 39, pp. 1965-1982, 2000.

LAMBIN, E. F. & EHRLICH, D. Land-cover changes in sub-Saharan Africa, 1982–1991: application of a change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, pp. 181–200, 1997.

LANDIM, P. M. B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. UNESP, Rio Claro – SP, 226 p., 1998.

LANGELLA, G., BASILE, A., BONFANTE, A., & TERRIBILE, F. “High-resolution space–time rainfall analysis using integrated ANN inference systems”. **Journal of Hydrology**, vol. 387, pp. 328–342, 2010.

LEITE, E. A. **Gestão do valor da informação hidrometeorológica: o caso dos alertas de inundação para proteção de bens móveis em edificações residenciais de União da Vitória**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

LEIVAS, J. F., RIBEIRO, G. G., SOUZA, M. B. de, ROCHA FILHO, J. "Análise comparativa entre os dados de precipitação estimados via satélite TRMM e dados observados de superfície em Manaus". In: **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril. INPE, pp. 1611-1616, 2009.

LEMAY JR., N. E. **Variogram modeling and estimation**. Master of Science. B. S., University of Colorado, Denver, 1995.

LI, M. & SHAO, Q. X. "An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and rain gauge data". **Journal of Hydrology**, vol. 385, pp. 51–64, 2010.

LIU, B., CHEN, J., CHEN, X., LIAN, Y., WU, L. "Uncertainty in determining extreme precipitation thresholds". **Journal of Hydrology**, v. 503, pp. 233-245, 2013.

LIU, J., ZHU, A-X., DUAN, Z. "Evaluation of TRMM 3B42 Precipitation Product Using Rain Gauge Data in Meichuan Watershed, Poyang Lake Basin, China". **Journal of Resources and Ecology**, v. 3, n. 4, pp. 359-366, 2012.

LORENZ, E. "Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction". In: Tech. Rep. 1, **Statistical Forecasting Project**, Department of Meteorology, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 49 pp, 1956.

LOU, A. P. F. **Modelagem Geoestatística Aplicada à Integração entre Dados de Postos Pluviométricos e Radar Meteorológico**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2004.

LOVINO, M., GARCÍA, N. O. & BEATHGEN, W. "Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA)". **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 2, pp. 140-158, 2014.

LUCENA, A. J. **A ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

MACHADO, G. "Demanda e Disponibilidade Hídrica no Sistema Lagoa Mirim – São Gonçalo – Rio Grande do Sul". **Revista Discente Expressões Geográficas**. Florianópolis–SC, n. 03, p. 61-82, 2007.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Escola Nacional Superior de Minas de Paris, 211 p., 1971.

MATHERON, G. “Traité de Géostatistique Appliquée, Tome II. Le krigeage”. In: **Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques ET Minières**, No. 24. Editions B.R.G.M.: Paris, 1962.

MEDEIROS, V. S. & BARROS, M. T. L. de. Análise de eventos críticos de precipitação ocorridos na região serrana do estado do rio de janeiro nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011. In: **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 27 de novembro a 01 de dezembro de 2011. Maceió, AL, 2011.

MEKONNEN, G., WITOLD, F. K., TOMAS, M. O., YUKARIN, T., PHILLIP, A., KATAYAMA, “M. Scaling of tropical rainfall as observed by TRMM precipitation radar”. In: **Atmospheric Research**, vol. 88, pp. 337–354, 2008.

MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2004.

MORAES, B. C. **Avaliação do uso de imagens do sensor MODIS no estudo da pluma de sedimentos do rio Amazonas**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Editora UFV, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 482 p., 2011.

MORETTIN, P. A. & TOLOI, C. M. C. **Previsão de séries temporais**. 2. Atual Editora, São Paulo, SP, 439 p., 1987.

MYERS, D. **Geostatistics**, 3 (2), pp. 1-17. 1989.

NAGHETTINI, M. & PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. 1ª ed. CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Superintendência Regional de Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

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

NORTH, G.R., BELL, T.L., ROBERT, F., CAHALAN, F. MOENG, J. “Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions.” Monthly Weather Review, vol. 110, pp. 699–706, 1982.

OLIVEIRA, N. S. **Relação entre chuva e deslizamento em Nova Friburgo/RJ**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

PACA, V. H. M. **Análise de informações satelitais e dados convencionais da rede pluvio-fluviométrica como contribuição a modelagem hidrológica na região Amazônica – Estudo de caso: bacia do Rio Guamá – Pará**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

PAIVA, E. M. C. D. “Rede de Monitoramento Hidrológico”. In: PAIVA, J. B. D. & E. M. C. D. Orgs. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. USP, ABRH, Porto Alegre, RS, Cap.17, pp. 493-506, 2001.

PARDO-IGUZQUIZA, E. “Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing”. **Journal of Hydrology**, 201, pp. 206-220, 1998.

PEREIRA, P. E. C. **Métodos geoestatísticos de estimativa e classificação de recursos e reservas minerais e estudo de caso de um depósito de cobre**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Goiás. Catalão, GO. 161 p. 2013.

PETTY, G. W. “The Status of Satellite-Based Rainfall Estimation over Land”. In: **Remote Sensing of Environment**, v. 51, pp. 125-137, 1995.

PINHEIRO, H., ANDRADE, K., MOURA, C. **A maior catástrofe climática do Brasil sob a visão operacional do CPTEC/INPE**. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE, São Paulo-SP, Brasil, 2011.

RAO, A. R. & HSIEH, C. H. “Estimation of variables at ungauged locations by empirical orthogonal functions”. In: **Journal of Hydrology**, v. 123, pp. 51-67, 1991.

RAMAGE, K., JOBARD, I., LEBEL, T., DESBOIS, “M. Satellite estimation of 1-day to 10-day cumulated precipitation: comparison and validation over tropical Africa of TRMM, METEOSAT and GPCP products”. In: **The 2003 EUMETSAT**

Meterological Satellite Conference, 29 de setembro a 3 de outubro, Weimar, Alemanha, 2003.

RAMOS, C. M. C.; NARDINI, R. C.; ZIMBACK. C. R. L.; SERAPHIN, S. "Análise temporal da variação da temperatura utilizando-se a geoestatística". In: **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril, INPE, pp. 347-353, 2009.

RIBEIRO, C. B. M. **Sensoriamento remoto aplicado à detecção de mudanças na cobertura do solo de uma bacia hidrográfica**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis. An introduction**. Berlin, Springer-Verlag. 281 p., 1986.

ROSENDO, J. S. & ROSA, R. "A utilização de sensores com resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na bacia do rio Araguari – MG". In: **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 17 (3), pp. 91-104, 2005.

SALGUEIRO, J. H. P. B. **Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PB, Brasil, 2005.

SAVTCHENKO, A., OUZOUNOV, D., AHMAD, S., ACKER, J., LEPTOUKH, G., KOZIANA, J., NICKLESS, D. "Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC". In: **Advances in Space Research**, v. 34, pp.710–714, 2004.

SCHULTZ, G. A. & ENGMAN, E. T. **Remote Sensing in Hydrology and Water Management**. Springer, 483 p, 2000.

SEA/INEA, Secretaria Estadual do Ambiente / Instituto Estadual do Ambiente. **O Estado do Ambiente – Indicadores Ambientais do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.inea.proderj.rj.gov.br/basetematica_estadoambiente/>. Acessado em: 21 de setembro de 2013.

SEA/UFRJ, Secretaria Estadual do Ambiente / Universidade Federal do Rio de Janeiro. **Mapa de Uso do Solo e Cobertura Vegetal do Estado do Rio de Janeiro**. In: COELHO NETO (Coord.) Análise e Qualificação Socioambiental do Estado do Rio de Janeiro (escala 1:100.000): subsídios ao zoneamento ecológico-econômico. Secretaria Estadual do Ambiente (SEA-RJ), Fundação COPPETEC e Laboratório de Geohidroecologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Data dos relatórios, 2009. Data das imagens utilizadas no mapeamento, 2007.

SHIH, S. F. "Rainfall variation analysis and optimization of gaging systems". In: **Water Resources Research**, vol. 18, pp. 1269-1277, 1982.

SILVA, E. T. J. B. **Utilização dos índices de Vegetação do Sensor MODIS para Detecção de Desmatamentos no Cerrado: Investigação de Parâmetros e Estratégias**. Dissertação de Mestrado. 146 p. Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SILVEIRA, A. L. L. "Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica", In: TUCCI, C. E. M. (ed.), **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, 2ª Edição, capítulo 2, Ed. da Universidade / UFRGS – ABRH, Porto Alegre, RS, Brasil, 1993.

SILVEIRA, G. L., TUCCI, C. E. M., SILVEIRA, A. L. L. "Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados". **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.3, n.3, pp.111-131, jul/set. Porto Alegre, RS, Brasil, 1998.

SIMPSON, J. S., ADLER, R. F., NORTH, G. R. "A Proposed Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite". **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 69, n. 3, pp. 278-295, 1998.

SIMPSON, J. S., KUMMEROW, C., TAO, W., ADLER, R. F. "The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)". In: **Meteorology and Atmospheric Physics**, 60, pp. 19-36, 1996.

SINLCLAIR, A. J. & BLACKWELL, G. H. **Applied mineral inventory estimation**. Cambridge, Cambridge University Press, 381 p. 2004.

SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S. W.; GUPTA, V. K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; McDONNELL, J. J.; MENDIONDO, E. M.; O'CONNELL, P. E.; OKI, T.; POMEROY, J. W.; SCHERTZER, D.;

UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, 48:6, pp. 857-880, 2003.

SMITH, T. E. **Notebook for spatial data analysis - Part II. Continuous Spatial Data Analysis**. 2014. Disponível em: <http://www.seas.upenn.edu/~ese502/>. Acessado em 20 de agosto de 2014.

SOARES, J. H. P. **Definição de um Índice Econômico-Sanitário para Avaliação das Condições de Saneamento na Baixada Fluminense. Estudo de Caso: Programa de Despoluição da Baia de Guanabara**. Tese de Doutorado. 468 p. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

SOUZA, L. E. de. **Estimativa de incertezas e sua aplicação na classificação de recursos minerais**. Dissertação de Mestrado. 170 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ST-HILAIRE, A., OUARDA, T. B. M. J., LACHANCE, M., BOBÉE, B., GAUDET, J., GIGNAC, C. "Assessment of the impact of meteorological network density on the estimation of basin precipitation and runoff: a case study". In: **Hydrological Processes**, vol. 17, pp. 651–3580, 2003.

STATHIS, D. & MYRONDIS, D. "Principal Components Analysis of Precipitation in Thessaly Region (Central Greece)." **Global Nest Journal**, Vol. 11, No. 4, pp. 467-476. Greece, 2009.

SU, F G., HONG, Y., LETTENMAIER, D P. "Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin". **Journal of Hydrometeorology**, v. 9, n. 4, pp. 622-640, 2008.

TEIXEIRA, A. L. F. **Análise espacial de indicadores sócio-econômicos aplicada à gestão na área de saneamento – Estudo de caso: município de Niterói, RJ**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

USWRP, US Weather Research Program, 1997.

VALENTE, F. & MESQUITA, M. **Introdução à Geoestatística. Curso de Matemática II, Departamento de Ciências e Engenharia de Biossistemas**.

Agrupamento de Matemática, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, 2013.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F.; BURROWS, I. T. “Mapeamento da chuva diária máxima provável para o estado de São Paulo”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 15, n. 1, p. 93-98, 1991.

VIEIRA, S. R., NIELSEN, D. R., BIGGAR, J. W., TILLOTSON, P. M. “The scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, pp. 525-533, 1997.

WANDERLEY, H. S., AMORIM, R. F. C. de., CARVALHO, F. O. de. “Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas”. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Vol. 27, n.3, pp. 347-354, 2012.

WANG, W. & DING, J. “Wavelet Network Model and Its Application to the Prediction of Hydrology”. **Nature and Science**, v. 1, pp. 67-71, 2003.

WHEATER, H. S., ISHAM, V. S., COX, D. R., CHANDLER, R. E., KAKOU, A., NORTHROP, P. J. “Spatial-temporal rainfall fields: Modeling and statistical aspects”. In: **Hydrology & Earth System Sciences**, 4 (4), pp. 581–601, 2000.

WILHEIT, T. T. “Some comments on passive microwave measurement of rain”. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 67, n° 10, 1986.

WILLIAMS, C. R., ECKLUND, W. L., GAGE, K. S. “Classification of precipitation clouds in the Tropics using 915-MHz wind profilers”. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 12, pp. 966–1012, 1995.

WILSON, J. W. & BRANDES, E. A. “Radar measurement of rainfall – a summary”. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 60, pp. 1048–1058, 1979.

WMO, Water Meteorological Organization. **Guide to Hydrological Practices. Volume I. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information**. No. 168. Sixth edition. Geneva, Switzerland, 2008.

WOODLEY, W. L., OLSEN, A. R., HERNDON, A., WIGGERT, V. “Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement”. **Journal of Applied Meteorology**, v. 14, pp. 909–928, 1975.

XAVIER, L. N. R. **Modelagem Hidrológica com o Aporte de Dados da Missão Espacial GRACE: Aplicação a Bacias Brasileiras**. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.

YADAV, M., WAGWENER, T., GUPTA, H. "Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins". In: **Advances in Water Resources**, v. 30, pp. 1756–1774, 2007.

YAMAMOTO, J. K. **Avaliação e classificação de reservas minerais**. Edusp, 226 p. São Paulo – SP, 2001.

ZAMBOTI, J. L. **Mapas pluviométricos médios mensais no verão para o estado do Paraná, utilizando métodos geoestatísticos**. Tese de Doutorado em Agronomia - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. 2001.

ZAWADZKI, I. "Radar-raingage comparison". **Journal of Applied Meteorology**, v. 14, pp. 1430–1436, 1975.

ZENG, H. W., LI, L. J., LI, J Y. "The evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) in drought monitoring in the Lancang River Basin". **Journal of Geographical Sciences**, v. 22, n. 2, pp. 273-282, 2012.

ZEWELDI, D. A. & GEBREMICHAEL, M. "The Evaluation of CMORPH Precipitation Products at Fine Space–Time Scales". **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, pp. 300-307, 2009.

ZHANG, A. & JIA, G. "Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data". **Remote Sensing of Environment**, v. 134, pp. 12-23, 2013.

ANEXO A – Instituições Responsáveis pelo Monitoramento Hidrometeorológico

WMO – *World Meteorological Organization*

Criada em 1950, com sede em Genebra, Suíça, a WMO ou Organização Meteorológica Mundial é uma agência especializada das Nações Unidas desde 1951, sendo um organismo responsável pela análise, estudo e acompanhamento do comportamento da atmosfera terrestre, sua interação com os oceanos e com o clima, e pela distribuição de recursos hídricos.

No quadro de programas da WMO, os serviços meteorológicos e hidrológicos contribuem substancialmente para a proteção da vida e da propriedade contra catástrofes naturais e do meio ambiente, visando a melhoria do bem-estar social e econômico de todos os setores da sociedade.

Atualmente, conta com 191 membros e é um mecanismo internacional que prevê que todas as nações-membros devem colaborar mutuamente de forma efetiva, fornecendo dados e materiais necessários para prever ou, se possível, antecipar eventos hidrometeorológicos extremos e catastróficos, contando, inclusive com o apoio de satélites geoestacionários.

Entre suas diversas finalidades, podem-se citar:

- coordenar as atividades dos membros participantes a fim de gerar trocas de informações sobre o tempo, água e clima de acordo com as normas internacionais;
- realizar investigações, quando solicitado por um país membro ou, quando da ocorrência de um evento meteorológico local, regional ou mundial, causada por intempéries como furacões, ciclones, trombas de água, chuvas torrenciais e outros eventos atmosféricos;
- fornecer um nível de formação internacionalmente reconhecido a partir de fundos que banquem estudos de profissionais de ação relevante na área;
- facilitar o desenvolvimento de serviços que melhorem o bem-estar e a segurança da sociedade, das nações e do planeta.

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

Criada em 1958, a NASA ou Administração Nacional Aeronáutica e Espacial é uma agência civil independente norte-americana responsável por projetos de exploração espacial e diversas pesquisas relacionadas ao espaço e à exploração do espaço. Entretanto, a NASA possui diversas missões e tem se preocupado muito, não só com as questões relativas ao espaço, mas com as questões associadas à Terra.

O propósito do programa científico da Terra (ESP, do inglês, *Earth Science Program*) foi desenvolvido para auxiliar na compreensão científica do sistema da Terra e de suas respostas para as mudanças naturais ou para aquelas induzidas pelo homem, além de melhorar a previsão do clima, do tempo e riscos naturais.

Um componente importante da Divisão de Ciências da Terra (ESD, do inglês, *Earth Science Division*) da NASA é uma série de satélites coordenados e missões aéreas, em longo prazo, para observações globais da superfície terrestre como biosfera, "Terra sólida", atmosfera e oceanos. Essa abordagem permite uma melhor compreensão da Terra como um sistema integrado.

Neste trabalho, duas missões da NASA, a primeira em parceria com a agência japonesa JAXA, foram utilizadas para desenvolvimento das análises da rede existente e aplicação da metodologia para definição da nova rede de monitoramento, notadamente o TRMM e o MODIS.

O TRMM é o satélite de pesquisa projetado para aprimorar a compreensão da distribuição e da variabilidade da precipitação, como parte do ciclo da água no sistema climático atual, com área de abrangência nas regiões tropicais e subtropicais do planeta. Associado a outros satélites da NASA, o TRMM fornece informações importantes sobre a precipitação a partir da utilização de vários instrumentos espaciais que auxiliam no aumento da compreensão das interações entre o vapor de água, as nuvens e a precipitação, variáveis fundamentais para analisar e regular o clima da Terra.

O MODIS é um instrumento que observa (passa) por toda a superfície da Terra a cada 1 ou 2 dias, auxiliando na compreensão da dinâmica global e dos processos que ocorrem na superfície terrestre continental, nos oceanos e na baixa atmosfera, tendo um papel fundamental no desenvolvimento de modelos de sistemas validados, capazes de prever mudanças globais de forma precisa.

A seguir, são listadas, brevemente, algumas missões elaboradas e em desenvolvimento pela NASA.

- LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) – Os satélites LANDSAT observam e medem as paisagens continentais e costeiras da Terra em uma escala em que os impactos humanos e alterações naturais possam ser monitorados, diferenciados e caracterizados no tempo;
- GPM (*Global Precipitation Measurement*) – Missão internacional de satélite que fornece observações da formação de chuva e neve em todo o mundo a cada três horas. A NASA e a JAXA (*Japanese Aerospace Exploration Agency*) lançaram, em fevereiro de 2014, o satélite GPM *Core Observatory*, carregando instrumentos avançados que definirá um novo padrão para medições de precipitação a partir do espaço. Esses dados serão usados para unificar as medições de precipitação feitas por uma rede internacional de satélites parceiros para quantificar quando, onde e quanto chove ou neva em todo o mundo;
- SWOT (*Surface Water and Topography*) – Missão que reúne duas comunidades voltadas para melhor compreensão dos oceanos e das águas superficiais terrestres. Oceanógrafos e hidrólogos americanos e franceses uniram forças para desenvolver essa nova missão espacial para fazer a primeira pesquisa global da água da superfície da Terra, observando os detalhes da topografia da superfície do oceano e medindo como os corpos de água mudam com o tempo;
- SMAP (*Soil Moisture Active-Passive*) – Ainda em desenvolvimento, a missão combinará a baixa frequência radiométrica de micro-ondas de sensores ativos e passivos para medir a umidade superficial do solo e o estado de congelamento / descongelamento de porções da superfície terrestre, o que permite prever avanços científicos e benefícios sociais, uma vez que essas medidas são necessárias para melhorar a compreensão dos ciclos regionais de água, das produtividades dos ecossistemas e dos processos que envolvem os ciclos de água, de energia e de carbono.

NOAA – *National Oceanic and Atmospherical Administration*

Datada de 1807, a NOAA ou Administração Oceânica e Atmosférica Nacional é uma agência que trabalha com a informação sobre a evolução do ambiente, desde a superfície do Sol até as profundezas do oceano.

Os produtos e serviços da NOAA, como, por exemplo, previsões meteorológicas diárias, avisos de tempestade severa, monitoramento do clima da gestão das pescas, restauração costeira, apoio ao comércio marítimo, visam apoiar a vitalidade econômica.

Os cientistas da NOAA usam a pesquisa de ponta e instrumentos de alta tecnologia para proporcionar, aos cidadãos, planejadores, gestores de emergência e outros tomadores de decisão, informações confiáveis sobre os recursos naturais.

As missões da NOAA estão apresentadas a seguir:

- entender e prever as mudanças no clima e no tempo, nos oceanos e costas;
- compartilhar o conhecimento e informações;
- conservar e gerir os recursos e ecossistemas costeiros e marinhos.

ESA – *European Space Agency*

A Agência Espacial Europeia, organização internacional com 20 estados-membros (Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Noruega, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Romênia, Suécia e Suíça) tem a missão de planejar o desenvolvimento da capacidade espacial da Europa, por meio da elaboração de programas espaciais, com o intuito de descobrir mais sobre a Terra, sobre o espaço mais próximo, sobre o sistema solar e sobre o universo, além do desenvolvimento de tecnologias e serviços baseados em satélites.

A Hungria, a Letônia e a Eslovênia não fazem parte da ESA, entretanto são considerados países europeus colaboradores. Além dessas nações, a ESA também trabalha em estreita colaboração com organizações espaciais fora da Europa, como é o caso do Canadá, que participa em alguns projetos devido à celebração de um acordo de cooperação.

Dentre as missões e programas, podem ser citados a exploração da ciência e robótica, observações da Terra como meio ambiente e mudanças climáticas, atividades associadas à navegação, aplicações integradas em telecomunicações, tecnologia, acesso ao espaço como o porto espacial, entre outros.

JAXA – *Japan Aerospace Exploration Agency*

Em 2003, o Instituto Espacial e Ciência Astronáutica (ISAS), o Laboratório Nacional Aeroespacial do Japão (NAL) e a Agência de Desenvolvimento Nacional Espacial do Japão (NASDA) foram fundidas em uma instituição administrativa independente, a JAXA, capaz de executar todas as suas atividades no domínio aeroespacial, desde a pesquisa básica até o desenvolvimento de utilização, sendo a contribuição para a solução de várias questões nacionais e internacionais uma das missões mais importantes da instituição.

Com o objetivo de fornecer novos valores para superar desafios tendo em vista o desenvolvimento de tecnologia inovadora no campo aeroespacial, a JAXA tem missões nas mais diversas áreas, como, por exemplo, satélites de observação da Terra, satélites de observação astronômica, satélites de teste de comunicação, posicionamento e engenharia e exploração lunar e planetária.

AEB – Agência Espacial Brasileira

Criada em 1994, a AEB é responsável por formular e coordenar a política espacial brasileira, sendo uma autarquia federal vinculada ao MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, dando continuidade aos esforços empreendidos pelo governo brasileiro, desde 1961, em promover a autonomia do setor espacial.

Para organizar a execução das atividades espaciais, foi instituído o SINDAE – Sistema Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais, conforme Decreto nº 1.953/1996, que define a AEB como seu órgão central e responsável pela coordenação geral. Entre os órgãos setoriais que compõe o SINDAE, destacam-se o INPE e o DCTA – Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, do COMAER – Comando da Aeronáutica, do MD – Ministério da Defesa, que são responsáveis pela execução dos principais projetos e atividades estratégicos do PNAE – Programa Nacional de Atividades Espaciais.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

A partir de iniciativas no âmbito espacial que remontam desde 1961, apenas em 1990, o INPE passou a ser designado dessa forma, com a missão de produzir ciência e tecnologia nas áreas espacial e do ambiente terrestre e oferecer produtos e serviços singulares em benefício do Brasil.

Dentre essas missões, o INPE tem objetivos estratégicos, os quais são mostrados a seguir:

- ampliar e consolidar competências em ciência, tecnologia e inovação nas áreas espacial e do ambiente terrestre para responder a desafios nacionais;
- desenvolver, em âmbito mundial, liderança científica e tecnológica nas áreas espacial e do ambiente terrestre enfatizando as especificidades brasileiras;
- ampliar e consolidar competências em previsão de tempo e clima e em mudanças ambientais globais;
- consolidar a atuação do INPE como instituição singular no desenvolvimento de satélites e tecnologias espaciais;
- promover uma política espacial para a indústria visando atender às necessidades de desenvolvimento de serviços, tecnologias e sistemas espaciais;
- fortalecer o relacionamento institucional do INPE em âmbitos nacional e internacional;
- prover a infraestrutura adequada para o desenvolvimento científico e tecnológico;
- estabelecer uma política de recursos humanos para o INPE, baseada na gestão estratégica de competências e de pessoas;
- identificar e implantar modelo gerencial e institucional adequado às especificidades e desafios que se apresentam para o INPE.

Dentre as pesquisas e atividades desenvolvidas pelo INPE, cabe citar as áreas de ciências espaciais e atmosféricas, previsão de tempo e estudos climáticos, engenharia e

tecnologia espacial, observação da Terra, ciência do sistema terrestre, rastreio e controle de satélites, entre outros.

Na área de observação da Terra, tem-se o programa CBERS, um projeto conjunto entre o Brasil e a China (modelo de cooperação e intercâmbio tecnológico entre países em desenvolvimento) para a construção de uma família de satélites de sensoriamento remoto, iniciado em 1988.

Esse programa contemplou, num primeiro momento, apenas dois satélites de sensoriamento remoto, CBERS-1 e 2. O sucesso do lançamento pelo foguete chinês Longa Marcha 4B e o perfeito funcionamento do CBERS-1 e CBERS-2 produziram efeitos imediatos, tanto que ambos os governos decidiram expandir o acordo e incluir outros três satélites da mesma categoria, os satélites CBERS-2B e os CBERS-3 e 4. O CBERS-3 foi lançado recentemente, em dezembro de 2013, e algumas avaliações preliminares indicaram que o mesmo havia retornado ao planeta, entretanto os dados obtidos mostraram que os subsistemas do CBERS-3 funcionaram normalmente durante a tentativa de sua colocação em órbita. A previsão de lançamento do CBERS-4 é para dezembro de 2014.

As imagens geradas são usadas em importantes campos, como no controle do desmatamento e queimadas na Amazônia Legal, no monitoramento de recursos hídricos, áreas agrícolas, no acompanhamento do crescimento urbano, no planejamento da ocupação do solo, em educação e em inúmeras outras aplicações. A aquisição das imagens CBERS-2 pode ser feita gratuitamente pela internet (http://www.cbers.inpe.br/galeria_imagens/imagens_cbers2.php).

ANA – Agência Nacional de Águas

A ANA, representando o poder executivo federal e obedecendo aos fundamentos, objetivos e diretrizes da política nacional de recursos hídricos, é responsável por organizar, implantar e gerir o SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, ou seja, é responsável pela coordenação das atividades relacionadas ao monitoramento das águas através da rede hidrometeorológica nacional.

A rede nacional de monitoramento da ANA é composta de estações pluviométricas e fluviométricas, que monitoram os índices pluviométricos, o nível de água e a vazão dos rios, a qualidade das águas e a quantidade de sedimentos.

A ANA disponibiliza os dados hidrometeorológicos pela internet através das plataformas, a saber: HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas (www.hidroweb.gov.br), que permite o acesso ao banco de dados HIDRO, onde está cadastrado o inventário de todas as estações disponíveis não só do Brasil, como de outros países sul-americanos e onde também se encontram cadastrados e disponibilizados dados hidrometeorológicos convencionais e dados monitorados em tempo real, transmitidos pela rede de estações telemétricas; SNIRH (www.snirh.gov.br), que disponibiliza informações sobre usos de recursos hídricos em todo o território nacional, através do banco do CNARH – Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos, e também pesquisa avançada a respeito das informações do acesso às ferramentas de SIG – Sistema de Informações Geográficas, como mapas interativos, arquivos vetoriais georreferenciados, cartas, imagens, ortofotos, fotografias aéreas, modelos digitais de elevação, entre outras.

A ANA assume, também, a função de orientar a respeito dos procedimentos de coleta, tratamento e armazenamento dos dados hidrométricos.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

O INMET é um órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, e seu papel é, através do monitoramento, análise e previsão de tempo e de clima, prover informações meteorológicas à sociedade brasileira e influir construtivamente no processo de tomada de decisão, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do país.

O INMET representa o Brasil junto à WMO e, por delegação dessa organização, é responsável pelo tráfego das mensagens coletadas pela rede de observação meteorológica da América do Sul e dos demais centros meteorológicos que compõem o sistema de vigilância meteorológica mundial.

Algumas atribuições do INMET são apresentadas a seguir:

- elaboração e divulgação, diariamente, em nível nacional, da previsão do tempo, avisos e boletins meteorológicos especiais;
- execução de estudos e levantamentos meteorológicos e climatológicos aplicados à agricultura e outras atividades correlatas;

- coordenação, elaboração e execução programas e projetos de pesquisas agrometeorológicas e de acompanhamento das modificações climáticas e ambientais;
- estabelecimento, coordenação e operação das redes de observações meteorológicas e de transmissão de dados, inclusive aquelas integradas à rede internacional;
- simulação do comportamento futuro da atmosfera, por meio de modelos físico-matemáticos de última geração e alta resolução que permitem que os meteorologistas façam previsão de tempo com dias de antecedência, dentro de padrões internacionais;
- acompanhamento à implementação de capacitação e treinamento de recursos humanos, em atendimento a demandas técnicas específicas.

O sistema de coleta e distribuição de dados meteorológicos é dotado de estações de sondagem de ar superior (radiossonda), de estações meteorológicas de superfície, operadas manualmente, e a maior rede de estações automáticas da América do Sul. Todos os dados coletados pela rede são disponibilizados no endereço eletrônico da instituição (www.inmet.gov.br).

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

A CPRM, criada em 1969, vinculada ao MME – Ministério de Minas e Energia e com atribuições do Serviço Geológico do Brasil, tem com missão de geração e difusão do conhecimento geológico e hidrológico básico necessário para o desenvolvimento sustentável do país.

As atividades desenvolvidas pela CPRM abrangem os levantamentos geológicos, geofísicos, geoquímicos, a hidrologia de superfície e a hidrogeologia, sendo responsável, também, desde a sua fundação, por grande parte da operação da rede de monitoramento hidrometeorológica nacional sob o encargo da ANA.

Dessa forma, atualmente, algumas de suas atribuições são as seguintes: operação de diversas estações convencionais e telemétricas, coleta de informações, consistência dos dados e armazenamento em banco de dados hidrológicos anuais.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

O INEA foi criado em 2007, como órgão resultante da fusão de organismos ambientais vinculados à SEA – Secretaria de Estado do Ambiente, incluindo a FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, a SERLA – Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas e o IEF – Fundação Instituto Estadual de Florestas.

O INEA surgiu com a missão de proteger, conservar e recuperar o patrimônio ambiental do estado do Rio de Janeiro para promover a agenda do desenvolvimento sustentável, sendo um órgão gestor ambiental de referência, exercendo um papel estratégico no desenvolvimento do estado, tendo o desafio de integrar a política ambiental e atender às demandas da sociedade nas questões ambientais.

ANEXO B – Técnicas de Estimativa de Precipitação

Visível e Infravermelho

As técnicas de estimativa de precipitação que usam o espectro do visível e infravermelho estimam a precipitação de forma indireta, uma vez que a gotas de chuva não são diretamente observadas pelo satélite. Diferentes técnicas para avaliar a precipitação a partir de dados de satélites de órbita polar e geoestacionária já foram produzidas. A tarefa de estimar a chuva é feita por algoritmos que relacionam a taxa de chuva de nuvens precipitantes à espessura e/ou temperatura de brilho das nuvens (CPTEC/INPE, 2011).

O princípio da estimativa de precipitação de chuva através de sensoriamento em bandas na faixa óptica é o fato de que o brilho da luz do sol refletida por nuvens pode ser uma indicação razoável de sua espessura e consequentemente do volume de água em seu interior (PETTY, 1995).

De fato, estimativas no infravermelho e no visível podem ser feitas apenas localmente, fornecendo resultados precários quando transpostas para outras regiões (WILHEIT, 1986; PETTY, 1995). Possivelmente, essa talvez seja a principal limitação.

As estimativas nessas bandas podem ser classificadas em três classes básicas (SCHULTZ e ENGMAN, 2000):

- indexação de nuvens – baseia-se na hipótese de que a probabilidade de ocorrer precipitação sobre uma determinada área está relacionada com a quantidade e tipo de nuvens presentes sobre essa área;
- evolução de nuvens (*Life-history methods*) – baseadas na observação de séries de imagens consecutivas obtidas de satélite geoestacionário. Verifica-se que o volume de precipitação associado a um tipo de nuvem também está relacionado ao seu estágio de desenvolvimento, de forma que duas nuvens apresentando o mesmo aspecto (do ponto de vista de imagens VIS/IR) podem produzir diferentes quantidades de chuva dependendo se estiverem evoluindo ou decaindo;
- técnicas bispectrais – exploram as informações de profundidade das nuvens, adquiridas de imagens no visível, e de correspondentes altitudes, obtidas de imagens no infravermelho; os dados são divididos em um

número de classes IR e classes VIS, o que permite produzir uma tabela de probabilidades de ocorrência de chuva a partir da comparação com dados de radar, gerando campos de probabilidade, com aplicação em áreas fora do alcance do radar.

Imagens de Micro-ondas

Nos comprimentos de onda associados à faixa de micro-ondas ou de radar (da ordem de milímetros a centímetros), as gotas de nuvem têm uma interação muito pequena com a radiação. Nessa faixa do espectro eletromagnético, a radiação tem capacidade de penetrar as nuvens. As gotas com tamanho precipitável (da ordem de milímetros) interagem fortemente com a radiação em micro-ondas, com absorção e espalhamento de energia, o que possibilita sua detecção por radiômetros nessas frequências.

A taxa de precipitação sobre a Terra, estimada por sensores de micro-ondas em órbita, é fortemente dependente do parâmetro de espessura da camada de gelo. WILHEIT (1986) já alertava que a melhor forma de estimar esse parâmetro seria por meio de radares a bordo do satélite. Essa constatação foi uma das motivações para o envio do primeiro radar meteorológico em órbita a bordo do satélite TRMM (KUMMEROW *et. al.*, 2000).

Uma desvantagem dos sensores ópticos em relação à estimativa através de sensores que operam na faixa de micro-ondas é o longo período entre duas passagens do satélite sobre um mesmo ponto na superfície terrestre, podendo chegar a dois dias, devido à órbita oblíqua típica desses satélites.

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), porém a resolução temporal e espacial de estimativas VIS/IR é alta, apresentando uma vantagem dessa técnica sobre a tecnologia de radar.

ANEXO C – Instrumentos de Medição das Variáveis Hidrometeorológicas

Abaixo são abordados os aspectos das estações associadas aos instrumentos e sensores com os quais as estações hidrometeorológicas serão equipadas.

Pluviômetro

O pluviômetro é um instrumento que mede a precipitação (em milímetros) em um dado intervalo de tempo. Segundo a WMO, é recomendado que ele seja instalado em um local livre, plano, horizontal, a uma altura de 1,5 m e em uma distância igual ou superior a quatro vezes a altura dos eventuais obstáculos. A Figura C.1 mostra um pluviômetro automático.

Figura C.1 – Exemplo de um pluviômetro automático
Fonte: www.gisiberica.com

Termógrafo

O termógrafo registra a temperatura do ar, em graus Celsius (ºC). Esse equipamento deve ser instalado em locais protegidos, podendo ser de plástico ou alumínio, evitando a exposição direta dos sensores às intempéries. A WMO estabelece alturas padronizadas para a instalação desse instrumento, de 1,25 m a 2,00 m acima do solo.

Higrômetro

Este equipamento registra a umidade do ar, em valores relativos, expressos em porcentagem (%). Assim como os sensores de temperatura, o higrômetro segue as mesmas recomendações. Os termômetros e higrômetros podem ser combinados em um único conjunto de sensores, conhecidos como termohigrômetros, que permitem obter diretamente as duas variáveis (temperatura e umidade relativa do ar).

Barômetro

O barômetro mede a pressão atmosférica em milibar (mb) ou hectoPascal (hPa). Se for um barômetro de mercúrio, a unidade poderá ser em termos da altura da coluna de milímetros de mercúrio (mm Hg) ou hPa. Fisicamente, a pressão atmosférica representa o peso que a atmosfera exerce por unidade de área. Esse instrumento pode ser instalado tanto horizontalmente quanto verticalmente. Normalmente, é instalado no interior de uma caixa selada da estação, mas com comunicação externa para realização da leitura da pressão.

Piranômetro

Este aparelho serve para medir a radiação solar global ou difusa, em $cal.cm^{-2}.mm^{-1}$ ou $W.m^{-2}$. A radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre varia basicamente com a latitude e com o tempo, a qual, ao atravessar a atmosfera, interage com seus contribuintes. Parte dessa radiação que é espalhada em outras direções é denominada de radiação solar difusa, enquanto a outra parte chega diretamente à superfície do solo é denominada de radiação solar direta. Com a soma da radiação solar difusa e da radiação direta, obtém-se a radiação solar global.

Dois conjuntos de sensores devem ser instalados nas estações para que seja possível captar as ondas curtas e longas.

O piranômetro (Figura C.2) deve ser instalado em local adequado e em suporte que garantam perfeito nivelamento com a normal, sem presença de sombras, obstáculos e áreas reflexivas. Como as estações estão situadas aqui no hemisfério sul, é recomenda a instalação para a face norte, minimizando a possibilidade de sombras por conta dos outros sensores ou estruturas como prédios. Essa variável não depende da altura do

instrumento, sendo recomendada a instalação entre 1,5 m e 2,0 m de altura, facilitando o acesso.

É recomendável que esse sensor seja posicionado no lado aposto dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar para evitar interferências.

Figura C.2 – Exemplo de um piranômetro
Fonte: **www.efficientbrasil.com.br**

Anemômetro

Este instrumento mede a velocidade do vento ($m.s^{-1}$ ou $km.h^{-1}$) e também determina a sua direção (em graus).

Os sensores de vento (a Figura C.3 mostra apenas o sensor de velocidade, sendo que o seu par é o sensor de direção) devem ser instalados em área livre acima do nível do terreno ao seu redor, com distância horizontal 10 vezes superior à altura do obstáculo, segundo recomendação da WMO. Em algumas condições, essa distância horizontal pode ser reduzida para três vezes sua altura, sendo que valores inferiores inviabilizam por completo a representação do fenômeno.

Figura C.3 – Exemplo de um sensor de velocidade do vento
Fonte: **www.meteomarta.altervista.org**

Medidores de Nível de Água

Os sistemas de medição de nível variam em complexidade, desde simples visores para leituras *in loco* até indicação remota ou registro automático. A unidade de nível d'água usual é o metro (m).

A estrutura deve ser rígida e o local deve ser posicionado de modo que a formação de espuma seja a menor possível (o sensor deve ser instalado o mais distante possível do ponto de entrada).

ANEXO D – Interpolação de Dados Espaciais

As imagens de satélite representam dados obtidos espacialmente. Muitas vezes, essas imagens podem apresentar falhas, que se justificam devido à presença de nuvens durante a passagem do satélite. Sendo assim, essas imagens precisam ser trabalhadas e corrigidas através da interpolação, de modo que as lacunas espaciais sejam preenchidas.

A interpolação espacial pode ser dada por meio de modelos determinísticos ou estatísticos, apresentados abaixo.

- modelos determinísticos:
  - efeitos locais – admite-se que os efeitos locais são predominantes e cada ponto da superfície é estimado por interpolação das observações mais próximas;
  - efeitos globais – supõe-se que a variação em larga escala seja dominante; dessa forma, a superfície é aproximada por um ajustamento polinomial dos dados;
- modelo estatístico:
  - krigagem – neste modelo, cada ponto da superfície é obtido por meio de um estimador estatístico, que leva em consideração a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço.

Nos modelos determinísticos locais, conforme mencionado anteriormente, o valor a ser estimado, por exemplo, num ponto x_0, é calculado através da combinação linear dos valores observados em uma vizinhança. A fórmula geral da interpolação é dada pela seguinte equação:

$$z(x_0) = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_j \cdot z(x_j)}{\sum_{j=1}^{n} w_j} \qquad \text{(D.1)}$$

sendo:

$z(x_0)$ – valor a ser estimado no ponto x_0;

$z(x^j)$ – valor observado em x_j;

w_j – fator de ponderação;

m – número de pontos vizinhos a ser considerados na interpolação.

O fator de ponderação w_j depende do método de interpolação utilizado, que pode ser de três tipos:

- <u>interpolação pelo vizinho mais próximo</u> – este método usa apenas o valor do ponto mais próximo do local em que se deseja estimar o valor interpolado; neste método, também chamado de método dos polígonos de influência, o fator de ponderação w_j é igual a 1 (um) para a observação $z(x_j)$ mais próxima de x_0 e 0 (zero) para as demais observações;
- <u>interpolação por meio da média simples</u> – esta interpolação estima os valores de pontos ao redor apenas calculando a média de pontos selecionados; o valor de $z(x_0)$ é dado pela média aritmética dos valores $z(x_j)$ de n observações vizinhas; sendo assim, o valor do fator de ponderação w_j é equivalente a 1 (um) para as n observações próximas e 0 (zero) para as observações restantes.
- <u>interpolação pelo inverso da potência das distâncias</u> – este método baseia-se na dependência espacial dos pontos, isto é, supõe-se que, quanto mais próximo um ponto estiver do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores; dessa forma, este modelo atribui maior peso para as observações mais próximas do que para as mais distantes. O fator de ponderação $w_j = (1/d_j)^k$, em que d_j é a distância euclidiana do ponto x_j ao ponto em que se deseja interpolar x_0 para n observações vizinhas e 0 (zero) para as demais; o valor de k corresponde a diferentes valores de potência, sendo que, quanto maior for o valor dessa potência, maior será a influência dos vizinhos mais próximos $z(x_j)$ no valor estimado para o ponto $z(x_0)$; a potência mais utilizada é a segunda (2ª) potência, e, por isso, frequentemente, essa interpolação é chamada de inverso do quadrado da distância.

No presente trabalho, foi utilizada a interpolação pelo vizinho mais próximo, utilizando o código computacional ArcGIS versão 10.1.