

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

DISSERTAÇÃO PARA MESTRADO

**EVENTOS HIDROCLIMÁTICOS EXTREMOS NAS CABECEIRAS DA
BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, SÃO PAULO.**

ANDRÉ LUIS DE SOUZA COELHO

**SEROPÉDICA - RJ
2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**EVENTOS HIDROCLIMÁTICOS EXTREMOS NAS CABECEIRAS DA
BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, SÃO PAULO.**

ANDRÉ LUIS DE SOUZA COELHO

Sob a orientação do Prof.
Gustavo Bastos Lyra, D. Sc.

e Sob a coorientação do Prof.
Friedrich Wilhelm Herms, D. Sc.

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável, Área de concentração em Meio Ambiente, Sustentabilidade e Conservação dos Recursos Naturais

Seropédica, RJ
Junho de 2019

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C672e Coelho, Andre Luis de Souza, 1988-
Eventos hidroclimáticos extremos nas cabeceiras da
Bacia do Rio Paraíba do Sul, São Paulo. / Andre Luis
de Souza Coelho. - Rio de Janeiro, 2019.
72 f.

Orientador: Gustavo Bastos Lyra.
Coorientador: Friedrich Wilhelm Herms .
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Práticas em Desenvolvimento Sustentável/Mestrado em
Práticas em Desenvolvimento Sustentável, 2019.

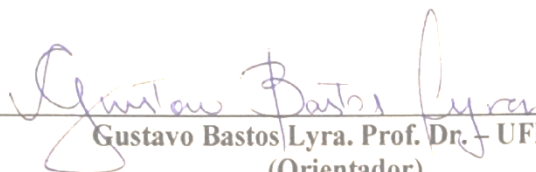
1. Recursos Hídricos. 2. Extremos
Hidrometeorológicos. 3. Variabilidade Climática. I.
Bastos Lyra, Gustavo , 1975-, orient. II. Wilhelm
Herms , Friedrich , -, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
Graduação em Práticas em Desenvolvimento
Sustentável/Mestrado em Práticas em Desenvolvimento
Sustentável. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRÁTICAS EM DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL**

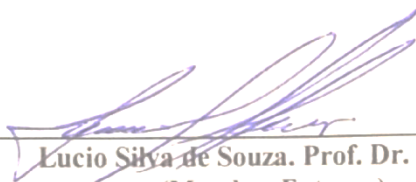
ANDRÉ LUIS DE SOUZA COELHO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável da UFRRJ.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/08/2019.



**Gustavo Bastos Lyra. Prof. Dr. - UFRRJ
(Orientador)**



**Lucio Silva de Souza. Prof. Dr. - UERJ
(Membro Externo)**



**Marcel Carvalho Abreu. Prof. Dr. - UFRRJ
(Membro Interno)**

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Gustavo Bastos Lyra e Friedrich Wilhelm Herms pela Orientação e Co-orientação, pela sua dedicação, paciência, sugestões e críticas para materialização deste trabalho.

À minha mãe Sueli de Souza, meu Pai Carlos Coelho (*in memorian*), minha mãe Carmen Lucia Soares, meu pai Edson Soares (*in memorian*), minha noiva Diyana Petrova, minhas irmãs Aline Coelho e Patrícia de Souza, meu amigo irmão André Strecht e todos meus familiares e irmãos espirituais, por todo amor, dedicação e suporte na minha formação pessoal, além do apoio na preparação e ao longo de todo período do curso.

Aos meus Mestres e Guias espirituais da Umbanda, por me ensinar o caminho da humildade e da fé, por toda proteção e conselhos durante minha jornada nesta vida.

Aos Professores Lucio Silva de Souza, Marcel Carvalho Abreu, André Felipe Nunes Freitas, Henderson Silva Wanderley, Ednaldo Oliveira dos Santos, Carlos Rodrigues Pereira, Paulo Diniz de Oliveira, além de todos os Professores e Funcionários do PPGPDS, pela convivência e auxílio nos anos de curso.

Aos amigos Maria Ceclia Trannin, Marcus Campos Matraca, Marco Aurélio Rodrigues, Irina Nasteva e meu padrinho Marco Sobral, pela inspiração, suporte e colaboração na realização deste trabalho.

Aos amigos Jaison Santos e Aluan Medeiros pelo companheirismo, cobertura e aos colegas de curso, especialmente aos amigos Wendell Bornéo e Amanda Regueira, pela dedicação, ajuda e sugestões recebidas durante o decorrer do curso.

Aos amigos Erick Amâncio, Helton de Souza e todos que diretamente ou indiretamente, contribuíram com ideias e sugestões para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ); ao Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável (PPGPDS); ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua/UERJ); ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biosistemas (PGEB/UFF).

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS); a Agência Nacional de Águas (ANA); ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) pela disponibilização dos dados utilizados nesta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

COELHO, André Luis de Souza. **Eventos hidroclimáticos extremos nas cabeceiras da Bacia do Rio Paraíba do Sul, São Paulo**. 72 p. Dissertação (Mestrado em Práticas em Desenvolvimento Sustentável, Meio Ambiente, Sustentabilidade e Conservação dos Recursos Naturais). Instituto de Florestas, Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

Os impactos sobre os recursos hídricos devem ser reduzidos para se manter o modo de vida atual e futuro. Avaliou-se influência dos extremos de precipitação e vazão nas cabeceiras da Bacia do Rio Paraíba do Sul e sua relação com os modos de variabilidade climática. Os extremos foram caracterizados por meio de índices padronizados, buscando analisar a dinâmica dos mesmos e sua relação com os modos de variabilidade climática. Na região localizam-se três reservatórios (Paraibuna, Santa Branca e Jaguari), principalmente, utilizados para geração de energia elétrica, abastecimento e controle de inundações. Foram utilizadas séries de precipitação de sete estações meteorológicas e três pontos de medição de vazão natural entre janeiro/1972 e dezembro/2016. As séries de precipitação passaram por tratamento de qualidade e preenchimento de falhas. Foi utilizado o *Standardized Precipitation Index* (SPI) para anomalias de precipitação e o *Streamflow Drought Index* (SDI) para anomalia de vazão. Os índices foram calculados nas escalas de 3, 6 e 12 meses para avaliar os anos hidrológicos, semestres e trimestres secos e úmidos. As séries passaram por testes estatísticos que permitiram a análise de tendência. Foi realizada a correlação entre SPI e SDI para as três escalas de tempo. Os índices climáticos dos modos de variabilidade climática: Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), El Niño Oscilação Sul (ENOS) e Gradiente Inter-hemisférico de TSM do Atlântico (GITA) foram analisados. As séries temporais foram submetidas a análise harmônica e espectral. As análises de SPI caracterizaram 79 anomalias, sendo 39 anos secos e 40 úmidos, enquanto o SDI apresentou 37 anomalias, sendo 15 secos e 22 úmidos. Não foram verificadas tendências estatísticas significativas nas séries. As análises de correlação demonstraram correlação com $r > 0,5$ para todas as avaliações, com exceção de quatro estações na escala de três meses para a estação seca e uma estação na escala de seis meses para semestre úmido. A maior frequência de ocorrência de extremos nas estações ocorreu em cinco anos secos e seis anos úmidos. A série pode ser dividida entre dois períodos característicos, o primeiro de 1972 a 1993 e, o segundo de 1994 a 2016. O primeiro período apresentou anos com predominância de anomalia positiva no semestre seco e na estação seca e no segundo observou-se uma inversão, com anomalia negativas no semestre úmido e na estação chuvosa. O primeiro harmônico apresentou período entre 11 e 22 anos para escala decadal e pode estar relacionado com ODP ou GITA. O segundo e terceiro harmônicos entre 2 e 7 anos para escala interanual pode estar relacionada com o fenômeno ENOS. Foi possível observar a ocorrência de extremos climáticos e caracterizar sua frequência. Foram observados ciclos entre três e seis anos para a ocorrência de extremos climáticos. A frequência de extremos de precipitação e vazão apresentaram relação, entretanto a intensidade desses fenômenos não pode ser observada com a mesma clareza. O estudo realizado contribui, assim, para transição dos sistemas tradicionais de gestão para sistemas alinhados ao modelo de desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Recursos Hídricos, Extremos Hidrometeorológicos, Variabilidade Climática.

ABSTRACT

COELHO, Andre Luis de Souza. **Extreme hydroclimatic events in the Spring of Paraíba do Sul Watershed, São Paulo**. 72 p. Dissertation (Master's in Sustainable Development Practices, Environment, Sustainability and Natural Resource Conservation). Forestry Institute, Postgraduate Program in Sustainable Development Practices, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

The impacts on water resources must be reduced to maintain current and future lifestyle. The influence of precipitation and streamflow extremes in the spring of the Paraíba do Sul Watershed and their relationship with the climate variability modes were evaluated. The extremes were characterized by standardized indices to analyze the dynamics and relationship with the climate variability modes. There are three reservoirs (Paraibuna, Santa Branca and Jaguari) in this region, mainly used for power generation, fresh water supply and flood control. The precipitation series were used from seven weather stations and three natural flow measurement points for the period between January 1972 and December 2016. The precipitation series underwent quality treatment and gap filling. Standardized Precipitation Index (SPI) was used for precipitation anomalies and Streamflow Drought Index (SDI) for flow anomalies. The indices were calculated on the scales of 3, 6 and 12 months to evaluate the hydrological years, dry and wet semesters and seasons. A trend analysis was performed. Correlation between SPI and SDI was performed for the three timescales. The climate indices were analyzed of the following climate variability modes: Pacific Decadal Oscillation (PDO), El Niño Southern Oscillation (ENSO) and Atlantic Interhemispheric SST Gradient (AISG). The time series were subjected to harmonic and spectral analysis. SPI analyzes characterized 79 anomalies, of which 39 dry and 40 wet years, while SDI identified 37 anomalies, of which 15 dry and 22 wet. No significant statistical trends were found in the series. There was correlation with $r > 0.5$ for all evaluations except for four seasons on the three-month dry season scale and one season on the six-month wet semester scale. The most frequent occurrence of extremes in the seasons occurred in five dry years and six wet years. The series can be divided into two characteristic periods, the first from 1972 to 1993 and the second from 1994 to 2016. The first period showed years with predominance of positive anomalies in the dry semester and the dry seasons, and in the second period there was an inversion, with negative anomalies in the wet semester and the rainy seasons. The first harmonic presented a period between 11 and 22 years for decadal scale and may be related to ODP or GITA. The second and third harmonics between 2 and 7 years for interannual scale may be related to the ENSO phenomenon. It was possible to observe the occurrence of climatic extremes and characterize their frequency. Cycles between three and six years were observed for the occurrence of climatic extremes. The frequency of precipitation and streamflow extremes were related, however the intensity of these phenomena cannot be observed with the same clarity. The study thus contributes to the transition from traditional management systems to systems aligned with the sustainable development model.

Key words: Water Resources, Hydrometeorological Extremes, Climate Variability.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Regiões Hidrográficas Brasil. - Fonte: ANA, 2017 | 12 |
| Figura 2: Relevo. – Fonte: CEIVAP, 2018..... | 14 |
| Figura 3: Divisão da Bacia por Estado e Geração de Energia – Fonte: CEIVAP, 2018 | 15 |
| Figura 4: Cobertura Vegetal e Uso do Solo – Fonte: CEIVAP, 2018..... | 16 |
| Figura 5: Densidade Demográfica na Bacia – Fonte: CEIVAP, 2018 | 17 |
| Figura 6: PIB per capita na Bacia– Fonte: CEIVAP, 2018 | 18 |
| Figura 7: Divisão Climática - Fonte: CEIVAP, 2018..... | 19 |
| Figura 8: Divisão da Bacia por Comitê – Fonte: CEIVAP, 2018 | 21 |
| Figura 9: Esquema Sistema Hidráulico da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Fonte: ANA, 2015a | 22 |
| Figura 10: Localização das Estações e Hidrografia da Área de Estudo ... Erro! Indicador não definido. | |
| Figura 11: Gráficos das séries pré (esquerda) e pós (direita) tratamento qualidade dos dados do entorno do reservatório de Paraibuna para séries de dados (jan/1972-dez/2016). Estações (1) Alferes, (2) Natividade da Serra e (3) Redenção da Serra. | 42 |
| Figura 12: Gráficos das séries pré (esquerda) e pós (direita) tratamento qualidade dos dados do entorno do reservatório de Santa Branca para séries de dados (jan/1972-dez/2016). Estações (4) Santa Branca 01 e (5) Santa Branca 02..... | 43 |
| Figura 13: Gráficos das séries pré (esquerda) e pós (direita) tratamento qualidade dos dados do entorno do reservatório de Jaguari para séries de dados (jan/1972-dez/2016). Estações (6) Igarata e (7) Santa Isabel. | 44 |
| Figura 14: Boxplot das chuvas mensais nas estações meteorológicas na série (jan/1972-dez/2016). | 46 |
| Figura 15: Boxplot das vazões mensais nas nos pontos de medição de vazão na série (jan/1972-dez/2016)..... | 48 |
| Figura 16: Índices de SPI (verde) e SDI (azul) para todas as estações e reservatórios série (jan/1972-dez/2016)..... | 51 |
| Figura 17: Índice SPI e SDI nos anos com anomalias mais representativas. (1) Alferes; (2) Natividade da Serra; (3) Redenção da Serra; (4) Santa Branca 01; (5) Santa Branca 02; (6) Igaratá; (7) Santa Isabel; (A) Paraibuna; (B) Santa Branca; (C) Jaguari..... | 58 |
| Figura 18: Gráfico dos primeiros harmônicos de SPI para todas as estações. | 61 |
| Figura 19: Gráfico dos primeiros harmônicos de SDI para todos os pontos de medição de vazão. | 61 |
| Figura 20: Harmônicos séries de SPI para todas as estações. | 62 |
| Figura 21: Harmônicos séries de SDI para todos os pontos de medição de vazão. | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Reservatórios cabeceiras Bacia do Rio Paraíba do Sul. Fonte: ANA (2015a) | 25 |
| Tabela 2: Estações pré-selecionadas. - Fonte: ANA, 2018 | 26 |
| Tabela 3: Classificação de intensidade dos índices de SPI e SDI. – Fonte: MC KEE et al., 1993 | 30 |
| Tabela 4: Distância e correlação entre a estação de referência e as cinco estações mais próximas. (*estação não foi utilizada no preenchimento de falhas)..... | 38 |
| Tabela 5: Índices pré e pós tratamento qualidade dos dados da série (jan/1972-dez/2016).... | 40 |
| Tabela 6: Estações não utilizadas da série (jan/1972 - dez/2014). | 40 |
| Tabela 7: Precipitação média (mm) das estações da série (jan/1972-dez/2016). | 45 |
| Tabela 8: Vazão Média Reservatórios (m/s) Dados da Série (jan/1972-dez/2016)..... | 47 |
| Tabela 9: Fases Modos de Variabilidade Climática. Dados da Série (jan/1972-dez/2016). ... | 50 |
| Tabela 10: SPI Anos Úmidos Dados da Série (jan/1972-dez/2016)..... | 52 |
| Tabela 11: SPI Anos Secos Dados da Série (jan/1972-dez/2016)..... | 52 |
| Tabela 12: SDI Anos Úmidos Dados da Série (jan/1972-dez/2016)..... | 53 |
| Tabela 13: SDI Anos Secos Dados da Série (jan/1972-dez/2016). | 53 |
| Tabela 14: Testes preliminares nas séries anuais de SPI e SDI série (jan/1972-dez/2016). ... | 54 |
| Tabela 15: Análise de tendência nas séries anuais de SPI e SDI série (jan/1972-dez/2016). . | 55 |
| Tabela 16: Análise de Correlação SDI e SPI..... | 56 |
| Tabela 17: Modos de variabilidade nos anos de anomalias representativas..... | 59 |
| Tabela 18: Principais harmônicos das séries de SPI e SDI na bacia e índice de acerto da relação entre os harmônicos e os dados observados..... | 60 |

LISTA DE ABREVIACÕES

| | |
|-------------------|--|
| ANA | Agência Nacional de guas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| CP1-CAB-A | Compartimento 1 Cabeceira A |
| CP1-CAB-B | Compartimento 1 Cabeceira B |
| CP2-JAG-A | Compartimento 2 Jaguari A |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais |
| DAEE | Departamento de águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo |
| ENOS | El Niño – Oscilação Sul |
| GITA | Gradiente Inter-hemisférico de TSM do Atlântico |
| hm ³) | Hectmetro Cúbico |
| km | Quilometro |
| m | Metro |
| m/s | Metro por Segundo |
| MEI | <i>Multivariate ENSO Index</i> |
| MG | Minas Gerais |
| mm | Milímetro |
| MMV | Método da Máxima Verossimilhança |
| MW | Megawatts |
| N ₂ | Nitrogênio |
| NOAA | <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> |
| O ₂ | Oxignio |
| O ₃ | Ozônio |
| ODM | Objetivos de Desenvolvimento do Milênio |
| ODP | Oscilação Decadal do Pacífico |
| ODS | Objetivos do Desenvolvimento Sustentável |
| ONS | Operador Nacional do Sistema |
| ONU | Organização da Nações Unidas |
| PDO | <i>Pacific Decadal Oscillation Index</i> |
| PGEB | Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biosistemas |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PPGPDS | Programa de Pós-Graduação em Práticas em Desenvolvimento Sustentável |
| Profágua | Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos |
| RJ | Rio de Janeiro |
| SDI | <i>Streamflow Drought Index</i> |
| SP | São Paulo |
| SPI | <i>Standardised Precipitation Index</i> |
| TNA | <i>Tropical Northern Atlantic Index</i> |
| TSA | <i>Tropical Southern Atlantic Index</i> |
| TSM | Temperatura da Superfície do Mar |
| UERJ | Universidade Estadual do Rio de Janeiro |
| UFF | Universidade Federal Fluminense |
| UFRRJ | Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro |
| UGRHI | Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos |
| ZCAS | Zona de Convergência do Atlântico Sul |
| ZCIT | Zona de Convergência Intertropical |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 OBJETIVOS | 2 |
| 2.1 Geral..... | 2 |
| 2.2 Específicos | 2 |
| 3 REVISÃO DE LITERATURA..... | 2 |
| 3.1 Climatologia..... | 2 |
| 3.1.1 Elementos e Fatores Climáticos no Estudo da Precipitação e Vazão..... | 2 |
| 3.1.2 Extremos Climáticos Relacionados a Precipitação e Vazão | 6 |
| 3.1.3 Variabilidade Climática Global | 8 |
| 3.2 Água e Recursos Hídricos | 10 |
| 3.2.1 Importância da Água no Desenvolvimento Sustentável..... | 10 |
| 3.2.2 Disponibilidade de Água e Organização dos Recursos Hídricos no Brasil..... | 11 |
| 3.3 Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul | 13 |
| 3.3.1 Características Gerais da Bacia | 13 |
| 3.3.2 Clima na Bacia | 18 |
| 3.3.3 Gestão de Recursos Hídricos na Bacia | 20 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 23 |
| 4.1 Caracterização da Área de Estudo..... | 23 |
| 4.2 Séries Históricas de Precipitação | 25 |
| 4.3 Preenchimento de Falha e Análise de Qualidade | 26 |
| 4.4 Séries Históricas Vazão Natural..... | 28 |
| 4.5 Cálculo do Índice Padronizado de Precipitação (Standardised Precipitation Index - SPI) e Índice Padronizado de Seca Hidrológica (Streamflow Drought Index - SDI) | 29 |
| 4.6 Análise de Tendência das Séries de Precipitação e Vazão..... | 32 |
| 4.7 Índices dos Modos de Variabilidade Climática..... | 35 |
| 4.8 Análise Harmônica e Espectral | 36 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 5.1 Análise de Qualidade e Preenchimento de Falhas nas Séries de Precipitação | 37 |
| 5.2 Caracterização Meteorológica e Hidrológica | 45 |
| 5.3 Caracterização Climática..... | 49 |
| 5.4 Anomalias de Precipitação e Vazão | 50 |
| 5.5 Testes Estatísticos, Correlação e Análise de Tendência nas Séries de SPI e SDI..... | 53 |
| 5.6 Análise Observacional dos Resultados para Anos Extremos | 56 |
| 5.7 Análise Harmônica e Espectral | 59 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 64 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 65 |

1 INTRODUÇÃO

A água é fundamental para a sobrevivência e modo de vida em sociedade. Além da importância meramente biológica, a água tem importância estratégica no desenvolvimento em todas as suas vertentes. No mundo, soluções para aproveitamento e controle hídrico emolduram a história da sociedade. É fundamental entender os sistemas hidrológicos para alcançar o atendimento universal para sociedade e a promover a proteção necessária desses recursos para sustentar o modo de vida das pessoas e o desenvolvimento nas nações. Somente com uma gestão eficiente e integrada dos recursos hídricos é possível garantir o direito humano de acesso à água, a disponibilidade para atender os meios de produção e agricultura, dentro dos limites ambientais, que possibilitam a renovação dos recursos, sem prejuízo aos usuários.

Avaliar os extremos de precipitação e vazão permite entender como o ciclo hidrológico atua na região. Estes extremos têm o potencial de causar diversos desastres naturais como seca, enxurradas, inundações e deslizamento de terra. Estas ocorrências em áreas com grande ocupação tendem a causar elevados danos socioeconômicos. Deste modo é possível propor estratégias para prevenção, adaptação e mitigação de desastres naturais decorrentes dos extremos climáticos. O uso de índices padronizados permite a comparação com diversas regiões com os mais diversos tipos de características climáticas, econômicas, sociais e ambientais. Também se pode analisar os fenômenos de precipitação e vazão e observar a dinâmica dos extremos de modo individual e correlacionado.

Os modos de variabilidade climática influenciam o clima em todo mundo e ocorrem devido a interação entre o oceano-atmosfera. As diferentes fases dos modos interagem de forma diferente ao redor do globo e podem influenciar na ocorrência de extremos climáticos. Avaliar a influência desses fenômenos no clima regional permite aos tomadores de decisão criarem estratégias de atuação na ocorrência de cada fase e interação entre os diferentes modos.

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul está localizada na Região Sudeste do Brasil e se distribui na área entre os estados de São Paulo (SP), Minas Gerais (MG) e Rio de Janeiro (RJ). As cabeceiras da bacia estão localizadas no estado de São Paulo. Na região encontram-se três dos seus quatro principais reservatórios, Paraibuna, Santa Branca e Jaguari. A região Sudeste tem grande importância econômica e política nacional, além de possuir a maior densidade demográfica do país. A bacia é fundamental para abastecimento público da região metropolitana do Rio de Janeiro, sendo atendida pelas águas do Rio Paraíba do Sul, através de uma transposição dentro da complexa estrutura hidráulica que compõe a sistema da bacia. O sistema atende diversos

municípios em toda sua extensão nos estados de SP, MG e RJ. Os reservatórios são responsáveis também por armazenagem de água para geração de energia elétrica. Os três estados possuem usinas de geração hidroelétrica nos seus barramentos. O sistema também é responsável pela regularização de vazão a fim de minimizar o risco de desastres naturais. A ocorrência de extremos de precipitação de chuva e vazão na região influencia diretamente na segurança hídrica da região podendo causar impactos severos a população local. Além do risco de desastre, chuva e vazão abaixo ou acima do esperado podem comprometer a gestão do recursos e causar distribuição insuficiente para os usuários.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a ocorrência de extremos de precipitação e vazão na região dos reservatórios das cabeceiras da Bacia do Rio Paraíba do Sul, sua tendência temporal e relação com os modos de variabilidade climática.

2.2 Específicos

1. Caracterizar ocorrência de extremos climáticos úmidos e secos por meio de índices padronizados.
2. Analisar a dinâmica e características das séries dos extremos de precipitação e vazão.
3. Identificar os padrões temporais de frequência e intensidade dos extremos de precipitação e vazão e a influência dos modos de variabilidade climática.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Climatologia

3.1.1 Elementos e Fatores Climáticos no Estudo da Precipitação e Vazão

O clima influencia a vida das pessoas de diversas maneiras. A adaptação ao clima é parte da rotina das diversas sociedades ao redor do mundo. Os tomadores de decisão das mais diversas áreas estratégicas devem ter conhecimento sobre o clima. Deste modo eles podem atuar na prevenção, adaptação e mitigação com ações que podem reduzir os impactos decorrentes dos extremos climáticos. (TORRES e MACHADO, 2008; AMBRIZZI e ARAUJO, 2014).

O clima é definido por elementos e fatores climáticos internos e externos. Estes são responsáveis pela regulação do clima. O formato da Terra e seu movimento em relação ao Sol são a base para os estudos meteorológicos e climáticos. Devem-se considerar os estudos de pontos, linhas e planos de referência da superfície terrestre. Estes elementos vão caracterizar as latitudes, longitudes e altitude do globo terrestre e servir de referência para caracterizar os variados climas. Do seu movimento vão ser observados os solstícios e equinócios, que variam de acordo com a declinação do o Sol referente ao planeta. Estes vão ser responsáveis pela ocorrência das estações do ano. Além disso, outros importantes elementos do clima são: temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, ventos, nebulosidade, insolação, radiação solar e precipitação. entre os fatores, destacam-se: latitude, altitude, maritimidade e continentalidade, solos, vegetação, correntes marítimas, disposição do relevo e a interferência antrópica (VAREJÃO-SILVA, 2005; TORRES e MACHADO, 2008).

A atmosfera é um conjunto de gases, vapor d'água e partículas que circundam a Terra e acompanham seus movimentos. Estes gases vão se tornando mais rarefeitos à medida que aumenta a altitude. Os principais gases que formam a atmosfera são: Nitrogênio (N_2), Oxigênio (O_2), Ozônio (O_3) e Dióxido de Carbono (CO_2). O vapor d'água também exerce importante influência na atmosfera por interferir na distribuição de temperatura, na formação de nuvens e fenômenos hidrometeoros. A maioria dos fenômenos meteorológicos ocorre nas camadas mais baixas da atmosfera, a Troposfera. Os fenômenos hidrometeoros consistem na ocorrência de partículas de água na atmosfera, em fase líquida ou sólida, em queda livre ou suspensão, depositadas sobre quaisquer objetos ou na atmosfera livre. Os mais comuns são chuva, chuvisco, sereno, neve, granizo, saraiva, nevoeiro, névoa, orvalho, geada, tromba (VAREJÃO-SILVA, 2005; TORRES E MACHADO, 2008; INMET, 2018).

O peso que a coluna de ar atmosférico exerce sobre qualquer superfície, define a pressão atmosférica. A pressão atmosférica em superfície varia principalmente em função da temperatura. Ela pode definir centros de alta (anticiclones) e baixa pressão (ciclones). Devido a influência da temperatura as ocorrências de diferentes temperaturas relacionadas a altitude e latitude vão apresentar alterações na pressão atmosférica. Devido à relação com a temperatura a pressão

atmosférica vai se relacionar diretamente com a sazonalidade e, assim altera sua intensidade de acordo com as estações do ano. Este fenômeno ocorre em função dos mecanismos de convergência e divergência, que formam as células de circulação, características da circulação de grande escala. (VAREJÃO-SILVA, 2005; TORRES E MACHADO, 2008).

O vento é o movimento do ar na atmosfera em relação a superfície da Terra. O vento se desloca das áreas de baixa pressão para as áreas de alta pressão. O vento em baixas altitudes tem forte influência do relevo e da temperatura da superfície. Nas partes mais altas da atmosfera o vento tende a ter velocidade mais alta, nas partes mais baixas ele é reduzido devido a força de fricção e obstáculos. Os ventos constantes, denominados de Alísios são os ventos que provêm de zonas subtropicais de alta pressão para a faixa equatorial de baixa pressão. O vento mais frio se desloca em baixas altitudes até a faixa equatorial, onde se aquece e faz o sentido inverso em altitudes maiores, formando os chamados ventos Contra-Alísios. Devido ao movimento de rotação da terra os ventos Alísios do Hemisfério Norte escoam de nordeste para sudoeste e no Hemisfério Sul de sudeste para noroeste. Esse fenômeno é condicionado pela força de Coriolis. Os ventos periódicos são chamados de brisas marítimas/terrestres relacionados a áreas costeiras e brisas de vale/montanha ocorrem em regiões de relevo acentuado. As brisas marítimas ocorrem devido a área do continente se aquecer mais rapidamente e promover uma área de baixa pressão. A brisa terrestre ocorre no sentido oposto, quando o continente se esfria mais rapidamente e o oceano ainda está aquecido transferindo a zona de baixa pressão para a água. A brisa de vale ocorre devido ao aquecimento dos topos das montanhas mais rapidamente que os vales, o que faz com que o vento escoa de forma ascendente. E a brisa da montanha é o inverso, ou seja, quando o topo das montanhas esfria e os vales permanecem mais quentes, zonas de alta pressão, que ocasiona ventos descendentes e frios (VAREJÃO-SILVA, 2005; TORRES E MACHADO, 2008).

O vapor d'água na atmosfera (umidade do ar) é um elemento fundamental para o clima. A umidade do ar é resultante da evaporação da água dos corpos hídricos, gelo, superfícies terrestres, transpiração animal e vegetal. Para ocorrer evaporação é necessária a presença de água e calor, sem um desses elementos não ocorre a evaporação e a umidade permanece baixa. A umidade relativa do ar também está relacionada com a precipitação. Locais com grande índice de precipitação apresentaram umidade relativa do ar elevada. Esse vapor d'água é transportado pelas correntes aéreas e voltam ao estado líquido ou sólido, quando encontram condições favoráveis para essa mudança de estado. O vapor d'água tem participação importante no balanço energético da atmosfera (VAREJÃO-SILVA, 2005; TORRES e MACHADO, 2008).

As correntes oceânicas influenciam o clima na interação oceano-continente. A circulação oceânica é influenciada pela temperatura e salinidade no que diz respeito a densidade da água. O vento tem ação sobre as correntes superficiais. O movimento de rotação da Terra também influencia nas correntes devido a força de Coriolis. As correntes são responsáveis pela troca da água quente e a água fria entre as regiões próximas ao Equador e as regiões polares. Essa troca de água é responsável pela regulação climática na interação oceano atmosfera (TORRES E MACHADO, 2008).

A disposição dos relevos é um fator que exerce grande influência no clima. O relevo contribui com a direção do vento, altitude e conseqüente diferença de temperatura e pressão atmosférica. Em grande escala grandes regiões montanhosas, como a Cordilheira dos Andes e os Himalaias influenciam em grande escala no clima. Os relevos também podem apresentar microclimas distintos. As vertentes são influenciadas por diferentes elementos, o que faz com que se tenham diferentes características ambientais, dependendo da umidade e temperatura observadas nestas regiões (NIMER, 1972; SANT'ANNA-NETO, 2005; TORRES E MACHADO, 2008).

Dentre os elementos e fatores climáticos e suas relações, o objeto de estudo deste trabalho é a precipitação. A precipitação ocorre quando existem condições necessárias para a água, em estado gasoso, condense ou solidifique e posteriormente precipite e atinja a superfície em estado líquido ou sólido. Essa troca de estado é o ciclo hidrológico que é indispensável para vida no planeta. Estes ciclos de precipitação mudam sazonalmente de acordo com as condições climáticas para cada região do planeta. Esses processos vão determinar, além da quantidade de precipitação a sua distribuição, dois pontos de extrema importância para o presente estudo (TORRES e MACHADO, 2008). “Na avaliação da influência da pluviosidade na disponibilidade hídrica é importante analisar não só os períodos de estiagem, mas também os períodos chuvosos, pois chuvas abaixo da média nesses períodos podem forjar períodos de estiagem catastróficos” (CBH-PS, 2016a).

As massas de ar são grandes porções de atmosfera que abrangem extensa área horizontal sobre a superfície terrestre, com distribuição homogênea de temperatura e umidade. Elas se formam quando uma grande porção de ar permanece por um longo tempo sobre uma grande região com superfície com características homogêneas (oceanos, floresta, geleiras, desertos). Devido à influência da região, a massa de ar adquire característica aproximadamente homogênea. Esse fator é observado quando a ocorrência ventos fracos e fenômenos de baixa turbulência, que proporcionam estacionamento da massa de ar sobre a região de influência. As massas de ar são classificadas em polares e tropicais e geralmente subclassificadas em continentais e marítimas.

Também são classificadas quanto a temperatura como frias e quentes e quanto a umidade como secas ou úmidas. Na ocorrência de duas massas de ar distintas, a zona de contato entre as massas é chamada de frente. As frentes são classificadas com frentes quentes e frentes frias relacionadas com as massas de ar que as seguem. As frentes frias tendem a se deslocar dos Polos para o Equador e as frentes quentes no sentido oposto. As ocorrências de frentes normalmente estão associadas a ar agitado e tempo instável. Os centros de ação atmosférica são áreas influenciadas pela alta e baixa pressão atmosféricas que formam os ciclones, anticiclones e depressões. Eles são influenciados pela Força de Coriolis. Eles ocorrem em ambos os hemisférios e se movem sazonalmente no decorrer do ano devido à mudança de radiação solar (VAREJÃO-SILVA, 2005; TORRES e MACHADO, 2008).

3.1.2 Extremos Climáticos Relacionados a Precipitação e Vazão

Dentre os eventos de extremos climáticos relacionados a precipitação, destacam-se a enxurradas, alagamentos, inundações, movimentos de massa e secas. Estes eventos têm potencial para afetar vários setores da sociedade e, impactam nos recursos hídricos, produção de alimentos, geração de energia, entre outros. Estes impactos causam diversos problemas econômicos e sociais para a população atingida direta e indiretamente. Estes eventos estão fortemente relacionados a óbitos, perda de bens materiais e problemas generalizados de saúde pública. A frequência e intensidade de extremos de precipitação tem relação com a variabilidade climática (BRASIL, 2012; AMBRIZZI e ARAUJO, 2014).

A região Sudeste do Brasil é altamente vulnerável a ocorrência de eventos extremos de precipitação, devido principalmente a sua alta densidade demográfica. O clima na região também confere essa característica de ocorrência de extremos climáticos. Diversas pesquisas dão conta da ocorrência de extremos de precipitação na região Sudeste do Brasil. Alguns destes eventos ocorreram em períodos de atuação dos diversos modos de variabilidade climática (AMBRIZZI e ARAUJO, 2014). Eventos relacionados a extremos de precipitação, que ocasionam chuva intensa e seca serão analisados na presente pesquisa.

O Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013) apresenta os desastres naturais ocorridos entre 1991 e 2012. O documento descreve que na região do Vale do Paraíba Paulista, onde a área de estudo desse trabalho está localizada, ocorreram 130 desastres naturais. Número menor apenas que a região Metropolitana de São Paulo. A maior parte deles está relacionado a ocorrência de extremos de precipitação.

Segundo Wilhite e Glantz (1985) a seca é caracterizada como a ocorrência de redução na precipitação em relação ao normal climatológico em determinada área. Ela está relacionada ao atraso da estação chuvosa e é um fenômeno de difícil identificação. Ela pode ocorrer por um tempo, mas seus impactos podem durar por um período muito maior. Sua gravidade é difícil de determinar, pois não envolve somente a duração, intensidade e extensão, mas envolve também a resposta da vegetação, impacto as atividades humanas e sistemas hidrológicos. Os impactos são sociais, econômicos e ambientais. Uma seca pode ocorrer com mesma duração, intensidade e extensão e ter efeitos diferentes.

A seca pode ser dividida em quatro tipos como caracterizados a seguir: i) Seca meteorológica - determinada pela intensidade e duração de período seco comparado a condição normal, resultado de deficiência na precipitação; ii) Seca hidrológica – definida pela redução do nível médio de disponibilidade de água da sua condição normal, devido à redução de precipitação e no abastecimento de água superficial e subterrânea. Sua determinação necessita de um período de tempo maior que a meteorológica e traz consequências no abastecimento de água humano, agrícola, industrial e para geração de energia; iii) Seca agrícola - proveniente da combinação da seca meteorológica e hidrológica. Esse tipo de seca está relacionado à disponibilidade de água no solo para as culturas. Caracterizada quando o solo fica com baixa umidade, o que impossibilita o crescimento e produção das culturas agrícolas e; iv) Seca socioeconômica - consequência do somatório dos impactos relacionados aos tipos de secas anteriormente apresentadas. Ela é influenciada pelo impacto direto e indireto da produção agrícola e atividades econômicas, principalmente os impactos sociais diretos (WILHITE e GLANTZ, 1985; FERNANDES et al., 2009).

Os eventos extremos de chuva são responsáveis por diversos tipos de desastres naturais. Os eventos mais comuns são enxurradas, alagamentos inundações, movimentos de massa. As enxurradas são decorrentes do escoamento superficial de alta velocidade, resultado de chuvas intensas e concentradas e, normalmente, associadas com terrenos com relevo acidentado. Esse fenômeno tem seu impacto agravado quando ocorre em áreas urbanas de alta densidade. Inundação é caracterizada quando uma área fora dos limites normais de um curso d'água é tomada por água. Esse fenômeno ocorre na decorrência de chuvas prolongadas que o fluxo de água é maior que a capacidade de drenagem normal da região. As inundações são fenômenos naturais em algumas regiões e fazem parte da sazonalidade de algumas áreas com a região Amazônica e o Pantanal. Quando ocorrem em decorrência de eventos extremos podem gerar danos severos a região e grandes perdas humanas e materiais. Os alagamentos ocorrem quando uma área urbana tem

precipitações maiores que seus sistemas de drenagem comportam diante de chuvas intensas. Eles estão na maioria das vezes relacionados ao mal planejamento urbano e crescimento urbano acelerado, devido a impermeabilização do solo. Os movimentos de massa são eventos geológicos que tem grande relação com a pluviosidade. Eles são caracterizados como deslocamento de solo ou rocha de uma encosta. Estes eventos muitas vezes estão relacionados a ocorrência de chuva por vários dias em regiões com relevo acidentado (UFSC, 2013).

3.1.3 Variabilidade Climática Global

Além da variabilidade anual e sazonal, o clima possui modos de variabilidade interanual, decadal e multidecadal. Estes modos de variabilidade geram incertezas na previsão dos ciclos climáticos normais observados em diversas regiões do planeta. Esses cenários exigem a busca por conhecimento científico com o objetivo de compreender e orientar para adoção de medidas para reduzir os impactos decorrentes dos extremos climáticos decorrentes. É decisivo quantificar os riscos para ser possível a definição dos mecanismos para gerenciar os mais diversos cenários (CGEE, 2014).

A variabilidade climática está relacionada aos desvios dos índices climáticos em relação à média climática regional. Estes desvios estão relacionados a Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Isso se dá devido à alta capacidade térmica dos oceanos, que levam mais tempo para absorver e liberar o calor proveniente das radiações solares. Com isso a atmosfera, por meio das teleconexões reage de maneira distinta às diferenças de pressão e de temperatura, assim impactam diferentes partes do globo (SILVA e SILVA, 2012). As teleconexões ocorrem quando forçantes climáticas locais influenciam regiões remotas. Devido a característica fluida da atmosfera estas conexões são possíveis. A identificação destas conexões é importante ferramenta para entender a ocorrência de fenômenos anômalos nas diferentes regiões do planeta (CAVALCANTI e SAMPAIO, 1996; SILVA e SILVA, 2012).

O primeiro modo de variabilidade apresentado nesta pesquisa é fenômeno chamado El Niño – Oscilação Sul (ENOS). Este fenômeno ocorre no Oceano Pacífico Tropical e tem grande relação com o clima na América do Sul. O fenômeno está associado a alteração de TSM e dos ventos Alísios de sudeste. O fenômeno possui duas fases, uma positiva denominada El Niño e a fase negativa chamada La Niña. O fenômeno é caracterizado pela alteração da Célula de Walker, que é um sistema de circulação de ventos na direção de oeste para leste entre Darwin e a costa peruana na América do Sul. O ENOS é um fenômeno variável, suas fases têm tendência de se

alternarem de dois a sete anos e com intervalos entre anos de um a 10 anos entre as ocorrências (VAREJÃO-SILVA, 2005; TORRES e MACHADO, 2008; SILVA e SILVA, 2012).

A fase positiva, El Niño é caracterizada pelo aumento de TSM no Pacífico Tropical Leste e Central, sendo caracterizada pelo deslocamento do centro de baixa pressão para o Pacífico Central. Os ventos Alísios enfraquecem na área central e leste, o que faz baixar a termoclina na costa da América do Sul. A fase oposta, negativa, La Niña ocorre o oposto e, os ventos Alísios ficam mais fortes e as águas do Pacífico Leste e Central ficam mais frias. O centro de baixa pressão do Pacífico Oeste é intensificado. O fenômeno de ressurgência das águas frias de grandes profundidades oceânicas ganha intensidade. O ENOS influencia no clima de diversas partes do mundo. No Brasil na ocorrência de El Niño indica seca e redução de precipitação no Norte do Brasil e seca severa no Nordeste. No Sudeste ocorre aumento da temperatura média e no Sul aumento na precipitação. Na ocorrência de La Niña podem ser observados aumento de precipitação no Norte e Nordeste, frio no Sudeste e seca severa no Sul do país (VAREJÃO-SILVA, 2005; COMET, 2009; SILVA e SILVA, 2012).

A Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) é um fenômeno de baixa frequência que ocorre na bacia do Pacífico Norte. A ODP está relacionada à diferença de TSM entre o Pacífico Extratropical e Tropical. O fenômeno ocorre em duas fases: positiva e negativa. A fase positiva ocorre quando as águas do Pacífico Extratropical estão mais frias que o normal climatológico e as águas do Pacífico Tropical estão mais quentes. A fase negativa é quando ocorre exatamente o oposto nas anomalias de TSM (MANTUA et.al., 1997; SILVA e SILVA, 2012). A ODP possui baixa frequência, porém grande energia tendo a capacidade de influenciar o ENOS. Os padrões de ODP e ENSO podem ser relacionados, caracterizando esta interconexão entre os fenômenos. Com isso pode se considerar ODP como um modulador de El Niños e La Niñas mais intensos e em maior frequência, dependendo da fase de ODP que está atuando no período (MANTUA et al., 1997; ZHANG et al., 1997; SILVA e SILVA, 2012).

O Oceano Atlântico é controlado por um gradiente meridional. As ocorrências de anomalias de TSM no Oceano Atlântico Tropical Norte e Sul são caracterizadas como Gradiente Inter-hemisférico de TSM do Atlântico (GITA), descrita anteriormente como Dipolo do Atlântico Tropical. Esse modo de variabilidade possui escala interanual e decadal. O modo apresenta duas fases positiva e negativa. A fase positiva ocorre quando o norte do Atlântico Tropical está quente e o sul frio, na fase oposta negativa ocorre o inverso. A ocorrência do Dipolo impacta na posição latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e, influencia na distribuição sazonal de chuvas parte do Norte e Nordeste do Brasil. Influenciando no clima da Amazônia. Existem

evidências de que ENOS influencie na TSM do Atlântico tropical, diante das correlações entre os fenômenos (MOURA e SHUKLA, 1981; SERVAIN, 1991; HUANG e SHUKLA, 1997; ENFIELD et al., 1999; HUANG et al., 2004; LUCENA et al., 2011).

3.2 Água e Recursos Hídricos

3.2.1 Importância da Água no Desenvolvimento Sustentável

Desenvolvimento Sustentável é definido como “desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades”. Esse termo foi cunhado e definido no Relatório da Comissão Brundtland (1987) pela Organização das Nações Unidas (ONU). O desenvolvimento sustentável busca a interação de três sistemas complexos. São eles a economia mundial, uma sociedade global e o meio ambiente físico do planeta. Buscar o equilíbrio entre esses sistemas é o objetivo firmado entre as nações que formam a ONU. Extinguir a pobreza e fome, garantir acesso à educação, combater as mudanças climáticas e os impactos dos extremos climáticos, garantir o acesso à água e igualdade de direitos, são alguns dos principais objetivos do desenvolvimento sustentável. A ciência e a tecnologia são consideradas opções de caminhos para atingir estes objetivos. Alguns acordos foram firmados desde os anos setenta na busca de viabilizar um caminho para ampliar e implementar o conceito ao redor do mundo (SACHS, 2015; UN, 2015; ONU, 2019a).

As preocupações com a agenda ambiental mundial na década de 60 e início da década 70 culminaram na Conferência das Nações Unidas de Estocolmo (1972). Este foi um marco histórico para a construção dos acordos atuais. Diversos outros encontros ocorreram e em 1992 foi realizada no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Rio 92). Em 2000 com a virada do milênio foi adotada a Declaração do Milênio. Com esta declaração foram criados os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), que foi uma parceria global para reduzir a pobreza extrema até 2015 com base em oito objetivos. Em 2012 aconteceu novamente no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20). Nesta conferência, com a proximidade de 2015, prazo para os resultados dos ODM serem analisados, foram iniciadas as discussões sobre uma nova agenda que começou a ser construída. Em 2015 ocorreu em Nova York a Cúpula de Desenvolvimento Sustentável. Neste evento os países que fazem parte da ONU apresentaram uma nova agenda para os quinze anos subsequentes. Essa agenda é conhecida como Agenda 2030. A agenda é composta por 17

objetivos que contêm 169 metas que ficaram conhecidos como Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). O Brasil é signatário desta agenda junto com outros 192 estados membros da ONU (UN-WATER, 2014; UN, 2015; ONU, 2019a; ONU 2019b).

O objetivo número seis da agenda é definido como Água Potável e Saneamento. Este objetivo está ligado área de pesquisa objeto deste estudo. Todas as discussões sobre desenvolvimento sustentável passam pela questão da água, devido seu papel vital e estratégico. As melhorias na gestão dos recursos hídricos, disponibilização de acesso a abastecimento de água e saneamento básico de maneira integrada é fundamental. Essas ações são o caminho para o desenvolvimento social e econômico, preservação do meio ambiente e garantia dos recursos necessários para essa e as próximas gerações. O acesso a água depende da disponibilidade hídrica física, da gestão dos recursos, da forma de armazenamento e disponibilização aos usuários. O ODS 6 busca criar modelos para garantir a acessibilidade hídrica de modo equitativo e justo. Outro fator primordial para alcançar os objetivos é a pesquisa e desenvolvimento na área. “A inovação, a pesquisa e o desenvolvimento científico são essenciais para fundamentar um processo consciente de tomada de decisões” (UN-WATER, 2019c). Criar novas tecnologias e modelos de gestão mais eficientes é um desafio a ser alcançado. Compreender os extremos climáticos faz parte da estratégia para adaptação e mitigação dos impactos que, secas, enchurradas e inundações podem causar (BISWAS, 1991; KOUDSTAAL et al., 1992; UN-WATER, 2019a; UN-WATER, 2019b; UN-WATER, 2019c).

3.2.2 Disponibilidade de Água e Organização dos Recursos Hídricos no Brasil

O Brasil é um país com abundância de água em números gerais. Entretanto com diversos problemas relacionados à distribuição, devido a maior quantidade de água doce disponível se concentrar na região Norte do país e a maior parte da população ocupar a região Sudeste (ANA, 2018a). Os recursos hídricos são assim nomeados quando a água é destinada ao uso. Os sistemas de recursos hídricos são o conjunto de organizações públicas e privadas que, planejam, deliberam e executam as ações necessárias para garantir a disponibilidade e controlar os usos de água. Eles se amparam na legislação em todos os níveis governamentais por meio de instrumentos de planejamento, controle e proteção da água (LANNA, 2001).

O principal instrumento de gestão de recursos hídricos no Brasil é a lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Esta lei é conhecida com a “Lei das Águas” (LANNA,

2001). A Política Nacional de Recursos Hídricos foi promulgada para aperfeiçoar as legislações que tratavam do tema antes de 1997. Essa lei que determina os fundamentos, objetivos, instrumentos de gestão, planos, enquadramento de classes, outorga e cobrança para os usos, infrações e penalidade, indicação da criação de organismos e outros pontos específicos que norteiam as ações referentes ao tema (BRASIL, 1997; ANA, 2013).

Em 2003, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, por meio da resolução nº 32 instituiu a divisão hidrográfica nacional em 12 regiões hidrográficas (Figura 01). A divisão foi realizada considerando as bacias ou grupos de bacias e sub-bacias hidrográficas com características homogêneas ou similares com o objetivo de facilitar a gestão de recursos hídricos. As regiões hidrográficas são divididas também em sub-bacias e microbacias (ANA, 2015b; ANA, 2017).

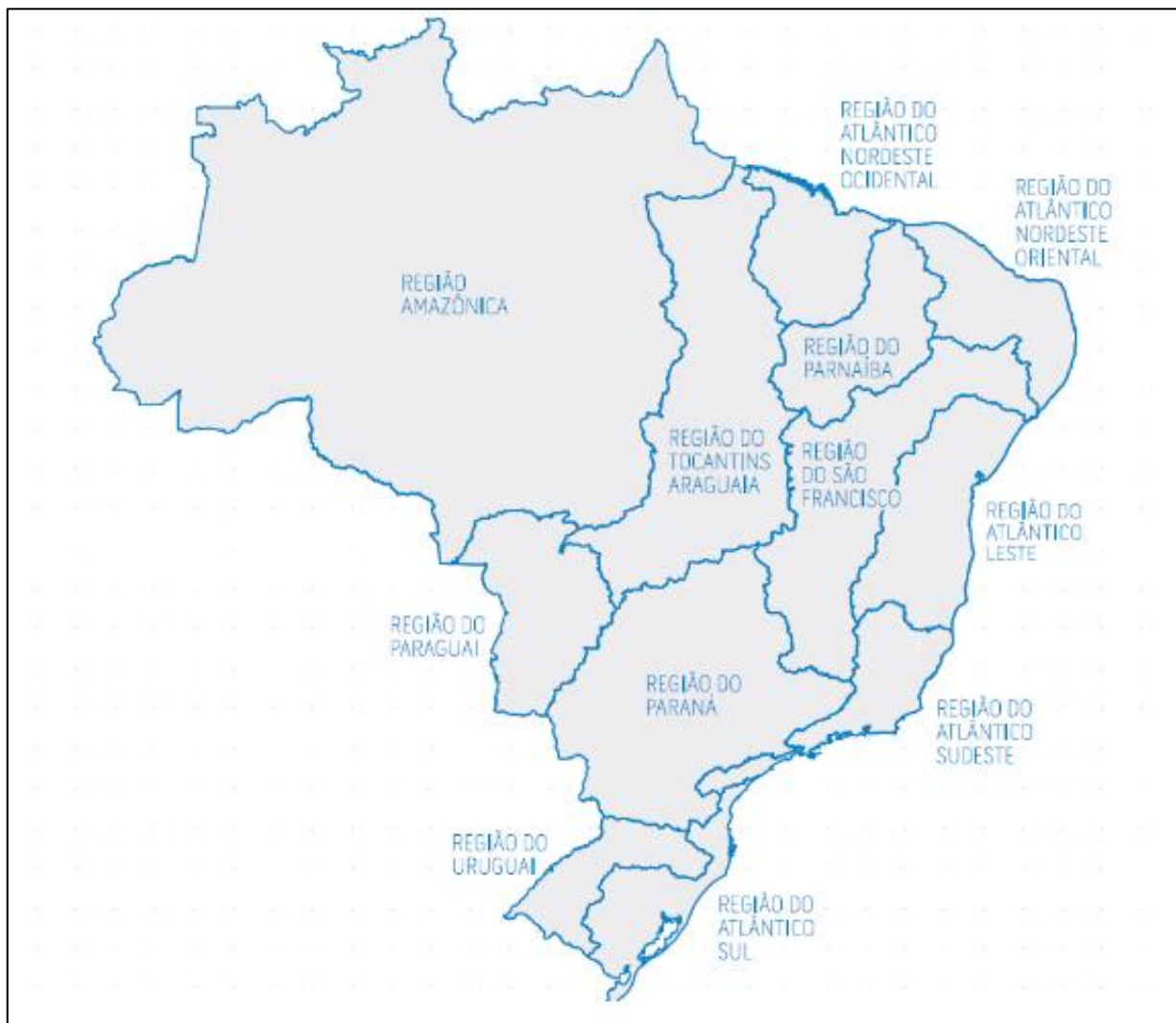


Figura 1: Regiões Hidrográficas Brasil. - Fonte: ANA, 2017

Os comitês de bacia são organismos de gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos. Neles estão presentes representantes de diversos setores da sociedade. Eles são os principais instrumentos de gestão de conflitos relacionados à água. Observa-se que a existência dos comitês de bacia é mais presente nos estados do Nordeste, Sudeste e Sul do país. Esse fato está ligado à maior ocorrência de conflito relacionado aos usos da água nessas regiões. Estes conflitos podem ser agravados pela redução da disponibilidade de água nas regiões. Os comitês são divididos por estados. Nas bacias de rios de domínio da União, que são interestaduais, como por exemplo, o Rio Paraíba do Sul, existem também os comitês de integração. Estes comitês têm o objetivo de harmonizar e integrar as ações entre os comitês dos diferentes estados (ANA, 2009; ANA, 2011).

3.3 Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul

3.3.1 Características Gerais da Bacia

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul faz parte da região Hidrográfica do Atlântico Sudeste. Ela é uma bacia interestadual, está localizada na Região Sudeste do Brasil abrangendo os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. A bacia possui área de drenagem com cerca de 61.307 km², distribuída em 184 município, inseridos total ou parcialmente dentro da bacia. Dentro da divisão estadual 39 municípios são do estado de São Paulo, 57 do estado do Rio de Janeiro e 88 do estado de Minas Gerais. A bacia abrange 63 % da área total do estado do Rio de Janeiro, 5 % de São Paulo e 4 % de Minas Gerais. A bacia drena uma das regiões do país mais desenvolvidas (AGEVAP, 2006; AGEVAP, 2014; CBH-PS, 2016a).

A bacia é formada pelos Rios Paraíba e Paraitinga na serra da Bocaina. O rio possui extensão de mais de 1.100 km desde a nascente do Rio Paraitinga até a foz na região Norte Fluminense. Os principais afluentes da margem esquerda são: Jaguari, Buquira, Paraíba Mineiro, Pomba e Muriaé e na margem direita: Una, Bocaina, Bananal, Piraí, Piabanha, Paquequer e Dois Rios. A bacia é limitada ao Norte pelas bacias do Rio Grande e Doce, também pelas serras da Mantiqueira, Caparaó e Santo Eduardo; a Nordeste pela bacia do rio Itabapoana; ao Sul pela Serra dos Órgãos e do Mar; a Oeste pela bacia do rio Tietê da qual é separada da Serra da Mantiqueira. A região tem relevo (Figura 02) acidentado e atinge 2.787 metros no Pico das Agulhas Negras no Maciço do Itatiaia (AGEVAP, 2014).

O Vale do Paraíba encontra-se entre duas cadeias montanhosas, as Serras do Mar e da Mantiqueira, a região norte da bacia encontra-se em uma planície. Essa configuração oferece a bacia climas distintos, característicos da região sudeste. Os maiores índices pluviométricos se concentram na região do Maciço de Itatiaia até a Região Serrana do Rio de Janeiro. Os menores índices de precipitação ocorrem nas Regiões Norte e Noroeste do Rio de Janeiro (MARENGO e ALVES, 2005; AGEVAP, 2014).

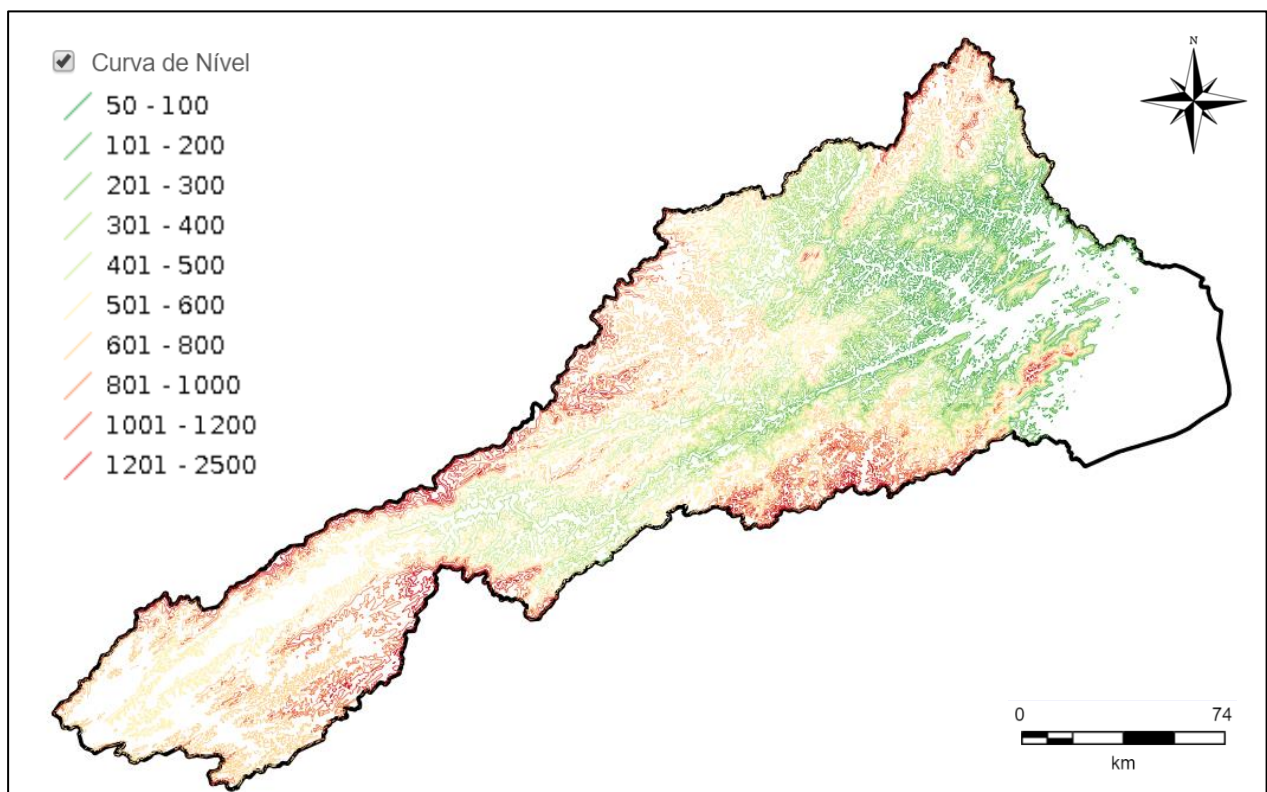


Figura 2: Relevo. – Fonte: CEIVAP, 2018

As principais barragens do sistema hidráulico foram construídas entre 1930 e 1960. O sistema foi projetado para atender a demanda da região por energia elétrica. Os três principais reservatórios da região possuem destaque em capacidade em megawatts (MW) tendo Paraibuna 86 MW instalados, Santa Branca 58 MW e Jaguari 27,6 MW. E contam com sistemas de bombeamento e reservatório, que ligam a Bacia do Rio Paraíba do Sul com a Bacia do Rio Guandu no estado do Rio de Janeiro. Essa transposição hoje é responsável por grande parte do abastecimento de região metropolitana do Rio de Janeiro. Na bacia também se encontra usinas

geradoras de energia termoelétrica. As unidades de geração de energia podem ser observadas na Figura 03 (MARENCO e ALVES, 2005, AGEVAP, 2006; AGEVAP, 2014).

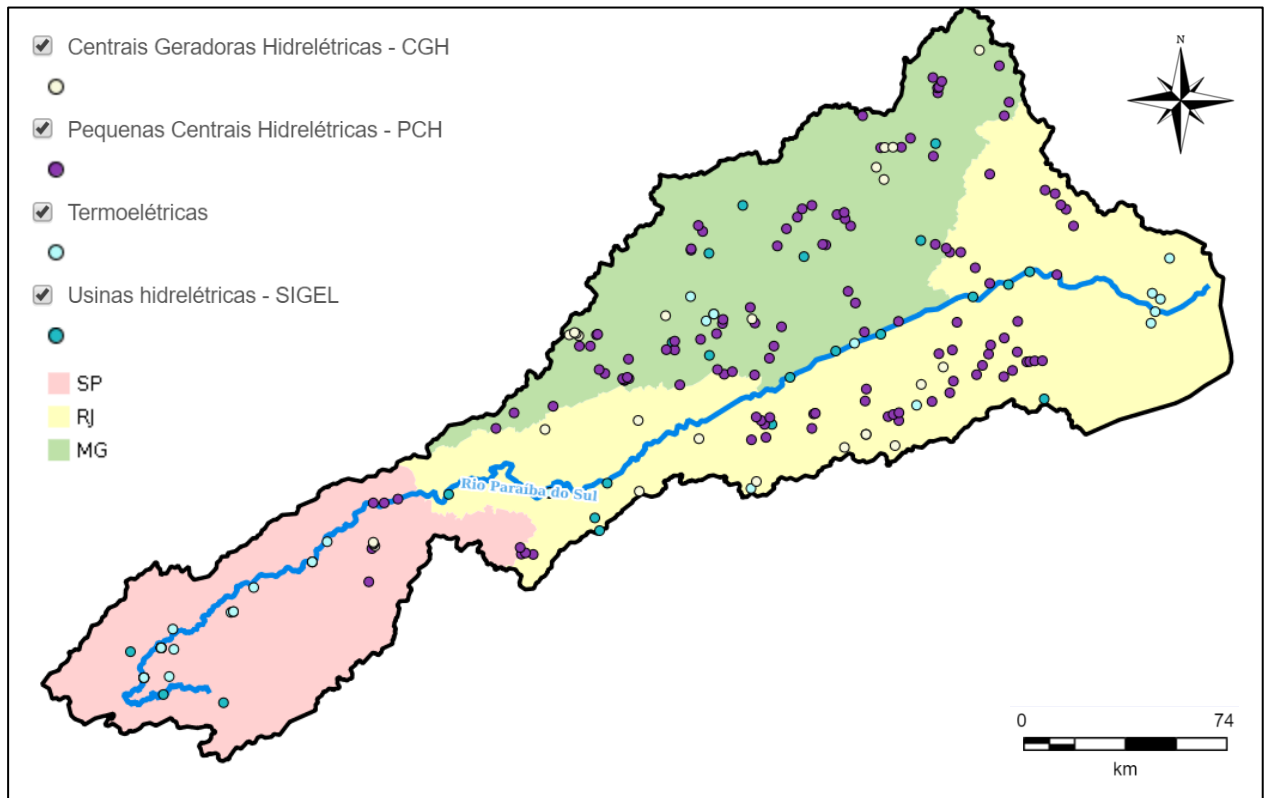


Figura 3: Divisão da Bacia por Estado e Geração de Energia – Fonte: CEIVAP, 2018

A Bacia do Paraíba do Sul está inserida no bioma Mata Atlântica. Esse bioma é característico da região costeira e é altamente impactado pela ação antrópica. Na bacia existem alguns remanescentes florestais nas áreas de relevo mais acidentado. Existem também algumas unidades de conservação no interior da bacia, que tem o objetivo de conservar áreas estratégicas para a conservação e manutenção dos recursos naturais. A conservação destes fragmentos florestais está relacionada a geomorfologia e unidades de conservação existentes na bacia. A presença destes fragmentos florestais é de suma importância para conservação dos recursos hídricos. Eles contribuem para redução dos impactos relacionados ao efeito antrópico e contribuem na manutenção da garantia da quantidade e qualidade dos recursos hídricos. O processo de ocupação e uso da terra (Figura 04) resultou na completa transformação de paisagem da bacia, que passou composta por pastagem. Este tipo de cobertura é remanescente de um período de agricultura intenso iniciado na época colonial. Os terrenos mais íngremes foram ocupados por lavouras de

café, que foram se perdendo devido o processo de degradação acelerado decorrente desta mudança. A vegetação de pastagem ocupou estas áreas com solo degradado. O início da industrialização da região é responsável pela crescente expansão da área urbana que pode ser observada na região (AGEVAP, 2006; ENGENCORPS, 2010; AGEVAP, 2014).

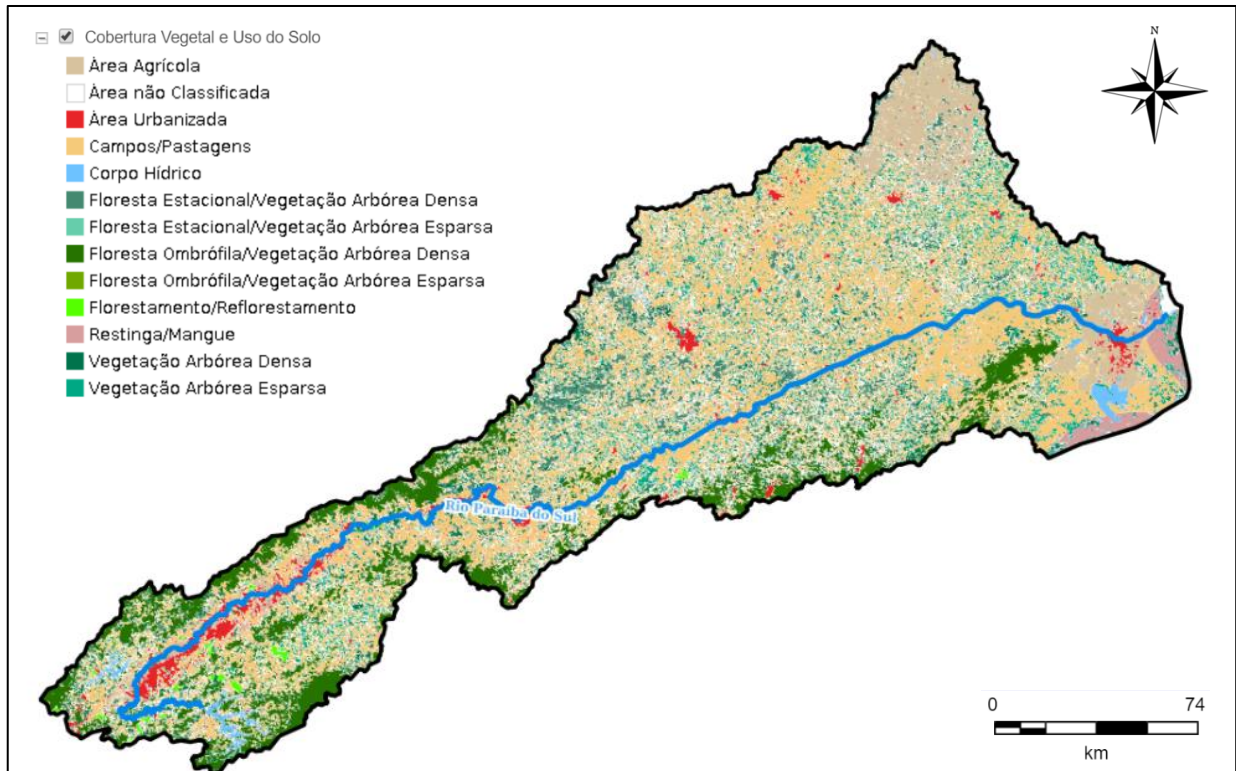


Figura 4: Cobertura Vegetal e Uso do Solo – Fonte: CEIVAP, 2018

A população dos municípios abrangidos pela bacia ultrapassa oito milhões de habitantes. A densidade demográfica (Figura 05) está mais elevada é encontrada nos eixos onde a estrutura viária é mais estruturada. Os municípios que são cruzados pelas grandes rodovias da região apresentam números mais expressivos. Os municípios da bacia pertencentes ao estado de São Paulo tem maior densidade demográfica seguidos de Rio de Janeiro e Mina Gerais por último (MARENGO e ALVES, 2005; AGEVAP, 2006; AGEVAP, 2014).

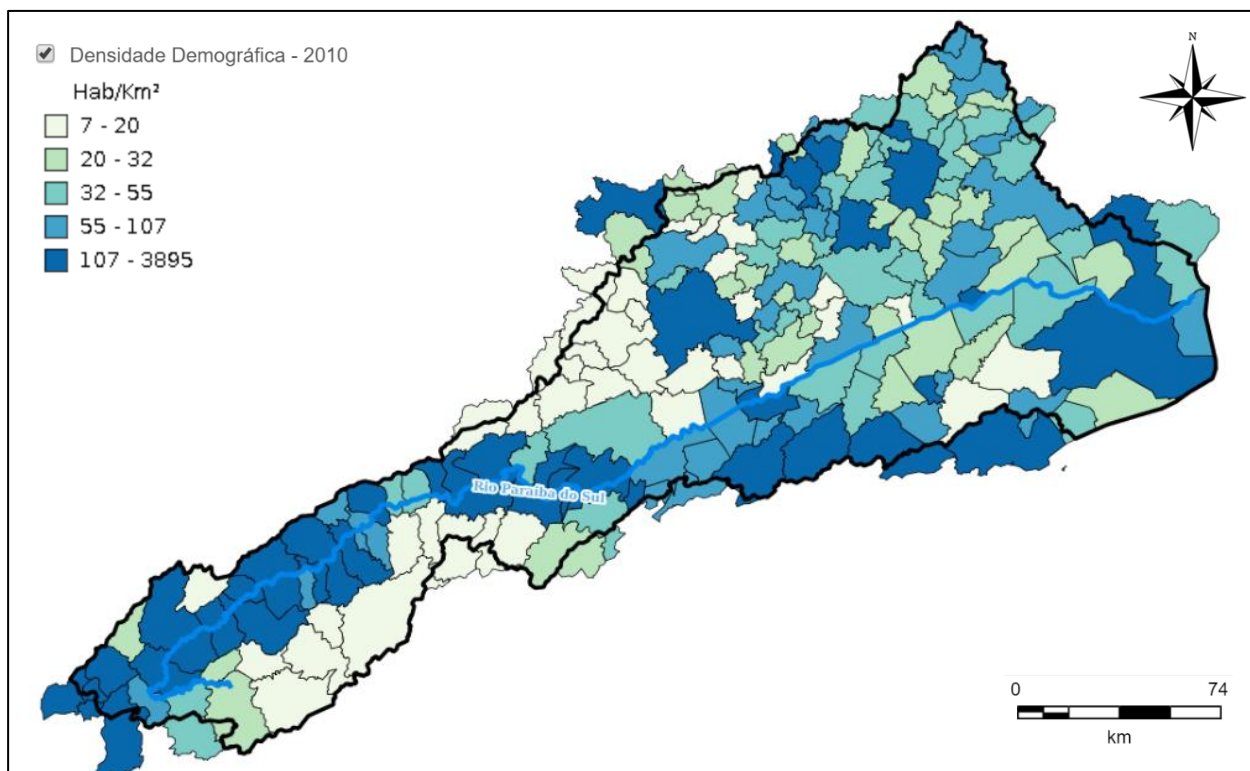


Figura 5: Densidade Demográfica na Bacia – Fonte: CEIVAP, 2018

A Bacia do Rio Paraíba do Sul está localizada em importante área econômica do país e, contribui expressivamente para economia nacional. A região apresenta acelerado processo de industrialização e urbanização. Com isso a demanda pelo uso dos recursos hídricos urbano, industrial e energético é bastante expressiva. Esta configuração confere a bacia a ocorrência de conflitos referente a concorrência dos usos dos recursos hídricos. A economia da região tem base nas indústrias, agropecuária e no setor de serviços. O Produto Interno Bruto (PIB) para os municípios da região está descrito na Figura 06 (MARENGO e ALVES, 2005; AGEVAP, 2006; AGEVAP, 2014).

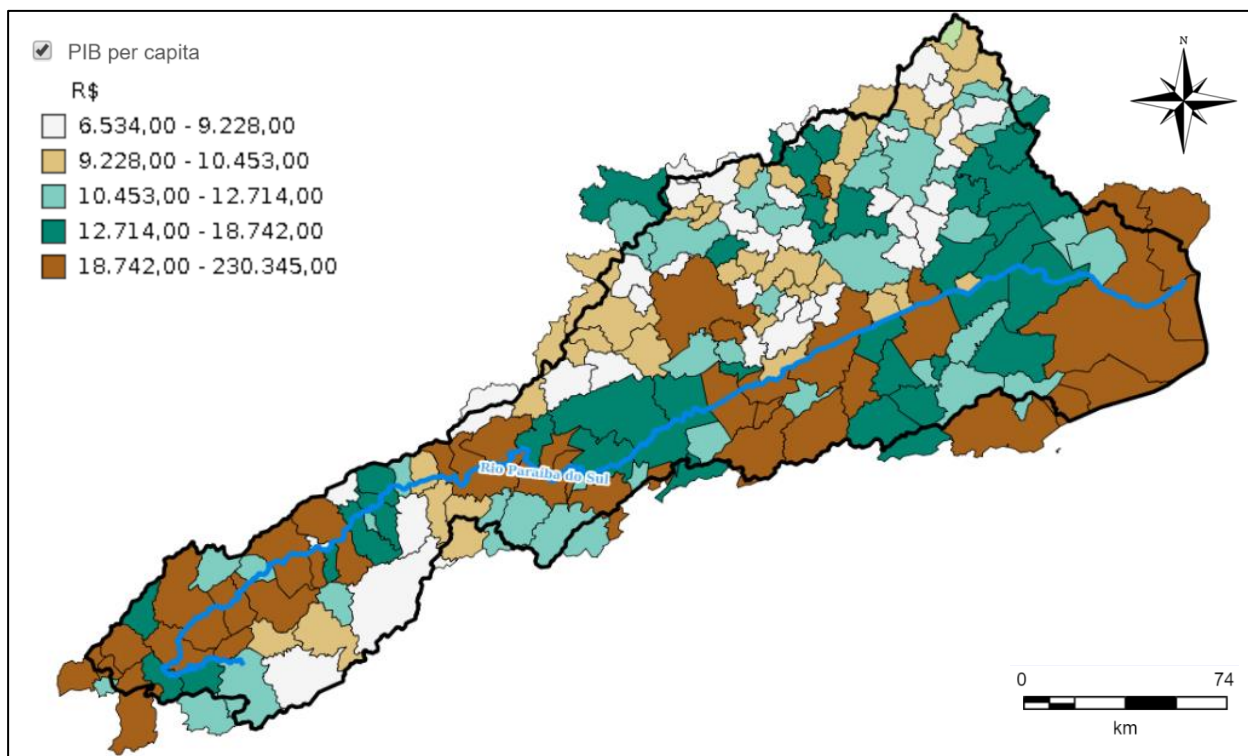


Figura 6: PIB per capita na Bacia– Fonte: CEIVAP, 2018

3.3.2 Clima na Bacia

Região Sudeste apresenta diversidade climática, com predominância do clima tropical quente e úmido (AGEVAP, 2006). Essa diversificação ocorre devido à diversos elementos e fatores climatológicos característicos da região. A região encontra-se em sua maior porção dentro da faixa tropical do globo e possui esta faixa costeira. A região possui relevo acidentado com alta influência no clima. Esse relevo influencia na disposição de áreas homogêneas, que induz a diversidade de tipos climáticos. Outra característica são os extremos de precipitação e temperatura do ar, que possuem faixa de variação grande. Além disso, a região apresenta grande variabilidade entre os anos. O último fator é de ordem antropogênica relacionado à ocupação a região. A região Sudeste concentra expressivo percentual da população Brasileira. Diante disso a região sofreu grande modificação do seu uso e cobertura da Terra (SANT’ANNA-NETO, 2005).

O clima na bacia do Rio Paraíba do Sul é caracterizado como subtropical quente com temperatura do ar média anual entre 18 e 24°C. Os totais anuais de precipitação mais altos ocorrem nas Serras do Mar, da Mantiqueira e dos Órgãos, ultrapassando 2000 mm/ano, região onde também ocorrem as menores médias de temperatura do ar. O regime de chuva é caracterizado por um

período seco de maio a setembro e um período chuvoso de novembro a janeiro. No verão, os meses de dezembro e janeiro acumulam precipitações de 200 a 250 mm e no inverno os meses de maio a julho, com precipitação inferior a 50 mm. As divisões climáticas estão descritas na Figura 07 (MARENGO e ALVES, 2005; AGEVAP, 2006).

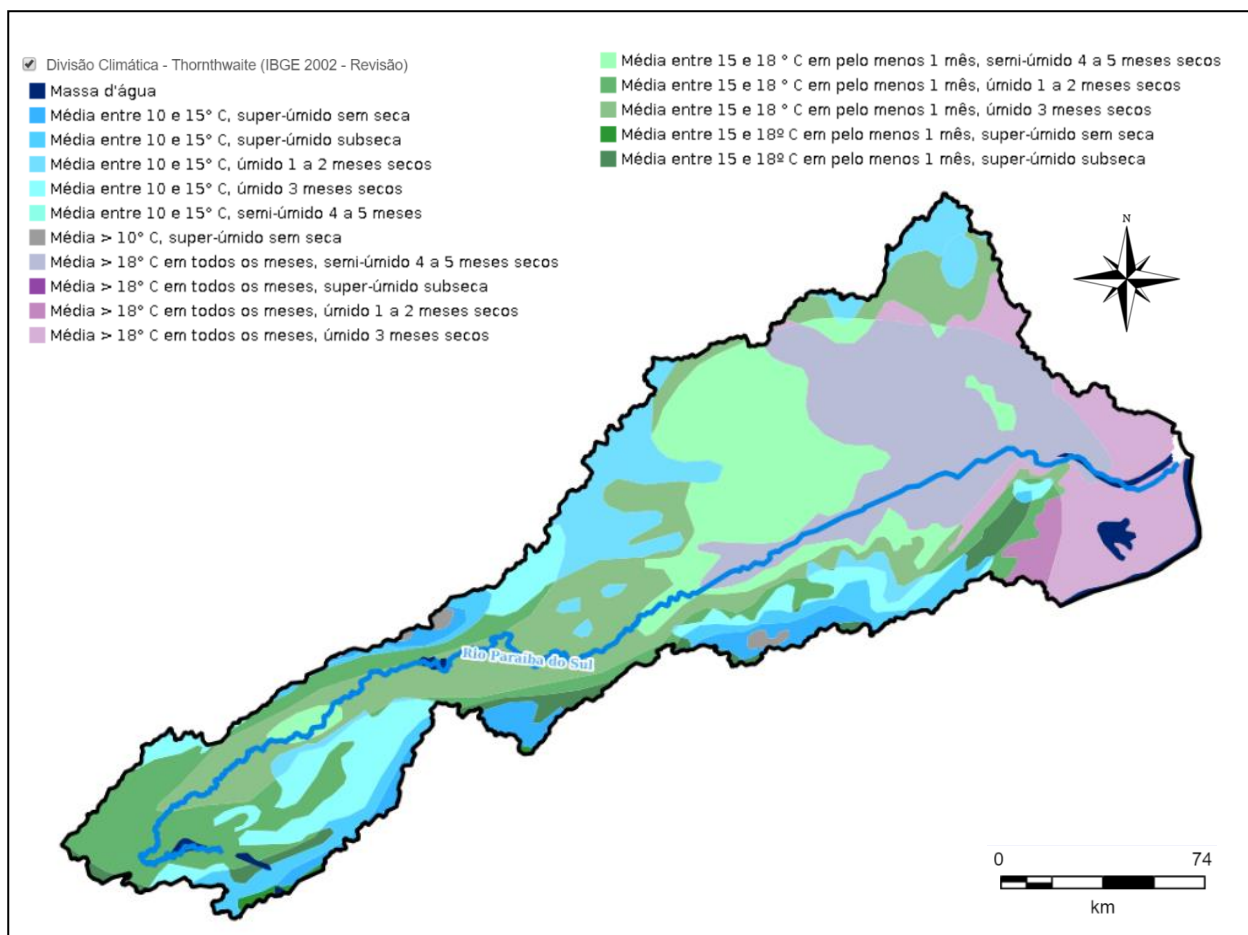


Figura 7: Divisão Climática - Fonte: CEIVAP, 2018

Existem na bacia diversos pontos de vulnerabilidade a desastres naturais. Estes desastres estão relacionados a três fatores, que combinados resultam nestas ocorrências. São eles as condições climáticas, que podem ser relacionadas a chuvas intensas ou estiagens. A susceptibilidade natural da região, que está fortemente relacionada à configuração do relevo. E por último as condições de ocupação e uso da Terra inadequadas. Estes fatores podem desencadear em inundações, deslizamentos, enxurradas e secas, gerando diversos níveis de impacto a população da bacia. Um exemplo marcante foi o desastre que ocorreu na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, deixando centenas de mortos principalmente no município de Teresópolis (AGEVAP, 2006).

3.3.3 Gestão de Recursos Hídricos na Bacia

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul é uma bacia nacional. Isso quer dizer que o rio principal da bacia, que é o Rio Paraíba do Sul, percorre mais de um estado da federação. Com isso a bacia é denominada Bacia Nacional. A gestão de recursos hídricos nas bacias nacionais é complexa, devido a necessidade de gestão compartilhada entre os estados que seus territórios são abrangidos pela bacia. As dinâmicas institucionais e jurídicas nacionais e dos estados são diferentes, entretanto o conteúdo e a aplicação do modelo de gestão estão interligados. Com isso os órgãos gestores devem trabalhar de modo integrado. No Brasil, a chamada Lei das Águas (BRASIL, 1997) determina a gestão por meio dos Comitês de Bacia. Estão presentes na bacia oito comitês (Figura 08) dentre os três estados sendo eles: Paraíba do Sul em São Paulo; Médio Paraíba do Sul, Guandu, Piabanha, Rio Dois Rios e Baixo Paraíba do Sul no Rio de Janeiro; Preto Paraibuna e Comitê dos Rios Pomba e Muriaé em Minas Gerais. Neste mesmo âmbito existe o Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP). Nestes comitês é que os acordos são negociados entre as partes integrantes e os instrumentos de gestão são aplicados. No processo de gestão as definições deliberadas pelos comitês são tomadas num processo de compromissos e negociações, que tem o objetivo de atender as partes interessadas (AGEVAP, 2006; AGEVAP, 2014; CBH-PS, 2016a).

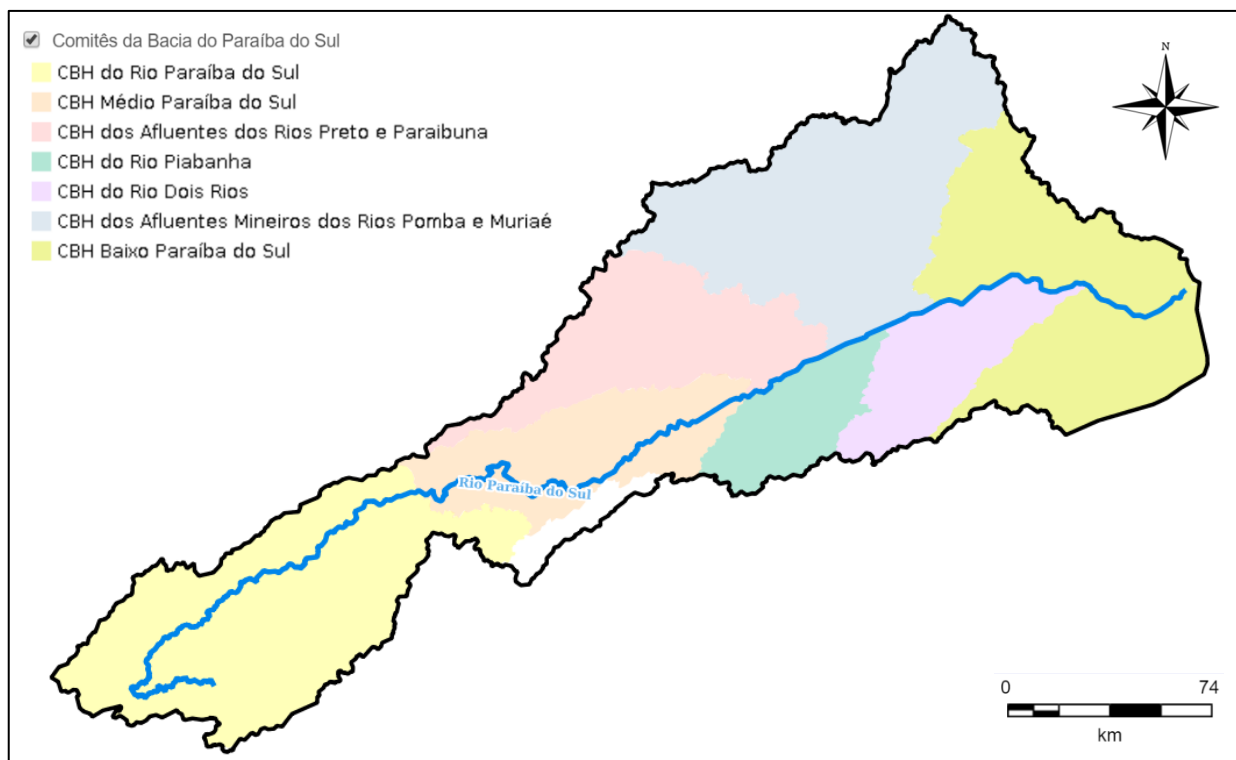


Figura 8: Divisão da Bacia por Comitê – Fonte: CEIVAP, 2018

O Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul é composto por diversas estruturas hidráulicas instaladas na bacia do Rio Paraíba do Sul e do Rio Guandu (Figura 09). Os principais reservatórios da bacia são: Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil. A capacidade total destes reservatórios chama-se reservatório equivalente. Com exceção de Funil, todos os outros reservatórios estão localizados no estado de São Paulo. A estação elevatória de Santa Cecília, fica no município de Barra do Piraí no estado do Rio de Janeiro, sendo responsável pela transposição regularizada de água para a bacia do Rio Guandu. O volume transposto nesta usina é responsável por grande parte da água que abastece a Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Os reservatórios Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil são os responsáveis pela garantia da disponibilidade hídrica da bacia (ANA, 2015a; ANA, 2015b).

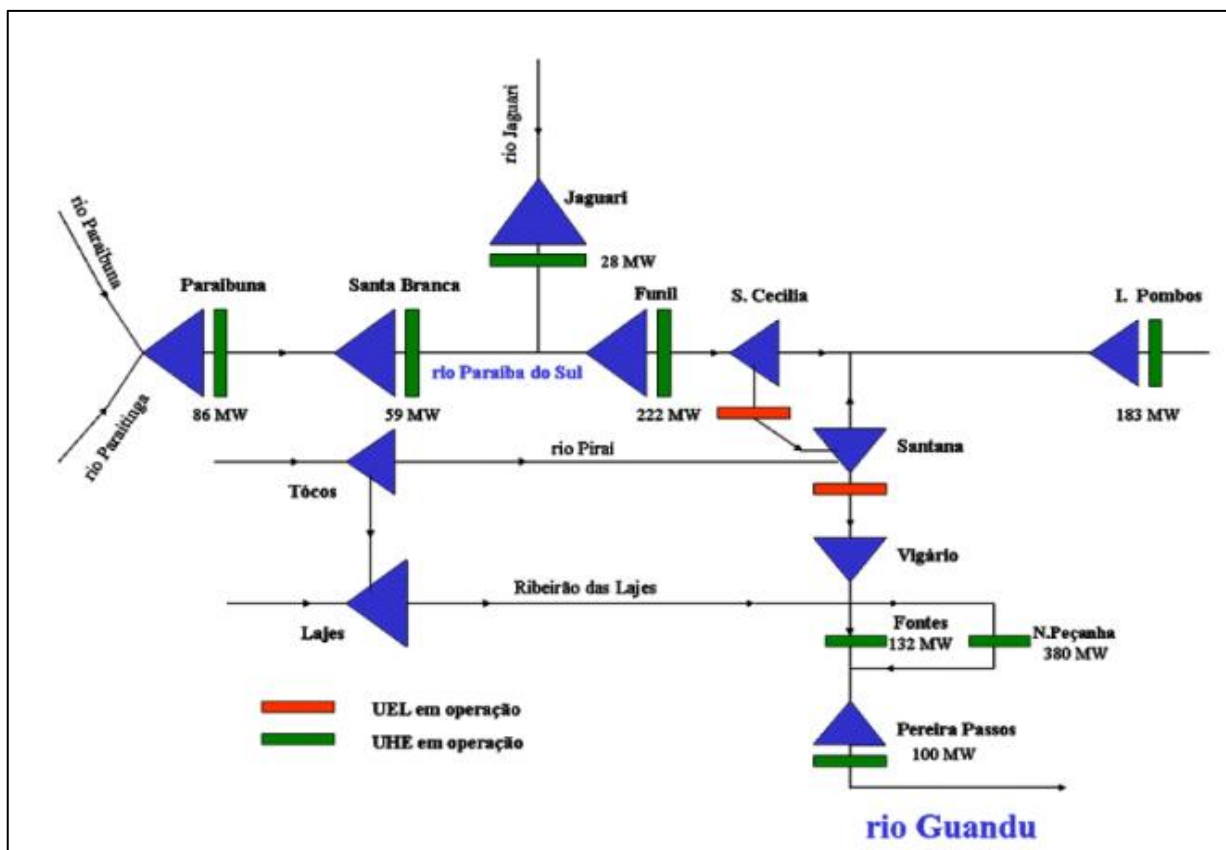


Figura 9: Esquema Sistema Hidráulico da Bacia do Rio Paraíba do Sul - Fonte: ANA, 2015a

O aproveitamento hidroelétrico é a principal forma de geração de energia elétrica no Brasil. A interligação da gestão de recursos hídricos para geração de energia elétrica e abastecimento hídrico de forma geral é realizada com base na Política Nacional de Recursos Hídricos. O aproveitamento hidroelétrico está inserido na Lei das Águas e deve ser autorizado por meio do sistema de outorga sob responsabilidade da ANA. Entretanto, outro tipo de outorga também é exigido para geração de energia elétrica, sob responsabilidade da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Compete a ANEEL a articulação entre os estados para geração de energia elétrica e a compatibilização com a Política Nacional de Recursos Hídricos. O órgão responsável pela coordenação e controle da geração de energia elétrica é o Operador Nacional do Sistema (ONS). O setor elétrico tem relevantes trabalhos nos estudos de reserva de disponibilidade hídrica de longo prazo e no controle de cheias nas bacias onde tem reservatórios sob sua responsabilidade. Por meio destes estudos é possível ampliar o horizonte em relação a disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas o, que facilita a tomada de decisão e concessão de outorgas (AGEVAP, 2006).

A operação dos sistemas de reservatórios é coordenada pelo ONS e executada pelos agentes de geração em cada usina. O controle de cheia é efetuado através da previsão de volume de água que vai chegar a cada reservatório e as restrições de vazão a jusante aos reservatórios. Esse controle tem o objetivo de regularizar o fluxo para reduzir o risco para vidas humanas e instalações na bacia. Além de garantir as operações hidráulicas e elétricas. Essa operação é realizada com base nos dados hidrometeorológicos, ocorrências e informações de todos os atores presentes na bacia. Para realização destas operações é necessário a caracterização das cheias e secas da bacia. Que consiste na avaliação dos estados presentes e futuros de armazenamento e o tempo de recorrência, que é o tempo estimado para a ocorrência de determinado evento, recomendado para cada reservatório. Além da capacidade de armazenamento. A previsibilidade das vazões afluentes, que é o maior horizonte de previsão onde se obtém o menor erro. E a capacidade de armazenamento que os reservatórios possuem (LOPES e SANTOS, 2012; ONS, 2018a; ONS, 2018b; ONS, 2018c).

Os fatores hidrometeorológicos são fundamentais para uma gestão eficiente dos recursos hídricos. Os estudos hidroclimáticos tendem a dar mais robustez e contribuir na tomada de decisão dos atores chave para a bacia. Na bacia do Rio Paraná um dos fatores observados na construção do Plano Anual de Prevenção de Cheias é a tendência de ENOS. Os índices de ENOS são utilizados nos cálculos das previsões para controle de cheias. Foi calculado o histórico de influência de ENOS na estação chuvosa. Os anos tiveram sua classificação em normais, secos e úmidos. O trabalho de Costa et al. (2018) demonstra a importância desta utilização na otimização do uso dos reservatórios no Rio Paraná. Também deixa a indicação da necessidade de aprofundar os estudos para ENOS e testar outros modos é indicado (COSTA et al., 2018; ONS, 2018c).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da Área de Estudo

Os reservatórios do Paraibuna, Santa Branca e Jaguari pertencem a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. As cabeceiras dos reservatórios estão localizadas nos compartimentos 01 e 02 e subcompartimentos CP1-CAB-A (Paraibuna), CP1-CAB-B (Santa Branca), e CP2-JAG-A (Jaguari) da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 02. A UGRHI 02 localiza-se no leste do estado de São Paulo e faz fronteira com os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, região Sudeste do Brasil (Figura 10). Os subcompartimentos apresentam áreas de drenagem de 4.272,15, 797,99 e 1.319 km² respectivamente. No compartimento, onde está localizado o

apresenta o volume dos três reservatórios que junto com o reservatório de Funil, que não está presente na cabeceira, são os principais do sistema hidráulico da bacia.

Tabela 1: Reservatórios cabeceiras Bacia do Rio Paraíba do Sul. Fonte: ANA (2015a)

| ID | Reservatório | Volume Máximo (hm ³) | Volume Mínimo (hm ³) | Volume Útil (hm ³) | Distribuição do Vol. Útil |
|----|--------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| A | Paraibuna | 4.731,7 | 2.095,6 | 2.636,1 | 61% |
| B | Santa Branca | 439,0 | 131,0 | 308,0 | 7% |
| C | Jaguari | 1235,6 | 443,1 | 792,5 | 18% |

4.2 Séries Históricas de Precipitação

As series de precipitação mensais foram obtidas através do sistema “HydroWeb” que é uma ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos e oferece o acesso ao banco de dados coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional e é gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA). Também foram utilizados dados do Banco de Dados Hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) que é o órgão responsável pela regulação e gestão dos setores de água e energia elétrica do estado de São Paulo. Este órgão disponibiliza todas as séries de precipitação das estações onde é operador (ANA, 2018; DAEE, 2018). Foi realizada uma pré-seleção de 20 estações (Tabela 02) no entorno dos três reservatórios, buscando as estações com séries de no mínimo 30 anos de dados de precipitação.

As séries de precipitação mensal dispunham de dados de novembro de 1927 até os dias atuais. Das vinte estações dezoito são operadas pelo DAEE, uma pela Light e uma pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Todas as estações utilizadas são convencionais e operam utilizando o pluviômetro. Para realização da pesquisa foi escolhida uma série de 45 anos (540 meses) de janeiro de 1972 a dezembro de 2016. Período escolhido por dispor de séries onde considerável número de estações possuía dados concomitantes permitindo assim uma análise estatística mais robusta.

Tabela 2: Estações pré-selecionadas. - Fonte: ANA, 2018

| Nº | Nome Estação | Código | Latitude | Longitude | Altitude | Operadora | Série - Início | Série - Fim |
|----|-----------------------|---------|----------|-----------|----------|-----------|----------------|-------------|
| 1 | ALFERES | 2345034 | -23.36 | -45.68 | 670 | DAEE-SP | jan/43 | mai/18 |
| 2 | IGARATA | 2346344 | -23.20 | -46.15 | 780 | DAEE-SP | set/72 | jun/18 |
| 3 | NATIVIDADE DA SERRA | 2345032 | -23.38 | -45.45 | 720 | DAEE-SP | jan/40 | jun/18 |
| 4 | REDENÇÃO DA SERRA | 2345023 | -23.28 | -45.53 | 740 | DAEE-SP | set/53 | mai/18 |
| 5 | SANTA BRANCA 01 | 2345037 | -23.40 | -45.88 | 670 | DAEE-SP | jun/42 | abr/18 |
| 6 | SANTA BRANCA 02 | 2345071 | -23.36 | -45.90 | 573 | CPRM | jun/52 | out/18 |
| 7 | SANTA ISABEL | 2346019 | -23.33 | -46.23 | 690 | DAEE-SP | mai/37 | mai/18 |
| 8 | ALTO DA SERRA | 2345176 | -23.56 | -45.45 | 760 | DAEE-SP | set/72 | out/14 |
| 9 | BAIRRO ALTO | 2345041 | -23.46 | -45.35 | 710 | DAEE-SP | jan/40 | dez/99 |
| 10 | CAPUAVA | 2345156 | -23.28 | -45.83 | 660 | DAEE-SP | jan/60 | dez/00 |
| 11 | CEDRO | 2345046 | -23.55 | -45.60 | 750 | DAEE-SP | set/69 | nov/95 |
| 12 | COMÉRCIO | 2345154 | -23.45 | -45.58 | 720 | DAEE-SP | mar/43 | set/03 |
| 13 | JARDIM | 2345029 | -23.31 | -45.88 | 660 | DAEE-SP | mai/62 | jul/97 |
| 14 | LARANJAL | 2345031 | -23.36 | -45.36 | 800 | DAEE-SP | jan/70 | mar/01 |
| 15 | PARAIBUNA | 2345102 | -23.39 | -45.66 | 650 | LIGHT | nov/27 | out/03 |
| 16 | PARATEI | 2346018 | -23.31 | -46.11 | 600 | DAEE-SP | nov/57 | jun/03 |
| 17 | PITAS | 2345042 | -23.50 | -45.55 | 780 | DAEE-SP | mar/43 | dez/93 |
| 18 | REPRESA - MONTE CLARO | 2346006 | -23.10 | -46.03 | 630 | DAEE-SP | set/69 | mar/04 |
| 19 | SÃO JOSÉ DOS CAMPOS | 2345019 | -23.18 | -45.88 | 560 | DAEE-SP | nov/42 | nov/03 |
| 20 | VARADOURO | 2345025 | -23.28 | -45.78 | 680 | DAEE-SP | mar/43 | dez/94 |

4.3 Preenchimento de Falha e Análise de Qualidade

Para realização das análises climáticas através da metodologia de índices padronizados é necessário a utilização de séries homogêneas e contínuas (sem falhas). Para isso foram aplicadas técnicas de análise de qualidade e preenchimento de falhas propostas por ALLEN et al. (1998) e KITE (1988). Estas técnicas também foram utilizadas para séries mensais de precipitação por BRITO et al. (2017), LYRA et al. (2014a; 2014b; 2017a; 2017b), OLIVEIRA JÚNIOR et al. (2012) e UELE (2013; 2017).

A escolha das estações para análise de qualidade e preenchimento de falhas foi realizada selecionando as séries climáticas das cinco estações mais próximas (menos de 36 km) à estação a ser preenchida. Após essa seleção foi realizada análise de correlação, baseada no coeficiente de correlação de Person, utilizando somente os meses que não continham falhas entre a estação a ser preenchida e as cinco estações mais próximas. Foram removidas as estações que não apresentaram correlação superior a $r > 0,50$ com a estação de referência ou com as demais estações mais

próximas da estação de referência. Todas as estações utilizadas apresentaram $r > 0,70$ (LYRA et al., 2014b). Neste método são utilizados os dados de precipitação de três e cinco estações para construção da série de referência. Buscou-se sempre utilizar cinco estações para construção da série de referência. Para cada estação a ser preenchida as falhas, a série de referência foi construída utilizando as médias aritmética das cinco estações mais próximas. Entretanto, no caso de Alferes, Santa Branca 01 e Santa Branca 02, devido a restrições de uma estação no entorno das mesmas apresentaram correlação com $r < 0,50$, consideraram-se então as quatro estações mais próximas para construção da série de referência.

A análise de qualidade foi realizada comparando-se a série de referência X_i com a série observada Y_i utilizada no preenchimento de falhas. Foi realizada uma análise exploratória das séries para identificar *outliers* com base nos intervalos climáticos esperados para os dados baseados nas séries de precipitação mensal das cinco estações mais próximas e com maior correlação entre elas. Os *outliers* foram comparados com a média de precipitação da série de referência das estações correlatas e a estação analisada. Nesta comparação os valores de chuva mensal que se afastaram mais ou menos 75 % da tendência determinada pelas series foram considerados não representativos e foram retirados da série (LYRA et al., 2014b; OLIVEIRA JÚNIOR et al.,2012).

O preenchimento de falhas foi realizado utilizando o método da regressão linear entre a série de precipitação, na qual ocorrerá o preenchimento de falhas (Y_i = variável dependente), e a precipitação de uma série climática, que foi adotada como série de referência (X_i =variável independente). A equação é descrita num modelo de regressão linear simples pela equação 01:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i \quad (01)$$

em que:

b_0 e b_1 = coeficientes do modelo ajustados.

i = i-ésima observação da série.

X_i = média aritmética da série climática.

Para ajustar o coeficiente do modelo linear (b_0 e b_1) os dados das series de precipitação foram pareados cronologicamente. A adequação do método foi avaliada pelos valores do coeficiente angular (b_1) e o coeficiente de determinação (r^2) da regressão. O método é considerado

satisfatório quando coeficiente angular (b_1) está entre 0,7 e 1,3 e o coeficiente de determinação (r^2) é maior ou igual a 0,7 (ALLEN et al., 1998).

4.4 Séries Históricas Vazão Natural

Para o cálculo de vazão foi escolhida as séries de vazões naturais médias mensais, pois estas consideram as vazões observadas somadas as retiradas do sistema. Deste modo, aproxima-se mais do que seria a vazão do rio sem a interferência do sistema hidráulico. Essa metodologia é utilizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS para todas as medições que têm a necessidade de comparação com índices de processos naturais (ONS, 2009; 2016; 2018a; 2018b; 2018c), no presente caso, o índice de precipitação Índice de Precipitação Normalizado (*Standardized Precipitation Index – SPI*) Índice Padronizado de Seca Hidrológica (*Streamflow Drought Index – SDI*).

A metodologia consiste primeiro no cálculo da vazão incremental, que possibilita o cálculo da vazão natural. Para isso foram utilizados os cálculos das equações 02 e 03 (ONS, 2009).

$$Q_{inc} = Q_{afl} - Q_{defmp} + Q_{uso} + Q_{evp} \quad (02)$$

em que:

Q_{inc} = vazão natural incremental, entre o aproveitamento e os aproveitamentos de montante (m^3/s).

Q_{afl} = vazão afluente ao reservatório (m^3/s).

Q_{defmp} = vazão defluente dos reservatórios de montante, devidamente propagada em condição de reservatório (m^3/s).

Q_{uso} = vazão relativa aos usos consuntivos da bacia incremental (m^3/s).

Q_{evp} = vazão relativa à evaporação do reservatório, obtida a partir do polinômio cota x área e do vetor mensal de evaporação líquida do reservatório (m^3/s).

$$Q_{nat} = Q_{natp} + Q_{inc\ con} \quad (03)$$

em que:

Q_{nat} = vazão natural no local do aproveitamento (m^3/s).

Q_{natp} = vazão natural dos reservatórios de montante, devidamente propagada em

condição natural (m^3/s).

$Q_{inc\ con}$ = vazão natural incremental consistida, entre o aproveitamento e o(s) aproveitamentos de montante.

Três pontos de medição de vazão natural foram utilizados, sendo estes localizados um em cada reservatório. As séries de dados foram disponibilizadas pela ONS e consistem em dados de 1931 até os dias atuais. Porém foram utilizados a séries de 45 anos (540 meses) de janeiro de 1972 a dezembro de 2016, que coincidem com o período das séries de precipitação (ONS, 2019).

4.5 Cálculo do Índice Padronizado de Precipitação (*Standardised Precipitation Index* - SPI) e Índice Padronizado de Seca Hidrológica (*Streamflow Drought Index* - SDI)

Para identificação dos extremos de precipitação secos e úmidos foi utilizado o Índice Padronizado de Precipitação, ou *Standardised Precipitation Index* – SPI proposto inicialmente por Mc Kee et al. (1993). O índice é calculado selecionando um conjunto de dados mensais, de precipitação preferencialmente considerando uma série de no mínimo 30 anos. Um conjunto de meses é determinado para indicar a escala analisada que pode ser de 3, 6, 9, 12, 24 ou 48 meses. Esses conjuntos conseguem representar diversas escalas de interesse em pesquisas para determinação de extremos. Para determinação dos índices, cada série de dados é ajustado à função de probabilidade gama e em seguida aplicada à transformação Z para normalização das séries, de forma a se obter uma série com média zero e desvio padrão um [0, 1]. O resultado é um índice normalizado, que permite a classificação das anomalias e, que pode ser utilizado para períodos secos e úmidos. (MC KEE et al., 1993).

Já para determinar os extremos secos e úmidos de vazão foi utilizado o Índice Padronizado de Seca Hidrológica, ou *Streamflow Drought Index* – SDI, que é análogo ao SPI. Este índice é calculado utilizando a mesma metodologia utilizada por Mc Kee et al. (1993), entretanto os dados de entrada são dados de vazão. A utilização deste índice análogo foi proposta por Modarres (2007) Shukla e Wood (2008) Nalbantis e Tsakiris (2009). O índice pode ser calculado para as mesmas escalas de tempo que o SPI e os dados de saída são normalizados como no índice anterior. Isso permite uma melhor comparação entre os índices dos extremos de precipitação e vazão. A intensidade dos extremos é classificada entre extremamente úmido e extremamente seco conforme Tabela 03 para ambos os índices. (MC KEE et al., 1993; MODARRES, 2007; SHUKLA e WOOD, 2008; NALBANTIS e TSAKIRIS, 2009).

Tabela 3: Classificação de intensidade dos índices de SPI ou SDI. – Fonte: MC KEE et al., 1993

| | |
|---------------|---------------------|
| $\geq 2,00$ | Extremamente úmido |
| 1,50 a 1,99 | Severamente úmido |
| 1,00 a 1,49 | Moderadamente úmido |
| -0,99 a 0,99 | Próximo ao normal |
| -1,00 a -1,49 | Moderadamente seco |
| -1,50 a -1,99 | Severamente seco |
| $\leq -2,00$ | Extremamente seco |

A escolha destes índices se deu devido sua versatilidade e simplicidade, dito que ele pode ser utilizado para diversas escalas de tempo, regiões com climas diferentes e utilizando somente os dados de precipitação ou vazão para ser calculado. A similaridade entre o SPI e SDI permite análise mais apurada dos dados comparados de precipitação e vazão (MODARRES, 2007; SHUKLA e WOOD, 2008; NALBANTIS e TSAKIRIS, 2009; RAJSEKHAR et al., 2014). Todas as análises foram realizadas no ambiente de análises estatísticas R Project (R, 2018). Foram utilizados os pacotes “*SCI*”, “*trend*”, “*tseries*” e “*iki.dataclim*” para realização das análises (ORLOWSKY, 2015; GUDMUNDSSON e STAGGE, 2016; POHLERT, 2018; TRAPLETTI et al., 2018).

O SPI foi calculado utilizando a série mensal de precipitação após a análise de qualidade e preenchimento de falhas para cada uma das sete estações. O índice foi calculado para as escalas de tempo de 3, 6 e 12 meses. A escala de 12 meses (SPI 12) foi selecionada para analisar as anomalias no ano hidrológico. O ano hidrológico inicia no período chuvoso e vai até o fim do período seco, que na região de estudo se caracteriza entre outubro a setembro (MARCUIZZO e GOULARTE, 2013). A escala de tempo de 6 meses (SPI 6) foi selecionada para analisar as anomalias no semestre mais seco e no semestre mais úmido. O semestre seco vai de abril a setembro e o semestre úmido vai de outubro a março. A escala de tempo de 3 meses (SPI 3) foi selecionada para analisar as anomalias no trimestre mais seco, referente a estação seca, de junho a agosto, e o trimestre mais úmido, relacionado a estação chuvosa, de dezembro a fevereiro. O trimestre seco coincide com o inverno e o trimestre úmido com o verão no Hemisfério Sul. O SDI foi calculado com a série mensal de vazão natural para cada um dos três pontos de medição, para as mesmas escalas que o SPI. Para 12 meses (SDI 12), seis meses (SDI 6) para o semestre úmido e semestre seco, e três meses (SDI 3) para estação seca e estação chuvosa.

Os índices foram calculados primeiramente ajustando os dados de precipitação de cada estação em uma função gama, em que os parâmetros α e β são determinados usando o Método da Máxima Verossimilhança (MMV) (THOM, 1966). Após determinação dos parâmetros da função gama foram calculadas as probabilidades cumulativas de precipitação e vazão natural para as escalas de 3, 6 e 12 meses conforme equação 04:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (04)$$

em que:

$f(x)$ = é a função de densidade de probabilidade

$\Gamma(\alpha)$ = é a função gama incompleta para o parâmetro α , ou seja, não são permitidos valores nulos (THOM, 1958)

α = é o parâmetro de forma

β = é o parâmetro de escala

e = é o número de Neper (2,718...)

A probabilidade acumulada para ambos os casos, nulos ou não, é calculada pela equação 05.

$$F(x) = F(0) + (1 - F(0)) G(x) \quad (05)$$

em que:

$F(0) = [m / (n + 1)]$ é a probabilidade de ocorrência de um valor nulo

$G(x)$ = é a distribuição cumulativa de $F(x)$ com parâmetros estimados apenas para os períodos chuvosos

m = é a classificação dos valores nulos em uma série climatológica

n = é o tamanho da amostra

Com isso, a distribuição cumulativa $F(x)$ é transformada em uma distribuição normal para o aleatório variável Z (Equação 06) que corresponde ao valor do SPI.

$$Z(= (X_i - F_{50})/\sigma \quad (06)$$

em que:

X_i = é a chuva anual para o ano i

F_{50} = é a chuva acumulada à 50%

σ = é o desvio padrão, com média 0 e desvio padrão 1 [$N(0,1)$]

4.6 Análise de Tendência das Séries de Precipitação e Vazão.

Após o cálculo do SPI e SDI foram realizados quatro testes preliminares para avaliar os dados quanto à aleatoriedade, independência, estacionariedade e homogeneidade. Todas as análises foram realizadas no ambiente de análises estatísticas R Project (R, 2018). Foram utilizados os pacotes “*trend*”, “*tseries*”, “*iki.dataclim*” e “*modifiedmk*” para realização das análises (ORLOWSKY, 2015; POHLERT, 2018; TRAPLETTI et al., 2018; PATAKAMURI e O'BRIEN, 2019).

O teste de aleatoriedade verifica se as variações em uma grandeza hidrológica são de decorrência natural. Para atestar essa hipótese, foi realizado o teste *Bartels's* (Equação 07) para aleatoriedade (POHLERT, 2018), são utilizadas para as análises estatísticas as posições r_1, \dots, r_n de X_1, \dots, X_n .

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - r_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2} \quad (07)$$

O valor-p é calculado para tamanhos amostrais na faixa de ($10 \leq n < 100$) com a distribuição beta não padrão para o intervalo $0 \leq x < 4$ com parâmetros segundo a equação 08.

$$a = b = \frac{5n(n+1)(n-1)^2}{2(n-2)(5n^2-2n-9)} - \frac{1}{2} \quad (08)$$

Para tamanhos de amostra $n \geq 100$, uma aproximação normal com $N(2, 20/(5n + 7))$ é usada para o cálculo do valor p.

O teste de independência de *Wald-Wolfowitz* (Equação 09) foi realizado para verificar a hipótese de que uma observação não influencia a ocorrência ou a não ocorrência da outra no tempo (POHLERT, 2018).

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_n \quad (09)$$

em que:

$$\text{O valor esperado de } R = E(R) = \frac{s_1^2 - s_2}{n-1}$$

$$\text{O valor esperado de variância} = V(R) = \frac{s_2^2 - s_4}{n-1} - E(R)^2 + \frac{s_1^4 - 4s_1^2 s_2 + 4s_1 s_3 + s_2^2 - 2s_4}{(n-1)(n-2)}$$

com:

$$s_t = \sum_{i=1}^n x_i^t$$

$$t = 1, 2, 3, 4$$

Para $n > 10$ é normal utilizar a distribuição estatística $z = \frac{R - E(R)}{\sqrt{V(R)}}$

A estacionariedade é a propriedade comportamental de uma série histórica de não apresentar tendência temporal. Foi realizado o teste de *Dickey-Fuller* (Equação 10) para estacionariedade. O teste incorpora três tipos de modelos de regressão linear, sendo, um sem *drift* e tendência linear em relação ao tempo, o com *drift*, mas sem tendência linear e um terceiro modelo linear com ambos, *drift* e tendências lineares (TRAPLETTI et al., 2018; R DOCUMENTATION, 2019).

$$ADF = p.hat / S.E(p.hat) \quad (10)$$

em que:

$p.hat$ = é o coeficiente de estimativa

$S.E(p.hat)$ = é a estimativa correspondente do erro padrão para cada tipo de modelo linear

Em hidrologia, o teste de homogeneidade verifica a hipótese de que uma série histórica de extremos, esteja associada a uma frequência de ocorrência normal. Foi realizado o teste de *standard normal homogeneity* (Equação 11) para homogeneidade (POHLERT, 2018).

$$T_k = k z_1^2 + (n - k) z_2^2 \quad (1 \leq k < n) \quad (11)$$

em que:

$$Z_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

$$Z_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

valor crítico = $T = \max T_k$

Para analisar tendência foi realizado o teste de Mann-Kendal modificado. O teste de correlação de classificação para dois conjuntos de observações $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ e $Y = y_1, y_2, \dots, y_n$. A estatística S é calculada como na Equação 12 (HAMED e RAO, 1998).

$$S = \sum_{i < j} a_{ij} b_{ij} \quad (12)$$

em que:

$$a_{ij} = \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j < x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ -1 & x_j > x_i \end{cases} \quad (13)$$

b_{ij} é similar definido para observações em Y .

Sob a hipótese nula de que X e Y são independentes e ordenados aleatoriamente, a estatística S tende normalidade para n grande, com média e variância dado por:

$$E(S) = 0 \quad (14)$$

$$\text{var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (15)$$

O teste modificado constrói uma série temporal, utilizando o estimador Sen's slope e o coeficiente de autocorrelação lag-1 na série de dados. Nesta abordagem somente atrasos significativos do coeficiente de autocorrelação são utilizados. A modificação proposta busca aumentar a robustez do teste especialmente em amostras pequenas (HAMED e RAO, 1998; PATAKAMURI e O'BRIEN, 2019).

Realizados os testes e análises de tendências para todas as estações e reservatórios as séries de SPI e SDI foram correlacionadas com o objetivo de entender como as anomalias de chuva influenciam nas anomalias de vazão em diferentes escalas. Com isso foi realizado a análise de correlação de Person (r). As escalas utilizadas na região de estudo foram SDI 12 e SPI 12 para o ano hidrológico nos três reservatórios para correlação anual. SDI 6 e SPI 6 para o semestre hidrológico seco que vai de abril a setembro e úmido que vai de outubro a março. SDI 3 e SPI 3 para o trimestre mais seco, compreendido entre junho e agosto e o trimestre mais úmido de dezembro a fevereiro.

4.7 Índices dos Modos de Variabilidade Climática

Os índices dos modos de variabilidade climática utilizados na pesquisa estão disponibilizados na página da *National Oceanic and Atmospheric Administration* – NOAA (NOAA, 2018e). São índices mensais de diversos modos de variabilidade climática que atuam nos oceanos ao redor do globo terrestre. Os índices utilizados na pesquisa são o Índice de Oscilação Decadal do Pacífico – *Pacific Decadal Oscillation Index* (PDO), o Índice Multivariado de ENOS - *Multivariate ENSO Index* (MEI), o Índice do Atlântico Tropical Sul - *Tropical Southern Atlantic Index* (TSA) e o Índice do Atlântico Tropical Norte - *Tropical Northern Atlantic Index* (TNA).

O índice de PDO é obtido segundo a metodologia de Mantua et al. (1997) e Zhang et al. (1997). O índice é calculado pela diferença de TSM entre o oceano Pacífico Tropical e Extratropical. Este modo de variabilidade possui uma fase positiva e uma fase negativa, que se alternam em período decadais (NOAA, 2018d).

O MEI foi escolhido por representar melhor ENOS para medições em escala global comparado a outros índices (NOAA, 2018a). O MEI foi proposto por Wolter (1987) e é baseado em seis variáveis meteorológicas (pressão ao nível do mar, componentes zonais e meridionais do vento superficial, temperatura da superfície do mar, temperaturas do ar superficial e nebulosidade total) obtidas na área do Pacífico Tropical. A caracterização dos anos de El Niño e La Niña, as fases positivas e negativas de ENOS, foi realizada através da observação de anomalias ± 0.5 do MEI (CAÑÓN et al., 2007; WOLTER e TIMLINB, 2011; LYRA, 2017). Os anos que apresentaram seis meses consecutivos de anomalias positivas foram caracterizados anos de El Niño e os anos que apresentaram seis meses consecutivos de anomalias negativas anos de La Niña. Os anos que não apresentaram estas características de anomalia foram considerados anos neutros.

O índice escolhido para o Oceano Atlântico foi o Gradiente Inter-hemisférico de TSM do Atlântico (GITA). O índice foi proposto por Moura e Shukla (1981) e Servain (1991). O GITA consiste na diferença entre a média de temperatura da média de TSM na área de TNA e TSA, disponibilizados pela NOAA. Estes índices foram utilizados por Rao et al. (1993), Enfield et al. (1999), Menezes et al. (2008), Chang et al. (2011), Lucena et al. (2011), Lyra et al. (2017a). Foram caracterizados como anos positivo os anos com GITA acima de 0,5 e negativo com GITA abaixo de -0,5 durante pelo menos dois meses consecutivos entre os meses de janeiro a junho. Os demais considerados anos neutros (LUCENA et al., 2011).

4.8 Análise Harmônica e Espectral

Para avaliar a influência da variabilidade climática sobre os extremos de precipitação e os extremos de vazão na bacia foi utilizada a técnica de análise harmônica e espectral (WILKS, 2006; UELE, 2013; LYRA et al., 2017a). Através da verificação das frequências dos harmônicos dos extremos de precipitação e vazão, relacionando-os com o tempo de atuação dos modos de variabilidade climática. As análises foram realizadas nas séries de SPI e SDI mensal (12 meses) para identificar os padrões dos harmônicos e compará-los com os sinais dos modos de variabilidade climática. A análise harmônica é baseada nas combinações de funções de senos e cossenos na busca da identificação dos harmônicos presentes nas séries. A análise espectral possibilita a identificação da importância de cada harmônico na série. Utilizou-se a série de SPI 12 e SDI 12 de janeiro de 1972 a dezembro de 2016 para realizar estas análises. A análise harmônica e espectral possibilita decompor a série temporal em diferentes frequências. Assim é possível avaliar a variabilidade do sinal e a contribuição das diversas escalas temporais da série.

O cálculo para série temporal com n elementos pode ser representado por $n/2$ senos e cossenos que oscilam em torno da média \bar{y} , de acordo com a equação 12.

$$y_i = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ C_k \cos \left[\frac{2\pi kt}{n} - \theta_k \right] \right\} = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ A_k \cos \left[\frac{2\pi kt}{n} \right] + B_k \sin \left[\frac{2\pi kt}{n} \right] \right\} \quad (16)$$

em que:

k = é um inteiro que varia até $n/2$

$C_k = (A_k^2 + B_k^2)^{1/2}$ = é a amplitude

$\theta_k = \arctan(B_k/A_k)$ = é a ângulo da fase

t = é o tempo

O valor de C_k é o máximo entorno da média e θ_k representa o máximo da função do harmônico. Os coeficientes $A_k = C_k \cos(\theta_k)$ e $B_k = C_k \sin(\theta_k)$ foram ajustados para as séries anuais de SPI usando o método dos mínimos quadrados.

Não é prático utilizar todos os harmônicos possíveis na representação de uma série temporal, uma vez que para muitos deles não é possível distinguir dos ruídos e não tem uma explicação física. O invés disso a contribuição de cada k th harmônico para a variância é calculada segunda a equação 13.

$$r_k^2 = \frac{\frac{n}{2} C_k^2}{(n-1) S_y^2} \quad (17)$$

em que:

numerador = é a soma dos quadrados de k th

denominador = é a soma total dos quadrados

S_y^2 = é a variância da amostra

$$r^2 = \sum_{k=1}^n r_k^2$$

De todos os harmônicos de $n/2$, foram utilizados os harmônicos de maior potência na escala decadal e os dois de maior potência na escala interanual. Sendo os harmônicos contribuírem mais com a variância. Estes harmônicos então classificam a alta e a baixa frequência nas séries analisadas. A análise harmônica espectral oferece informações sobre as fases dos harmônicos medidos em graus trigonométricos (0-360). As fases são convertidas no tempo usando os ângulos observados na análise.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise de Qualidade e Preenchimento de Falhas nas Séries de Precipitação

Buscando investigar o motivo da baixa correlação entre as estações Alferes, Santa Branca 01 e Santa Branca 02 e a estação removida da série de referência Varadouro realizou-se uma análise de correlação entre todas as estações. Analisando se alguma outra estação apresentava o mesmo parâmetro se comparando com todo o grupo de estações escolhidas. Essa análise

demonstrou que a estação de Varadouro mostrou correlação, com r abaixo de 0,50 em 18 das 20 estações pré-selecionadas na região. As estações de Natividade da Serra e Jardim o r foi de 0,51. As características da área da estação são similares as das outras estações, ela não está em área isolada das demais ou em faixa de altitude diferente. Esse resultado pode indicar algum erro de medição na série desta estação ou mesmo que série de outra estação foi imputada como se fosse de Varadouro. Todas as demais estações tiveram r superior a 0,79 umas com as outras.

Tabela 4: Distância e correlação entre a estação de referência e as cinco estações mais próximas. (*estação não foi utilizada no preenchimento de falhas).

| Estação Referência | Estações mais Próximas | Nº Meses Utilizados | (km) | (r) |
|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------|------------|
| Alferes | Paraibuna | 197 | 3,7 | 0,92 |
| | Comércio | | 13,8 | 0,92 |
| | Varadouro* | | 13,8 | 0,41 |
| | Redenção da Serra | | 17,9 | 0,88 |
| | Capuava | | 17,9 | 0,86 |
| Natividade Da Serra | Laranjal | 231 | 8,7 | 0,85 |
| | Redenção da Serra | | 13,8 | 0,83 |
| | Bairro Alto | | 14,0 | 0,84 |
| | Comércio | | 15,5 | 0,87 |
| | Pitas | | 16,5 | 0,82 |
| Redenção Da Serra | Natividade da Serra | 226 | 14,0 | 0,86 |
| | Paraibuna | | 17,8 | 0,87 |
| | Alferes | | 17,9 | 0,86 |
| | Comércio | | 19,1 | 0,85 |
| | Laranjal | | 19,4 | 0,82 |
| Santa Branca 01 | Santa Branca 02 | 226 | 3,9 | 0,90 |
| | Jardim | | 9,2 | 0,91 |
| | Capuava | | 13,9 | 0,88 |
| | Varadouro* | | 16,5 | 0,52 |
| | Alferes | | 20,8 | 0,91 |
| Santa Branca 02 | Santa Branca 01 | 192 | 3,9 | 0,90 |
| | Jardim | | 6,1 | 0,86 |
| | Capuava | | 11,7 | 0,83 |
| | Varadouro* | | 15,3 | 0,51 |
| | São José dos Campos | | 20,6 | 0,84 |

| | | | | (continuação) | |
|--------------|-----------------------|-----|------|---------------|--|
| Igaratá | Paratei | 217 | 13,4 | 0,87 | |
| | Represa - Monte Claro | | 16,3 | 0,85 | |
| | Santa Isabel | | 17,0 | 0,88 | |
| | São José dos Campos | | 27,4 | 0,88 | |
| | Jardim | | 30,2 | 0,82 | |
| Santa Isabel | Paratei | 217 | 12,1 | 0,85 | |
| | Igaratá | | 17,0 | 0,88 | |
| | Represa - Monte Claro | | 33,0 | 0,80 | |
| | Jardim | | 34,2 | 0,79 | |
| | São José dos Campos | | 35,8 | 0,86 | |

Após a análise de qualidade e preenchimento de falhas, das 20 estações pré-selecionadas, apenas sete estações apresentaram parâmetros que permitiram as séries das mesmas serem utilizadas nas análises do SPI. As outras 13 estações foram descartadas, devido ao número de falha nas series maiores que 15 % e/ou parâmetros (coeficiente de determinação – r^2 e, ou angular – b entre a série de referência e a da estação) no preenchimento de falha insatisfatório. Os dados de algumas das treze estações descartadas foram utilizados no preenchimento de falhas das sete estações finais utilizadas na pesquisa.

A tabela 05 apresenta as sete estações que foram utilizadas nas análises desta pesquisa e os resultados pré e pós tratamento de qualidade nas séries. Nenhuma das séries sofreu retirada de dados maiores que 2 % após tratamento de qualidade. Foi observada melhora em todos os parâmetros da metodologia após o tratamento de qualidade dando mais robustez a série histórica. Já a tabela 06 apresenta as estações que foram removidas e o motivo da não utilização dos dados destas estações. Doze das treze estações forma removidas devido ao tamanho da falha, uma devido somente a índices insatisfatórios para metodologia e dentre as treze apresentaram ambos os motivos conforme indicado na tabela.

Tabela 5: Índices pré e pós tratamento qualidade dos dados da série (jan/1972-dez/2016).

| Identificação | | Pré-Tratamento | | | | Pós-Tratamento | | | | Diferença Falha |
|---------------|---------------------|----------------|----------------|-------|------|----------------|----------------|-------|------|-----------------|
| ID | Nome Estação | Falha (%) | r ² | a | b | Falha (%) | r ² | a | b | |
| 1 | Alferes | 7,59 | 0,70 | 17,80 | 0,86 | 8,15 | 0,77 | 11,79 | 0,92 | 0,56 |
| 2 | Natividade da Serra | 1,30 | 0,71 | 10,06 | 0,99 | 1,85 | 0,72 | 11,72 | 0,99 | 0,55 |
| 3 | Redenção da Serra | 0,78 | 0,74 | 23,40 | 0,74 | 2,78 | 0,77 | 23,32 | 0,75 | 2,00 |
| 4 | Santa Branca 01 | 10,74 | 0,84 | 16,85 | 0,85 | 11,11 | 0,88 | 11,29 | 0,92 | 0,36 |
| 5 | Santa Branca 02 | 3,89 | 0,80 | 21,75 | 0,78 | 4,81 | 0,84 | 16,78 | 0,83 | 0,92 |
| 6 | Igarata | 1,67 | 0,83 | 14,04 | 0,87 | 2,04 | 0,85 | 14,05 | 0,88 | 0,37 |
| 7 | Santa Isabel | 5,00 | 0,85 | 12,92 | 0,88 | 5,19 | 0,86 | 13,60 | 0,88 | 0,19 |

Tabela 6: Estações não utilizadas da série (jan/1972 - dez/2014) - Porcentagem de Falha (PF)/ Índices Insatisfatórios Metodologia (IIM).

| Nome Estação | Falha (%) | r ² | a | b | Não utilizada por: |
|-----------------------|--------------|----------------|-------|-------------|--------------------|
| Alto da Serra | 5,22 | 0,47 | 27,23 | 0,41 | IIM |
| Bairro Alto | 36,17 | 0,76 | 35,89 | 0,81 | PF |
| Capuava | 33,27 | 0,75 | 20,92 | 0,91 | PF |
| Cedro | 46,23 | 0,79 | 28,67 | 0,86 | PF |
| Comércio | 37,14 | 0,86 | 16,70 | 0,92 | PF |
| Jardim | 41,58 | 0,82 | 24,19 | 0,66 | PF/IIM |
| Laranjal | 33,46 | 0,73 | 28,04 | 0,64 | PF/IIM |
| Paraibuna | 35,98 | 0,85 | 10,29 | 0,91 | PF |
| Paratei | 29,98 | 0,85 | 15,28 | 0,92 | PF |
| Pitas | 51,45 | 0,78 | 23,57 | 0,85 | PF |
| Represa - Monte Claro | 35,20 | 0,80 | 13,90 | 0,76 | PF |
| São José dos Campos | 36,62 | 0,81 | 19,13 | 0,88 | PF |
| Varadouro | 47,39 | 0,24 | 56,31 | 0,46 | PF/IIM |

Buscou-se sempre interferir o mínimo no valor medido e, assim preservar a realidade observada em campo. Todas as intervenções buscaram adequar de acordo com as metodologias

apresentadas às séries para as análises. Os gráficos de dispersão com a regressão entre a série observada e de referência e o intervalo de confiança podem ser observados nas Figuras 11, 12 e 13. Todas as retiradas de dados considerados espúrios melhoraram os índices de b e r^2 conforme indicado por Allen et al. (1998).

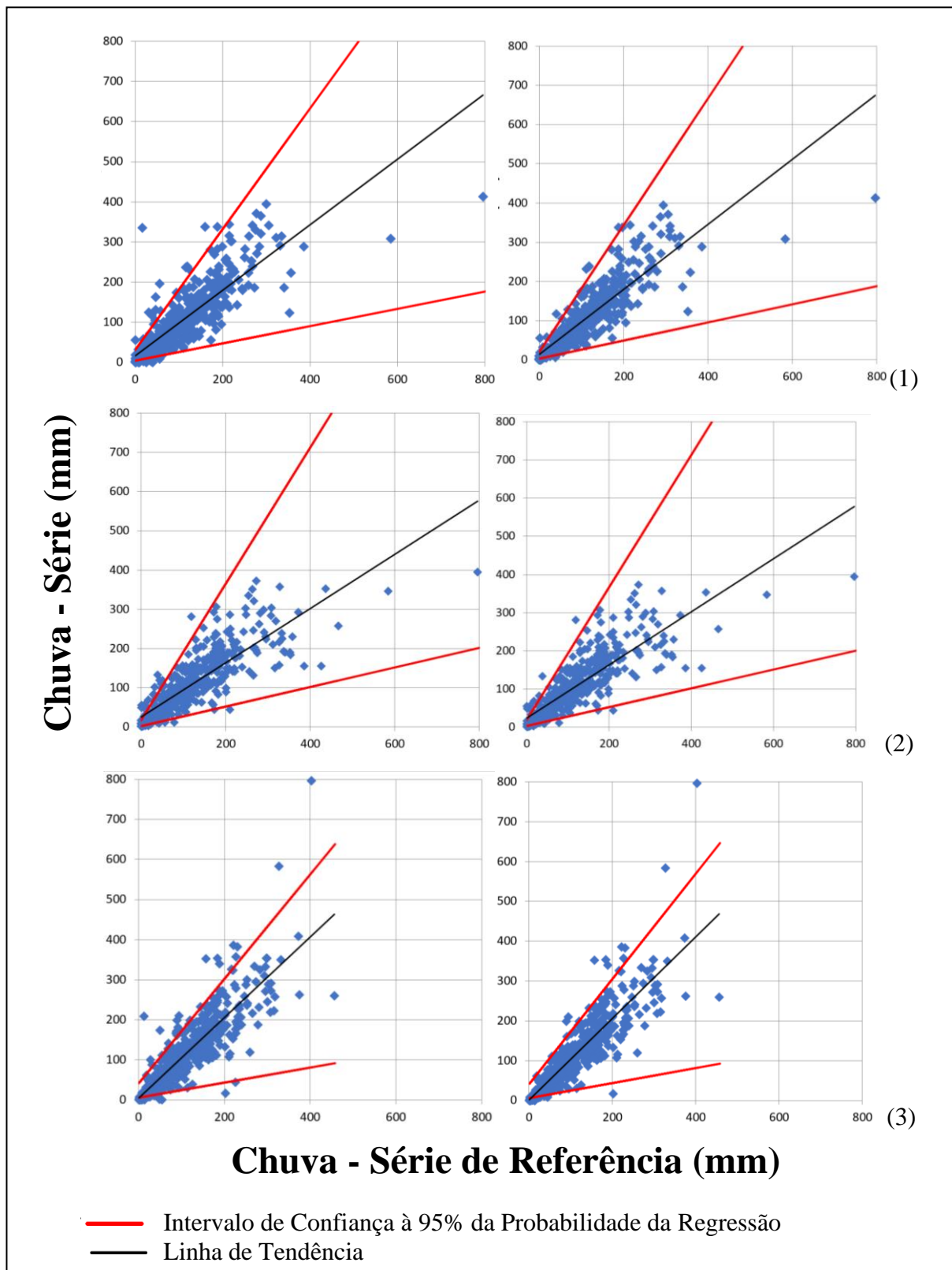


Figura 11: Gráficos das séries pré (esquerda) e pós (direita) tratamento qualidade dos dados do entorno do reservatório de Paraibuna para séries de dados (jan/1972-dez/2016). Estações (1) Alferes, (2) Natividade da Serra e (3) Redenção da Serra.

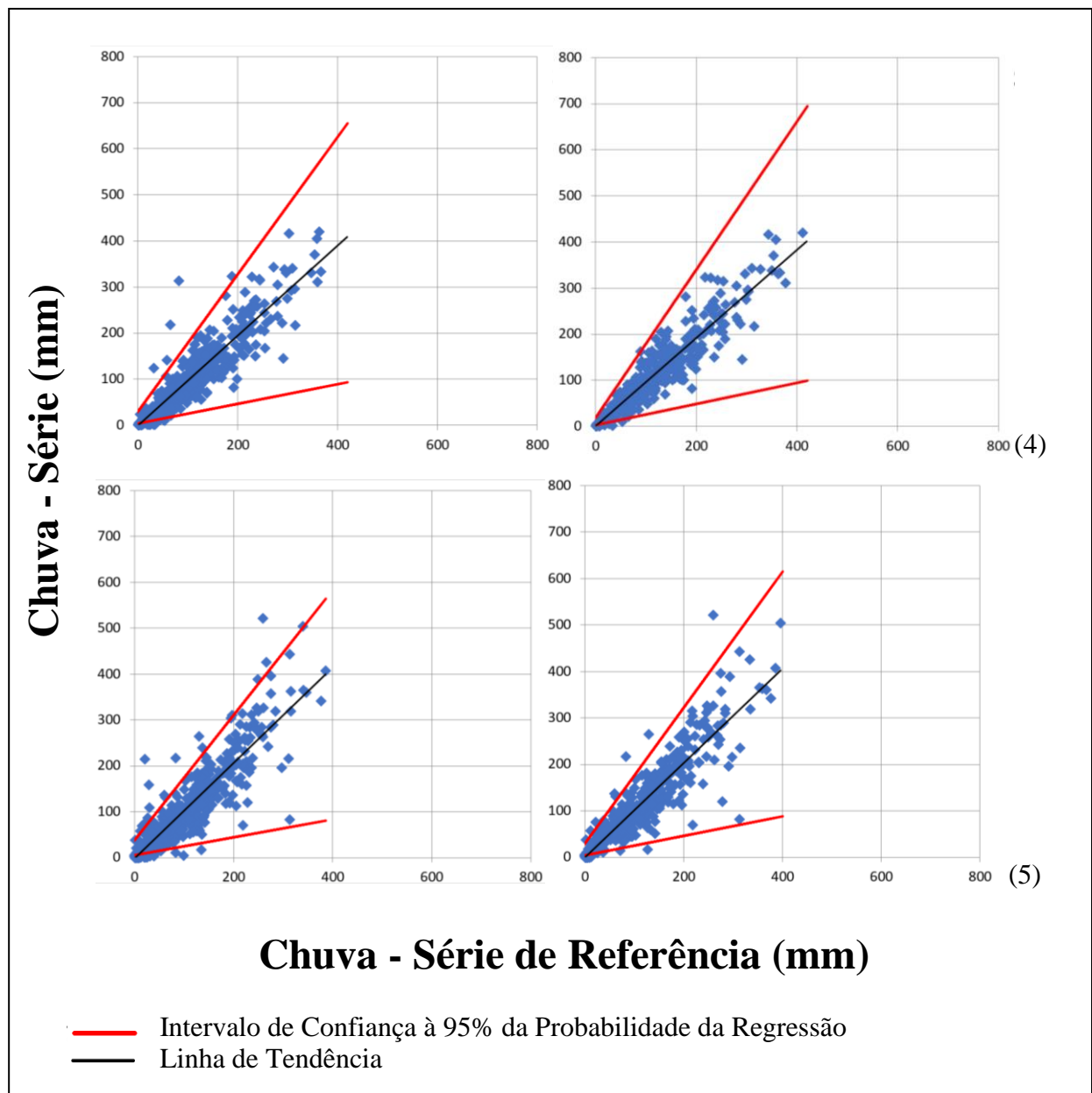


Figura 12: Gráficos das séries pré (esquerda) e pós (direita) tratamento qualidade dos dados do entorno do reservatório de Santa Branca para séries de dados (jan/1972-dez/2016). Estações (4) Santa Branca 01 e (5) Santa Branca 02.

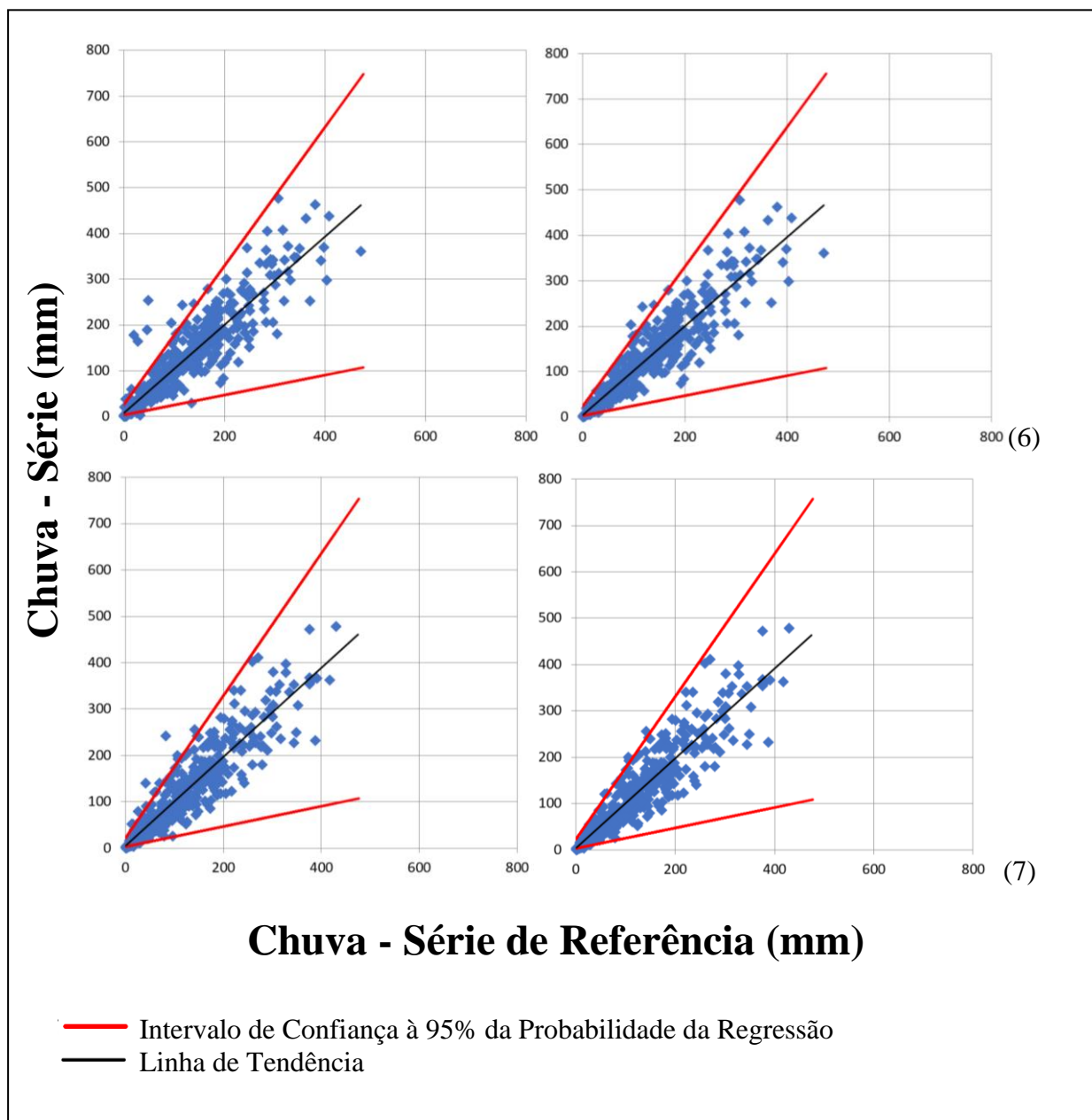


Figura 13: Gráficos das séries pré (esquerda) e pós (direita) tratamento qualidade dos dados do entorno do reservatório de Jaguari para séries de dados (jan/1972-dez/2016). Estações (6) Igarata e (7) Santa Isabel.

Após a aplicação da metodologia foi concebida uma série histórica de 45 anos (540 meses) totalmente preenchida de janeiro de 1972 a dezembro de 2016 para as sete estações. Esta série foi utilizada para realização de todas as análises estatísticas. Diante de dificuldade na obtenção de séries históricas maiores que trinta anos com a qualidade necessária para análises climatológicas na rede meteorológica brasileira, uma série de 45 anos nesta região é de grande importância para esta pesquisa e trabalhos futuros.

5.2 Caracterização Meteorológica e Hidrológica

Os maiores acumulados de precipitação anual foram encontrados nas duas estações do entorno do reservatório de Jaguari. Para as estações do entorno dos reservatórios de Paraibuna e Santa Branca, o acumulado anual variou entre 1260,9 e 1334,0 mm em Alferes e Redenção da Serra respectivamente. A distribuição da precipitação média entre as estações apresentou valores com diferença máxima de 40 mm. Nos meses de janeiro e março foi possível observar essa diferença entre as estações do reservatório de Jaguari com as estações dos outros reservatórios. O semestre seco de abril a setembro apresentou médias com menores variações entre as estações. Em outubro foi possível observar diferença média de 10 mm na precipitação entre as estações do entorno dos três reservatórios.

O padrão interanual das chuvas na Bacia do Rio Paraíba do Sul coincide com as estações do verão e inverno. O período mais seco está inserido no inverno (junho a agosto), enquanto o mais chuvoso no verão (dezembro a fevereiro) (Figura 14; Tabela 07). Pode-se observar para todas as estações, que as menores médias ocorrem em agosto e as maiores em janeiro. O acumulado anual variou entre 1259,8 (Natividade) e 1435,1 mm (Igaratá) dentre as sete estações. Todas as estações apresentaram distribuição similar entre as séries. A estação seca representou cerca de 9,5 % da média do total anual e a estação chuvosa cerca de 45 % média do total anual.

Tabela 7: Precipitação média (mm) das estações da série (jan/1972-dez/2016).

| Meses/Estações | Alferes | Natividade da Serra | Redenção da Serra | Santa Branca 01 | Santa Branca 02 | Igaratá | Santa Isabel |
|------------------|---------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|---------|--------------|
| Janeiro | 220,7 | 213,3 | 236,4 | 230,7 | 240,5 | 253,5 | 230,9 |
| Fevereiro | 170,4 | 178,0 | 187,4 | 186,7 | 196,5 | 190,8 | 206,5 |
| Março | 135,7 | 145,0 | 146,8 | 144,7 | 141,4 | 174,7 | 171,9 |
| Abril | 79,1 | 86,4 | 82,8 | 76,5 | 78,0 | 84,8 | 81,8 |
| Mai | 61,3 | 62,2 | 61,0 | 60,9 | 63,8 | 67,1 | 65,2 |
| Junho | 48,4 | 46,1 | 48,3 | 48,1 | 51,3 | 51,6 | 51,7 |
| Julho | 40,9 | 43,5 | 42,4 | 42,6 | 40,5 | 44,6 | 44,9 |
| Agosto | 33,0 | 34,3 | 31,1 | 30,5 | 32,7 | 32,4 | 32,0 |
| Setembro | 68,5 | 72,7 | 74,9 | 66,2 | 70,0 | 79,8 | 76,8 |
| Outubro | 96,1 | 92,2 | 94,5 | 102,0 | 103,6 | 116,1 | 115,5 |
| Novembro | 127,9 | 111,5 | 130,4 | 116,9 | 131,4 | 142,3 | 144,2 |
| Dezembro | 179,0 | 174,5 | 198,0 | 171,0 | 177,1 | 197,3 | 193,9 |
| Anual | 1260,9 | 1259,8 | 1334,0 | 1276,8 | 1326,8 | 1435,1 | 1415,4 |

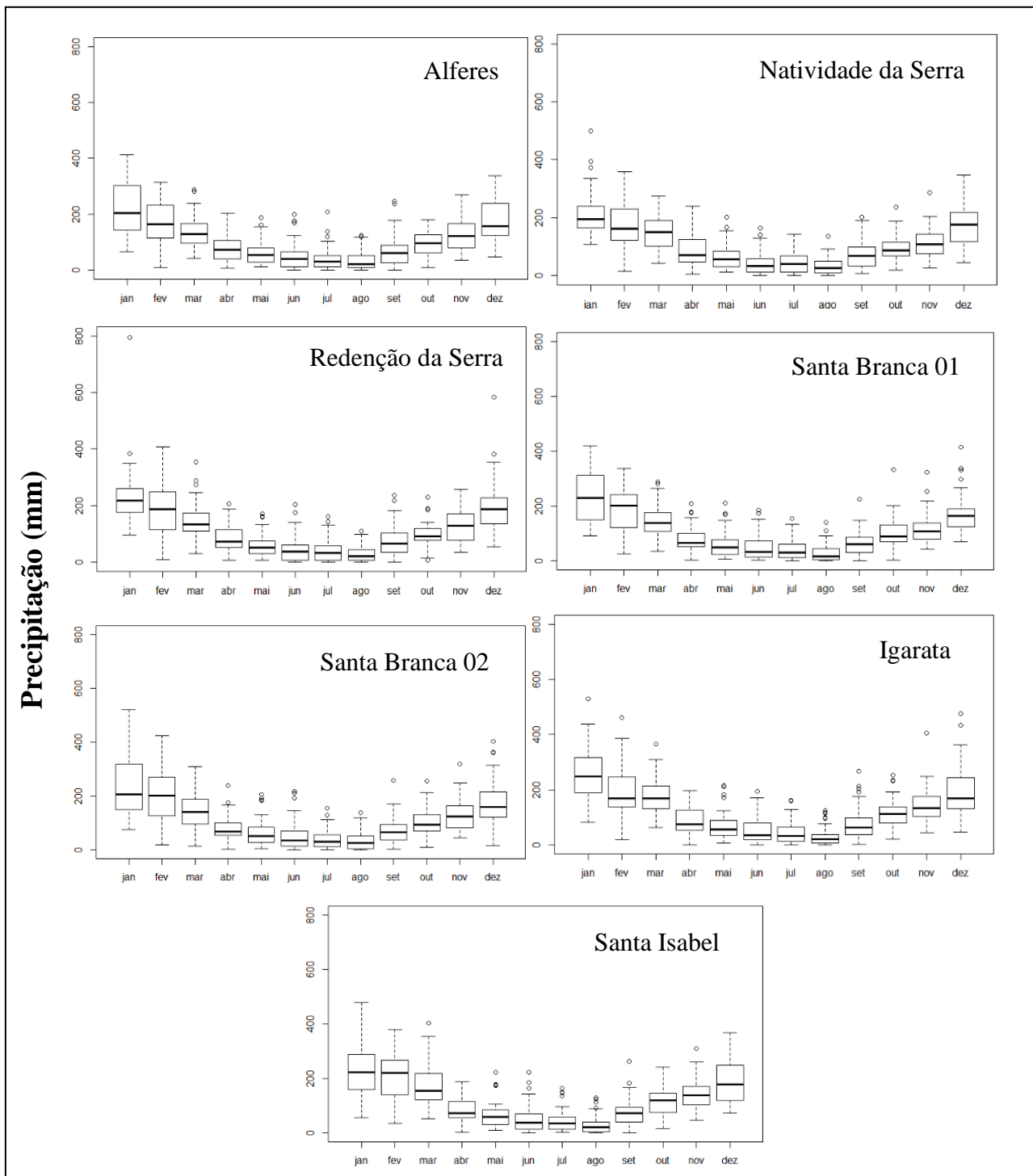


Figura 14: Boxplot das chuvas mensais nas estações meteorológicas na série (jan/1972-dez/2016).

Utilizando as séries de vazão natural para os pontos de medição localizados nos reservatórios pode-se observar que julho, agosto e setembro apresentaram as vazões mais baixas,

enquanto janeiro, fevereiro e março apresentaram as vazões mais altas (Figura 15; Tabela 08). Fevereiro foi o mês no qual as vazões começam a diminuir e em outubro elas voltaram a aumentar. Para cabeceira do Rio Paraíba do Sul o reservatório de Paraibuna apresenta vazão média anual de 69,5 m/s, média das vazões mínimas de 30,7 m/s e média das vazões máximas de 151,3 m/s. O reservatório de Santa Branca apresenta vazão média anual de 79,4 m/s, média das vazões mínimas de 35,0 m/s e média das vazões máximas de 174,2 m/s. Para o reservatório de Jaguari a vazão média anual é de 26,4 m/s, média das vazões mínimas de 10,9 m/s e média das vazões máximas de 60,3 m/s.

Tabela 8: Vazão Média Reservatórios (m/s) Dados da Série (jan/1972-dez/2016).

| Meses/Estações | Paraibuna | Santa Branca | Jaguari |
|-----------------------|------------------|---------------------|----------------|
| Janeiro | 110,1 | 126,2 | 41,3 |
| Fevereiro | 108,3 | 125,2 | 41,2 |
| Março | 95,3 | 107,6 | 39,7 |
| Abril | 79,2 | 89,8 | 29,7 |
| Mai | 60,9 | 69,6 | 23,6 |
| Junho | 55,5 | 64,0 | 22,0 |
| Julho | 48,8 | 55,8 | 18,3 |
| Agosto | 41,4 | 47,2 | 15,3 |
| Setembro | 46,2 | 52,7 | 16,7 |
| Outubro | 51,1 | 58,0 | 18,3 |
| Novembro | 57,6 | 66,0 | 21,4 |
| Dezembro | 79,8 | 90,7 | 29,8 |

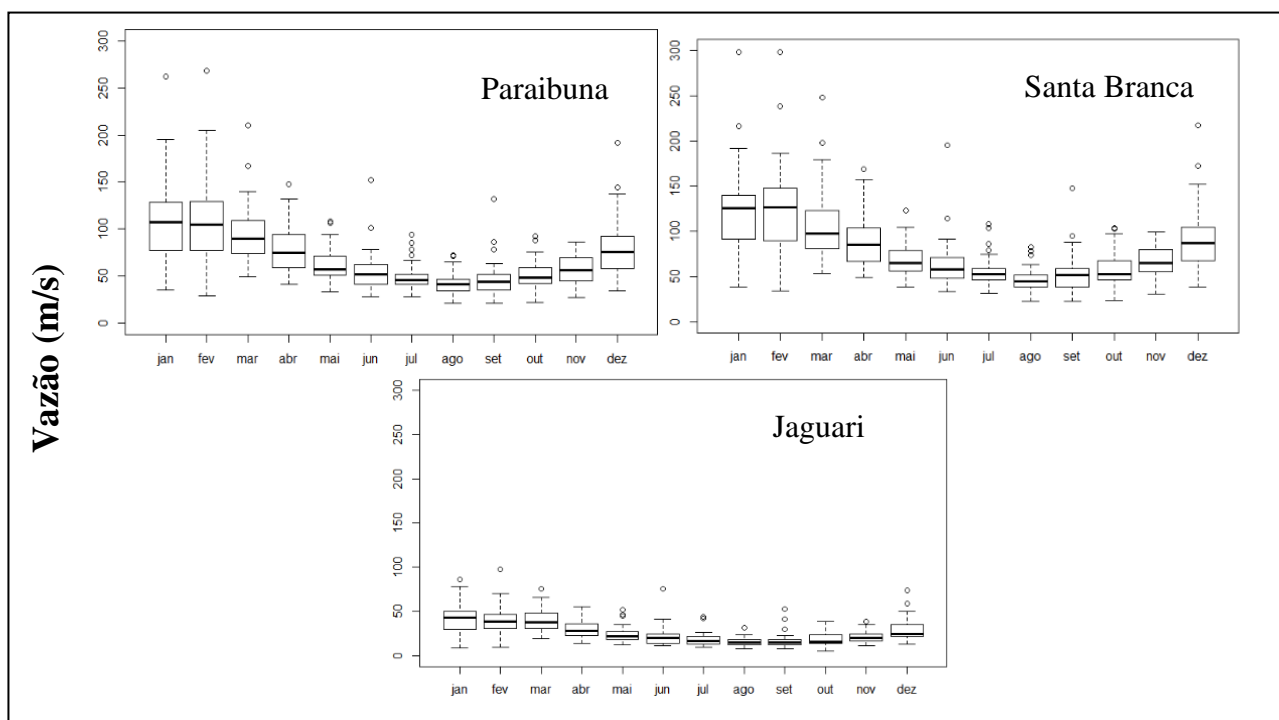


Figura 15: Boxplot das vazões mensais nas nos pontos de medição de vazão na série (jan/1972-dez/2016).

Pode-se destacar alguns sistemas que definem o regime de chuvas na região Sudeste. Estes sistemas são responsáveis pela característica de precipitação e vazão apresentadas anteriormente na região. Revisando os trabalhos de Nimer (1972), Lemos e Fisch (2000), Sant’Anna Neto (2005), Torres e Machado (2008), Reboita et al. (2010), Marengo et al. (2012; 2015), Coelho et al. (2015), Nobre et al. (2016) e Brito et al. (2017) foi possível determinar as principais características destes sistemas. Especialmente sistemas de grande e mesoescala, que tem influência sobre a região de estudo. De modo geral a Zona, de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Sistemas Frontais, as Linhas de Instabilidade e os Sistemas Convectivos de Mesoescala exercem grande influência sobre as precipitações na região. Estes sistemas interagem com o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, que tem sua posição alterada durante o ano e contribui nos índices de precipitação nas estações seca (inverno) e chuvosa (verão). Bloqueios atmosféricos podem ocorrer na região, como por exemplo, no verão de 2013 para 2014, que culminou na crise hídrica nos anos de 2014 e 2015. Estes bloqueios impedem a entrada dos Sistemas Frontais e a formação de ZCAS, que são os principais sistemas geradores de chuva na região. As Brisas Marítimas também influenciam na região e quando associadas a outros sistemas podem desencadear em tempestades severas no

verão. A proximidade com o oceano confere alta umidade para algumas áreas da região contribuindo para formação de nebulosidade e consequente ocorrência de precipitação. O relevo na região tem papel fundamental no clima e, gera áreas com características mais secas ou úmidas nas vertentes das montanhas, gerando também turbulência de ar pela ascendência orográfica. As Brisas de Vale e Montanha tem grande atuação nos pontos mais altos do relevo da região devido a diferença de temperatura dos vales e dos cumes das montanhas que estão presentes na região das cabeceiras.

5.3 Caracterização Climática

As fases da ODP nos anos desta pesquisa foram caracterizados em 15 anos de fases frias, entre 1972 a 1976 (iniciada em 1947), entre 1999 e 2002, e entre 2008 e 2013. A fase oposta quente 28 anos caracterizada entre 1977 e 1998, entre 2003 e 2005, e entre 2014 e 2016. Além disso dois anos de fase neutra em 2006 e 2007. Em 1998 com o fim de uma fase decadal quente esperava-se o início de uma fase fria decadal, entretanto isso não ocorreu. Desde então este modo vem sendo caracterizados por fases curtas (NASA, 2019; NWFSC, 2019). As fases da ODP são responsáveis por influenciar a intensidade e frequência de ENOS, de forma que na fase quente da OPD espera-se maior frequência e intensidade de El Niño e na fase fria maior frequência e intensidade de La Niña (LYRA et al., 2017a).

Os anos das fases de ENOS positivas e negativa, El Niño e La Niña respectivamente, também foram caracterizados. Os anos caracterizados como El Niño foram 1972, 1977, 1980, 1982/83, 1987, 1991/92, 1993/94, 1997/98, 2002, 2004, 2006, 2009, 2015/16 e os anos caracterizados como La Niña foram 1973/74/75, 1988, 1999, 2010. Os demais foram caracterizados anos neutros. Com resultado, na série de dados tiveram seis anos de ocorrência de La Niña, 18 anos caracterizados como El Niño e 21 anos neutros. Do mesmo modo, GITA foi caracterizado como positivo em 1978, 1980/81, 1983, 1997, 2002, 2005, 2010 e com negativo em 1973/74/75, 1984/85/86, 1989, 1991, 1994/95, 1999, 2003, 2008/09, 2014. Os demais foram classificados como anos neutros. Somando 15 anos negativos, oito anos positivos e 22 anos neutros. A relação entre as fases de ODP, ENOS e GITA relacionada aos anos da série utilizada nesta pesquisa podem ser observados na Tabela 09.

Na série de anos observados na fase ODP Neutra ENOS apresentou um ano El Niño e outro neutro, para GITA ambos foram neutros. Na fase fria de ODP ocorreu quase a totalidade de La Niñas, que ocorreram na maior parte em anos de GITA negativo. A ocorrências de ENOS e GITA

neutro nesta fase da ODP ocorreram nos mesmos anos quase em sua totalidade também. A fase quente de ODP, onde quase dois terços dos anos da série estão caracterizados, apresentou apenas um evento de La Niña. A maior parte dos anos foi caracterizada como El Niño e ocorreram em nove das quatorze ocorrências com GITA neutro. A maior parte dos anos de ocorrência de ENOS neutro ocorreu em anos de GITA negativo.

Tabela 9: Fases Modos de Variabilidade Climática. Dados da Série (jan/1972-dez/2016).

| Fase ODP | ENOS/GITA | GITA (+) | GITA (-) | GITA (Neutro) |
|-------------------|------------------|------------------|--|--|
| ODP Fria | La Niña | 2010 | 1973, 1974, 1975, 1999 | - |
| | El Niño | 2002 | 1972 | 2009 |
| | Neutro | - | 2008 | 1976, 2000, 2001, 2011, 2012, 2013 |
| ODP Quente | La Niña | - | - | 1988 |
| | El Niño | 1980, 1983, 1997 | 1991, 1994 | 1977, 1982, 1987, 1992, 1993, 1998, 2004, 2015, 2016 |
| | Neutro | 1978, 1981, 2005 | 1984, 1985, 1986, 1989, 1995, 2003, 2014 | 1979, 1990, 1996 |
| ODP Neutra | La Niña | - | - | - |
| | El Niño | - | - | 2006 |
| | Neutro | - | - | 2007 |

5.4 Anomalias de Precipitação e Vazão

As análises de SPI e SDI identificaram os anos que ocorreram extremos secos e úmidos nas estações e pontos de observação localizados nos reservatórios (Figura 16). Os anos úmidos são caracterizados por anomalia acima de 1 e os anos secos por anomalia abaixo de -1. Os anos entre 1 e -1 são caracterizados normais. É possível perceber que até o ano de 1996 os dados oscilavam mais harmonicamente, característica que foi quebrada após este ano.

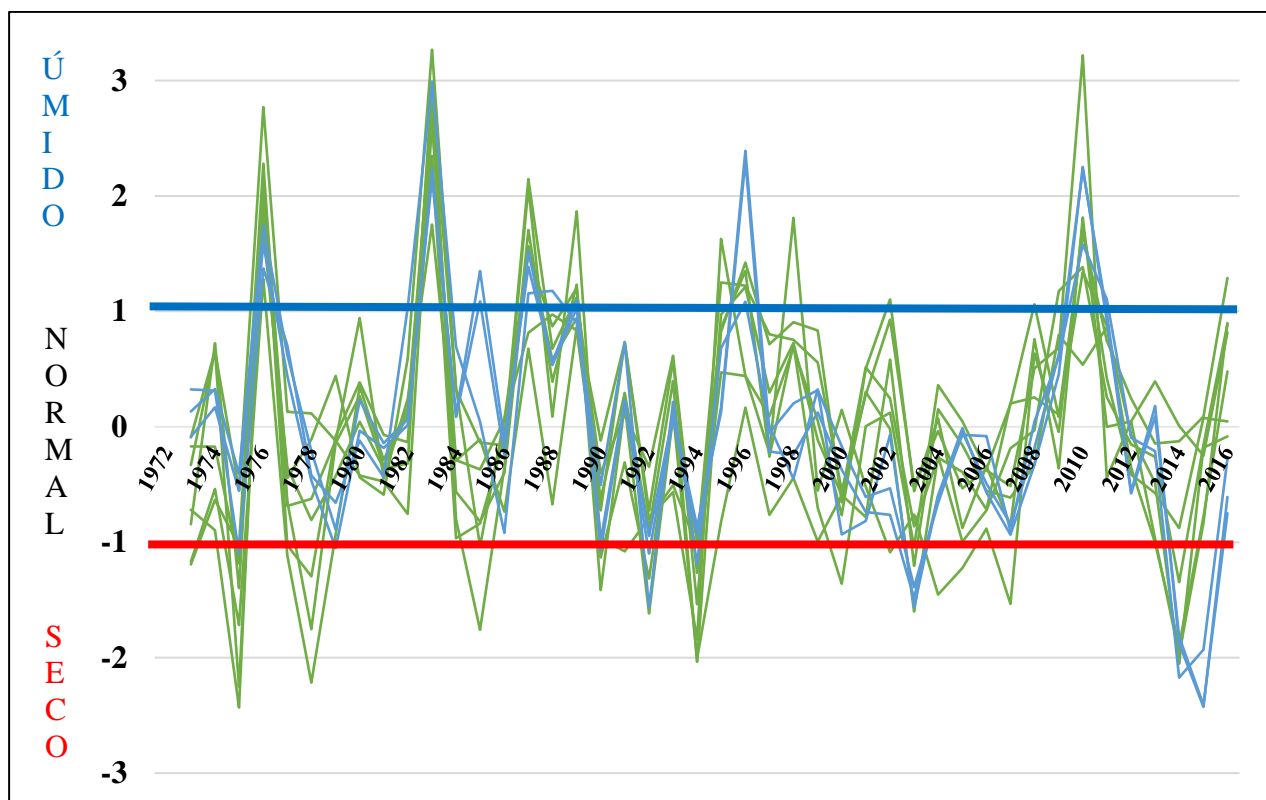


Figura 16: Índices de SPI (verde) e SDI (azul) 12 meses para todas as estações e reservatórios série (jan/1972-dez/2016).

Do total de 45 anos dentre as sete estações, 79 eventos apresentaram anomalias de precipitação, sendo 39 anos secos e 40 úmidos, os outros 236 eventos foram de normalidade. As ocorrências secas classificadas como moderadas foram 23, como severa 10 e com extremas seis. Nas ocorrências úmidas moderadas forma 16, severas 11 e extremas 13. As ocorrências apresentam frequência similar. Entretanto as ocorrências úmidas extremas e severas somaram 24 ocorrências, que representou 60 % do total de ocorrências úmidas. Dos 18 anos em que alguma estação apresentou anomalias secas, os anos de 1975, 1994 e 2014 pode-se observar que mais da metade das estações apresentaram anomalia de alguma intensidade. Já nos 12 anos que alguma estação apresentou anomalias úmidas, os anos de 1976, 1983, 1987, 1989, 1996 e 2010 mais da metade das estações apresentou algum tipo de anomalia de alguma intensidade dentre as estações. Nos anos de 1976 e 1983, que foram anos úmidos, todas as sete estações apresentaram anomalia severa ou extrema, exceto Santa Branca 2 que apresentou anomalia moderada. Os anos de anomalias de precipitação úmidas podem ser verificados na Tabela 10 e secas na Tabela 11.

Tabela 10: SPI Anos Úmidos Dados da Série (jan/1972-dez/2016).

| Estação | Extremamente Úmido | Severamente Úmido | Moderadamente Úmido |
|---------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Alferes | 1976, 1983, 1987 | 1989, 2010 | 2016 |
| Natividade da Serra | 1976 | 1983, 1995, 1998, 2010 | 1987, 1989 |
| Redenção da Serra | 1976, 1983, 2010 | - | 1996 |
| Santa Branca 01 | 1983, 1987 | 1976, 2010 | 1989, 2002 |
| Santa Branca 02 | 1983 | 1987 | 1976, 1995, 1996, 2008, 2010 |
| Igaratá | 1976, 1983 | - | 1996 |
| Santa Isabel | 1983 | 1976, 1987 | 1989, 1996, 2009, 2010 |

Tabela 11: SPI Anos Secos Dados da Série (jan/1972-dez/2016).

| Estação | Extremamente Seco | Severamente Seco | Moderadamente Seco |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Alferes | 1994 | - | 1975, 1977, 1978, 1990, 1992 |
| Natividade da Serra | - | 1994, 2007 | 1991, 2002, 2004, 2005 |
| Redenção da Serra | 1994 | - | 1973, 1975, 2000, 2003 |
| Santa Branca 01 | 1975 | 1978, 2014 | 1994 |
| Santa Branca 02 | 1978 | 1975, 2014 | 1973, 1977, 1994, 2013 |
| Igaratá | 1975, 2014 | 1994 | 1985, 2003 |
| Santa Isabel | - | 1985, 1992, 2003 | 1975, 1990, 2014 |

Para vazão foram identificados 37 anos de anomalia dentre os três pontos de medição, sendo 15 secos e 22 úmidos, os outros 98 eventos foram de normalidade. Nos anos secos foram classificadas sete moderadas, cinco severas e três extremas. Para os anos úmidos foram classificadas onze moderadas, quatro severas e sete extremas. As ocorrências úmidas de vazão

apresentaram maior frequência que as secas. Dentre as ocorrências úmidas os anos extremos e severos representaram 50 % da série. Todos os três pontos de medição apresentaram anomalias nos anos de 2003, 2014 e 2015 para anomalias secas e nos anos de 1976, 1983, 1987, 1996 e 2010 para anomalias úmidas de alguma intensidade na série estudada. Os anos de anomalias de vazão úmidas podem ser verificados na Tabela 12 e secas na Tabela 13.

Tabela 12: SDI Anos Úmidos Dados da Série (jan/1972-dez/2016).

| Reservatório | Extremamente Úmido | Severamente Úmido | Moderadamente Úmido |
|---------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| Paraibuna | 1983, 1996, 2010 | 1976 | 1985, 1987, 1989 |
| Santa Branca | 1983, 1996, 2010 | 1976, 1987 | 1985, 1989 |
| Jaguari | 1983 | 2010 | 1976, 1982, 1987, 1988, 1996, 2011 |

Tabela 13: SDI Anos Secos Dados da Série (jan/1972-dez/2016).

| Reservatório | Extremamente Seco | Severamente Seco | Moderadamente Seco |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Paraibuna | 2015 | 2014 | 2003 |
| Santa Branca | 2015 | 2014 | 1979, 1990, 1992, 2003 |
| Jaguari | 2014 | 1992, 2003, 2015 | 1975, 1994 |

5.5 Testes Estatísticos, Correlação e Análise de Tendência nas Séries de SPI e SDI.

Os resultados dos testes preliminares são apresentados na Tabela 14. No teste de Bartels todas as estações e o reservatório de Santa Branca apresentaram $p > 0,05$ e, assim aceitou-se que os dados são aleatórios. Para os reservatórios de Paraibuna e Jaguari o p -valor $< 0,05$, isso indicou que as séries apresentaram anomalia de vazão desses reservatórios sendo não aleatórios. O teste de independência de Wald-Wolfowitz o resultado foi o similar, tendo todas as estações e o reservatório de Santa Branca apresentaram dados independentes. E os reservatórios de Paraibuna e Jaguari apresentando p -valor $< 0,05$, sendo assim os dados foram caracterizados como não independentes. No teste de Dickey-Fuller os resultados das análises demonstram que as estações de Alferes, Santa Branca 02 e os reservatórios de Paraibuna e Santa Branca apresentam $p > 0,05$,

com isso a hipótese H_0 foi aceita e os dados são considerados estacionários. A estação de Natividade da Serra, Redenção da Serra, Santa Branca 01, Igaratá e Santa Isabel, além do reservatório de Jaguari apresentaram $p\text{-valor} < 0,05$ sendo as séries de dados consideradas não estacionárias. No teste de homogeneidade somente os reservatórios de Paraibuna e Santa Branca apresentaram dados com nível de significância $p < 0,05$. Todas as estações e o reservatório de Jaguari apresentam resultados "NS" (não significativos) para o teste.

Tabela 14: Testes preliminares nas séries anuais de SPI e SDI série (jan/1972-dez/2016).

| Estações Reservatórios | Bartels's test - H_0 = Dados aleatórios | | Wald-Wolfowitz test - H_0 = Dados independentes | | Dickey-Fuller test - H_0 = Dados estacionários | | Standard normal homogeneity test | |
|---------------------------|---|---------------|---|---------------|--|---------------|-------------------------------------|-----------|
| | Valor do Teste | Valor de p | Valor do Teste | Valor de p | Valor do Teste | Valor de p | Valor do Teste | Signific. |
| Alferes | 1,94 | 0,42 | -0,11 | 0,92 | -2,42 | 0,41 | 2,61 | "NS" |
| Natividade da Serra | 1,89 | 0,36 | 0,76 | 0,45 | -3,96 | 0,02 | 5,05 | "NS" |
| Redenção da Serra | 2,13 | 0,67 | -0,32 | 0,75 | -4,14 | 0,01 | 163,00 | "NS" |
| Santa Branca 01 | 1,96 | 0,44 | 0,01 | 0,99 | -3,96 | 0,02 | 2,33 | "NS" |
| Santa Branca 02 | 1,60 | 0,09 | 1,43 | 0,15 | -3,24 | 0,09 | 5,96 | "NS" |
| Igarata | 1,85 | 0,31 | 0,91 | 0,36 | -4,89 | 0,01 | 4,66 | "NS" |
| Santa Isabel | 1,98 | 0,48 | 0,12 | 0,90 | -3,96 | 0,02 | 0,96 | "NS" |
| Paraibuna | 1,46 | 0,03 | 1,85 | 0,06 | -3,29 | 0,09 | 9,54 | "p5" |
| Santa Branca | 1,59 | 0,08 | 1,72 | 0,09 | -3,38 | 0,07 | 9,30 | "p5" |
| Jaguari | 1,40 | 0,02 | 2,15 | 0,03 | -3,68 | 0,04 | 7,38 | "NS" |

As análises de tendência foram realizadas nas sete estações e no reservatório de Santa Branca, pois apresentaram dados aleatórios e independentes (SALVIANO et al., 2016). Os reservatórios de Paraibuna e Jaguari não atenderam esses pré-requisitos. O resultado do teste para todas as estações e para o reservatório obtiveram $p > 0,05$, com isso aceitou-se a hipótese H_0 , ou seja, não existe tendência em nenhuma das séries analisadas. Sendo assim, o resultado do teste de

Mann-Kendall para tendências de SPI para todas as estações e SDI para o reservatório de Santa Branca é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15: Análise de tendência nas séries anuais de SPI e SDI série (jan/1972-dez/2016).

| Mann Kendall (HAMED e RAO, 1998) - H₀ = Sem tendência | | |
|---|-----------------------|-------------------|
| | Valor do Teste | Valor de p |
| Alferes | 1,07 | 0,28 |
| Natividade da Serra | -2,19 | 0,28 |
| Redenção da Serra | 1,77 | 0,07 |
| Santa Branca 01 | -3,91 | 0,96 |
| Santa Branca 02 | 6,16 | 0,53 |
| Igaratá | -4,21 | 0,67 |
| Santa Isabel | 6,85 | 0,94 |
| Santa Branca | -1,17 | 0,24 |

Os resultados da correlação entre as séries históricas de SDI e SPI podem ser verificados na Tabela 16. Para correlação de SDI 12 com SPI 12 para o ano hidrológico, SDI 6 e SPI 6 para o semestre seco e SDI 3 e SPI 3 para estação chuvosa observou-se que todas as estações dos três reservatórios apresentaram $r > 0,50$, o que caracterizou correlação grande (COHEN, 1988). Tendo o reservatório de Jaguari obtido $r > 0,70$ em todas as escalas três escalas. Para SDI 6 e SPI 6 no semestre úmido todas as estações exceto Alferes apresentaram $r > 0,50$, o que caracterizou correlação grande e a correlação entre o reservatório de Jaguari e a estação Igaratá seguiu apresentando $r > 0,70$. Alferes apresentou $r = 0,46$ nesta escala de tempo. Para SDI 3 e SPI 3, estação seca, a correlação de todas as estações com o reservatório de Paraibuna apresentaram $r < 0,50$, além da correlação entre o reservatório de Santa Branca e a estação Santa Branca 01 também não apresentarem correlação grande. Entretanto o reservatório de Santa Branca e a estação Santa Branca 02 e o reservatório de Jaguari com suas duas estações apresentaram $r > 0,50$, o que caracterizou correlação grande.

Tabela 16: Análise de Correlação SDI e SPI

| SDI 12 x SPI 12 Ano Hidrológico | SDI 6 x SPI 6 Semestre Seco | SDI 6 x SPI 6 Semestre Úmido | SDI 3 x SPI 3 Estação Seca | SDI 3 x SPI 3 Estação Chuvosa |
|--|--|---|---|--|
| Paraibuna x Alferes | | | | |
| 0,55 | 0,63 | 0,46 | 0,43 | 0,57 |
| Paraibuna x Natividade da Serra | | | | |
| 0,62 | 0,62 | 0,53 | 0,38 | 0,56 |
| Paraibuna x Redenção da Serra | | | | |
| 0,60 | 0,61 | 0,53 | 0,44 | 0,64 |
| Santa Branca x Santa Branca 01 | | | | |
| 0,62 | 0,64 | 0,54 | 0,46 | 0,58 |
| Santa Branca x Santa Branca 02 | | | | |
| 0,64 | 0,69 | 0,56 | 0,53 | 0,54 |
| Jaguari x Igaratá | | | | |
| 0,78 | 0,73 | 0,72 | 0,56 | 0,77 |
| Jaguari x Santa Isabel | | | | |
| 0,73 | 0,70 | 0,66 | 0,52 | 0,78 |

5.6 Análise Observacional dos Resultados para Anos Extremos

Foram selecionados os anos em que as análises de anomalias de precipitação e vazão tiveram maior representatividade na análise em escala anual. Para SPI foram destacados os anos em que dentre as sete estações, mais da metade das estações, ou seja 4 ou mais, apresentaram anomalia de alguma intensidade para o mesmo ano. Para anomalias secas destacaram-se os anos de 1975, 1994 e 2014 e para anomalias úmidas os anos de 1976, 1983, 1987, 1989, 1996 e 2010. Para SDI foram selecionados os anos em que os três pontos de medição de vazão concomitantemente apresentaram anomalia de alguma intensidade no mesmo ano. Foram destacados os anos de 2003, 2014 e 2015 para anomalia secas e 1976, 1983, 1987, 1996 e 2010 para anomalias úmidas. Foram observadas anomalias representativas para SPI e SDI concomitantemente nos anos de 1976, 1983, 1987, 1996 e 2010 para anomalias positivas (úmidas) e 2014 para anomalias negativas (secas). Os demais anos somente precipitação ou vazão apresentaram anomalias.

Observando a série de dados dos anos destacados foi possível extrair algumas informações (Figura 17). A série pode ser dividida em duas metades entre 1972 a 1993 e 1994 a 2016. A

primeira metade da série apresentou anos com predominância de anomalia positiva e a segunda metade anos com anomalia negativa. Na primeira metade da série a maior parte das anomalias de modo geral ocorreu no semestre seco e na estação seca. Na segunda metade da série houve inversão e a maior parte das anomalias de modo geral ocorreu no semestre úmido e na estação chuvosa. Analisando as anomalias negativas, na primeira metade, somente o ano de 1975 apresentou estas características. As anomalias positivas foram maioria, observadas nos anos de 1976, 1983, 1987 e 1989. Na segunda metade houve predominância de anomalias negativas em 1994, 2003, 2014 e 2015. As anomalias positivas foram observadas nos anos de 1996 e 2010. Não foi observada a ocorrência de SDI negativo no semestre úmido e na estação chuvosa na primeira metade da série. Também não foi observada ocorrência de SPI úmido no semestre seco e na estação na segunda metade da série.

Também foi possível relacionar os anos de anomalias com maior representatividade e os modos de variabilidade climática. Nos quinze anos de ODP fria, dentre os onze anos mais representativo, foram observados dois anos úmidos e um ano seco. Nos 28 anos de ODP quente, dentre os onze anos mais representativo, foram observados quatro anos úmidos e quatro anos secos. Nenhum dos dois anos de ODP neutra coincidiu com os anos de anomalias mais representativas. Em relação ao ENOS dos onze anos com maior representatividade foram observadas duas ocorrências de La Niña, quatro El Niño e cinco ocorrências de anos neutros. Para o GITA foram cinco ocorrências negativas, duas positivas e quatro neutras nos anos mais representativos. A relação entre os anos e as fases pode ser observada na Tabela 17. A tabela apresenta os onze anos e caracteriza a anomalia, depois demonstra a fase dos modos em cada ano.

Tabela 17: Modos de variabilidade nos anos de anomalias representativas.

| Ano | Anomalia | ODP | ENOS | GITA |
|-------------|-----------------|------------|-------------|-------------|
| 1975 | Seca | Fria | La Niña | Negativo |
| 1976 | Úmida | Fria | Neutro | Neutro |
| 1983 | Úmida | Quente | El Niño | Positivo |
| 1987 | Úmida | Quente | El Niño | Neutro |
| 1989 | Úmida | Quente | Neutro | Negativo |
| 1994 | Seca | Quente | El Niño | Negativo |
| 1996 | Úmida | Quente | Neutro | Neutro |
| 2003 | Seca | Quente | Neutro | Negativo |
| 2010 | Úmida | Fria | La Niña | Positivo |
| 2014 | Seca | Quente | Neutro | Negativo |
| 2015 | Seca | Quente | El Niño | Neutro |

5.7 Análise Harmônica e Espectral

A Análise Harmônica e Espectral foi realizada nas séries de SPI e SDI com o objetivo de caracterizar os ciclos das ocorrências das anomalias de precipitação e vazão para compará-los com o tempo de atuação dos modos de variabilidade climática. Já que os modos apresentam tempo de atuação decadal e interanual é possível comparar o ciclo das frequências dos harmônico com o

tempo de atuação dos modos. Após a decomposição das frequências foram selecionados o primeiro harmônico para escala decadal e segundo e terceiro harmônicos para escala interanual das séries de SPI e SDI (Tabela 18). Estes foram os harmônicos mais representativos para o conjunto de dados. Também foi observado o nível de acerto em relação aos harmônicos e o sinal dos dados observados. Esse acerto representa a porcentagem de vezes que o harmônico acerta a sinal, positivo ou negativo que as séries de SPI e SDI apresentaram.

Tabela 18: Principais harmônicos das séries de SPI e SDI na bacia e índice de acerto da relação entre os harmônicos e os dados observados.

| Estação/Reservatório | 1º Harm. | 2º Harm. | 3º Harm. | Acerto (%) |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Alferes | 22,0 | 3,4 | 2,2 | 61,74% |
| Natividade da Serra | 11,0 | 7,3 | 3,7 | 69,70% |
| Redenção da Serra | 14,7 | 6,3 | 2,9 | 64,58% |
| Santa Branca 01 | 11,0 | 7,3 | 3,7 | 66,48% |
| Santa Branca 02 | 11,0 | 7,3 | 3,7 | 69,32% |
| Igarata | 14,7 | 5,5 | 3,7 | 65,53% |
| Santa Isabel | 11,0 | 5,5 | 3,7 | 67,42% |
| Paraibuna | 11,0 | 3,7 | 2,2 | 67,42% |
| Santa Branca | 11,0 | 3,7 | 2,2 | 71,21% |
| Jaguari | 7,3 | 3,7 | 2,8 | 61,36% |

No primeiro harmônico foram observados intervalos de 22 anos para estação de Alferes, 7,3 anos para o ponto de medição de vazão de Jaguari, 14,7 anos para as estações de Redenção da Serra e Igaratá e 11 anos as quatro demais estações dois pontos de medição de vazão. A escala de 11 anos para o primeiro harmônico da série de dados foi observada em quatro das sete estações e dois dos três reservatórios. O gráfico com os primeiros harmônicos SPI e SDI podem ser observados nas Figuras 18 e 19 respectivamente.

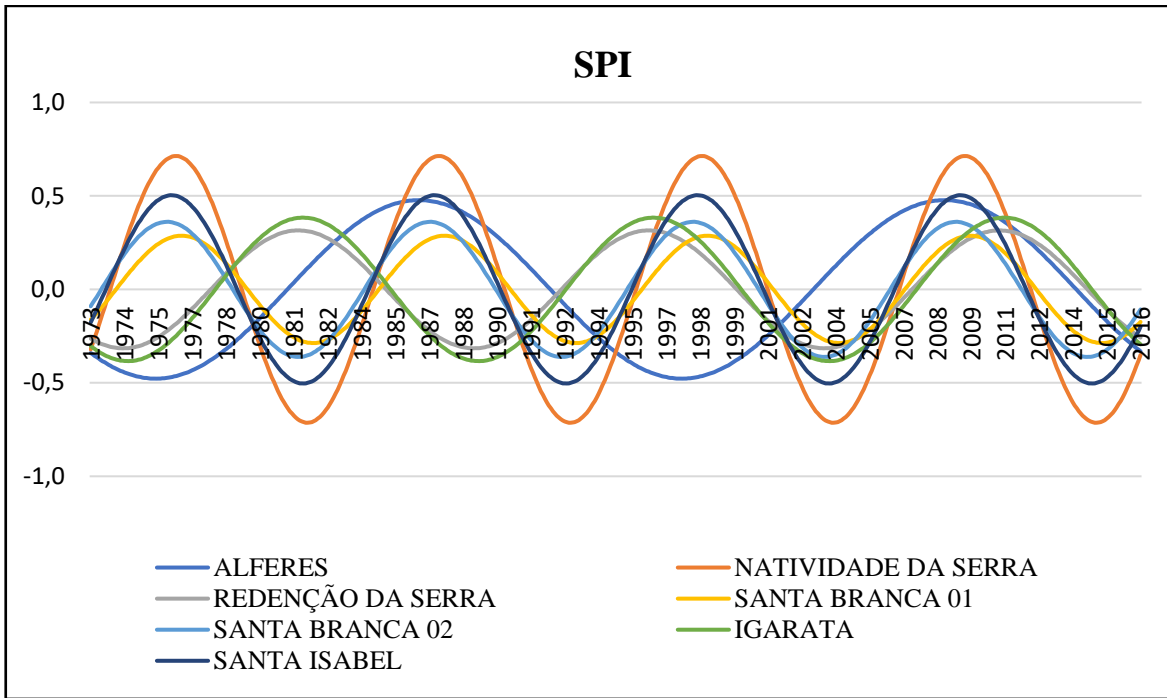


Figura 18: Gráfico dos primeiros harmônicos de SPI para todas as estações.

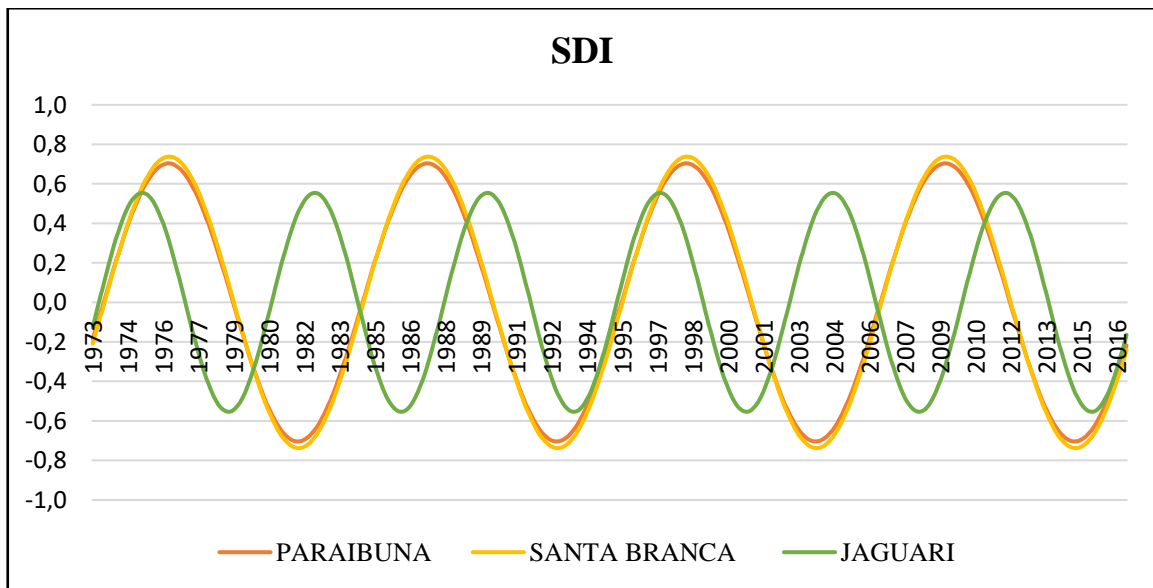


Figura 19: Gráfico dos primeiros harmônicos de SDI para todos os pontos de medição de vazão.

O primeiro e o terceiro harmônico são os mais representativos em comparação com os dados observados de SPI e SDI. As linhas com as frequências dos harmônicos foram plotadas em um gráfico com os índices mensais de SPI (Figura 20) e SDI (Figura 21) para toda série de dados.



Figura 20: Harmônicos séries de SPI para todas as estações.

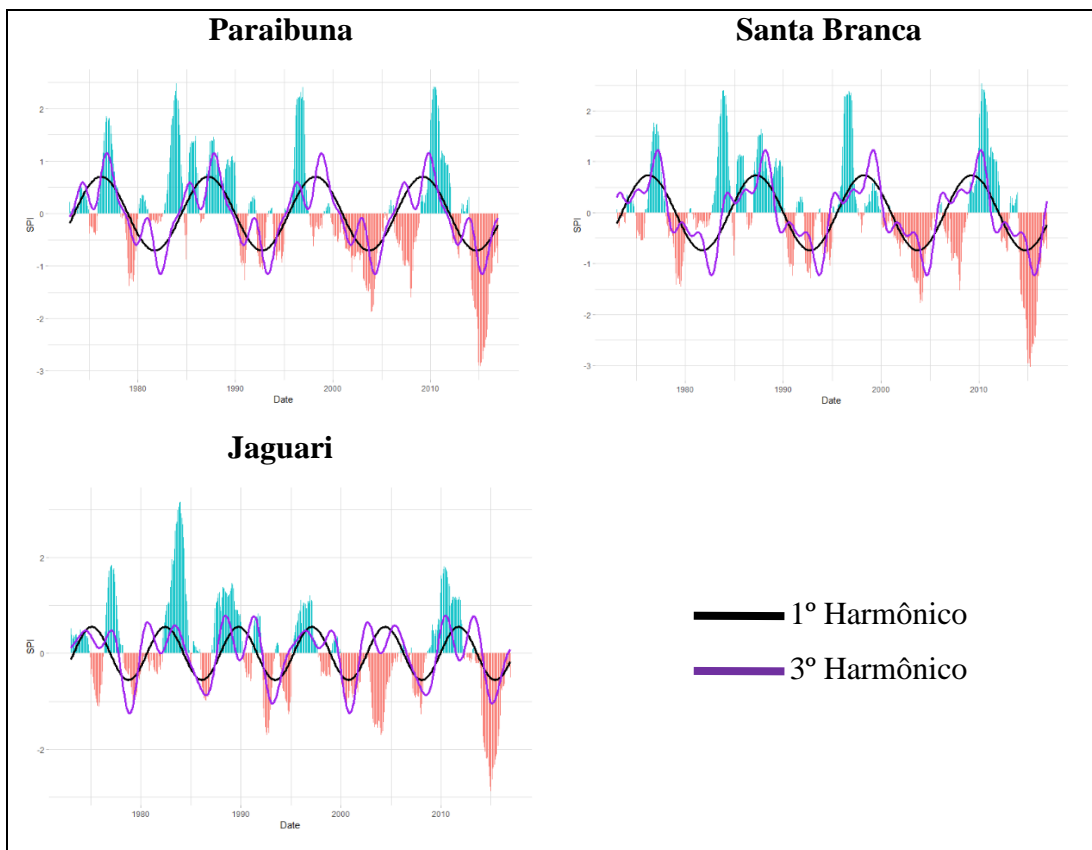


Figura 21: Harmônicos séries de SDI para todos os pontos de medição de vazão.

Os harmônicos conseguem descrever o sinal das anomalias de SPI e SDI. Entretanto quanto a frequência essa clareza não é expressada do mesmo modo conforme observado também por Lyra et al. (2017a). A variabilidade de 11 a 22 anos do primeiro harmônico para escala decadal pode estar relacionado a ocorrência de ODP e modos de variabilidade do Oceano Atlântico. A variabilidade de segundo e terceiro harmônico de entre 2 e 7 anos para escala interanual pode estar relacionada com o fenômeno ENOS. Entretanto como já discutido neste trabalho a região Sudeste tem sua precipitação fortemente influenciada pelas dinâmicas do oceano Atlântico (NIMER, 1972; SANT'ANNA NETO, 2005; REBOITA et al., 2010; MARENGO et al., 2012; MARENGO et al., 2015; COELHO et al., 2015). A influência forte da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Sistemas Frontais, as Linhas de Instabilidade e os Sistemas Convectivos de Mesoescala interferem no clima da região, tornando necessário estudos mais avançados dessa natureza para explicar a influência dos modos de variabilidade climática nas cabeceiras da bacia do Rio Paraíba do Sul.

6 CONCLUSÕES

A ocorrência de extremos de precipitação pode ser observada por meio das análises realizadas na região das cabeceiras da Bacia do Rio Paraíba do Sul. A utilização de índices padronizados possibilita a comparação dos extremos de precipitação e vazão, além de possibilitar a comparação com outras áreas de estudo que tenham os dados de entradas necessários para a realização das análises. As médias de precipitação entre todas as estações apresentam padrão tanto em quantidade quanto em variação durante o ano. Com chuvas de verão representando aproximadamente a metade das chuvas anuais e as chuvas de inverno menos de 10 % do total anual. As vazões anuais apresentam dinâmicas similares entre os pontos de medição nos reservatórios.

Ciclos de cerca de três a seis anos entre a ocorrência de anomalias extremas são observados nas séries. Nenhuma das estações e pontos de medição de vazão apresenta tendência na série analisada. Os extremos de precipitação e vazão apresentam, de modo geral, relação em sua frequência na maior parte dos anos onde foram caracterizadas as anomalias. Existe correlação entre as séries de SPI e SDI nas diversas escalas de tempo testadas. Entretanto, quanto à intensidade essa relação não pode ser observada de forma intensa. Alguns anos apresentam índices extremos de precipitação, que não são observados vazão, sendo o oposto também observado. A série pode ser dividida em duas partes distintas com padrões de anomalias positivas e negativas opostos em diferentes partes do ano hidrológico, interagindo com os semestres secos e úmidos e estação seca e chuvosa de forma distinta.

A análise harmônica e espectral possibilitou a identificação da relação entre os extremos de precipitação e vazão por meio do SPI e SDI com as escalas de tempo de atuação dos modos de variabilidade climática. Foi possível identificar a duração dos ciclos decadais e interanuais dos extremos de precipitação e vazão. Os ciclos decadais de aproximadamente 11 a 22 anos podem estar relacionados as fases de ODP e GITA. Os ciclos interanuais de cerca de dois a sete podem se relacionar com o fenômeno de ENOS. Não foi possível nesta pesquisa relacionar os eventos extremos com a ocorrência dos modos. Para isso é necessário a realização de estudos mais aprofundados, considerando a influência de todos os fatores meteorológicos atuantes na região.

A região de estudo é de relevante importância socioeconômica para região. Foi possível analisar os padrões de precipitação e vazão, que a área de estudo apresenta e, com base nisso possibilitar o planejamento das ações para redução dos riscos e estratégias de controle e mitigação

dos impactos dos extremos climáticos. Estes estudos podem ser integrados a análise dos impactos com base nos indicadores socioambientais da bacia e estudos relacionados a qualidade dos recursos hídricos. Em se tratando de índices padronizados os estudos realizados nesta região podem ser replicados para outras bacias de importância e usos similares, isso pode permitir a comparação dos resultados e fomentar estratégias conjuntas de pesquisa e gestão, além disso contribuir para futuras pesquisas relacionadas a área de recursos hídricos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – AGEVAP. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul: Diagnóstico dos Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – AGEVAP. *Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba Do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes relatório de diagnóstico: Tomo I, II e III*. Rio de Janeiro: 2014.

ALLEN, R.G. et al. *FAO Irrigation and drainage paper No. 56*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. p. 26-40.

AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. (eds.). *Base científica das mudanças climáticas*. PBMC, 2014: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 464 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília: 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *O Comitê de Bacia Hidrográfica: o que é e o que faz?* Brasília: 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília: 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Agência Nacional de Águas (Brasil) Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Sistema Hidráulico do rio Paraíba do Sul / Agência Nacional de Águas, Superintendência de Usos Múltiplos e Eventos Críticos*. Brasília: ANA, 2015a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras*. Brasília: 2015b. Edição Especial.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Agência Nacional de Águas (Brasil). Massas d'Água (Espelhos d'Água)*. Brasília: Coordenação de Conjuntura e Gestão da Informação, setembro de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília: 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *HIDROWEB*. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>> Acesso em: 28 março 2018.

BISWAS, Asit K. *Water for sustainable development in the 21st century*. International Journal of Water Resources Development, 1991. 7:4, 219-224.

BRASIL. *Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997: Política Nacional de Recursos Hídricos*. Brasília: 1997.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. *Anuário brasileiro de desastres naturais*. Brasília: Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Brasília: CENAD, 2012.84 p.

BRITO, Thábata T. et al. *Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil*. Meteorol Atmos Phys, 2017. 129:469–478.

CAÑÓN, Julio; GONZÁLEZ, Javier; VALDÉS, Juan. *Precipitation in the Colorado River Basin and its low frequency associations with PDO and ENSO signals*. Journal of Hydrology, 2007. 333, 252– 264.

CAVALCANTI, I. F. A.; SAMPAIO, G. *Teleconexões*. São José dos Campos: Climanálise, 1996.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO PARAÍBA DO SUL - CBH-PS. *Plano de bacias da UGRHI 02*. São Paulo: 2016a.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO PARAÍBA DO SUL - CBH-PS. *Relatório de Situação - Plano de bacias da UGRHI 02*. São Paulo: 2016b.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL - CEIVAP. *Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (SIGA-CEIVAP)*. Disponível em: <<http://sigaceivap.org.br/siga-ceivap/saibaMais>> Acesso em: 01 dezembro 2018.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. *Estudos relativos às mudanças climáticas e recursos hídricos para embasar o plano nacional de adaptação às mudanças climáticas: fundamentos conceituais – mudanças climáticas e adaptação no setor de recursos hídricos*. Fortaleza: 2014.

CHANG, C.-Y. et al. *Sulfate Aerosol Control of Tropical Atlantic Climate over the Twentieth Century*. Journal of Climate, 2011.

COELHO, Caio A. S. et al. *The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections*. Clim Dyn, 2015.

COHEN, Jacob. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1988.

COMET PROGRAM. *Introduction to tropical meteorology: chapter 5 - Tropical variability*. 2009.

COSTA, Fernanda da Serra. et al. *Consideração de variáveis macroclimáticas nos Estudos de Prevenção de Cheias no âmbito do planejamento da operação do Setor Elétrico Brasileiro*. XIV Symposium Of Specialists In Electric Operational And Expansion Planning, 2018.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. *São Paulo*. Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.gov.br/>> Acesso em: 01 dezembro 2018.

ENFIELD, David B.; MESTAS-NUFIE, Alberto M.; MAYER, Dennis A.; CID-SERRANO, Luis. *How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures?* Journal Of Geophysical Research, April 15, 1999. Vol. 104, No. C4, Pages 7841-7848.

ENGENHARIA DE CORPO DE ENGENHEIROS CONSULTORES. *Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul*. Brasília: ANA, 2010. 285p.

FERNANDES, Diego Simões et al. *Índices para a Quantificação da Seca*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009. 48 p.

GUDMUNDSSON, Lukas; STAGGE, James H.. Standardized Climate Indices Such as SPI, SRI or SPEI. The Comprehensive R Archive Network, 201. Version 1.0-2.

HAMED, Khaled H.; RAO, A. Ramachandra. *A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data*. Journal of Hydrology, 1998. 204, 182-196.

HUANG, Bohua; SHUKLA, J. *Characteristics of the Interannual and Decadal Variability in a General Circulation Model of the Tropical Atlantic Ocean*. American Meteorological Society, 1997.

HUANG, Bohua; SCHOPF, Paul S.; SHUKLA, J. *Intrinsic Ocean–Atmosphere Variability of the Tropical Atlantic Ocean*. Journal of Climate, June 2004. Volume 17.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – IMET. *Web Page*. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>> Acesso em: 01 dezembro 2018.

KITE, G.W. *Frequency and risk analyses in hydrology*. Water Resources Publications, 1988. p 257.

KOUDSTAAL, Rob; RIJSBERMAN, Frank R.; SAVENIJE, Hubert. *Water and sustainable development*. Natural Resources Forum, November 1992.

LANNA, Antonio Eduardo. *Introdução à Gestão das Águas no Brasil*. Porto Alegre: 2001.

LEMOS, Carlos Fernando; FISCH, Gilberto. *Análise espacial dos sistemas frontais que atuaram sobre a região do Vale do Paraíba entre 1981 e 1998*. Rio de Janeiro: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000.

LOPES, J. E. G.; SANTOS, R. C. P.. *Capacidade de Reservatórios*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, 2012.

LUCENA, Daisy Beserra; GOMES-FILHO, Manoel F.; SERVAIN, Jacques. *Avaliação do impacto de eventos climáticos extremos nos oceanos Pacífico e Atlântico sobre a estação chuvosa no nordeste do Brasil*. Revista Brasileira de Meteorologia, 2011. v.26, n.2, 297-312.

LYRA, G.B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; ZERI, M. *Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil*. International Journal of Climatology, v. 34, n. 13, p. 3546-3558, 2014a.

LYRA, Gustavo Bastos. et al. *Sistemas meteorológicos e a distribuição da precipitação pluvial no estado do Rio de Janeiro*. Seropédica: DCA/IF/UFRRJ, agosto, 2014b.

LYRA, G. B. et al. *Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies*. Meteorology and Atmospheric Physics, 2017a. 129:157-171 p. v. Volume 129 Number 2.

LYRA, Gustavo Bastos. et al. *Evaluation of methods of spatial interpolation for monthly rainfall data over the state of Rio de Janeiro, Brazil*. Theoretical and Applied Climatology, November 2017b.

MANTUA, N. J. et al. *Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production*. Bull Am Meteorol Soc, 1997. 78:1069–1079 p.

MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha; GOULARTE, Elvis Richard Pires. *Caracterização do Ano Hidrológico e Mapeamento Espacial das Chuvas nos Períodos Úmido e Seco do Estado do Tocantins*. Pernambuco: Revista Brasileira de Geografia Física, 2013. V. 06, N. 01. 091-099.

MARENGO, José A.; ALVES, Lincoln Muniz. *Tendências Hidrológicas da Bacia do Rio Paraíba do Sul*. Brasília: INPE, 2005.

MARENGO, José A. et al. *Recent developments on the South American monsoon system*. International Journal Climatology, 2012. 32: 1-21.

MARENGO, José A. et al. *A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo*. São Paulo: Revista USP, 2015. 31-44 p. v. 106.

MC KEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Boston, MA, USA: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993. 179-184 p.

MODARRES, Reza. *Streamflow drought time series forecasting*. Stoch Environ Res Risk Assess, 2007. 21:223–233.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. *On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with general circulation model*. Journal of the Atmospheric Sciences, 1981. Vol. 48, 2653-2675.

NALBANTIS, I.; TSAKIRIS, G. *Assessment of Hydrological Drought Revisited*. Water Resour Manage, 2009. 23:881–897.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. *Pacific Decadal Oscillation (PDO)*. Disponível em: <https://sealevel.jpl.nasa.gov/science/el_nino_pdo/> Acesso em: 01 abril 2019

NIMER, E. *Climatologia da Região Sudeste do Brasil: Introdução a Climatologia Dinâmica*. Revista Brasileira de Geografia, 1972. 34:3–48.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. *Multivariate ENSO Index - MEI Timeseries*. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>> Acesso em: 18 dez. 2018a

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. *Tropical Southern Atlantic Index - TSA Timeseries*. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>> Acesso em: 18 dez. 2018b

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. *Tropical Northern Atlantic Index - TNA Timeseries*. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>> Acesso em: 18 dez. 2018c

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. *Pacific Decadal Oscillation - PDO Timeseries*. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>> Acesso em: 18 dez. 2018d

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION – NOAA. *Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time-Series*. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>> Acesso em: 18 dez. 2018e

NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, L.A.; ALVES, L.M. *Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015*. Journal of Water Resource and Protection, 2016, 8, 252-262

NORTHWEST FISHERIES SCIENCE CENTER – NWFSC. *Pacific Decadal Oscillation (PDO)*. Disponível em: <<https://www.nwfsc.noaa.gov/research/divisions/fe/estuarine/oeip/ca-pdo.cfm>> Acesso em: 14 abril 2019

OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; LYRA, G.B.; GOIS, G.; BRITO, T.T.; MOURA, N.S.H. *Análise de homogeneidade de séries pluviométricas para determinação do índice de seca IPP no estado de Alagoas*. Floresta e Ambiente, 2012. 101–112 p.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS. *Crerios para estudos hidrológicos*. Submódulo 23.5. Resolução Normativa, nº 372/09. Ago. 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS. *Manual de Procedimentos da Operação: Conceitos e metodologias para a operação hidráulica dos reservatórios*. Novembro 2016.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS. *Diretrizes para as regras de operação de controle de cheias - bacia do rio paraíba do sul: ciclo 2018-2019*. Rio de Janeiro: Janeiro, 2018a.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS. *Manual de Procedimentos da Operação: Controle dos Reservatórios da Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste - Bacia do rio Paraíba do Sul*. Novembro 2018b.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS. *Plano anual de prevenção de cheias: ciclo 2018/2019*. Rio de Janeiro: Agosto, 2018c.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA – ONS. *Série Histórica Vazões Naturais Reservatório Bacia do Rio Paraíba do Sul*. Distribuição Interna, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. *Nações Unidas Brasil*. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/#>> Acesso em: 20 março 2019a.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. *Agenda 2030*. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>> Acesso em: 20 março 2019b.

ORLOWSKY, Boris. e Consistency, Homogeneity and Summary Statistics of Climatological Data. The Comprehensive R Archive Network, 2015. Version 1.0

PATAKAMURI, Sandeep Kumar; O'BRIEN, Nicole. *Modified Versions of Mann Kendall and Spearman's Rho Trend Tests*. The Comprehensive R Archive Network, 2019. Version 1.3.1.

POHLERT, Thorsten. *Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection*. The Comprehensive R Archive Network, 2018. Version 1.1.1.

R FOUNDATION. *The R Project for Statistical Computing*. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>> Acesso em: 01 dezembro 2018.

R DOCUMENTATION. *Augmented Dickey-Fuller Test*. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/aTSA/versions/3.1.2/topics/adf.test>> Acesso em: 30 Mai. 2019.

RAJSEKHAR, Deepthi; SINGH, Vijay P.; MISHRA, Ashok K.. *Hydrologic Drought Atlas for Texas*. Journal of Hydrologic Engineering, October 2014.

RAO, V. B.; DE LIMA, M. C.; FRANCHITO, S. H. *Seasonal and interannual variations of rainfall over Eastern Northeast Brazil*. Journal of Climate, 1993. 1754–1763 p. v. 6.

REBOITA, Michelle Simões; GAN, Manoel Alonso; ROCHA, Rosmeri Porfírio; AMBRIZZI, Tércio. *Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica*. Revista Brasileira de Meteorologia, 2010. v.25, n.2, 185 – 204.

SACHS, Jeffrey D. *The age of sustainable development*. New York: Columbia University Press, 2015.

SALVIANO, Marcos Figueiredo; GROppo, Juliano Daniel; PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz. *Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil*. Revista Brasileira de Meteorologia, 2016. v. 31, n. 1, 64-73.

SANT'ANNA-NETO, João Lima. *Decálogo da climatologia do sudeste Brasileiro*. São Paulo: Revista Brasileira de Climatologia, 2005, vol. 1. n°1.

SERVAIN, Jacques. *Simple Climatic Indices for the Tropical Atlantic Ocean and Some Applications*. Journal of Geophysical Research, 1991. vol. 96, no. c8, pages 15,137-15,146.

SHUKLA, Shraddhanand; WOOD, Andrew W. *Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought*. Geophysical Research Letters, 2008. VOL. 35.

SILVA, Maria Elisa Siqueira; SILVA, Carlos Batista. *Variabilidade Climática: processos físicos e dinâmicos nos oceanos e atmosfera*. São Paulo: Revista do Departamento de Geografia – USP, 2012. Volume Especial 30 anos. p. 372-406.

THOM, H. C. S. *A note on the gamma distribution*. Mon Weather, 1958. Rev 86:117–122

THOM, H. C. S. *Some methods of climatological analyses*. Geneva: World Meteorological Organization- WMO, 1966. 53 p. (Technical Note, 81).

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira; MACHADO, Pedro José de Oliveira. *Introdução à Climatologia*. Ubá: Ed. Geographica, 2008. 234p.

TRAPLETTI, Adrian et al. *Time Series Analysis and Computational Finance*. The Comprehensive R Archive Network, 2018. Version 0.10-46.

UELE, Dionísio Inocêncio; LYRA, Gustavo Bastos; OLIVEIRA-JUNIOR, José Francisco. *Variabilidade Espacial e Interanual das Chuvas na Região Sul de Moçambique, África Austral*. Revista Brasileira de Meteorologia, 2017. v. 32, n. 3, 473-484.

UELE, Dionísio Inocêncio. *Impactos dos Modos de Variabilidade Climática no Cultivo do Milho em Regime de Sequeiro: Uma Abordagem de Aplicação da Sustentabilidade Agrícola na Região Sul de Moçambique*. 169 p. (Dissertação Mestrado Práticas em Desenvolvimento Sustentável) Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC. *Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012*. Santa Catarina: Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, 2013. 2.ed. rev. ampl. 142 p.

UNITED NATIONS - UN. *Transforming our World: The 2030 agenda for sustainable development*. New York: September 2015.

UNITED NATIONS WATER - UN-Water. *The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind*. Paris: UNESCO, 2019a.

UNITED NATIONS WATER - UN-Water. *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2019: Não deixar ninguém para trás - Fatos e dados*. Brasília: ANA, 2019b.

UNITED NATIONS WATER - UN-Water. *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2019: Não deixar ninguém para trás - Resumo executivo*. Brasília: ANA, 2019c.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e climatologia*. Campinas: XIV Congresso de Agrometeorologia, 2005.

WILHITE, Donald A.; GLANTZ, Michael H. *Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions*. Drought Mitigation Center Faculty Publications, 1985. 20 p.

WILKS, D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2. ed. USA: Elsevier, 2006. International Geophysics Series.

WOLTER, K.; TIMLINB Michael S. *The southern oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis*. J Climate Appl Meteorol, 2011. 540–558 p.

WOLTER, Klaus. *The Southern Oscillation in Surface Circulation and Climate over the Tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as Captured by Cluster Analysis*. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1987. Vol. 26, 540-558.

ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; BATTISTI, D. S. *ENSO-like Interdecadal Variability: 1900–93*. J Clim, 1997. 1004–1020 p. v. 10.