

DANILO JOSÉ BRANDÃO VITOR SILVA

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO
E VAZÃO E SUAS CONSEQUÊNCIAS PARA A GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS REGIONAIS**

DANILO JOSÉ BRANDÃO VITOR SILVA

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO
E VAZÃO E SUAS CONSEQUÊNCIAS PARA A GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS REGIONAIS**

Tese apresentada a Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na área de
Energia.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho
Simões

Coorientadora: Profa. Dra. Isabel Cristina de
Barros Trannin

Guaratinguetá – SP
2017

Palavras-chave: Krigagem. Tendência de precipitação. Tendência de vazão. Teste de Mann-Kendall. Bacia do rio Paraíba do Sul.

S586v	Silva, Danilo José Brandão Vitor Variabilidade espaço-temporal da precipitação e vazão e suas conseqüências para a gestão dos recursos hídricos regionais / Danilo José Brandão Vitor Silva – Guaratinguetá, 2017 108 f. : il. Bibliografia: f. 96-108 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões Coorientadora: Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin 1. Krigagem. 2. Recursos hídricos-desenvolvimento. 3. Hidrologia. 4. Bacias (Geologia). I. Título CDU 556.18
-------	---

DANILO JOSÉ BRANDÃO VITOR SILVA

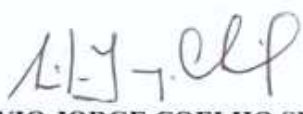
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMÕES
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP/FEG


Prof. Dr. TATIANA SUSSEL GONÇALVES MENDES
UNESP/ICT


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS TARGA
UNITAU


Prof. Dr. ANDRÉ LUIZ ZANGIACOMO
UFLA

Janeiro de 2017

DADOS CURRICULARES

DANILO JOSÉ BRANDÃO VITOR SILVA

NASCIMENTO	28.11.1980 – PINDAMONHANGABA/ SP
FILIAÇÃO	Benedito Vitor da Silva Filho Raquel Maria Trani Brandão Silva
2000/2006	Curso de Graduação de Engenharia Civil Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP
2007/2009	Mestrado em Engenharia Civil Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP

Dedico este trabalho, de modo especial, a Deus por ter providenciado os meios necessários para realizá-lo e também a minha esposa, Nadia, por ter me incentivado a superar os desafios encontrados nesta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo dom da vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões, e a minha coorientadora, Profa. Dra. Isabel Cristina de Barros Trannin, por terem compartilhado seus conhecimentos e experiências, os quais foram essenciais para a realização deste estudo.

A minha querida e amada esposa, Nadia, pela demonstração de amor e carinho durante este período de desafios e desenvolvimento pessoal.

Aos meus pais, Benedito Vitor e Raquel, pelo apoio incondicional nesta caminhada.

Ao meu sogro, Sr Farid, pelo exemplo de motivação e de busca constante pelo conhecimento.

Aos meus tios, Brandão e Sirlei, pelo incentivo e apoio para a realização deste trabalho.

Ao meu amigo, Ivair, pela ajuda em momentos importantes.

Aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela cordialidade e presteza, especialmente a Ana Maria, Rosana e Edson.

A todos os funcionários da seção de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela paciência.

Ao Alexandre do ICT-UNESP, pela disponibilidade em me auxiliar na utilização dos softwares SIG.

SILVA, D.J.B.V. **Variabilidade espaço-temporal da precipitação e vazão e suas consequências para a gestão dos recursos hídricos regionais**. 2017. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2017.

RESUMO

Este trabalho analisou os parâmetros hidroclimatológicos, buscando encontrar o padrão de precipitação em uma abordagem espaço-temporal para a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul, empregando o interpolador geoestatístico krigagem. Além disso, verificou a existência de tendência de precipitação e de vazão em séries históricas nesta mesma bacia, utilizando o teste estatístico de Mann-Kendall. Com relação a espacialização da precipitação, foi constatada uma significativa variação espacial para os períodos analisados (verão, outono, inverno e primavera). No verão, período de recarga dos reservatórios, foram registrados os menores índices de precipitação na área de contribuição das sub-bacias que abastecem os reservatórios do Paraíba e do Jaguari, implicando em uma possível redução na vazão afluente. Não se constatou tendência de precipitação estatisticamente significativa em escala de tempo interanual para os postos pluviométricos, entretanto, foi identificada tendência de diminuição para o outono. Para os postos pluviométricos das sub-bacias do rio Paraíba, do rio Paraitinga e do rio Jaguari-Buquira, em um período interanual, houve tendência de aumento de vazão para séries históricas de 1930 a 1970 e de diminuição para séries de 1930 a 2015. As estações de medição de vazão utilizadas foram aquelas localizadas a montante dos reservatórios, não estando submetidas assim ao efeito de regularização de vazão. A tendência de diminuição de vazão encontrada para a região pode levar a uma alteração na disponibilidade hídrica e a um possível impacto no abastecimento e na geração de energia.

PALAVRA-CHAVE: Krigagem. Tendência de precipitação. Tendência de vazão. Teste de Mann-Kendall. Bacia do rio Paraíba do Sul.

SILVA, D.J.B.V. **Spatial-temporal variability of precipitation and flow and its consequences for the management of regional water resources.** 2017. 108 f. Thesis (Philosophy Doctor degree in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2017.

ABSTRACT

This research analyzed the hydroclimatological parameters, seeking to find the precipitation pattern in a space-time approach for the São Paulo portion of the Paraíba do Sul river basin, using the geostatistical interpolator kriging. In addition, it verified the existence of precipitation and streamflow trends in historical series for the same basin, using the statistical test of Mann-Kendall. Regarding the precipitation pattern, a significant spatial variability was observed for the periods analyzed (summer, autumn, winter and spring). In the summer, reservoir recharge period, the lowest precipitation rates were recorded in the sub-basin contribution area that supply the Paraibuna and Jaguari reservoirs, implying a possible reduction in the inflow. There was no statistically significant precipitation trend in the interannual time scale for the pluviometric stations, however, a decrease trend was identified for the autumn. For fluviometric stations in the sub-basins of the Paraibuna, Paraitinga and Jaguari-Buquira rivers, in the interannual time scale, there was a trend towards an increase in streamflow for historical series from 1930 to 1970 and decrease for series from 1930 to 2015. The streamflow stations used were those located upstream of the reservoirs and were not subject to the effect of flow regulation. The downward trend in streamflow found in the region can lead to a change in water availability and a possible impact on the supply and energy generation.

KEYWORDS: Kriging. Precipitation trend. Streamflow trend. Mann-Kendall test. Paraíba do Sul river basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Volume útil dos reservatórios da UGRHI - 02 em relação ao volume útil total no Estado	26
Figura 2 -	Sistema Nacional de Recursos Hídricos	27
Figura 3 -	Situação da precipitação no Brasil de 2012 a 2014	33
Figura 4 -	Energia Armazenada no Subsistema Sudeste/ Centro-Oeste do Brasil até ago/2015	36
Figura 5 -	Energia Armazenada no Subsistema Nordeste do Brasil até ago/2015.....	36
Figura 6 -	Energia Armazenada no Subsistema Norte-Interligado do Brasil até ago/2015	37
Figura 7 -	Energia Armazenada no Subsistema Sul do Brasil até agosto de 2015.....	37
Figura 8 -	Evolução da capacidade de geração da energia hidráulica para o período de 2011 a 2015*.....	38
Figura 9 -	Criticidade da precipitação de janeiro a março entre 2012 e 2014 no Sudeste ..	40
Figura 10 -	Evolução do reservatório equivalente da Bacia do Rio Paraíba do Sul – volume acumulado desde 1994.....	41
Figura 11 -	Vazões mensais dos afluentes ao reservatório Paraibuna.....	42
Figura 12 -	Desenho típico de um semivariograma e suas propriedades	52
Figura 13 -	Localização da área de estudo	58
Figura 14 -	Mapa Geológico da bacia do rio Paraíba do Sul porção paulista	59
Figura 15 -	Mapa geomorfológico da bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista).....	60
Figura 16 -	Mapa pedológico da bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista).....	61
Figura 17 -	Modelo Digital da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul	64
Figura 18 -	Semivariograma para dados de precipitação do período JJA	66
Figura 19 -	Precipitação média mensal da bacia do rio Paraíba do Sul de janeiro de 2010 a dezembro de 2014.....	69
Figura 20 -	Distribuição espacial da precipitação durante o período DJF indicando as áreas com maiores precipitações.....	71
Figura 21 -	Distribuição espacial da precipitação durante o período MAM	72
Figura 22 -	Distribuição espacial da precipitação durante o período JJA	73
Figura 23 -	Distribuição espacial da precipitação durante o período SON	74
Figura 24 -	Comportamento das tendências para os dados de precipitação da bacia do rio Paraíba do Sul (1970 – 2014)	75

Figura 25 - Localização dos postos pluviométricos com tendência de diminuição de precipitação	77
Figura 26 - Tendência das estações pluviométricas em escala de tempo interanual localizadas na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul	78
Figura 27 - Série temporal de precipitação (1982 até 2014) das estações pluviométricas que apresentaram tendência de diminuição de precipitação na porção paulista do Vale do Paraíba do Sul	79
Figura 28 - Comportamento das tendências de vazão para a bacia do rio Jaguari-Buquira (1932-1972)	81
Figura 29- Comportamento das tendências para a vazão para a bacia do rio Paraibuna-Paraitintiga (1931-1978)	83
Figura 30 - Comportamento das tendências de vazão para a bacia do rio Paraibuna-Paraitinga (1935 – 2014)	84
Figura 31 - Concentração de plantação de eucalipto nos municípios da porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul para os anos de 2000, 2007, 2010 e 2013	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Matriz Elétrica Brasileira.....	30
Tabela 2 -	Dados dos postos pluviométricos utilizados.....	63
Tabela 3 -	Postos pluviométricos empregados para análise das tendências de precipitação em períodos intra e interanual.....	76
Tabela 4 -	Postos fluviométricos situados na bacia do rio Jaguari-Buquira, empregados para análise das tendências das vazões em períodos intra e interanual (década de 30 a 70).....	81
Tabela 5 -	Posto fluviométrico situado na bacia do rio Jaguari-Buquira, empregado para análise das tendências das vazões em períodos intra e interanual (década de 70 a 2015).....	82
Tabela 6 -	Postos fluviométricos situados na bacia do rio Paraibuna-Paraitinga. Para análise de tendência intra e interanual (década de 30 a 70).....	83
Tabela 7 -	Postos fluviométricos situados na bacia do rio Paraibuna-Paraitinga, empregados para análise das tendências das vazões em períodos intra e interanual (década de 30 a 2015)	84
Tabela 8 -	Áreas plantadas com eucalipto para os anos de 2000, 2007, 2010 e 2013	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGEVAP	Agência da Bacia do Rio Paraíba do Sul
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BLUE	Best Linear Unbiased Estimation
CEIVAP	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
COPPE-UFRJ	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CPTEC	Centro de Estudos do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DGI	Divisão de Geração de Imagens
DIEESE	Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos
DJF	Dezembro – Janeiro – Fevereiro
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GTADH	Grupo de Trabalho Permanente de Acompanhamento da Operação Hidráulica
HIDROWEB	Sistema de Informações Hidrológicas
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Changes
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IQD	Inverso do Quadrado da Distância
JJA	Junho – Julho – Agosto
MAM	Março-Abril-Maio
MLT	Média de Longo Termo
MMA	Ministério do Meio Ambiente

NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
OBT	Coordenação Geral de Observação da Terra
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PBMC	Painel Brasileiro de Mudança Climática
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIGEL	Sistema de Informações Georreferenciadas
SIGRH	Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo
SIN	Sistema Interligado Nacional
SON	Setembro – Outubro – Novembro
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UGRHI-02	Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Paraíba do Sul
VR	Variável Regionalizada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVOS.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO.....	20
2.2 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	22
2.2.1 Usos múltiplos da bacia do rio Paraíba do Sul	25
2.2.2 Gestão hídrica na bacia do rio Paraíba do Sul	27
2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO BRASIL.....	29
2.4 CRISE HIDROENERGÉTICA NO BRASIL EM 2014	31
2.4.1 Crise hídrica.....	31
2.4.2 Crise hidroenergética	35
2.4.3 Crise energética nas usinas de Paraibuna e Santa Branca.....	39
2.5 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA PARA ANÁLISE DE DADOS HIDROLÓGICOS.....	43
2.5.1 Sistema de Informação Geográfica.....	43
2.5.2 Modelos de Dados Espaciais.....	44
2.5.3 Base de dados georreferenciados	45
2.5.3.1 DGI (Divisão de Geração de Imagens).....	45
2.5.3.2 Base de dados do CPTEC	46
2.5.3.3 SISCOM (Sistema Compartilhado de Informações Ambientais).....	46
2.5.3.4 Base de dados online do MMA	46
2.5.3.5 Base de dados online da EMBRAPA	46
2.5.3.6 Base de dados online do IBGE.....	47
2.5.3.7 Base de dados online do CPRM.....	47
2.5.3.8 HIDROWEB	47
2.5.3.9 SIGEL.....	48
2.5.4 Geoestatística	48
2.5.4.1 Krigagem.....	51
2.6 ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE SERIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO.....	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	58
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	59
3.2.1 Geologia, geomorfologia e pedologia da área de estudo	59

3.3	METODOLOGIA PARA GERAR MAPAS DE PRECIPITAÇÃO.....	61
3.3.1	Escolha das estações pluviométricas	61
3.3.2	Inserção de dados das estações pluviométricas em ambiente SIG	64
3.3.3	Procedimento geoestatístico para geração de mapa de previsão de precipitação.....	65
3.4	METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA EM SÉRIES HISTÓRICAS PLUVIOMÉTRICAS E FLUVIOMÉTRICAS.....	66
4	RESULTADOS.....	69
4.1	PRECIPITAÇÃO MÉDIA DA ÁREA DE ESTUDO.....	69
4.2	ANÁLISE ESPACIAL DAS PRECIPITAÇÕES.....	70
4.3	ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO.....	74
4.4	ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE VAZÃO NAS SUB-BACIAS DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	79
4.4.1	Análise dos dados fluviométricos para a bacia do Jaguari-Buquira	80
4.4.2	Análise dos dados fluviométricos para a bacia do rio Paraibuna e do rio Paraitinga.....	82
5	DISCUSSÃO.....	85
5.1	ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO	85
5.2	VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E DA VAZÃO	85
5.2.1	Análise de tendência de precipitação	85
5.2.2	Análise de tendência de vazão	86
5.3	INTERFERÊNCIA DA SILVICULTURA NOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO TESTE DE MANN-KENDALL	87
5.4	VARIABILIDADE DAS PRECIPITAÇÕES E DAS VAZÕES E A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	91
6	CONCLUSÕES	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

O comportamento da precipitação e da vazão deve ser observado quando se quer realizar o gerenciamento dos recursos hídricos com a finalidade de atender aos usos múltiplos como o abastecimento, a irrigação, a geração de energia e as atividades industriais.

Segundo Almeida et al. (2011), dentre os parâmetros meteorológicos, a precipitação é a que apresenta a maior variabilidade temporal e espacial, sendo, desta forma, o de maior dificuldade de estimativa, o que tornaria fundamental a caracterização do seu padrão de distribuição local e as suas variações.

Silva et al. (2003) ressaltam que dentre as técnicas estatísticas usadas para análise e interpretação de dados climáticos, encontra-se a geoestatística, que tem como característica principal a análise da distribuição espacial e/ou temporal entre as observações, determinando a distância ou período de tempo de dependência entre estas. Dentre os processos de geoestatística empregados para estimar valores distribuídos no tempo e no espaço, pode-se mencionar a técnica da krigagem, que possui como pressuposto a não geração de resultados tendenciosos e apresenta um estimador linear imparcial (Clark, 1979).

Atualmente, tem sido utilizado o interpolador geoestatístico krigagem para realizar estudos de espacialização da magnitude de precipitação tanto no Brasil como em outros países. Alguns pesquisadores que realizaram trabalhos utilizando esta técnica foram Viola et al. (2010), Rio et al. (2011) e Sandighi e Vafakhan (2015).

O teste de Mann-Kendall é um teste estatístico que tem sido aplicado extensivamente para realizar análise de tendência de série de dados pluviométricos e fluviométricos no Brasil e em diversas outras regiões do mundo (Lettenmaier et al., 1994; Marengo e Alves, 2005; Stahl et al., 2010; Lacruz et al., 2012).

De dezembro de 2013 a janeiro de 2015, o Sudeste do Brasil experimentou uma de suas piores secas de sua história. De acordo com o estudo realizado pela Agência Nacional de Águas – ANA (2015a), as precipitações ocorridas no ano de 2014, registradas por grande parte das estações pluviométricas localizadas na região sudeste do país, apresentaram período de retorno superior a 100 anos. Nesta região brasileira, nas bacias hidrográficas do rio Paraíba do Sul e do Guandu, localiza-se o Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul, um complexo conjunto de estruturas hidráulicas. Este sistema apresentou neste período os menores níveis já registrados em seu reservatório.

Em janeiro de 2015, o nível do reservatório equivalente do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul atingiu o volume morto, superando assim os marcos históricos anteriores. Em razão da baixa disponibilidade de água nos reservatórios, neste mesmo mês, as usinas hidrelétricas de Paraibuna e de Jaguari, pertencentes ao Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul, pararam de gerar energia em razão do deplecionamento dos seus reservatórios. A Agência Nacional de Águas - ANA (2015a) afirma que as vazões afluentes ao reservatório de Paraibuna para o ano de 2014 foram muito inferiores as vazões médias do período entre 1995 a 2014, principalmente no período de verão, período em que ocorre o replecionamento dos reservatórios. Houve meses em 2014 que a vazão afluente do reservatório de Paraibuna atingiu apenas 30% da vazão média. Em meados de fevereiro de 2015, com o aumento do nível dos reservatórios, as duas usinas hidrelétricas, que tinham parado de gerar energia por falta de água, voltaram a funcionar.

A bacia do rio Paraíba do Sul é a bacia de ligação entre as principais metrópoles do país, São Paulo e Rio de Janeiro, sendo desta forma, uma região de grande importância econômica. Caracteriza-se pelos acentuados conflitos de usos múltiplos e pelo desvio de suas águas para a bacia hidrográfica do rio Guandu com a finalidade de promover, conforme COPPETEC (2014), o abastecimento de 8,6 milhões de pessoas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

Este trabalho analisou os parâmetros hidroclimatológicos da porção paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, buscando identificar a distribuição espacial da precipitação em escala de tempo intra-anual e verificar a existência de tendência de precipitação e de vazão.

A espacialização da precipitação identifica a localização e a magnitude da concentração de precipitação e o estudo de tendência de precipitação e de vazão indica uma mudança nos parâmetros de precipitação e de vazão, apontando para uma direção de diminuição ou aumento. Estas informações poderão auxiliar na gestão dos recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul, uma vez que permite a visualização de áreas com menor disponibilidade hídrica e a identificação de áreas que estão apresentando variabilidade climática regional, podendo contribuir desta forma, com a gestão dos reservatórios existentes na região, os quais são responsáveis pelo abastecimento e a geração de energia elétrica.

A bacia do rio Paraíba do Sul foi a área escolhida por apresentar recorrentes eventos de estresse hídrico, pela sua importância econômica no desenvolvimento regional e também por possuir uma rede de dados pluviométricos e fluviométricos disponíveis.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em identificar o padrão de precipitação da porção paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, como também verificar as tendências hidroclimatológicas, com dados históricos das últimas três décadas.

Os objetivos específicos são:

- Analisar o padrão de precipitação em uma abordagem espaço-temporal;
- Identificar, por meio do teste de Mann-Kendall, se há tendência de precipitação e de vazão com significância estatística e com nível de confiança igual a 95%;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO

Com o aquecimento da atmosfera, espera-se entre outras consequências mudanças nos padrões da precipitação, bem como o aumento da intensidade e da variabilidade, o que poderá afetar significativamente a disponibilidade e a distribuição temporal da vazão nos rios (ANA, 2010).

Conforme Gleick (1989), uma das consequências mais importantes das mudanças climáticas está relacionada com a alteração dos ciclos hidrológicos regionais que podem impactar os recursos hídricos quantitativa e qualitativamente.

A variabilidade dos recursos hídricos de curto, médio e longo prazo pode comprometer o desenvolvimento das atividades em diferentes setores socioeconômico (TUCCI, 2002).

No Brasil, por suas características de geologia e de clima, aparecem como desastres naturais mais comuns as inundações e as secas, que estão relacionados à ocorrência de fenômenos climáticos, em especial aos denominados “eventos extremos” (ANA, 2010).

As inundações e as secas decorrentes das alterações climáticas podem causar impactos econômicos e sociais. De acordo com São Paulo (2016), recursos financeiros são gastos na recuperação de perdas causadas pelas enchentes, oriundas de aumento da variabilidade climática e um crescente número de pessoas têm sido afetadas pelas secas, ligadas ao aumento de temperatura e decréscimo de precipitação.

Alguns estudos apontam para a alteração de padrão de precipitação e de vazão em algumas bacias hidrográficas como a do rio Alzette na Europa.

A bacia do rio Alzette ocupa parte do território Francês e Luxemburgues e acomoda uma população equivalente a dois terços de Luxemburgo e uma importante infraestrutura industrial. Os efeitos da precipitação sobre a vazão nesta bacia foram investigados por Pfister et al. (2000). Estes autores observaram que desde a década de 70 tem havido uma modificação no padrão de precipitação na bacia do rio Alzette, com elevação de intensidade e de duração, o que gerou um aumento significativo na vazão máxima durante o período de inverno, fato incomum para este período sazonal.

Pesquisa realizada por Svensson et al. (2006) indicam, nos últimos 30 anos, um aumento global da precipitação com uma tendência para invernos mais úmidos e verões mais secos no Reino Unido e em algumas partes da Europa. Para a Inglaterra e para o País de Gales, nesta mesma pesquisa, foram identificadas grandes variações sobre a média de longo

prazo na série temporal de precipitação de inverno (dezembro a fevereiro). Houve também o registro de um aumento de precipitação desde a década de 20, apresentando nos 10 anos anteriores a 2004 a maior média de precipitação desde 1766.

De acordo com Galvão e Bermann (2015), além das questões climáticas, outros fatores que contribuem para a diminuição na disponibilidade dos recursos hídricos devem ser considerados, como a ampliação na necessidade de abastecimento devido ao aumento populacional, o aumento na ocupação do solo, responsável pela mudança nos níveis de infiltração e escoamento de água, o aumento nas atividades produtivas e o aumento na poluição das águas.

O uso do solo e o seu manejo também podem estar relacionados a variabilidade das vazões e por consequência implicando na disponibilidade hídrica. Para Changnon e Demisse (1996), as mudanças climáticas podem interferir na vazão dos rios, porém o estudo dessas alterações deve ser feito com parcimônia, visto que também as modificações no uso do solo, na drenagem e no uso da água podem interferir no comportamento hidrológico.

Para discernir entre os efeitos antrópicos em uma bacia daqueles produzidos pela precipitação ao longo do tempo, estes autores compararam o escoamento médio anual durante os anos de 1940 a 1990, em dois tipos de bacia (uma em área rural e outra em área urbanizada), localizadas no oeste dos Estados Unidos. As bacias apresentaram tendências significativas que apontavam para aumento na precipitação anual e nos fluxos médios anuais. As mudanças antropogênicas afetaram o escoamento em ambas as bacias, entretanto nas rurais essa interferência foi de dois terços das flutuações no escoamento médio, enquanto que a precipitação representou o outro terço. Os resultados da pesquisa indicaram a necessidade de uma análise cuidadosa das características naturais da bacia (tipos de solos, formas da bacia) e das alterações de drenagem e do uso do solo a fim de compreender a interferência da precipitação nas condições hidrológicas.

Tucci e Clarke (1997) afirmam que as modificações naturais e artificiais na cobertura vegetal das bacias hidrográficas podem influenciar o seu comportamento hidrológico.

O impacto do desmatamento deve ser analisado na vazão média, na vazão mínima e na vazão máxima, considerando interferência como: as diferenças de estado de umidade do solo; a climatologia sazonal; as diferenças de elevação; a profundidade do solo e declividade; o grau de alteração devido ao método de desmatamento; o grau de desmatamento da bacia; e a cobertura que substitui a floresta ou a vegetação (TUCCI e CLARKE, 1997).

Tucci e Mendes (2006) afirmam que o desmatamento geralmente tende a aumentar a vazão média em função da diminuição da evapotranspiração, além disso, a supressão da vegetação pode gerar um aumento das vazões máximas e uma diminuição do fluxo mínimo, entretanto há a possibilidade de ocorrer situações singulares distintas dessas. Para este mesmo autor o reflorestamento tende a recuperar condições anteriormente existentes da superfície do solo.

2.2 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A água é um bem fundamental à existência. Com o desenvolvimento da sociedade, verifica-se uma demanda cada vez mais crescente deste recurso natural, ocorrendo o aumento em quantidade e variedade de utilizações.

No passado, a água era utilizada, principalmente, para dessedentação, uso doméstico, criação de animais e para uso agrícola, mas, à medida que a civilização se desenvolveu, outros tipos de usos foram surgindo (TUCCI, 2014),

Miranda (2012) afirma que o aumento populacional dos centros urbanos, o desperdício e a poluição são fatores que devem ser considerados para explicar a grande demanda por água. Esta demanda pode ter como consequência conflitos de usos por qualidade e quantidade. De acordo com este mesmo autor, a perda de qualidade e escassez da água trazem prejuízos à saúde das pessoas, às atividades econômicas e sociais e ao meio ambiente em geral. Em contrapartida, a disponibilidade hídrica pode viabilizar o desenvolvimento econômico e social.

A distribuição desigual de água pode agravar ainda mais a situação com relação a disponibilidade de água, havendo regiões com abundância de água e outras tantas com déficit para suprir as necessidades da população.

O Brasil possui uma distribuição desigual do volume e disponibilidade de recursos hídricos: enquanto um habitante do Amazonas tem 700.000 m³ de água por ano disponíveis, um habitante da Região Metropolitana de São Paulo tem 280 m³ (TUNDISI, 2008).

Independente do posicionamento de pesquisadores que debatem as causas das mudanças climáticas globais, seja originada pelas atividades humanas e/ou naturais, uma série de estudos apontam que a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos vêm sendo alterada pelos atuais dinamismos climáticos (DOS SANTOS, 2010).

Quando o padrão espacial de disponibilidade de água não está em sintonia com o padrão espacial das necessidades, a solução é a busca de água no subsolo ou superficialmente, em outras localidades.

Um exemplo disso foi a proposta do governo paulista em abril de 2014 de transposição de água do reservatório do Jaguari, pertencente ao Sistema Hidráulico do rio Paraíba do Sul (porção paulista) para o Sistema Cantareira, sistema que abastece uma parte da Região Metropolitana de São Paulo. O custo da obra é de aproximadamente R\$ 830 milhões e calcula-se que tal ligação levará, em média, 5.130 a 8.500 litros de água por segundo do rio Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira (GALVÃO e BERMANN, 2015).

Assinala Galvão e Bermann (2015) que um estudo a respeito do projeto de transposição concebido em 2010 elaborado por pesquisadores do Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente da COPPE-UFRJ, contratados pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) do Estado do Rio de Janeiro, e que foi apresentado ao governo fluminense em 2013, indica que a obra de transposição poderia diminuir em 4,2% a capacidade de geração de energia dos reservatórios da principal bacia hidrográfica do estado e que essa queda de capacidade em virtude de menor vazão do rio teria um impacto negativo de R\$ 20 milhões por ano para as geradoras e distribuidoras de energia.

Considerando a criação de reservatórios para a reserva de água como uma solução em períodos de necessidade, a extração de água em mananciais subterrâneos (aquíferos) pode também ser uma sugestão para a região de grande demanda, desde que se estabeleça uma taxa de extração adequada para se evitar o rebaixamento do lençol freático e a diminuição de disponibilidade hídrica (TUCCI, 2014).

Um alerta que se faz é com os usos excessivos que incluem as águas superficiais e subterrâneas, que são reservas importantes e substanciais de água em algumas regiões do planeta. Há uma enorme necessidade de redução desse uso com a introdução de tecnologias adequadas, eliminação dos desperdícios e introdução de reuso e reciclagem (TUNDISI, 2008).

Diante dessas questões, procura-se alcançar um equilíbrio entre os múltiplos usos dos recursos hídricos e o controle de sua qualidade e quantidade, buscando atingir um desenvolvimento sustentável. A necessidade de harmonização dos diversos usos, seja por regulamentações, seja por expansão da oferta deve ser realizada em uma base de gerenciamento integrado, de forma a ampliar ou adequar as disponibilidades hídricas com as diversas demandas (TUCCI, 2014).

Visto a importância dos recursos hídricos para o Brasil, a sua gestão não deve se restringir apenas em um âmbito privado. A Constituição Federal atribui à União e aos Estados a propriedade dos recursos hídricos e determina que o poder público deve instituir um Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

A Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil é instituída pela Lei Federal nº 9.433/97 que estabelece a bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento para coordenar e articular os seus diferentes usos e controles. Entre os seus fundamentos encontra-se o compromisso da gestão dos recursos hídricos em viabilizar o uso múltiplo da água e em realizar um gerenciamento descentralizado, em que haja a participação de diferentes níveis do poder público, dos usuários e das comunidades no processo de tomada de decisão.

O gerenciamento dos recursos hídricos é uma atividade complexa que envolve uma equipe multi e interdisciplinar. Esta deve promover a integração dos diferentes usos, atendendo aos interesses sociais, econômicos, culturais e ambientais, a fim de reduzir conflitos.

De acordo com Tundisi (2006), processou-se, nos últimos dez anos do século XX, a mudança de paradigma quanto à gestão, passando do gerenciamento de um sistema setorial, local e de resposta a crises e impactos, para um sistema integrado, preditivo e no âmbito de ecossistema (bacia hidrográfica).

A solução para os problemas referentes à água se encontra no desenvolvimento de sistemas adequados de gestão, na procura permanente de inovações tecnológicas e ainda na adoção de medidas estruturais e não-estruturais para a gestão integrada e preditiva das águas (TUNDISI, 2006). A preparação de gestores com novas abordagens é outra necessidade para o avanço da gestão de recursos hídricos no século XXI (TUNDISI, 2008).

A projeção para o futuro com relação à demanda por água não é otimista. Como já visto, com o aumento da população global crescerá a necessidade de recursos hídricos para a produção de alimentos, consumo doméstico e atividades industriais e aliado a isso há as mudanças climáticas e o desperdício que afetam fortemente a disponibilidade da água. A gestão de recursos hídricos, buscando encontrar soluções que contribuam para o uso racional e equilibrado da água, objetivará garantir sua utilização e sustentabilidade.

2.2.1 Usos múltiplos da bacia do rio Paraíba do Sul

O rio Paraíba do Sul é um rio de porte mediano (COPPETEC, 2006) e está localizado em uma bacia de mesmo nome, que tem um importante parque industrial com mais de 6.000 unidades fabris e responde por aproximadamente 11% do PIB nacional (IORIS, 2011).

A bacia do rio Paraíba do Sul é ocupada por três Estados, sendo 25% pelo Estado de São Paulo, 39% pelo Rio de Janeiro e 36% por Minas Gerais e em 2010, a quantidade de água consumida por estes Estados foram: Rio de Janeiro 66%, São Paulo 24% e Minas Gerais 10% (AGEVAP, 2013).

Vinte e oito municípios pertencentes aos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro são banhados pelo rio Paraíba do Sul e captam água para abastecimento público (GALVÃO e BERMANN, 2015). O Rio Paraíba do Sul se destaca como um dos principais mananciais para suprimento de água da região metropolitana do Rio de Janeiro por meio da transposição desse rio para a bacia hidrográfica do rio Guandu (ANA, 2015a), abastecendo 8,6 milhões de pessoas (COPPETEC, 2014). Isso evidencia a importância do rio Paraíba do Sul para o abastecimento humano.

Existem aproximadamente 120 hidrelétricas em operação na bacia, entre pequenas, médias e grandes geradoras (IORIS, 2011). São sete as principais usinas hidrelétricas localizadas ao longo do rio Paraíba do Sul, sendo Jaguari, Paraibuna e Santa Branca localizadas no Estado de São Paulo e Funil, Fontes, Nilo Peçanha e Pereira Passos pertencentes ao Estado do Rio de Janeiro. A capacidade instalada dessas usinas é de 1.007 MW, sendo 173 MW de São Paulo e 834 MW do Rio de Janeiro (GALVÃO e BERMANN, 2015).

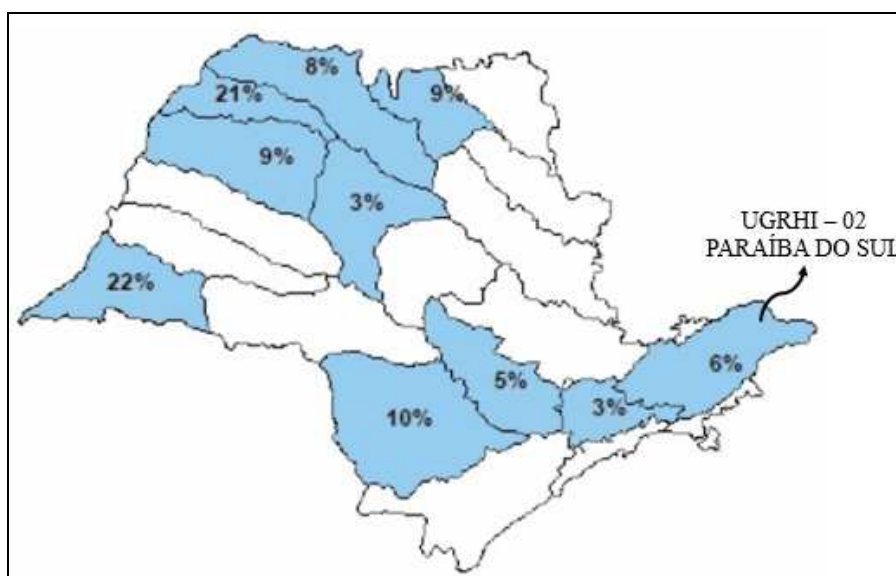
Na porção paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, área de estudo deste trabalho, em 2010 a demanda de água para o setor agropecuário foi de 5,36 m³/s, abastecimento urbano 2,41 m³/s, industrial 1,92 m³/s e outros usos 0,072 m³/s, totalizando 9,76 m³/s e o que corresponde a 4,5% da vazão média do rio Paraíba do Sul (SÃO PAULO, 2013b).

O Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE (2005) publicou no Plano Estadual de Recursos Hídricos 2004 – 2007 a projeção da demanda de abastecimento urbano para o ano de 2020 que ficou na ordem de 6,14 m³/s. Essa demanda é duas vezes e meia superior a de 2010 que foi de 2,41 m³/s.

No que concerne à participação das bacias no território do Estado de São Paulo, a bacia do rio Paraíba do Sul, porção paulista, ocupa 5,8% da área do Estado. O seu escoamento

superficial é de 6,9% de toda água escoada do Estado de São Paulo, sendo o segundo maior escoamento superficial. O volume útil de água de seus reservatórios é de 6% do volume útil reservado no Estado de São Paulo, conforme pode ser observado na Figura 1, que ilustra as mais significativas Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos com volumes acumulados maiores que 3% (DAEE, 2005).

Figura 1 - Volume útil dos reservatórios da UGRHI - 02 em relação ao volume útil total no Estado



Fonte: DAEE, 2005 (adaptado)

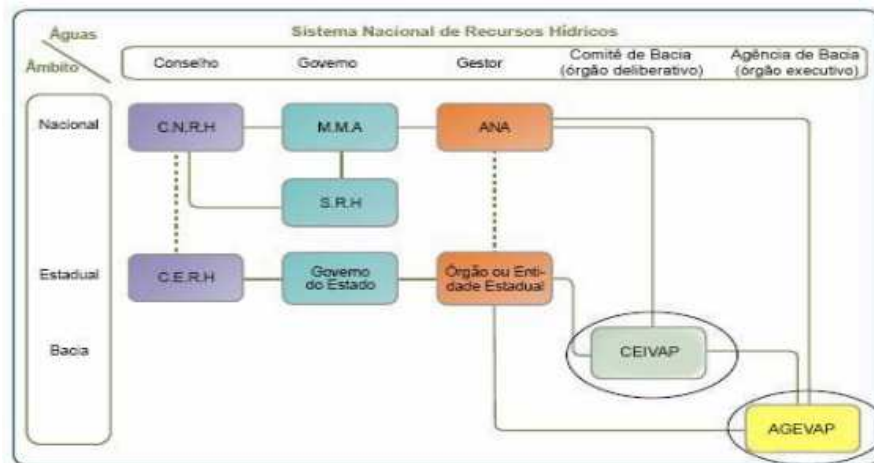
São Paulo (2013b) afirma que na Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Paraíba do Sul (UGRHI-02) há o comprometimento da porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul com relação à sua disponibilidade hídrica em decorrência da utilização de 160 m³/s para abastecimento público no Estado do Rio de Janeiro, significando que a disponibilidade per capita desta UGRHI é de cerca de 880 m³/hab.ano, colocando-a em situação crítica. Entretanto, se não houvesse a transposição a sua classificação seria ideal.

A Classificação da Disponibilidade Per Capita de Água é classificada em 6 tipos: Abundante, Muita Rica, Rica, Ideal, Pobre e Crítica (SÃO PAULO, 2013b). A disponibilidade hídrica de uma UGRHI é classificada como crítica quando for menor que 1.500 m³/hab.ano e ideal quando ficar entre 2.500 e 5.000 m³/hab.ano.

2.2.2 Gestão hídrica na bacia do rio Paraíba do Sul

O Sistema Nacional de Recursos Hídricos, instituído pelas Leis nº. 9.433/97 e 9.984/00, introduz no contexto da gestão dos recursos hídricos os Comitês de Bacia, as Agências de Bacia e a Agência Nacional de Águas – ANA (Figura 2). Os Comitês de Bacia são fóruns democráticos para debates e decisões sobre questões relacionadas ao uso da água da bacia; a Agência de Bacia é o braço executivo do Comitê e é também quem recebe e aplica os recursos arrecadados com a cobrança pelo uso da água na bacia; e pôr fim a ANA, jurisdição em esfera pública federal e vinculada ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) que assume funções de órgão gestor dos recursos hídricos de domínio da União (CEIVAP, 2016).

Figura 2 - Sistema Nacional de Recursos Hídricos



Fonte: CEIVAP, 2016

O CEIVAP, Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, foi criado pelo Decreto Federal 1.842 de 1996 e teve sua área de abrangência e nomenclatura alterada pelo Decreto Federal 6.591 de 2008. Cento e oitenta e quatro cidades dos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo estão submetidos a sua área de atuação.

Esse Comitê é constituído por representantes dos poderes públicos, dos usuários e de organizações sociais com importante atuação para a conservação, preservação e recuperação da qualidade das águas da Bacia.

No CEIVAP é onde ocorrem os debates e decisões descentralizadas sobre as questões relacionadas aos usos múltiplos das águas da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, inclusive a decisão pela cobrança pelo uso da água na bacia (CEIVAP, 2016).

Em virtude de seu rio ser de domínio da União e por possuir reservatórios de aproveitamento hidrelétrico, o Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul, localizado na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, tem como gestores as seguintes instituições federais: a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A Lei nº 9.984/00 institui a ANA como responsável por definir e fiscalizar as condições de operação de reservatórios visando garantir o uso múltiplo dos recursos hídricos e no caso de haver reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos, a definição das condições de operação dos reservatórios será efetuada em articulação com o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (COSTA et al., 2015).

Ao longo de 2014, a ausência de precipitação significativa nas cabeceiras dos reservatórios do Sistema Hidráulico do Paraíba do Sul implicou em um registro de vazões muito baixas e a consequente diminuição dos volumes armazenados.

A esse evento de seca foi dado um caráter de excepcionalidade, visto que para grande parte das estações pluviométricas foi registrado um período de retorno superior a 100 anos (ANA, 2015a). Isso fez com que os reservatórios das usinas hidrelétricas de Paraibuna e de Santa Branca, localizadas nesse mesmo sistema hidráulico, atingissem o volume morto, impossibilitando a produção de energia por um determinado período e o volume de água remanescente no reservatório foi destinado apenas para o abastecimento.

Questões climáticas contribuíram para a diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos na região, mas também alguns outros fatores, como a maior necessidade de abastecimento, o aumento das atividades produtivas e, consequentemente, o aumento também na poluição das águas.

Normalmente, a medida a ser tomada para o enfrentamento de estiagem é a diminuição da utilização das águas reservadas. Para isto é necessário mudar as regras de operação dos reservatórios durante a situação de estiagem excepcional.

De acordo com Costa et al. (2015) houve problemas relacionados à gestão dos reservatórios do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul com a estiagem de 2014, pois as regras de operação na época permitiram o uso intensivo de suas águas para geração de energia quando a bacia já estava hidrologicamente recessiva em plena estação chuvosa.

Numerosos atores da bacia do rio Paraíba do Sul podem ser afetados com as alterações nas regras de operação de seus reservatórios, são estes: os usuários consultivos e não-consultivos; a Agência Nacional de Águas (ANA); o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão que coordena e controla a operação das instalações de geração e transmissão de

energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN); os órgãos gestores estaduais, que no Estado de São Paulo são o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e no Estado do Rio de Janeiro o Instituto Estadual do Ambiente (INEA); o Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP) e os comitês estaduais das bacias do Paraíba do Sul e do Guandu, que, entre outras atribuições legais, têm de arbitrar os conflitos relacionados ao uso de recursos hídricos da bacia; e as associações da sociedade civil (COSTA et al., 2015).

Em razão da diversidade e da complexidade dos temas a serem tratados em consequência da baixa pluviosidade ocorrida nessa bacia em 2014, a ANA decidiu repetir a experiência de gestão compartilhada, já experimentada em outras situações similares, por meio do Grupo de Trabalho Permanente de Acompanhamento da Operação Hidráulica na Bacia do Rio Paraíba do Sul (GTAOH) do Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

Dentre os objetivos do GTAOH destacam-se a antecipação e a análise de situações de conflito envolvendo a operação hidráulica dos reservatórios e os usos múltiplos da água, bem como a proposição de soluções alternativas visando ao atendimento dos requisitos quantitativos de água nas bacias (COSTA et al., 2015).

2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO BRASIL

A matriz elétrica do Brasil é fundamentalmente baseada em fontes renováveis, isto é, baseada em fontes que são oriundas da natureza, inesgotáveis e limpas. Em 2015, aproximadamente 80% da matriz elétrica brasileira teve origem em fontes renováveis de energia, gerando uma potência de 144,4 GW (Tabela 1). Dentre as fontes renováveis de energia como biomassa, eólica e solar, está a hídrica que contribui na matriz elétrica brasileira com 62,25% (ANEEL, 2015). Para o ano de 2030, projeta-se que 71% da produção de eletricidade no país seja de origem hidráulica, embora seja previsto na expansão do sistema elétrico brasileiro que a hidroeletricidade perca espaço para outras fontes de geração elétrica (EPE, 2007).

Tabela 1 – Matriz Elétrica Brasileira

MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA			
Empreendimentos em Operação			
Fonte	CAPACIDADE INSTALADA		
	Nº de Usinas	(kW)	%
Biomassa	506	12.414.542	8,59
Eólica	266	5.862.249	4,05
Fóssil	1888	26.051.167	18,04
Hídrica	1173	89.888.340	62,25
Nuclear	2	1.990.000	1,37
Solar	317	15.179	0,01
Importação	-	8.170	5,65
Total	4152	144.391.477	100

Fonte: Aneel, 2015 (adaptado)

Visto a grande participação das usinas hidrelétricas na Matriz Elétrica Brasileira, a geração de energia elétrica no país é fortemente dependente dos regimes hidrológicos das bacias hidrográficas.

De acordo com Freitas e Soito (2008), como existe um desequilíbrio regional na disponibilidade da água, que pode ser observado através das secas recorrentes na região Nordeste, da degradação de rios e solos na região Sudeste, dos riscos sócio-ambientais de cada região e da rápida elevação da demanda por água e energia em todo o território nacional, novos e antigos empreendimentos hidrelétricos estão, em maior ou menor grau, vulneráveis às mudanças climáticas.

Alguns sistemas energéticos, como a hidroeletricidade, dependem do ciclo hidrológico e estão sujeitos a impactos advindos de alterações no clima, tanto na produção de energia, em suas diversas formas, quanto no seu consumo (LUCENA, 2010).

Tiezzi (2015) ressalta que o Brasil possui um sistema elétrico altamente dependente dos recursos hídricos e por isso, vulnerável a problemas hidroclimatológicos, como bem evidenciado na crise hídrica do ano de 2014 que impactou o sistema hidroenergético e os sistemas de suprimento hídrico de muitos municípios na região Sudeste.

Conforme Tucci (2007), ainda que o sistema hidrelétrico brasileiro possua uma grande interligação energética e por isto o risco de falha do sistema diminua, o fato de grande parte das usinas hidrelétricas estarem localizadas na região sudeste, na ocorrência de variabilidade

climática simultânea, estas usinas seriam atingidas, concentrando o risco de falha em razão do ponto de vista espacial.

Tancredi e Abbud (2013) afirmam que para o Brasil continuar a suprir a demanda de energia elétrica por geração hidrelétrica, há a necessidade de investimentos em armazenamento de energia. Em 2001, quando os reservatórios apresentaram níveis de armazenamento abaixo da média, o país sofreu com uma crise energética, devido à incapacidade de geração de energia elétrica e para evitar a interrupção no fornecimento de energia novamente, algumas medidas foram tomadas, dentre elas o investimento em usinas termoeletricas e, mais recentemente, em usinas eólicas e usinas hidrelétricas a fio de água ou com pouca capacidade de reservação.

A queda no nível dos reservatórios ocorrida recentemente foi sob a utilização contínua das usinas térmicas desde outubro de 2012, sem as quais o cenário seria ainda mais crítico (TANCREDI e ABBUD, 2013). Estes mesmos autores afirmam que 25,9% da energia elétrica gerada no SIN (Sistema Interligado Nacional) em março de 2015, a fim de manter maior nível de água armazenada nos reservatórios, correspondiam a fontes fósseis. Isto evidencia a importância das usinas térmicas na geração de energia elétrica. Outra medida tomada com o objetivo de atender a demanda de energia elétrica no Brasil neste mesmo período, foi a importação de uma potência firme de 5.650 MW do Paraguai e de 200 MW da Venezuela (ANEEL, 2015).

O sistema elétrico brasileiro, por estar sujeito aos recursos hídricos, pode colocá-lo em uma situação de suscetibilidade em virtude da variabilidade climática, por isso a importância de haver a diversificação de fontes energéticas renováveis na matriz elétrica nacional.

2.4 CRISE HIDROENERGÉTICA NO BRASIL EM 2014

2.4.1 Crise hídrica

O Brasil possui uma grande oferta hídrica, entretanto há uma significativa diferença na disponibilidade deste recurso entre suas bacias hidrográficas no que diz respeito à oferta e à demanda de água. Enquanto que áreas com baixa disponibilidade e grande utilização dos recursos hídricos podem enfrentar situações de estresse hídrico, outras não apresentam situação de escassez.

Os recursos hídricos superficiais gerados no Brasil representam 50% do total dos recursos da América do Sul e 11% dos recursos mundiais, totalizando 168.870 m³/s, sendo

que a distribuição desses recursos no território brasileiro e durante o ano não é uniforme, destacando-se os extremos do excesso de água na Amazônia e as limitações de disponibilidade no Nordeste (TUCCI et al., 2001).

Segundo dados da ANA (2015a), desde 2012, observou-se uma gradativa e intensa redução nos índices pluviométricos em algumas regiões do Brasil, prejudicando de forma significativa a oferta de água para o abastecimento público, a irrigação e a energia hidrelétrica, especialmente para o nordeste brasileiro e regiões metropolitanas mais populosas e com maior demanda hídrica (São Paulo e Rio de Janeiro).

Em 2014, as bacias de contribuição dos principais reservatórios de abastecimento urbano da região Sudeste (Sistemas do Cantareira e do Paraíba do Sul) tiveram precipitações próximas às mais baixas já registradas no histórico, o que tem impedido a recuperação dos níveis dos reservatórios (JACOBI, 2016).

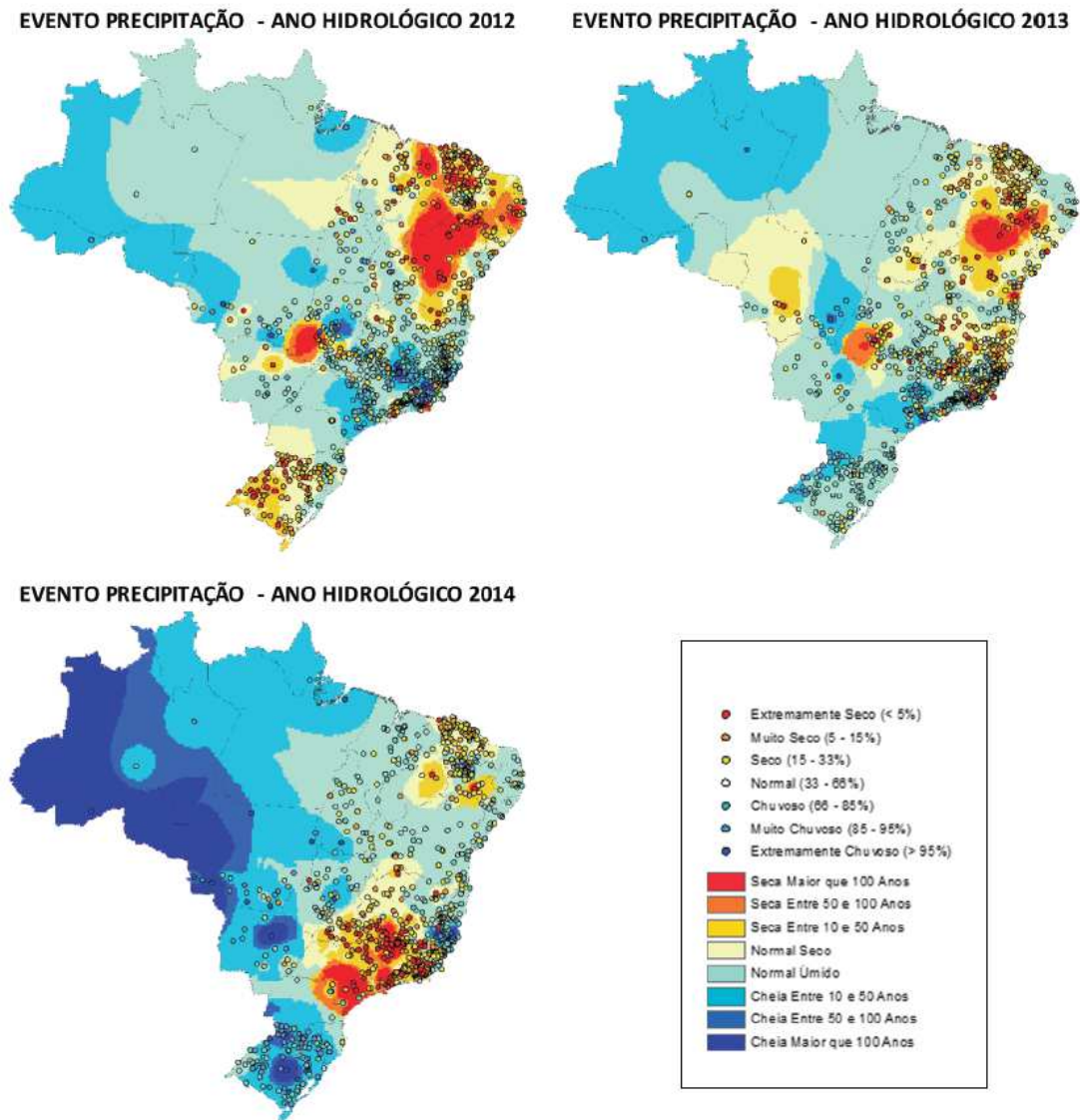
As anomalias negativas de precipitação são verificadas em todos os continentes do hemisfério sul, mais significativamente sobre o Brasil, sendo que a diminuição das precipitações gerou uma escassez hídrica de grande abrangência espacial e, portanto, com impactos negativos nas grandes bacias hidrográficas brasileiras que afetaram desde o abastecimento de água potável até a geração de energia elétrica nos sistemas produtores do Sudeste e Nordeste (PEREIRA FILHO, 2015).

A Agência Nacional de Águas (2015a) com o intuito de analisar a severidade das precipitações ocorridas no período de 2012 a 2014, fez uma análise dos dados de 950 estações pluviométricas espalhadas por todo o território nacional com série histórica de 30 anos. O resultado desta análise foi a elaboração de mapas de tempos de retorno que representam espacialmente os eventos de cheia e de seca ocorridos para o mesmo período.

Conforme pode ser observado na Figura 3, para o ano de 2012 houve situação crítica de seca na região sul do país. Nesta região foi registrada uma seca com período de retorno entre 10 e 50 anos. Ao contrário do que ocorreu no ano de 2012, as ocorrências de pluviosidade mudaram significativamente no ano de 2014, saindo de uma condição de seca para uma condição de cheia em praticamente toda a região Sul. Os resultados obtidos para a região Norte apresentam menor representatividade devido à baixa densidade de estações pluviométricas que atendessem aos critérios para serem utilizadas pela pesquisa. Apesar disso, foi verificado coerência nestes resultados, uma vez que na região do rio Madeira, no ano de 2014, ocorreu sinal de evento extremo de cheia.

Marengo (2014) ao analisar o histórico de ocorrência de eventos climáticos extremos no Brasil nos últimos 30 anos, observou-se que tem aumentado a frequência de precipitação no verão e no inverno do Sul e do Sudeste, e na região amazônica, em 2009, 2012 e 2014, houve enchentes.

Figura 3 - Situação da precipitação no Brasil de 2012 a 2014



Fonte: Ana, 2015a

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2015a), a redução nos níveis de precipitação verificada mensalmente neste estudo, desde 2012 na região nordeste e desde outubro de 2013 na região sudeste, traz um fato novo, porém de difícil compreensão das causas dessas alterações climáticas e da dinâmica tendencial da pluviometria interanual, em virtude do curto período de observação dessas anomalias.

O Intergovernmental Panel on Climate Changes - IPCC (2007) apresentou uma projeção global para o século XXI de longo prazo que indica uma redução de precipitação em regiões de baixa latitude e um aumento à medida que se avança para os polos.

Um aquecimento adicional do planeta pode alterar os padrões de pressão atmosférica e ventos, modificando o ciclo hidrológico. Portanto, alterando o ciclo hidrológico podem-se esperar mudanças nos padrões de precipitação (SOITO E FREITAS, 2008).

A causa da crise hídrica que se instalou desde outubro de 2013 na região Sudeste não pode ser atribuída unicamente as baixas taxas pluviométricas verificadas nos últimos anos, mas deve-se considerar outros aspectos que podem agravar ou atenuar o quadro de uma crise que são os relativos à gestão da demanda e à garantia da oferta (JACOBI et al., 2016).

As perdas na rede de distribuição de abastecimento é um fator que deve ser observado para uma melhor utilização dos recursos hídricos. A Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2013) afirma que as perdas de água na distribuição são muito elevadas no Brasil e têm se mantido em níveis próximos a 40% nos últimos doze anos, ainda que seja possível notar uma leve tendência de queda nos últimos anos. O quadro é ainda mais preocupante porque a maior parte das empresas não mede suas perdas de água de maneira consistente. Quando se compara o Brasil com países desenvolvidos, é notável o grande espaço para mudanças. Cidades da Alemanha e do Japão possuem 11% e Austrália possui perdas em torno de 16%. Estas perdas poderiam ser revistas, a fim de evitar o desperdício.

De acordo com o Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro (Brasil, 2015), os valores de afluências brutas a todos os subsistemas elétrico brasileiro foram inferiores à média de longo termo - MLT, com exceção do Sul. Nos subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste, as afluências foram as piores para janeiro de 2015 do histórico de 83 anos e o Norte registrou o oitavo pior valor.

Segundo Jacobi (2016), a demanda por água tem crescido e, se não houver gestão entre demanda e oferta, o déficit global de água se consolidará. O relatório *Water for a Sustainable World* publicado pela Unesco (2015) prevê que até 2050 haverá um crescimento na demanda por água em torno de 55% devido, principalmente, ao aumento de uso industrial, geração de energia, uso doméstico, produção de alimentos e crescimento das áreas urbanas. Este mesmo relatório afirma que o consumo de água aumentou 200% nas últimas décadas, mais do que o aumento da população, e a estimativa é que a demanda cresça ainda mais 55% até 2050 e se forem mantidos os mesmos padrões atuais de consumo, o mundo enfrentará um déficit no abastecimento de água de 40%, em 2030. Segundo este relatório, a falta de atenção à

capacidade de reposição e restauração dos ecossistemas, em especial às áreas de mananciais é um fator crítico, na medida em que dificulta que estes possam prover a sociedade com os serviços ecossistêmicos, inclusive o suprimento de água.

Um relatório publicado recentemente pela ANA (2015a) menciona que são essenciais para que se tenha maior garantia da oferta hídrica para os usos múltiplos a compreensão da crise hídrica que atualmente se apresenta, a valorização do recurso hídrico como bem público finito e a conscientização da necessidade de um uso mais racional e sustentável da água. Este documento acrescenta que apoiar e aprimorar técnicas de reuso da água, reduzir o desperdício pelos diferentes setores usuários (na irrigação, na indústria, na distribuição e no consumo residencial, por exemplo), além de implementar ações de conservação de mananciais são medidas, entre outras, que devem ser priorizadas e fomentadas.

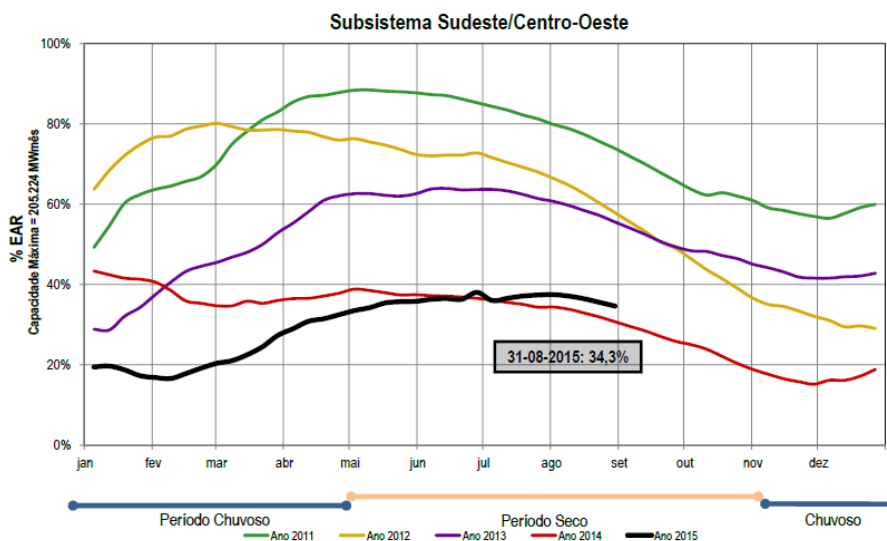
O investimento em infraestrutura com foco na segurança hídrica, de forma a garantir maior capacidade de reservação e de acesso à água também devem ser priorizadas (ANA, 2015a).

2.4.2 Crise hidroenergética

Em função das condições hidrológicas desfavoráveis ocorridas entre os anos de 2012 e 2014, os reservatórios dos subsistemas da região sudeste/centro-oeste e da região nordeste sofreram redução do seu volume de armazenamento, conforme pode ser observado nas Figuras 4 e 5.

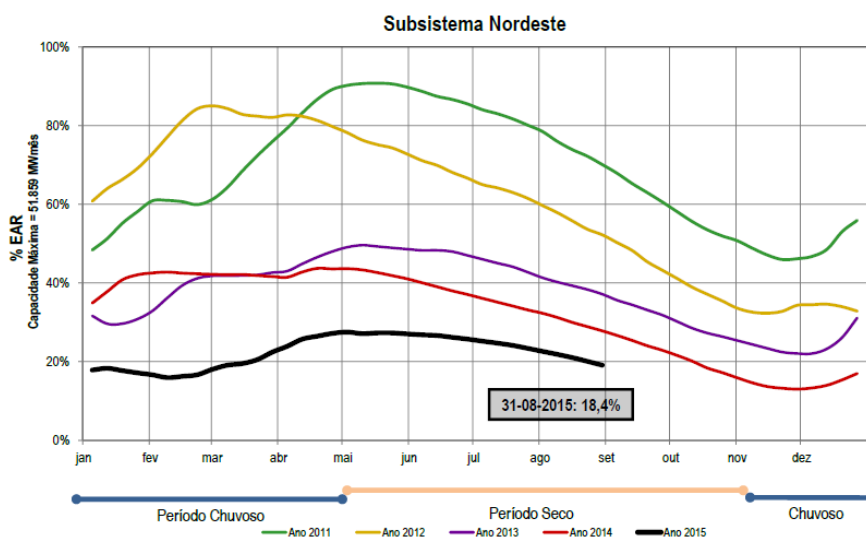
Segundo Guimarães (2015), o cenário de escassez fez com que a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL passasse a aplicar as bandeiras tarifárias a partir de janeiro de 2015, as quais têm graves efeitos, como serem altamente inflacionárias, já que a energia é um insumo básico para a indústria e comércio e compõe índices de correção monetária, que indexam cesta básica entre outros tantos produtos e serviços, ou seja, prejudicam o sistema produtivo e, conseqüentemente, prejudicam duplamente o consumidor, que paga a tarifa mais cara e outros produtos e serviços também. Guimarães (2015) afirma que o Brasil tem uma das tarifas mais caras do planeta - o valor médio ao final de 2014 do MWh foi de R\$ 534,28 que se comparado ao Canadá, que tem uma matriz energética hidráulica semelhante à do Brasil, tem a tarifa média de R\$ 115,20 por MWh; a média mundial está em R\$ 257,50 o MWh.

Figura 4 – Energia Armazenada no Subsistema Sudeste/ Centro-Oeste do Brasil até ago/2015



Fonte: Brasil, 2015

Figura 5 – Energia Armazenada no Subsistema Nordeste do Brasil até ago/2015



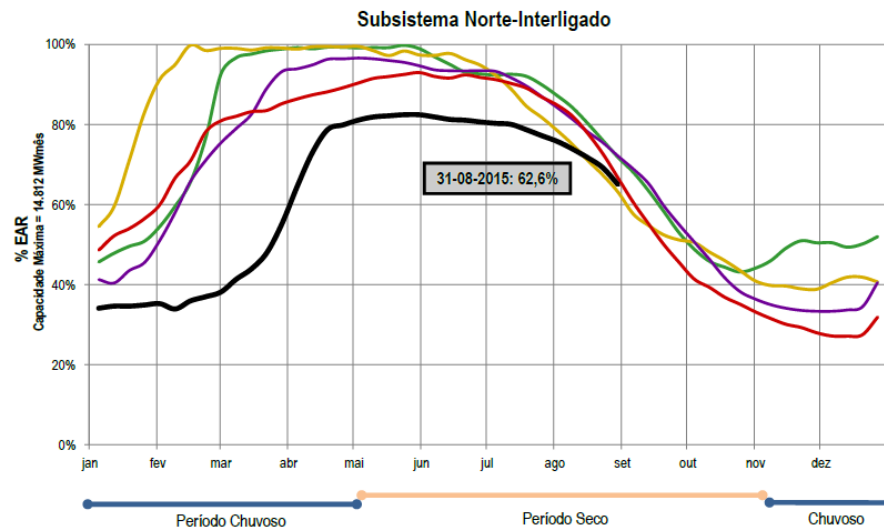
Fonte: Brasil, 2015

Verifica-se que mesmo recebendo as vazões afluentes do período chuvoso, os reservatórios dos subsistemas da região sudeste/centro-oeste e da região nordeste não conseguiram recompor seus níveis normais de operação.

O subsistema norte-interligado (Figura 6) não apresentou uma redução significativa no volume dos reservatórios no período de 2012 a 2014, no qual foi registrado baixo índice pluviométrico em algumas regiões brasileiras.

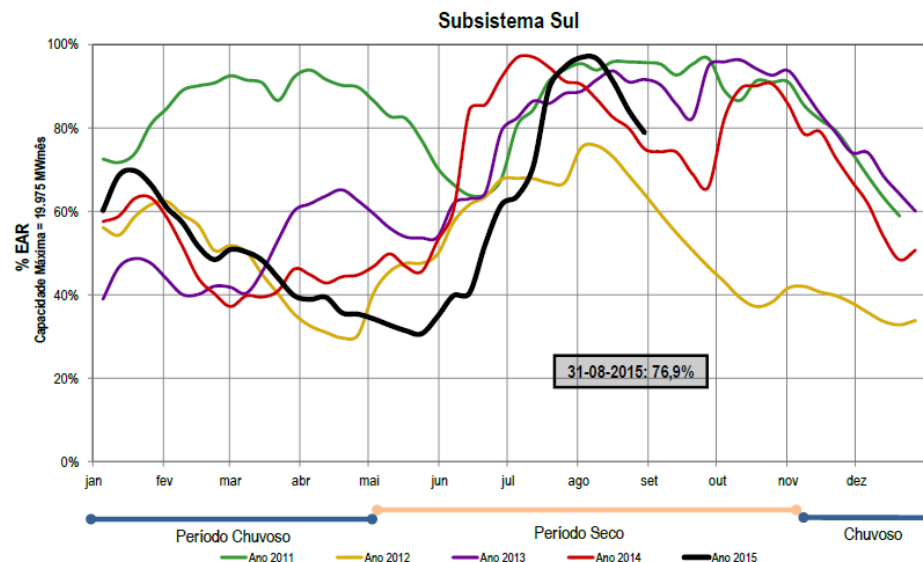
No subsistema do Sul (Figura 7), o período mais crítico com relação ao seu armazenamento foi em 2012. Nos anos de 2013 e 2014 o aumento dos reservatórios ocorreu no período considerado seco.

Figura 6 - Energia Armazenada no Subsistema Norte-Interligado do Brasil até ago/2015



Fonte: Brasil, 2015

Figura 7 – Energia Armazenada no Subsistema Sul do Brasil até agosto de 2015



Fonte: Brasil, 2015

Conforme Brasil (2015), em agosto de 2015 os valores de afluências brutas foram inferiores à média de longo termo (MLT) em todos os subsistemas, com destaque para o

verificado no Nordeste, que apresentou o pior valor de afluência para agosto considerando o histórico de 83 anos.

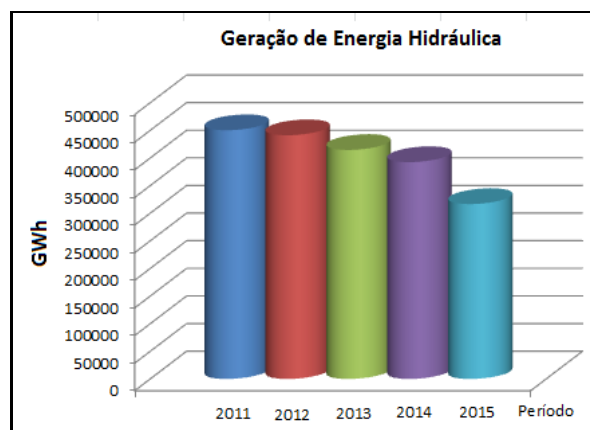
Com a redução das afluências naturais e consequentemente o deplecionamento dos reservatórios, houve uma crise na segurança energética do país, trazendo incertezas para as atividades econômicas – indústria, comércio e serviços – e também para a população

Pereira Filho (2015) sugere que o setor elétrico brasileiro invista mais em sistemas de monitoramento e previsão do tempo e do clima para haver melhor planejamento e gestão de recursos hídricos, para além dos modelos tradicionais fundamentados na hidrologia superficial clássica e métodos estatísticos e estocásticos.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2015), as condições hidrológicas desfavoráveis ocorridas desde 2012 gerou em 2013 uma redução de produção de energia hidráulica de 4,5% com relação ao ano anterior e em 2014 a redução foi na ordem de 5,6% comparada a 2013. Em 2013 a geração hidrelétrica foi de 390.992 GWh passando para 373.439 GWh em 2014.

Tancredi e Abbud (2013) relatam que houve uma queda na capacidade de geração de energia hidráulica nos últimos anos (Figura 8), devido ao baixo nível de água nos reservatórios pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Os mesmos autores afirmam ainda que o início da queda no armazenamento de energia se deu em 2012, quando no mês de outubro do mesmo ano o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) determinou a utilização de todas as usinas térmicas disponíveis, para contribuir na geração de energia e evitar maior esvaziamento dos reservatórios.

Figura 8 – Evolução da capacidade de geração da energia hidráulica para o período de 2011 a 2015*



Fonte: ONS, 2015

* (foi contabilizado a geração para o ano de 2015 até outubro)

Segundo Goldemberg (2015), a única razão pela qual não existe ainda uma falta generalizada de eletricidade no país se deve à geração térmica, incluindo biomassa e energia nuclear, que foi de 29,5% em 2013.

O Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos - DIEESE (2015) afirma que a geração de energia por meio das termelétricas cresceu 57%, entre 2013 e 2014: a geração de energia por meio de fonte térmica convencional (excluindo térmicas nucleares) passou de 7.227 GWh, em dezembro de 2013, para 11.371 GWh, em dezembro de 2014 e como consequência, a participação da geração por meio de fontes térmicas na capacidade instalada total no país aumentou de 22%, em 2008, para 30%, em 2013, enquanto a participação das hidrelétricas caiu de 75% para 68%, em 2013.

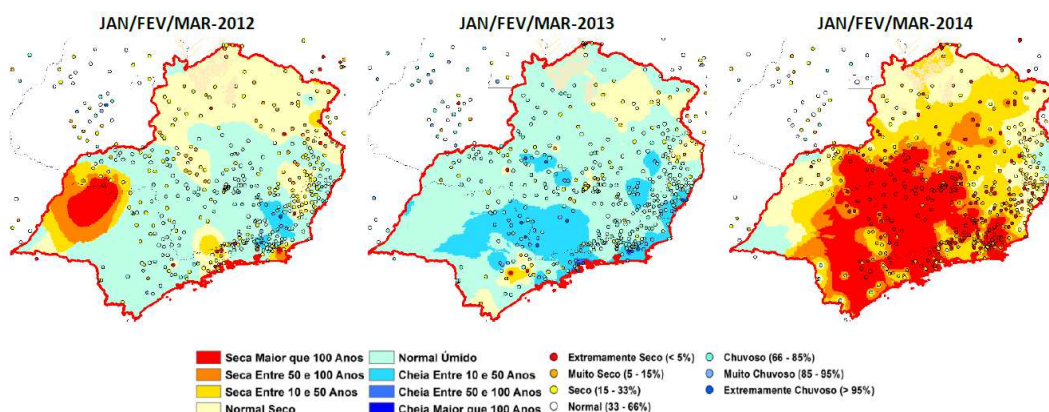
No ano de 2013 o consumo final de eletricidade foi suprido pela expansão da geração térmica, especialmente das usinas movidas a carvão mineral (+75,7%), do gás natural (+47,6%) e do bagaço de cana (+19,2%), cujas participações na matriz elétrica, em comparação ao ano de 2012, cresceram de 1,6% para 2,6%, de 7,9% para 11,3%, e de 4,2% para 4,9%, respectivamente. A menor oferta hídrica pode explicar o recuo da participação de renováveis na matriz elétrica brasileira apesar do incremento de 1724 MW na potência instalada do parque hidrelétrico (BRASIL, 2014).

2.4.3 Crise energética nas usinas de Paraibuna e Santa Branca

Desde o segundo semestre de 2012, houve um comportamento pluviométrico bem abaixo da média em diferentes regiões do Brasil, dentre elas o Sudeste (ANA, 2015a). Nesta região do país, no período de 2014 a 2015, houve a pior seca dos últimos 80 anos que afetou a segurança hídrica e energética de São Paulo e Rio de Janeiro, gerando restrições de água para a população da região metropolitana de São Paulo (MARENGO, 2014).

A Figura 9 apresenta a criticidade da precipitação para a região Sudeste do país de janeiro a março para os anos de 2012, 2013 e 2014. Para o ano de 2012 o Sudoeste da região registrou período de seca com retorno superior a 100 anos. Para 2013 não houve evento de seca com mesma intensidade como no ano anterior, apresentando uma porção na parte Sul da região com seca de período de retorno entre 10 e 50 anos. Em 2014, ocorreu em grande parte da região Sudeste seca com período de retorno maior que 100 anos.

Figura 9 – Criticidade da precipitação de janeiro a março entre 2012 e 2014 no Sudeste



Fonte: ANA, 2015a

No ano de 2014, a região sudeste se destacou por seca extrema. As precipitações foram especialmente anômalas. Em estudo realizado pela Agência Nacional de Água (2015a), utilizando estações pluviométricas com mais de 50 anos de dados, foi verificado que 25% destas precipitações ficaram entre as 3 piores já registradas, no Estado de São Paulo este fato foi registrado em 50% das estações, sendo que em 30% o evento foi o mais seco já registrado.

O Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul sofreu com as baixas precipitações ocorridas no ano de 2014. Em razão do grau de excepcionalidade deste evento na região que registrou, em grande parte das estações, seca com período de retorno superior a 100 anos, este evento foi rotulado como evento raro (ANA, 2015a).

O Sistema Hidráulico do rio Paraíba do Sul é um complexo conjunto de estruturas hidráulicas existentes nas bacias hidrográficas do rio Paraíba do Sul e do rio Guandu. Os reservatórios da Bacia do rio Paraíba do Sul são Paraibuna, Santa Branca, Jaguari e Funil. Todos esses reservatórios estão localizados no Estado de São Paulo, exceto o de Funil que se localiza no Estado do Rio de Janeiro próximo do limite do Estado de São Paulo. A capacidade total destes reservatórios é de 7.294,7 milhões de metros cúbicos, dos quais 4.341,9 milhões de metros cúbicos estão dentro da faixa normal de operação, volume útil total (volume compreendido entre os níveis mínimo operacional e máximo operacional, efetivamente destinado à operação do reservatório). O reservatório de Paraibuna é o que possui a maior capacidade de armazenamento em termos de volume útil (61%), seguido por Jaguari (18%), Funil (14%) e Santa Branca (7%) (ANA, 2015a).

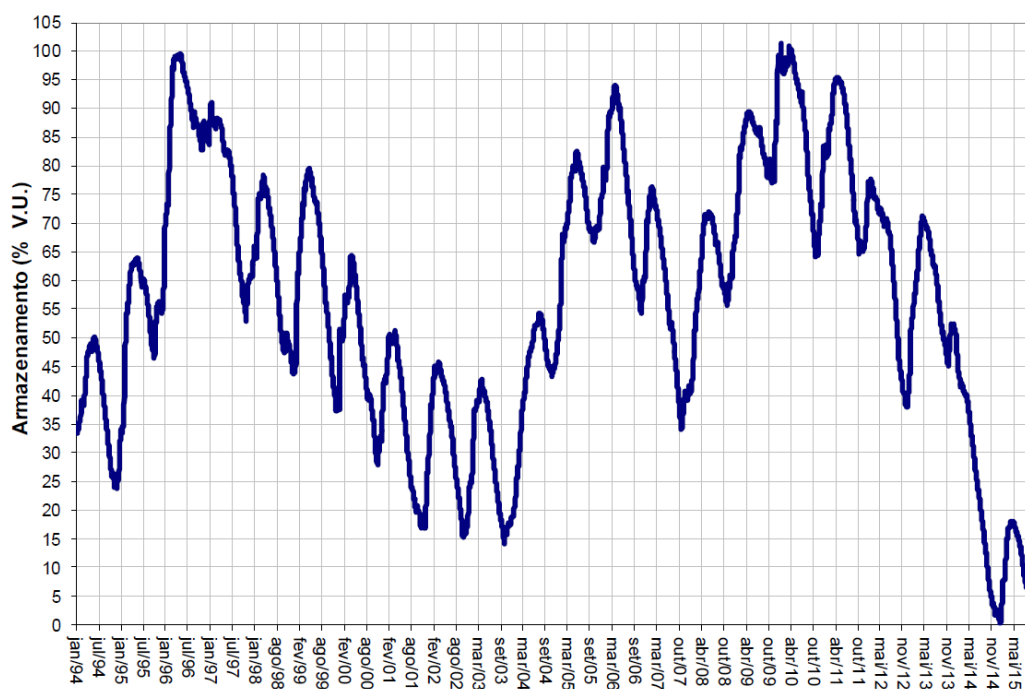
A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul está localizada no eixo Rio – São Paulo e está em uma área de maior concentração populacional e industrial do país, tendo grande

importância no cenário nacional. Esta região se caracteriza por conflitos de usos múltiplos e pelo desvio de suas águas para a bacia hidrográfica do rio Guandu que permite, conforme COPPETEC (2014), o abastecimento de 8,6 milhões de pessoas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

Reservatório equivalente é uma representação do volume total de água acumulada nos reservatórios que compõe um sistema hidráulico de uma determinada bacia hidrográfica. No caso da Bacia do rio Paraíba do Sul, seu sistema hidráulico é composto pelo volume de água dos reservatórios do Funil, Jaguari, Paraibuna e Santa Branca.

Na Figura 10 é apresentada a evolução temporal do volume armazenado no reservatório equivalente do rio Paraíba do Sul entre os anos de janeiro de 1994 e maio de 2015 (ANA, 2015b).

Figura 10 – Evolução do reservatório equivalente da Bacia do Rio Paraíba do Sul – volume acumulado desde 1994



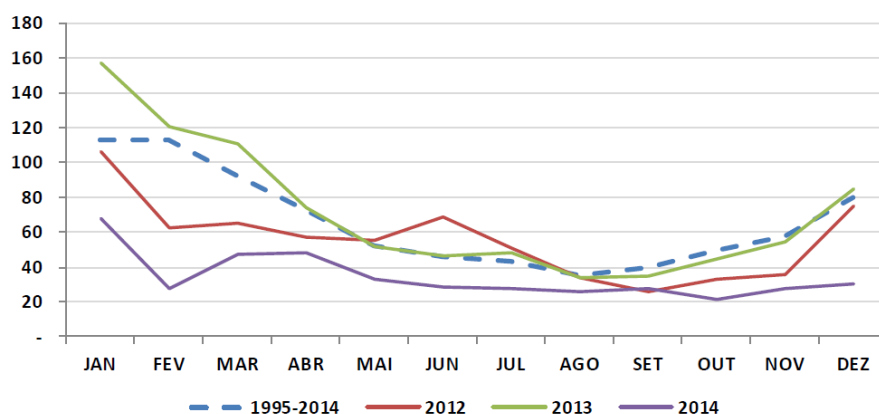
Fonte: ANA, 2015b

Conforme dados da ANA (2015b), após a seca de 1997 os níveis de água do reservatório diminuíram continuamente até o ano de 2002, quando a capacidade do reservatório atingiu 20% de sua capacidade de armazenamento, na época este foi considerado historicamente como um dos mais baixos índices. Em outubro de 2004, os reservatórios começam a recuperar sua capacidade normal, atingindo em março de 2006, um índice de

armazenamento de aproximadamente 95%. A partir deste período até outubro de 2007, o reservatório apresentou nova queda significativa em seu volume armazenado, perdendo neste período cerca de 60% do seu volume. Entre outubro de 2007 até abril de 2011 o reservatório apresentou recuperação do seu volume voltando a apresentar volumes superiores a 95% de sua capacidade máxima. Em 2012 a 2014 houve baixo índice de pluviosidade na região sudeste do Brasil, especificamente no Estado de São Paulo há registros de que o período de escassez hídrica no ano de 2014 apresentou período de retorno de 100 anos. Os reservatórios apresentaram um intenso deplecionamento, não conseguindo recuperar o seu volume de água no período chuvoso. Atingiu zero por cento de seu volume útil em janeiro de 2015, superando assim os marcos históricos anteriores.

A escassez de precipitação ocorrida desde 2014 na Região Sudeste afetou diretamente o reservatório de armazenamento de água localizado na sub-bacia do rio Paraibuna. Na Figura 11, é possível verificar que as vazões médias afluentes de 2014 ao reservatório de Paraibuna ficaram inferiores as vazões médias do período de 1995 a 2014 e também inferiores quando comparado as médias de 2012 e 2013.

Figura 11 – Vazões mensais dos afluentes ao reservatório Paraibuna



Fonte: ANA, 2015a

Segundo a Empresa Brasil de Comunicação (EBC, 2015), entre os dias 21 e 25 de janeiro de 2015, as usinas hidrelétricas de Paraibuna e de Santa Branca pertencentes à Companhia Energética de São Paulo (Cesp) e a Ligth, respectivamente, situadas na bacia do Rio Paraíba do Sul, porção paulista pararam de gerar energia uma vez que seus reservatórios atingiram o volume morto, impossibilitando-as de produzir energia elétrica. Assim, os

reservatórios de Paraibuna e Santa Branca apenas vertiam vazão mínima determinada pela legislação para atendimento emergencial de abastecimento de água.

O volume morto, também chamado de reserva técnica, representa o volume de água armazenado abaixo das comportas de um reservatório, o qual necessita de bombeamento para a utilização da água. Em situações críticas de baixo nível de armazenamento de água nos reservatórios, pode ser utilizada como uma "reserva de água" para uso emergencial (ANA, 2015a).

A ANA (2015c) ressalta que com a redução das vazões dos rios e das defluências e níveis dos reservatórios, é esperado que ocorra aumento de concentração de esgoto doméstico (principal poluente), uma vez que as cargas de poluição serão diluídas em um volume de água menor. Portanto, em virtude do que está ocorrendo na bacia do Paraíba do Sul, é importante intensificar o monitoramento da qualidade da água dos seus rios e reservatórios.

2.5 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA PARA ANÁLISE DE DADOS HIDROLÓGICOS

2.5.1 Sistema de Informação Geográfica

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um conjunto organizado de hardware e software, pessoas, recursos financeiros e infraestrutura organizacional que possibilita a aquisição e armazenamento de dados com atributos geográficos, com a finalidade de análise, síntese e visualização para promover compreensão e auxiliar a tomada de decisão (KENNEDY, 2013). Tarolli e Cavalli (2013) definem SIG como sendo um sistema de informação baseado em sistema computacional projetado para capturar, armazenar, analisar, gerenciar e exibir dados espaciais que representam fenômenos naturais e humanos do mundo real.

A partir de dados georreferenciados obtidos por meio da aplicação de um SIG é possível realizar o monitoramento e planejamento do espaço geográfico e com isto viabilizar a tomada de decisão de maneira ágil, fácil e segura (ROSA, 2009).

Um SIG geralmente consiste em quatro componentes genéricos: hardware, software, dados espacialmente relacionados e gestão de procedimentos (RAPFER e MAGUIRE, 1992). Longley et al. (2001) acrescentam outros dois componentes de um SIG: a rede e as pessoas. Para este autor, destes componentes, o mais importante é a rede, visto que permite realizar de forma rápida a comunicação e o compartilhamento de informações.

A literatura apresenta diversas funções associadas a um SIG. As funções serão entendidas como os próprios módulos do sistema a elas relacionadas. Entre estes podem ser destacados: aquisição e edição de dados, gerenciamento do banco de dados, análise geográfica de dados e representação de dados (FITZ, 2008).

O objetivo geral de um SIG é servir de ferramenta eficiente para todas as áreas do conhecimento que fazem uso de mapas, possibilitando: integrar em uma única base de dados informações representando vários aspectos do estudo de uma região; permitir a entrada de dados de diversas formas; combinar dados oriundos de diferentes fontes, gerando novos tipos de informações; gerar relatórios e documentos gráficos dos mais variados tipos (ROSA, 2009).

2.5.2 Modelos de Dados Espaciais

A passagem de dados do mundo real para um mundo virtual deverá se dar a partir da utilização de modelos (FITZ, 2008). Segundo Maguire (1992) o elemento central de um SIG é um banco de dados espaciais que compreende um conjunto integrado de dados dos objetos espaciais e seus atributos. Um banco de dados espacial é organizado por um modelo de dados, o qual é utilizado para descrever a realidade. Dois modelos de dados espaciais fundamentais são o modelo vetor e o matricial.

Para Ferreira (2003), o modelo de dados vetorial é utilizado para representar o espaço como um conjunto de entidades discretas (geo-objeto) definidas por uma unidade (ponto, linha ou polígono) geograficamente referenciada e por seus atributos descritivos. Por exemplo, as bacias hidrográficas do Brasil podem ser representadas por objetos geográficos, onde cada bacia é representada por um polígono que define o seu limite, cada rio por uma linha e cada usina hidrelétrica por um ponto. Além da localização, cada objeto geográfico tem seus atributos descritivos, como a população de cada bacia, a potência gerada em cada usina, os nomes dos rios, etc.

Este mesmo autor afirma que o modelo de dados matricial é utilizado para representar o espaço geográfico como uma superfície contínua (geo-campo), sobre a qual variam os fenômenos a serem observados segundo diferentes distribuições. Este espaço é então representado por uma matriz $P(m,n)$, formada por m linhas e n colunas. Conforme Câmara e Medeiros (1998), cada célula possui um valor correspondente ao atributo estudado e pode ser individualmente acessada pelas suas coordenadas. A representação matricial supõe que o espaço pode ser tratado como uma superfície plana, onde cada célula está associada a uma

porção do terreno. A resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula no mapa ou documento e a área por ela coberta no terreno. Ferreira (2003) cita, como exemplo deste modelo de dados, um mapa geoquímico, o qual associa o teor de um mineral a cada ponto.

2.5.3 Base de dados georreferenciados

Verifica-se, atualmente, esforços governamentais e parcerias público-privadas para que o acesso às informações geográficas do Brasil seja democratizado. Com a internet e com um grande volume de dados sem precedentes na história brasileira, vários arquivos atualmente são disponibilizados na internet gratuitamente, todos georreferenciados.

Estes portais de internet têm sido utilizados como fontes de pesquisa e mapeamento, essenciais para o desenvolvimento científico e socioeconômico do país, principalmente no desenvolvimento de políticas públicas de municípios, estados, regiões, bacias hidrográficas e biomas (CASTRO e FERREIRA, 2012).

O INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial), o CPTEC (Centro de Estudos do INPE), o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), o MMA (Ministério do Meio Ambiente), a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o CPRM (Serviço Geológico do Brasil), a ANA (Agência Nacional das Águas) e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) são algumas instituições brasileiras que possuem portais de dados online com informações de dados tabulares, vetoriais e matriciais e também informações sobre o meio físico e social. A seguir serão apresentadas as bases de dados destas instituições.

2.5.3.1 DGI (Divisão de Geração de Imagens)

A Divisão de Geração de Imagens (DGI) faz parte da Coordenação Geral de Observação da Terra (OBT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As atividades da DGI concentram-se na recepção, gravação, processamento, armazenamento e distribuição de imagens e dados de satélites de sensoriamento remoto, meteorológicos e científicos. O seu acesso pode ser realizado pelo endereço <http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/portugues/index.php>

2.5.3.2 Base de dados do CPTEC

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, também vinculado ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), possui um portal de monitoramento de focos de queimadas e de incêndios florestais detectados por satélites, e o cálculo e previsão do risco de fogo da vegetação. O seu acesso pode ser realizado pelo endereço <http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/index.php>

2.5.3.3 SISCOM (Sistema Compartilhado de Informações Ambientais)

O SISCOM (Sistema Compartilhado de Informações Ambientais) vinculado ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) realiza o monitoramento dos biomas brasileiros, indicando dados sobre áreas desmatadas e remanescentes e informações sobre áreas de corpos de água. O seu acesso pode ser feito pelo endereço <http://siscom.ibama.gov.br/>

2.5.3.4 Base de dados online do MMA

O MMA (Ministério do Meio Ambiente) possui um instrumental tecnológico denominado Geoprocessamento onde disponibiliza dados na categoria setor elétrico, ambiente físico, biodiversidade, bacias hidrográficas, Zoneamento Ecológico Econômico, mapas históricos, entre outros. O acesso a ferramenta pode ser realizado pelo endereço <http://www.mma.gov.br/governanca-ambiental/geoprocessamento>

2.5.3.5 Base de dados online da EMBRAPA

Na base de dados da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) são disponibilizadas imagens do satélite Landsat e informações sobre o relevo de todos os estados brasileiros. O relevo brasileiro é representado por meio de modelos digitais de elevação, originários da missão de mapeamento do relevo terrestre SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) dos Estados Unidos, no ano 2000. O acesso à ferramenta pode ser realizado pelo endereço <http://www.cdbrasil.cnpem.embrapa.br/>

2.5.3.6 Base de dados online do IBGE

O IBGE disponibiliza uma diversificada base de dados geográficos em categorias de abrangência nacional, tais como: dados cartográficos, atlas, dados georreferenciados dos recursos naturais brasileiros entre outros. Os mapas correspondem, por exemplo, às áreas de conservação ambiental, protegidas por lei, de localização da fauna ameaçada de extinção, dos biomas brasileiros, dados geodésicos, divisões territoriais, compartimentos de relevo, esboço geológico, potencial agrícola, vegetação, diagnóstico ambiental da Amazônia legal, climas, solos e de caracterização geral do Brasil. O acesso à base pode ser realizado pelo endereço <http://www.ibge.gov.br>

2.5.3.7 Base de dados online do CPRM

O Serviço Geológico do Brasil - CPRM é uma empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, que tem as atribuições de Serviço Geológico do Brasil. Possui como áreas de atuação a geração e a difusão do conhecimento geológico e hidrológico.

Distribui estas informações por meio de uma base de dados virtual, o GEOBANK, que apresentam dados em ambiente SIG (Sistema Geográfico de Informações). Recursos minerais, litoestratigrafia, projetos de geofísica, projetos de geologia e riscos geológicos são algumas bases disponibilizadas nesta base. O acesso ao GEOBANK realiza-se pelo endereço <http://www.cprm.gov.br>

2.5.3.8 HIDROWEB

A ANA (Agência Nacional de Águas) é uma instituição ligada ao Ministério do Meio Ambiente responsável por fazer cumprir os objetivos e diretrizes da lei 9.433/97, lei para as águas do Brasil. Cumpri seu papel por meio de algumas linhas de ação. Regula o uso da água e seu acesso a fim de garantir que todos os setores da sociedade tenham água em quantidade e qualidade. É responsável pelo monitoramento dos rios do país, em conjunto com os Estados. Além disso, juntamente com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), define as regras de operação dos reservatórios para garantir que todos os setores que dividem os reservatórios tenham acesso a água represada. A Agência possui uma rede hidro-meteorológica espalhadas por todo o território nacional, auxiliando no planejamento do uso da água e prevenção de eventos críticos (secas e inundações).

A Agência Nacional das Águas disponibiliza um portal denominado HIDROWEB onde pode se obter informações de uma rede hidro-meteorológica, reunindo dados sobre cota, vazão, precipitação e qualidade da água. O acesso a base pode ser realizado pelo endereço <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>

2.5.3.9 SIGEL

O Portal de Geoprocessamento da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) reúne os dados geográficos do Setor Elétrico de sua base de dados. A ANEEL com o intuito de dar publicidade a essas informações e auxiliar no planejamento e monitoramento do setor, nas pesquisas acadêmicas ou apenas para conhecimento do panorama do Setor Elétrico do país criou o SIGEL (Sistema de Informações Georreferenciadas). Um sistema com informações georreferenciadas de todo o setor energético brasileiro com dados das áreas de geração, de transmissão e de distribuição de energia. Nesta base podem ser realizados download dos dados nos formatos shapefile e kmz (Google Earth) e pode ser acessada pelo endereço <http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>

2.5.4 Geoestatística

O engenheiro francês Georges Matheron foi quem primeiro utilizou o termo Geoestatística (ANDRIOTTI, 2003). Geoestatística é um ramo da estatística que utiliza conceito de variáveis regionalizadas na avaliação de variabilidade espacial (GREGO et al., 2014).

Andriotti (1988) afirma que para Matheron o termo Variável Regionalizada visa alertar para o aspecto aleatório e o estruturado que o termo comporta. A aleatoriedade indica que os valores das medições realizadas podem variar entre si e estruturado corresponde a sua característica regionalizada, isto porque as amostras trabalhadas não são completamente independentes de sua localização geográfica. Desta forma, a regionalização e o caráter estruturado dos fenômenos e a linguagem utilizadas para trata-los e das funções aleatórias. Quase todas as variáveis quantitativas com que trabalhamos nas Ciências da Terra podem ser consideradas como Variável Regionalizada (VR). Como exemplo de VR pode-se citar a precipitação anual ou a espessura de uma camada de rocha. Como estes valores numéricos são dependentes entre si, não é possível tratá-los apenas pelos métodos estatísticos clássicos e é nesta circunstância que a geoestatística contribui para o estudo. Este autor acrescenta ainda

que a geoestatística trata das variáveis como regionalizadas, podendo, mesmo, ser considerada uma aplicação prática da Teoria das Variáveis Regionalizadas e leva em consideração as relações espaciais existentes entre as observações que compõem uma amostra, além de possibilitar também a quantificação dos erros cometidos nas avaliações.

Na década de 1970, a Geoestatística obteve grandes avanços na conceituação teórica e nos campos de atividade em que era aplicada, tendo ocorrido naqueles anos, no mundo todo, um crescimento importante na utilização dessa técnica (ANDRIOTTI, 2003).

Yamamoto e Landim (2013) mencionam que a partir da década de 80 a metodologia geoestatística passou a ter ampla aplicação, além de Lavra e Prospecção Mineira, também a Agricultura de Precisão, a Cartografia, a Climatologia, a Engenharia Florestal, a Hidrologia, a Pedologia, dentre outras áreas do conhecimento.

Para Chilés e Delfiner (1999) geoestatística é uma ferramenta que visa fornecer descrições quantitativas de variáveis naturais distribuídas no espaço ou no tempo, tais como: precipitação, propriedade do solo em uma região, temperatura, dentre outros. Tais valores são implicitamente assumidos ser correlacionados com outros, e o estudo de tal correlação é denominada de análise estrutural ou modelagem do variograma. Depois da análise estrutural, inferências em localizações não amostradas são realizadas usando krigagem. Segundo estes mesmos autores, a aplicação da técnica de geoestatística inclui as seguintes etapas: (a) análise exploratória dos dados, (b) análise estrutural (cálculo e modelagem do variograma) e (c) realização de inferências (krigagem ou Simulação).

Krigagem é uma metodologia empregada pela geoestatística, para estimar valores de um determinado parâmetro (CAMARGO et al., 2003). Esta metodologia possui como pressuposto a não geração de resultados tendenciosos e o melhor estimador linear imparcial (CLARK, 1979; ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

Andriotti (2003) ressalta que as técnicas geoestatísticas podem ser usadas para descrever e estabelecer o modelo de padrões espaciais (variograma), para prever valores em locais não amostrados (krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de krigagem) e para otimizar malhas de amostragem.

A geoestatística iniciou-se com o estudo de Daniel Krige na década de 1950 quando publicou seus estudos relativos a cálculos relacionados as reservas minerais na África do Sul. Krige (1951) apud Andriotti (2003) verificou que somente a informação fornecida pela variância seria insuficiente para explicar a distribuição das amostras, sendo assim, seria necessário levar em consideração a distância entre as observações.

Andriotti (2003) explica que a qualidade essencial de uma estimativa não é simplesmente associar um valor a um ponto ou a um bloco, mas também associar a esta avaliação uma idéia da qualidade da estimativa, dimensionando o erro existente, ou seja, é necessário que se saiba quão distante o valor atribuído pode estar do valor real. Ressalta ainda este autor que a geoestatística por meio da krigagem, fornece uma estimativa do ponto ou do bloco e, juntamente com ela, uma medida de acuracidade desta estimativa.

Em numerosos trabalhos têm sido empregado métodos geoestatísticos para realizar estimativas de dados de precipitação em áreas não amostradas, usando algoritmo de interpolação espacial.

Sadighi e Vafakhah (2015) realizaram uma pesquisa na província Lorestan, no Irã, com a finalidade de investigar as variações espaciais e as alturas anuais de precipitação entre os anos de 1951 a 2009. Para realizar as estimativas de precipitação ao longo da área de estudo, utilizaram-se de interpoladores geoestatísticos e o método IQD (Inverso do Quadrado da Distância). Observaram que os métodos geoestatísticos (krigagem e co-krigagem) em comparação ao método IQD apresentaram melhor precisão para realizar a predição da variação espacial de precipitação mesmo em áreas onde não haviam dados disponíveis.

Viola et al. (2010) fizeram um estudo com a finalidade de avaliar o desempenho de interpoladores no mapeamento da precipitação média mensal, precipitação média do período seco e precipitação média anual do Estado de Minas Gerais. Para isto empregou quatro diferentes interpoladores: inverso do quadrado da distância, modelagem estatística, krigagem e cokrigagem, sendo estes dois últimos interpoladores geoestatísticos. Estes pesquisadores identificaram a necessidade de investigar o desempenho dos interpoladores mais aplicados ao mapeamento de variáveis climáticas (precipitação), uma vez que os trabalhos desenvolvidos até aquele momento não demonstraram e nem concluíram de forma efetiva o melhor ou o mais indicado processo de interpolação espacial. A conclusão do estudo foi que todos os interpoladores utilizados apresentaram erros absolutos médios aceitáveis, porém os interpoladores geoestatísticos obtiveram melhor desempenho.

Río et al. (2011) elaboraram um estudo para identificar a distribuição espacial da magnitude das tendências de precipitação na Espanha. Para isto foram analisados dados mensais de precipitação de 553 estações pluviométricas com série histórica de 1961 a 2006. Para cada uma destas estações pluviométricas foi utilizado teste estatístico a fim de determinar as tendências de diminuição ou de aumento de precipitação. Por fim, para espacializar a magnitude das tendências de precipitação foi aplicado o interpolador

geoestatístico krigagem. Este trabalho indicou um aumento de precipitação para as áreas ocidental, central e oriental da Espanha para o período de 1961 a 2006. Nas áreas ocidental e central o aumento de precipitação ocorreu nas estações outono e verão e para a área oriental a precipitação aumentou na primavera e no inverno.

2.5.4.1 Krigagem

A krigagem é um método de estimativa por médias móveis e se destaca por levar em consideração a variabilidade espacial dos dados. É uma técnica geoestatística frequentemente utilizada no estudo da distribuição espacial de precipitação pluvial, pois consegue fazer a correlação espacial entre observações vizinhas para prever valores em locais não amostrados, sendo este recurso o que a diferencia dos demais interpoladores (CARVALHO E ASSAD, 2003). Segundo Landim (2006), krigagem é um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma.

Para verificar a relação da distribuição da variável no espaço, utiliza-se o semivariograma, o qual é capaz de medir o grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico (LANDIM, 2006).

Baseada em um estimador linear que atribui um maior peso para os pontos de dados mais próximos da previsão de locais não medidos, a krigagem não é uma metodologia determinística, pois incorpora propriedades estatísticas para estimar dados, como a correlação espacial.

A metodologia krigagem emprega o semivariograma para expressar a continuidade espacial (autocorrelação) e requer duas etapas diferentes. Primeiramente, realiza-se a modelagem do semivariograma para toda a área e em um segundo momento emprega-se o interpolador geoestatístico krigagem para estimar os pontos não amostrados de uma determinada área (BHOWMIK e COSTA, 2012).

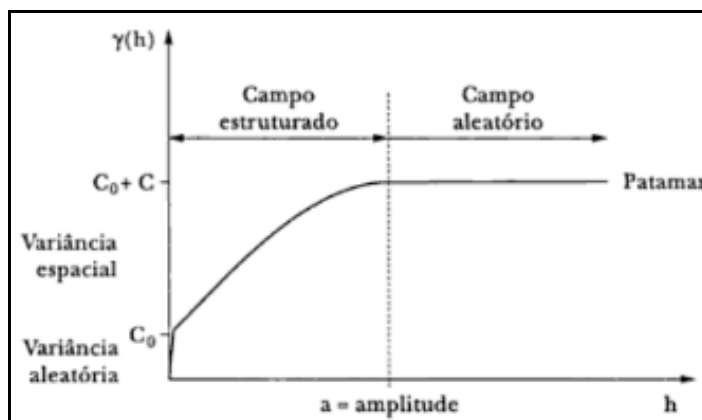
Conforme Gooverts (2000), as observações que são próximas umas das outras em um terreno tendem a ser mais parecidas do que aquelas mais distantes, assim as observações mais próximas deve receber um maior peso. Ao invés de utilizar a distância entre dois pontos, a geoestatística utiliza o semivariograma como uma medida para diferenciação entre as observações. O semivariograma experimental ($\gamma(h)$) é calculado como metade da média ao quadrado da diferença entre os componentes de pares de dados, conforme Equação 1.

$$\gamma(h) = \frac{1}{|2N(h)|} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[z(x_i + h) - z(x_i) \right]^2 \quad (1)$$

em que $N(h)$ é o número de elementos distintos. O semivariograma é uma função tanto da distância como da direção, e por isso pode explicar a variabilidade da dependência da direção (padrão espacial anisotrópica).

Todos os elementos que compõe um semivariograma podem ser vistos na Figura 12. Estas são descritas a seguir por Yamamoto (2001). O patamar ou *sill* representa uma estabilização ($C+C_0$) do semivariograma, em razão de não mais haver uma dependência espacial. A distância da origem até onde ocorre o patamar é conhecido por amplitude ou *range*, ou seja, é a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes, isto é, esta reflete o grau de homogeneização entre as amostras. Teoricamente, quando duas amostras de mesmo ponto ($h=0$) são ensaiadas, deveriam apresentar os mesmos valores, entretanto, devido a erros de amostragem, de análise ou da variabilidade natural do depósito, isto pode não ocorrer. Assim, efeito pepita é representado pelo valor do erro obtido entre amostras obtidas de um mesmo local.

Figura 12 - Desenho típico de um semivariograma e suas propriedades



Fonte: Yamamoto, 2001

A grande diferença entre a krigagem e outros métodos de inferência é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. Para Camargo (2003), na interpolação por média simples, os pesos são todos iguais e na interpolação baseada no IQD, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Este autor ressalta que na krigagem, o procedimento é semelhante ao de

interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de análises espaciais, baseadas no semivariograma experimental.

Yamamoto e Landim (2013) acrescentam que a krigagem pode ser comparada com os métodos tradicionais de estimativa por médias ponderadas ou por médias móveis, mas a sua diferença fundamental é que somente a krigagem apresenta estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado.

A krigagem se distingue dos demais métodos de estimativa de dados, pois em todas situações o método fornece, além dos valores estimados, valor do “erro” associado a uma determinada estimativa, além disso, este método emprega os resultados do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras a serem estimadas. Como o semivariograma é uma função da distância entre locais de amostragens, mantendo o mesmo número de amostras, os pesos são diferentes de acordo com o seu arranjo geográfico (LANDIM, 2006).

De acordo com Isaaks e Srivastava (1989) a krigagem gera as melhores estimativas de dados uma vez que está relacionada ao BLUE (Best Linear Unbiased Estimation), termo que em português significa melhor estimador linear imparcial. Ainda segundo estes autores, a krigagem é considerada linear, porque suas estimativas são ponderadas combinações lineares dos dados disponíveis, imparcial, pois a média do erro é nula e por fim é “melhor” porque visa minimizar a variância dos erros.

2.6 ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE SERIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO E DE VAZÃO

O ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e a rotação terrestre (TUCCI, 2014). Este ciclo possui várias fases, as quais ocorrem contínua e indefinidamente. A fase da evaporação da superfície líquida ou sólida e a transpiração de plantas agregam vapor de água a atmosfera. Este vapor uma vez elevado e condensado pode tornar-se precipitação, retornando aos mares e à superfície terrestre. A precipitação pode ser interceptada pelas folhagens da vegetação, retidas pelas irregularidades da superfície, infiltrada no solo ou escoar diretamente na superfície. A parcela infiltrada pode retornar por evaporação à atmosfera, por escoamento subsuperficial aos canais ou pode percolar pelo solo, alimentando os lençóis de água subterrâneo (BIELENKE e BARBASSA, 2012).

De acordo com Naguettini e Pinto, (2007), a Hidrologia, como ciência da Terra que estuda a ocorrência, a distribuição, o movimento e as propriedades da água na atmosfera, na superfície e no subsolo, tem buscado, cada vez mais, uma abordagem sistêmica e interdisciplinar, integrando-se às outras geociências com o objetivo de expandir o conhecimento existente das diversas fases do ciclo da água no planeta. Estes mesmos autores relatam que ao tratar o ciclo hidrológico de forma integrada, tem-se como propósito a descrição do passado e a previsão do futuro.

Os conhecimentos de hidrologia podem ter aplicações práticas para planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, tais como: geração de energia elétrica, abastecimento de água, irrigação, controle de erosão, sedimentação, dentre outros. Para o alcance destes objetivos requer a quantificação confiável das variabilidades espaciais e/ou temporais presentes em fenômenos hidrológicos. Estes fenômenos são mecanismos de armazenamento e transporte entre as diversas fases do ciclo da água em nosso planeta como a precipitação e o escoamento.

O desenvolvimento científico e tecnológico possibilitou o registro das variáveis hidrológicas, tais como as precipitações e os níveis em curso de água. O conjunto dessas informações permite a formação de séries ao longo do tempo e estas são utilizadas pela estatística como uma importante ferramenta para realizar análises, possibilitando assim o desenvolvimento de estudos em hidrologia.

Os arquivos de registro de vazão de um rio são informações vitais para a avaliação baseada em evidências de variabilidade hidrológica que ocorreu no passado e apoiar a modelagem hidrológica de mudanças futuras, além de servirem para a identificação dos locais e períodos de tempo mais sensíveis ao clima e impactos humanos (HANNAH et al., 2011). As medições de vazão dos rios são de grande importância por fornecerem bases para o planejamento dos recursos hídricos, a tomada de decisão, a política e a concepção de infraestruturas.

Informações confiáveis a respeito dos padrões de rios de pequenas ou grandes bacias, permitem a identificação de mudanças nos regimes de fluxo, entretanto o conhecimento de padrão regional de mudança hidrológica tornou-se um dos desafios mais importantes da hidrologia contemporânea (STAHL et al., 2010).

A tendência em uma série temporal é uma mudança climática caracterizada por um suave acréscimo ou decréscimo nos valores médios no período de registro (BACK, 2001). Yevjevich (1972) apud Back (2001) afirma que tendência em uma série temporal é uma

mudança sistemática e contínua em qualquer parâmetro de uma dada amostra, excluindo-se mudanças periódicas ou quase periódicas.

A presença de tendência em séries temporais de precipitação resulta essencialmente da variabilidade natural presente nos processos hidrológicos ou está diretamente relacionada com a existência de alterações climáticas (LIMA et al., 2005). As séries temporais de vazão, para Mortatti et al. (2004), são o resultado da integração dos componentes do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, das influências naturais e antrópicas numa determinada região. Tais ações antropogênicas podem alterar os regimes hidrológicos naturais, podendo modificar as vazões dos rios, como por exemplo, a construção de barragens com a finalidade de gerar energia elétrica (HADDELAND et al., 2006).

Dada à natureza probabilística do fenômeno hidrológico, a Estatística é uma área de conhecimento importante da Hidrologia, utilizada na avaliação do comportamento dos processos hidrológicos (NAGUETTINI e PINTO, 2007).

Algumas atividades humanas estão vinculadas aos processos hidrológicos, os quais possuem um caráter de aleatoriedade. Sendo assim, pode-se encontrar dificuldade em realizar o planejamento das atividades humanas. Tucci (2014) afirma que diante desta dificuldade o ser humano buscou estabelecer instrumentos para o tratamento desta aleatoriedade, sendo uma delas a estatística.

Existem métodos estatísticos que viabilizam a identificação de tendências em séries históricas, um deles é o teste estatístico não paramétrico.

De acordo com Penereiro e Ferreira (2012) para verificar se realmente uma série histórica de dados possui tendência, ou se a mesma está mascarada pela eventual flutuação da base de dados, é necessário que se realizem testes estatísticos mais sensíveis à identificação de tendência e o teste não paramétrico sequencial de Mann-Kendall é o método mais apropriado para isto.

Yue et al. (2002) e *World Meteorological Organization* (1998) concordam que o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall tem sido comumente utilizado para avaliar a significância das tendências em séries temporais, tais como a precipitação e a vazão.

Segundo Yue et al. (2002), a principal razão para a utilização deste teste estatístico não paramétrico é que, em comparação com os testes estatísticos paramétricos, os testes não paramétricos são pensados para ser mais adequados para dados que não sejam normalmente distribuídos, condição esta frequentemente encontrada em séries temporais hidrometeorológicas.

O teste Mann-Kendall verifica se uma variável de resposta aleatória monotonicamente pode aumentar ou diminuir com tempo, sendo o teste também resistente à influência de extremos (LINS e SLACK, 1999).

Hamed (2008) afirma que o estudo de tendências hidrológicas tem recebido especial atenção, especialmente em virtude das previsões de alterações climáticas. Acrescenta ainda este autor que o teste não paramétrico de Mann-Kendall é uma ferramenta amplamente utilizada para identificar tendências significativas em séries temporais.

Lacruz et al. (2012) realizaram uma análise das tendências de vazão em 187 sub-bacias hidrográficas localizadas na Península Ibérica levando-se em consideração registros datados entre os anos de 1945 e 2005. Os resultados deste estudo possibilitaram a identificação de uma acentuada diminuição do escoamento anual, durante o inverno e a primavera para a maioria dos rios das bacias ibéricas, especialmente aquelas localizadas na porção sul. Estes autores ainda advertem que o decréscimo do fluxo na Península Ibérica pode ser intensificado nas próximas décadas, uma vez que as projeções climáticas futuras mostram uma tendência de diminuição generalizada na precipitação.

A abordagem não paramétrica tem sido aplicada para realizar análise de tendência de série de dados pluviométricos e fluviométricos em diversas regiões do mundo. Um exemplo relativamente recente foi realizado por Stahl et al. (2010). Estes autores analisaram 441 bacias hidrográficas em toda a Europa, empregando dados de quatro décadas, a fim de avaliar o padrão de tendência de vazão na parte sul da Europa. Ao final deste estudo, identificaram que há fortes tendências de diminuição da vazão não apenas para as regiões sul e leste da área de estudo, mas também de forma generalizada por toda a Europa durante os meses de verão e primavera.

Na América do Norte, especificamente nos Estados Unidos, empregando o teste de Mann-Kendall, Lettenmaier et al. (1994) avaliaram as tendências de vazões médias em 1009 estações fluviométricas e a tendência de precipitação em 1.036 estações pluviométricas, durante os anos de 1948 a 1988. Ao término da pesquisa, foi possível constatar um aumento da precipitação entre os meses de setembro a dezembro em até 25% das estações situadas na parte central do país. Com relação à tendência da vazão média, foi observado que grande parte dos rios situados na porção noroeste dos Estados Unidos experimentou declínio na vazão, enquanto que aqueles localizados na região centro-oeste apresentaram tendência de aumento de seu fluxo. Lettenmaier et al. (1994) relatam ainda que as tendências observadas com

relação a vazão não estão relacionadas com variáveis climáticas, mas com uma combinação entre clima e efeitos da gestão de recursos hídricos.

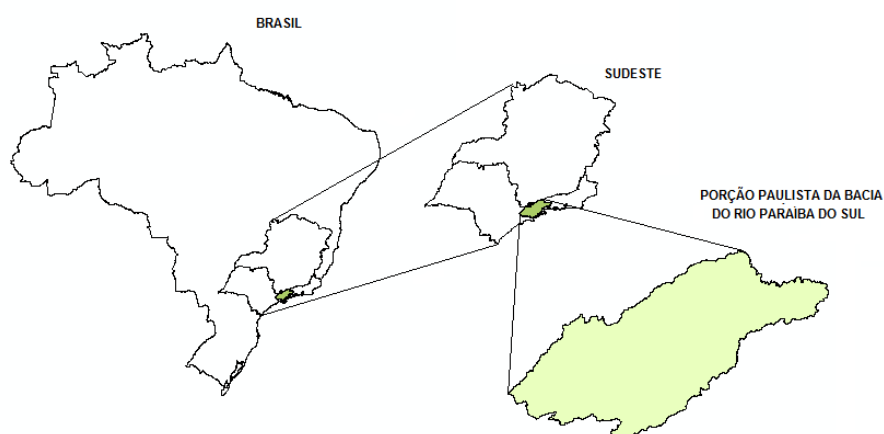
Marengo e Alves (2005) realizaram um estudo na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul com o objetivo de detectar e explicar as tendências de precipitação e de vazão ocorridas nesta localidade. Empregaram dados de precipitação e de vazão da década de 30 até o final da década de 90. Por meio deste estudo, foi constatado que não houve tendência de precipitação para os postos pluviométricos. Com relação à análise dos dados fluviométricos, foi identificada uma tendência negativa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Paraíba do Sul 02 (UGRHI-02). Localiza-se na porção paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (Figura 13) e possui uma área de 13.272 km². É uma região de dinâmica econômica intensa, devido a presença de diversos polos industriais e tecnológicos.

Figura 13 – Localização da área de estudo



Fonte: produção do próprio autor

O Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – CEIVAP publicou em 2006 o plano de recursos hídricos desta bacia. Neste documento afirmam que o aproveitamento de potência instalada de Paraibuna/Paraitinga possui 86 MW, de Santa Branca tem 58 MW e Jaguari tem 27,6 MW. De acordo com CEIVAP (2006), os reservatórios de Paraibuna/Paraitinga e Jaguari são os que apresentam maiores volumes de regularização de vazões, sendo os principais responsáveis em garantir o abastecimento da região metropolitana do Rio de Janeiro.

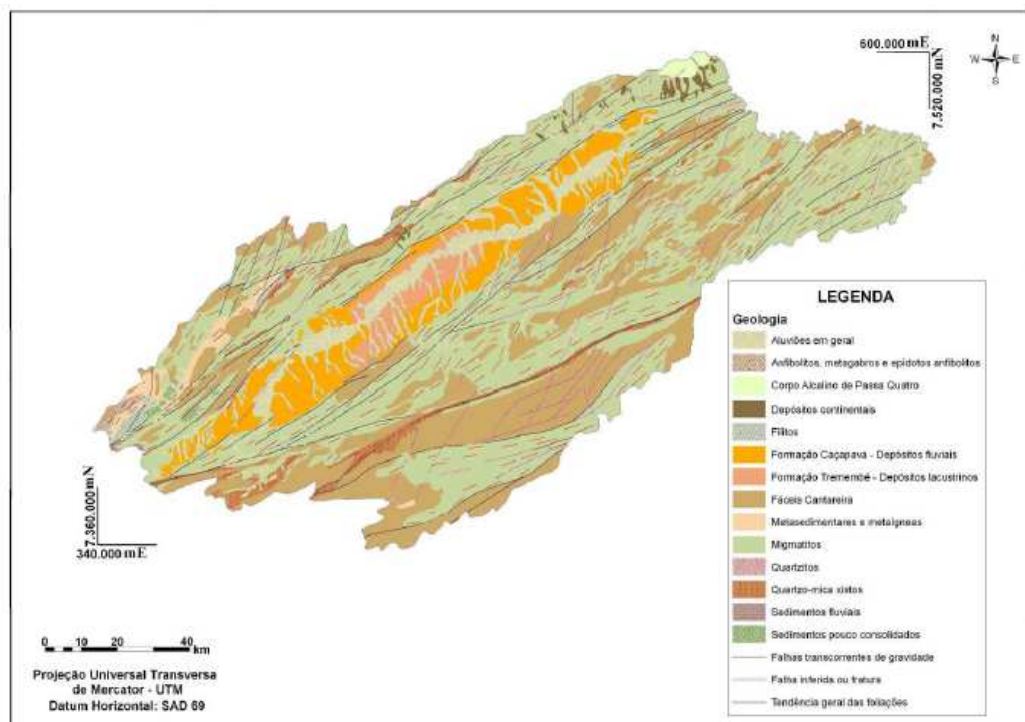
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.2.1 Geologia, geomorfologia e pedologia da área de estudo

Sátiro et al. (2013) realizaram uma simplificação das unidades geológicas existentes na porção paulista do Vale do Paraíba do Sul, tomando como base o Mapa Geológico do Estado de São Paulo produzido pelo IPT (1981), reagrupando e reclassificando as pequenas unidades com litologias semelhantes para representar as maiores unidades geológicas.

Assim, segue a nova reclassificação: as unidades granitos, rochas metassedimentares, migmatitos e quartzitos correspondem às unidades constituídas de rochas cristalinas (ígneas e metamórficas), de idade precambriana (maior que 500 milhões de anos) e as unidades rochas sedimentares arenosas, rochas sedimentares argilosas, depósitos de colúvio e tálus e planícies aluvionares correspondem às rochas sedimentares de idade Terciária-Quaternária (inferior a 60 milhões de anos) da Formação Caçapava (sedimentos arenosos), Formação Tremembé (sedimentos argilosos) e sedimentos aluvionares quaternários. A Figura 14 ilustra a reclassificação das unidades geológicas da porção paulista do rio Paraíba do Sul.

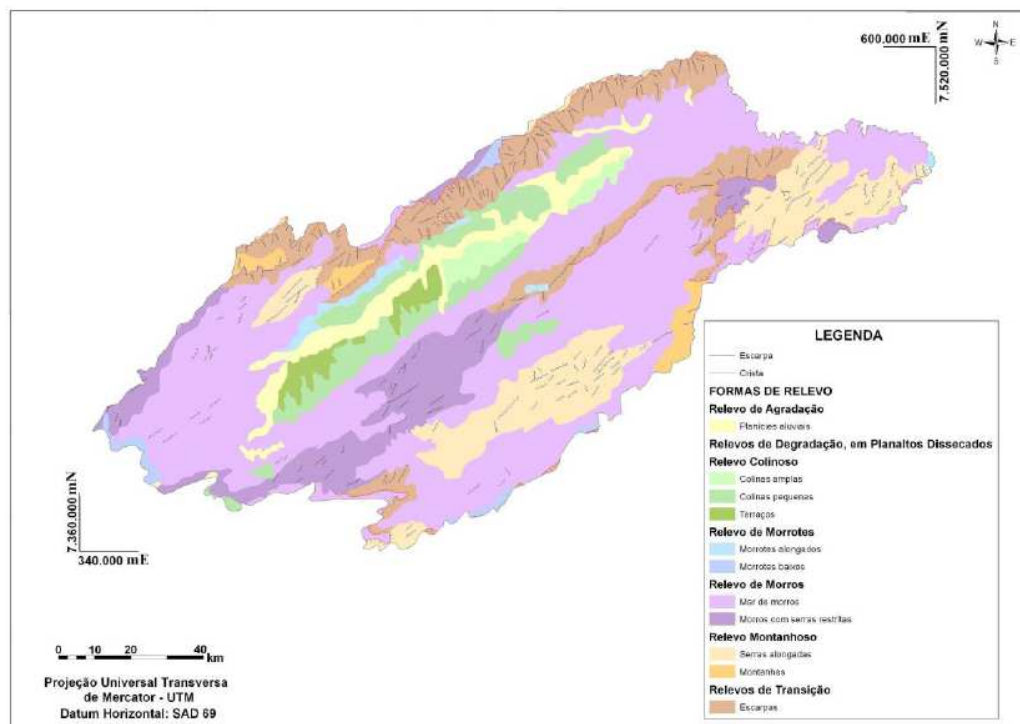
Figura 14 – Mapa Geológico da bacia do rio Paraíba do Sul porção paulista



Fonte: Sátiro et al., 2013

Com relação à geomorfologia da região estudada, Sátiro et al. (2013) agruparam e reclassificaram os relevos similares da mesma forma que as unidades geológicas, para que fosse possível a identificação das unidades de relevo distintas. Observa-se na Figura 15 a divisão da área em seis tipos de relevo.

Figura 15 – Mapa geomorfológico da bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista)

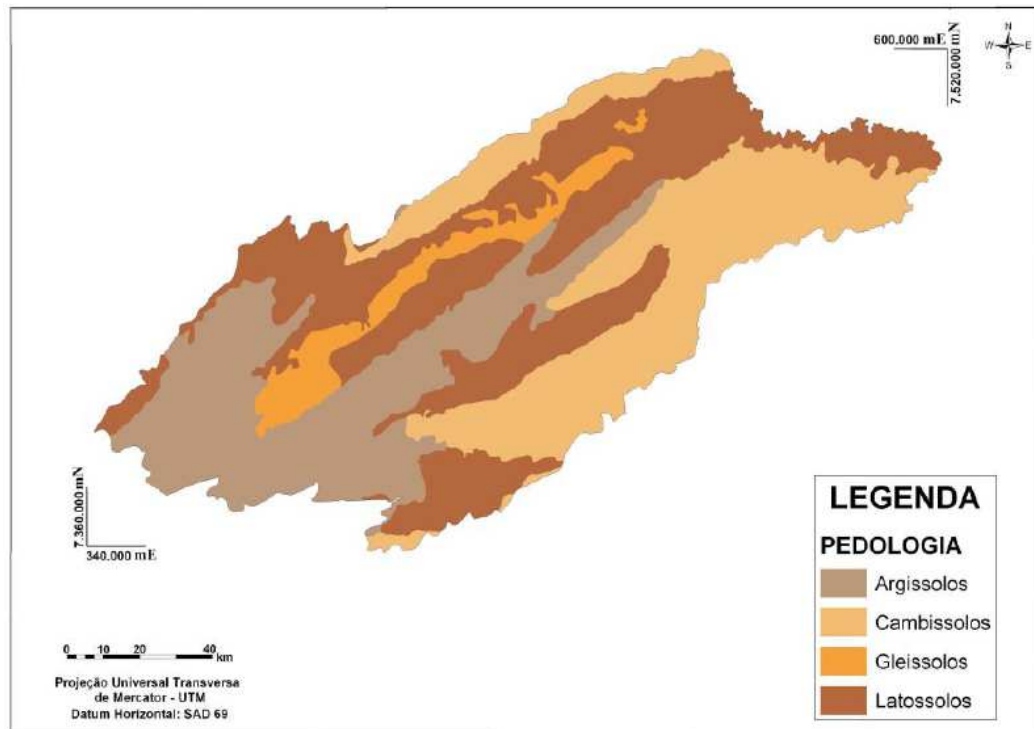


Fonte: Sátiro et al., 2013

As características dos relevos reclassificados foram descritas por Sátiro et al. (2013). O relevo colinas amplas e colinas suaves têm topos amplos e arredondados com declividades normalmente inferiores a 15%. Os relevos de morros, com declividades elevadas de 30% a 50% em média, possuem serras restritas, topos arredondados e drenagem relativamente menos densa quando comparados com outros tipos de relevo encontrados no ambiente de morros e serras existente na região. Os relevos de morrotes caracterizam por ter uma maior declividade, 20% a 30% em média e tenderem ao favorecimento de escoamento superficial em detrimento dos processos de infiltração e evidências de processos erosivos lineares. O relevo serras alongadas e relevos de escarpas, com declividades médias de 30% a 50%, possuem amplitude superiores a 300 metros que viabilizam os processos de erosão linear e escorregamentos. E por fim, as planícies aluviais que são propícias a inundações.

Para a área de estudo, Sátiro et al. (2013) identificaram cinco classes de solo que são apresentadas no mapa pedológico da bacia do rio Paraíba do Sul, porção paulista (Figura 16).

Figura 16 - Mapa pedológico da bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista)



Fonte: Sátiro et al., 2013

Algumas propriedades identificadas por estes mesmos autores com relação as cinco unidades de solo são: a) latossolos: possuem boa drenagem e baixa erodibilidade; b) argissolos: têm heterogeneidade vertical, com níveis enriquecidos em argila que dificultam a drenagem para os níveis inferiores; c) gleissolos: são solos orgânicos de várzea, apresentando baixas condições de infiltração; d) cambissolos húmicos; e) cambissolos háplicos. Os dois tipos de cambissolos, de uma maneira geral, são de relevo normalmente íngreme.

3.3 METODOLOGIA PARA GERAR MAPAS DE PRECIPITAÇÃO

3.3.1 Escolha das estações pluviométricas

Os dados pluviométricos empregados para a realização deste estudo foram obtidos, em sua grande maioria, de uma base de dados pluviométricos disponibilizada pelo Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo (SIGRH). Os demais dados

foram provenientes do Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB), que disponibilizam dados de estações pluviométricas de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Um número significativo de estações apresenta séries históricas desatualizadas ou relevantes falhas em seus registros.

Assim, foi necessário identificar aqueles postos pluviométricos que possuíam dados confiáveis e que apresentavam séries históricas atualizadas com período mínimo de 30 anos contínuos. Outro aspecto verificado foi o nível de falhas destes registros, ou seja, estes não deveriam possuir mais do que 5% de dados faltantes.

Os dados faltantes foram preenchidos pelo método da ponderação regional. Este prevê o preenchimento das falhas de um posto pluviométrico com base nos dados de pelo menos três postos vizinhos, que devem ser de regiões climatologicamente semelhantes ao do posto em estudo. A partir destes critérios, foram selecionados 30 postos pluviométricos (Tabela 2), cuja distribuição espacial pode ser observada na Figura 17. Deste total de postos, nove estão localizados nas cercanias dos limites da bacia. Isto ocorreu em razão da dificuldade de se encontrar estações pluviométricas situadas dentro do limite da área de estudo com dados de precipitação atualizados.

A Tabela 2 apresenta o detalhamento dos postos com relação ao período de anos, a altitude e a porcentagem de dados faltosos. Os dados empregados na pesquisa datam do início da década de 70 até o ano de 2014.

Para visualização espacial da localização dos postos pluviométricos foi elaborado um Modelo Digital do Terreno, empregando o software ArcGIS®.

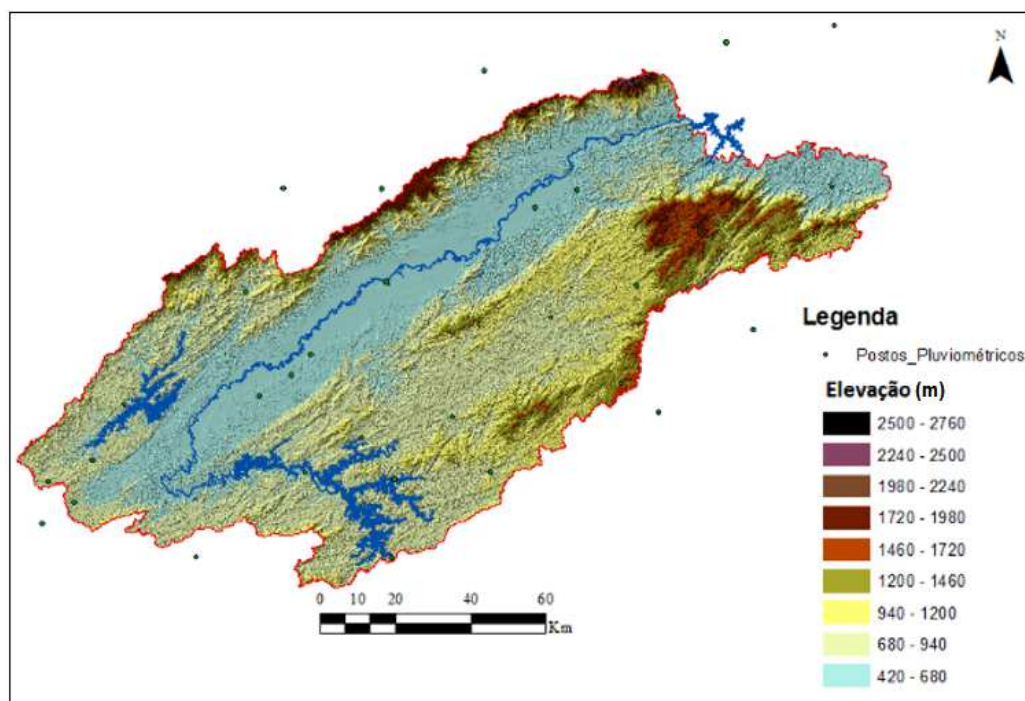
A hipsometria da área da bacia é representada de forma detalhada também na Figura 17. Pode-se observar que grande parte das estações pluviométricas localiza-se em baixas altitudes (inferiores a 940 m) e, em menor número, em altas altitudes.

Tabela 2 – Dados dos postos pluviométricos utilizados

POSTO	Nº DE ANOS E PERÍODO	ALTITUDE (m)	DADOS
			INTERPOLADOS (%)
Bananal	33 (1982-2014)	460	2,2
Monteiro Lobato	33 (1982-2014)	680	4,9
Lorena	33 (1982-2014)	540	1,0
Natividade da Serra	33 (1982-2014)	720	1,5
Alferes	35 (1980-2014)	670	4,7
Redenção da Serra	33 (1982-2014)	740	0,5
Sape	33 (1982-2014)	620	0,0
Cerâmica Quirino	33 (1982-2014)	580	1,0
Pararangaba	33 (1982-2014)	570	0,2
S. Luiz do Paraitinga	37 (1972-2008)	740	4,7
Briet	33 (1982-2014)	815	2,2
Alto da Serra	33 (1982-2014)	760	3,5
Santa Isabel	45 (1970-2014)	690	4,7
São Bento	33 (1982-2014)	690	1,0
Igaratá	33 (1982-2014)	780	0,2
B. Fazenda Velha	41 (1974-2014)	760	4,8
Faz. Santa Clara	33 (1982-2014)	550	3,5
Alto S. do Mar	33 (1982-2014)	1050	0,5
Estrada de Cunha	33 (1982-2014)	790	0,5
Campos de Cunha	33 (1982-2014)	750	0,7
Pindamonhangaba	33 (1982-2014)	524	3,7
Faz. Agulhas Negras	33 (1982-2014)	1245	0,2
Faz. da Guarda	31 (1982-2012)	1504	4,5
B. Santa Cruz	41 (1973-2013)	1083	4,8
Vila Mambucaba	33 (1982-2014)	10	0,7
Parati	33 (1982-2014)	30	1,5
Fumaça	33 (1982-2014)	720	0,2
Ponte Nova	33 (1982-2014)	800	0,5
Monte Belo	33 (1982-2014)	790	0,7
S. Bento do Sapucaí	30 (1981-2010)	926	4,7

Fonte: produção do próprio autor

Figura 17 - Modelo Digital da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul



Fonte: produção do próprio autor

3.3.2 Inserção de dados das estações pluviométricas em ambiente SIG

Tendo sido definidas as estações pluviométricas a serem utilizadas no estudo, um banco de dados foi organizado por meio do software Microsoft Excel®. As informações introduzidas neste banco de dados relacionavam-se com as características de cada estação pluviométrica, tais como: nome, coordenada espacial, alturas de precipitação acumulada mensal, altitude, intervalo dos registros de dados, município onde está localizada a estação, órgão responsável pela estação.

Posteriormente, o banco de dados foi georreferenciado por meio de um sistema de coordenadas e de projeção e inserido no ArcGIS®.

Foi realizada a análise das séries históricas de precipitação inter e intra-anual. Para a avaliação intra-anual, os dados de precipitação foram organizados em quatro períodos sazonais, sendo representados da seguinte maneira: DJF (dezembro – janeiro – fevereiro), MAM (março-abril-maio), JJA (junho-julho-agosto) e SON (setembro-outubro-novembro). Para a determinação da pluviosidade por período intra-anual, foi calculada a média das precipitações mensais e, na sequência, a soma destas médias de cada período intra-anual. Este cálculo foi realizado para cada um dos postos pluviométricos.

Para a determinação da pluviosidade por período intra-anual, foi calculada a média das precipitações para cada mês considerando os dados da série histórica de cada posto pluviométrico. Em seguida estes dados foram somados trimestralmente de acordo com o período sazonal.

As etapas de inserção de dados das estações pluviométricas em ambiente SIG foram desenvolvidas no Laboratório de Informática e Geoprocessamento do Instituto de Ciência e Tecnologia da Unesp em São José dos Campos.

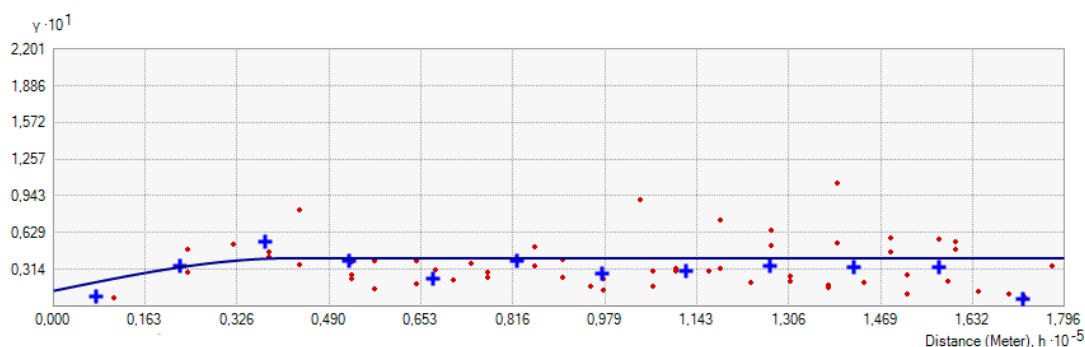
3.3.3 Procedimento geoestatístico para geração de mapa de previsão de precipitação

Para elaboração dos mapas de espacialização da precipitação para os períodos DJF, MAM, JJA e SON, será utilizado o método geoestatístico denominado krigagem. As principais etapas para a aplicação desta técnica são a modelagem do semivariograma e o emprego do algoritmo de krigagem (BHOWMIK e COSTA, 2012).

A etapa de modelagem do semivariograma consiste em identificar o modelo do semivariograma que melhor se ajusta a distribuição dos pontos. Este procedimento foi realizado pelo programa ArcGis® por meio da ferramenta *Geoestatística Wizard*. O melhor modelo de semivariograma identificado para a elaboração dos mapas de espacialização de precipitação da porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul para os períodos DJF, MAM, JJA e SON foi o esférico. Isto foi possível após a análise do comportamento dos dados de precipitação. Segundo Landim (2006) as melhores estimativas são obtidas quando os modelos são baseados em semivariogramas experimentais que apresentam a menor razão “efeito pepita/patamar” e, também, o maior alcance.

A Figura 18 apresenta o semivariograma mais adequado para a geração dos mapas de espacialização de precipitação da bacia do rio Paraíba do Sul, obtidos por meio dos dados de precipitação para o período JJA. Para os demais períodos (DJF, MAM e SON), o procedimento de elaboração dos semivariogramas foi o mesmo.

Figura 18 - Semivariograma para dados de precipitação do período JJA



Fonte: produção do próprio autor

Realizada a definição dos semivariogramas, os mapas foram produzidos por meio da aplicação do algoritmo krigagem. O software ArcGis® executou o algoritmo matemático para calcular o valor da variável precipitação e gerou os mapas de espacialização das precipitações da bacia para os períodos DJF, MAM, JJA e SON.

Com base no conhecimento prévio da distribuição espacial da precipitação da região, foi retirada uma estação pluviométrica do banco de dados por esta estar interferindo no processo de distribuição espacial das precipitações, podendo assim implicar na representação de um fenômeno não característico para o local. É importante ressaltar que a cada retirada de estação pluviométrica do banco de dados, deve-se novamente realizar o processo de modelagem do semivariograma, para se obter uma distribuição ajustada aos dados em análise.

3.4 METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DE TENDÊNCIA EM SÉRIES HISTÓRICAS PLUVIOMÉTRICAS E FLUVIOMÉTRICAS

Para a realização da análise de tendência das séries históricas pluviométricas e fluviométricas foi empregado inicialmente a planilha eletrônica Microsoft Excel® para a organização dos registros de precipitação e vazão. Posteriormente, foi implementado o teste estatístico de Mann-Kendall, utilizando-se o software de análise estatística denominado XLSTAT® que possibilitou o cálculo do parâmetro de Mann-Kendall para um nível de confiança igual a 95%.

A metodologia do teste de Mann-Kendall pode ser definida pela Equação 2 (YUE et al., 2002; SILVA et al., 2010).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1+i}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (2)$$

em que x_j são os dados estimados da sequência de valores, n é o número de elementos da série temporal e o sinal $(x_i - x_j)$ é obtido pela Equação 3.

$$sinal(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, para (x_i - x_j) > 0 \\ 0, para (x_i - x_j) = 0 \\ -1, para (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Mann (1945) apud Yue et al. (2002) documentou que quando $n \geq 8$, demonstrou que S é normalmente distribuída com a média $E(S)$ e a variância $Var(S)$, para uma situação na qual pode haver valores de x . A média $E(S)$ e a variância $Var(S)$ são calculadas pelas Equações 4 e 5.

$$E[S] = 0 \quad (4)$$

$$Var[S] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (5)$$

sendo que (t_p) é o número de dados com valores iguais em certo grupo de p e q é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados em um grupo p ; o segundo termo representa um ajuste para dados censurados.

Ao empregar a Equação 2, pode-se obter um valor positivo de S , isto indica que a tendência também é positiva, ou seja, os dados crescem com o tempo, entretanto, caso seja calculado um valor negativo para S , implica em uma tendência decrescente. Sabendo-se que S é normalmente distribuída e que tem média zero, a partir da variância obtida pelas Equações 5 e 6, respectivamente, pode-se testar se a tendência positiva ou negativa é significativamente diferente de zero. Se S é significativamente diferente de zero, a hipótese nula (H_0 - Não há tendência na série) pode ser rejeitada para certo nível de significância apontando para a existência de tendência, assim sendo, a hipótese alternativa (H_1 - Há uma tendência na série) é aceita. O teste estatístico parametrizado (Z_{MK}) é computado pela Equação 6.

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}[S]}} & \text{para } S > 0 \\ 0 & \text{para } S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}[S]}} & \text{para } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Emprega-se o valor de Z para avaliar a presença de uma tendência estatisticamente significativa e para testar a hipótese nula (H_0). Um valor negativo de Z_{MK} indica uma tendência decrescente, enquanto que um valor positivo aponta uma tendência crescente

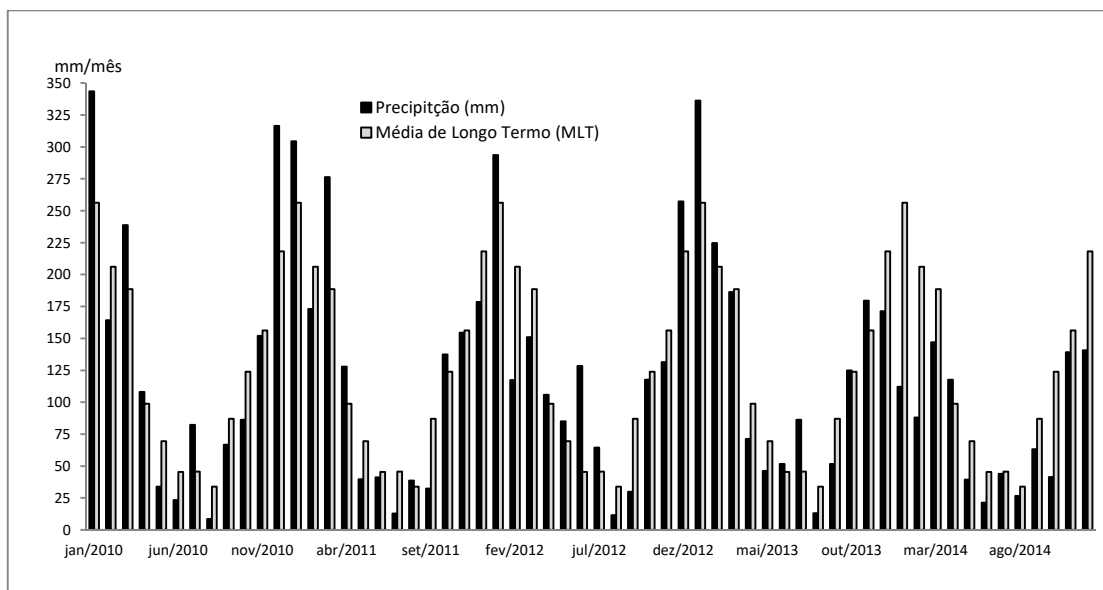
Para testar a tendência monotônica crescente ou decrescente no nível de significância de p , a hipótese H_0 será rejeitada se o valor absoluto de Z for maior que $Z_{1-p/2}$, sendo este último obtido por meio de tabela da distribuição normal cumulativa padrão.

4 RESULTADOS

4.1 PRECIPITAÇÃO MÉDIA DA ÁREA DE ESTUDO

Com as informações coletadas dos postos pluviométricos empregados para a realização deste estudo foi calculada a média de longo termo (MLT), por meio da análise da precipitação mensal, para o período de 1970 a 2014. O resultado obtido foi um acumulado de precipitação anual (MLT) de 1529 mm/ano e as médias acumuladas sazonais para os períodos DJF foi de 680 mm, para MAM foi de 357 mm, para o período seco, JJA, o registrado foi 125 mm e por fim para o período SON, 367 mm. É importante ressaltar que para o ano de 2014, o total médio de precipitação para a bacia foi de 980 mm/ano e média sazonal na estação chuvosa em 2013-2014 foi de 123 mm/mês. Conforme pode ser observado por meio da Figura 19, para todo o período de 2014 os totais mensais ficaram abaixo da média história da bacia. Ao analisar o total de precipitação acumulada no ano de 2014, verifica-se que este ficou abaixo 36% da média histórica da bacia e se for analisar o total acumulado para o verão do ano de 2013-2014 (371 mm), o resultado foi mais baixo ainda, uma vez que este valor ficou inferior à média de longo termo em 46%. Em função destes baixos índices pluviométricos ocorridos na região, foi observada uma diminuição anormal no nível equivalente dos reservatórios do Sistema Hidráulico do Paraíba do Sul.

Figura 19 – Precipitação média mensal da bacia do rio Paraíba do Sul de janeiro de 2010 a dezembro de 2014



Fonte: produção do próprio autor

4.2 ANÁLISE ESPACIAL DAS PRECIPITAÇÕES

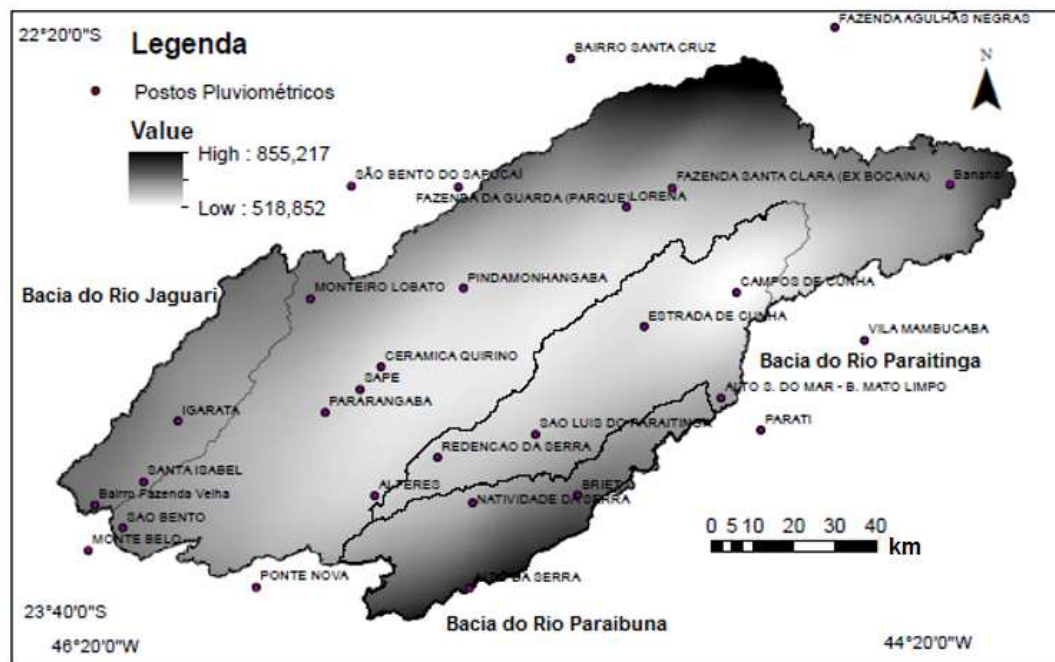
Para a elaboração dos mapas de precipitação foi utilizado o interpolador geoestatístico krigagem. O estudo da regionalização espacial da precipitação foi realizado, calculando-se a média de precipitação registrada para os quatro períodos trimestrais (DJF, MAM, JJA e SON), empregando séries históricas de 1970 a 2014.

Segundo Silva e Simões (2014), estima-se que 70% de toda a precipitação anual na região Sudeste brasileira ocorre durante o período de dezembro a fevereiro. Portanto, é importante analisar a precipitação espacial sazonalmente, visto as diferenças significativas que cada estação do ano pode apresentar. Por meio dos mapas de distribuição da precipitação, foi possível observar que há uma significativa variação espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, porção paulista.

Para o período chuvoso (DJF), as maiores intensidades pluviométricas ocorrem em três regiões da bacia: a primeira na porção norte, onde se localiza a formação da Serra da Mantiqueira com altitude de até 2400 m; a segunda na porção sul, onde percebeu-se uma faixa chuvosa localizada na Serra do Mar; e a terceira área, com maior concentração de precipitação, foi na região nordeste da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, com um relevo de morros e relevo montanhoso que atingem uma altitude de 1200 m.

A Figura 20 apresenta a distribuição da precipitação para o período DJF. As tonalidades mais escuras representam áreas com maior concentração de precipitação enquanto as tonalidades mais claras registram menores intensidades.

Figura 20 - Distribuição espacial da precipitação durante o período DJF indicando as áreas com maiores precipitações



Fonte: produção do próprio autor

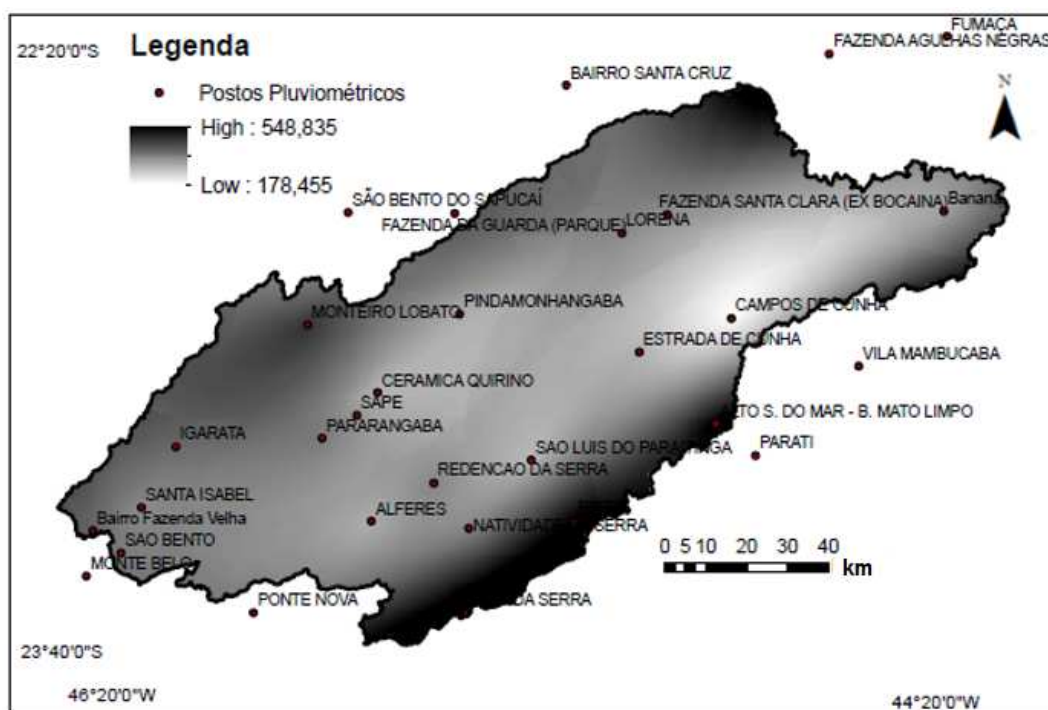
Os resultados obtidos para o período de verão corroboram com aqueles obtidos por Silva e Simões (2014), uma vez que esses autores realizaram um estudo a respeito da precipitação do Vale do Paraíba, empregando dados de precipitação da década de 40 até o final da década de 90. As maiores concentrações de precipitação ocorreram em regiões da formação da Serra da Mantiqueira e da região nordeste.

A área de menor concentração de precipitação localiza-se na porção central e sudoeste da bacia, com formas de relevo: planície aluvial, morro e colinoso. Outra região identificada com pouca concentração de precipitação corresponde à região onde se localiza a estação pluviométrica Campos de Cunha, situada no município de Cunha com altitude de aproximadamente 750 m. Tendo em vista que no período DJF é quando ocorre o replecionamento dos reservatórios do sistema hidráulico da bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista), é importante ressaltar que toda a área de contribuição do reservatório de Jaguari e Santa Branca encontram-se com baixa concentração pluviométrica. Situação parecida ocorre em grande parte da área de drenagem da bacia do Paraibuna-Paraitinga, onde se localiza o reservatório do Paraibuna, exceto em uma pequena faixa na porção sul em que se observa uma maior intensidade de precipitação.

Para o período MAM, uma das regiões com maior concentração de precipitação situa-se em uma faixa na porção sul da bacia, com forma de revelo de morros de altitudes entre 680 a 1.200 metros (Figura 21). Outra região identificada com alta concentração de precipitação é a norte, situada na serra da Mantiqueira, com relevo de escarpa e altitude de até 2.200 m. Ao comparar estas mesmas regiões, Silva e Simões (2014) observaram que as maiores concentrações de precipitação diminuíram na região norte e aumentaram significativamente na região sul. Este fato pode ser um indicativo de que o padrão de precipitação da região estaria se modificando nos últimos quinze anos, uma vez que os autores já mencionados empregaram dados de precipitação até o final da década de 90, enquanto que neste estudo foi utilizado dados até o ano de 2014.

A região de menor concentração de precipitação para o período MAM situa-se no entorno da estação pluviométrica Campos de Cunha.

Figura 21 – Distribuição espacial da precipitação durante o período MAM

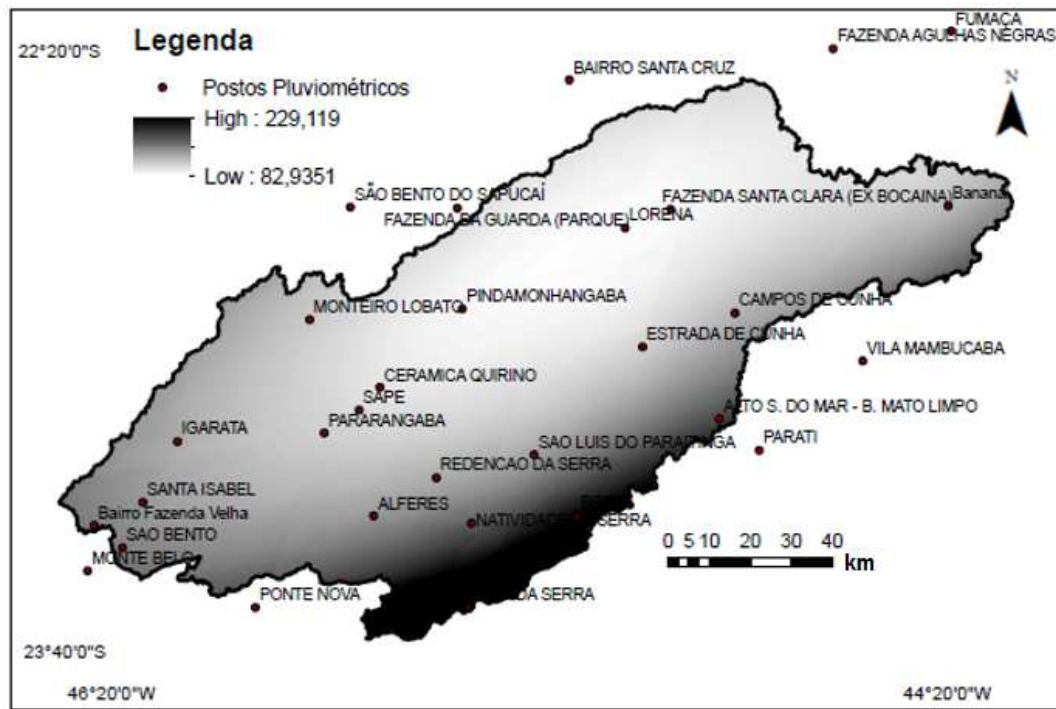


Fonte: produção do próprio autor

Para a estação do inverno (JJA), na porção norte, é interessante observar que o padrão de precipitação se tornou diferente em relação as duas estações anteriormente analisadas, uma vez que deixou de registrar maior concentração de precipitação. Na região sul da bacia, localizada em uma área com relevo de morros, concentrou-se as maiores precipitações (Figura

22). Silva e Simões (2014) observaram uma maior concentração de precipitação na porção sul e também, de uma maneira mais reduzida, na região noroeste. As regiões que apresentaram as menores concentrações de precipitação foram a norte e a central.

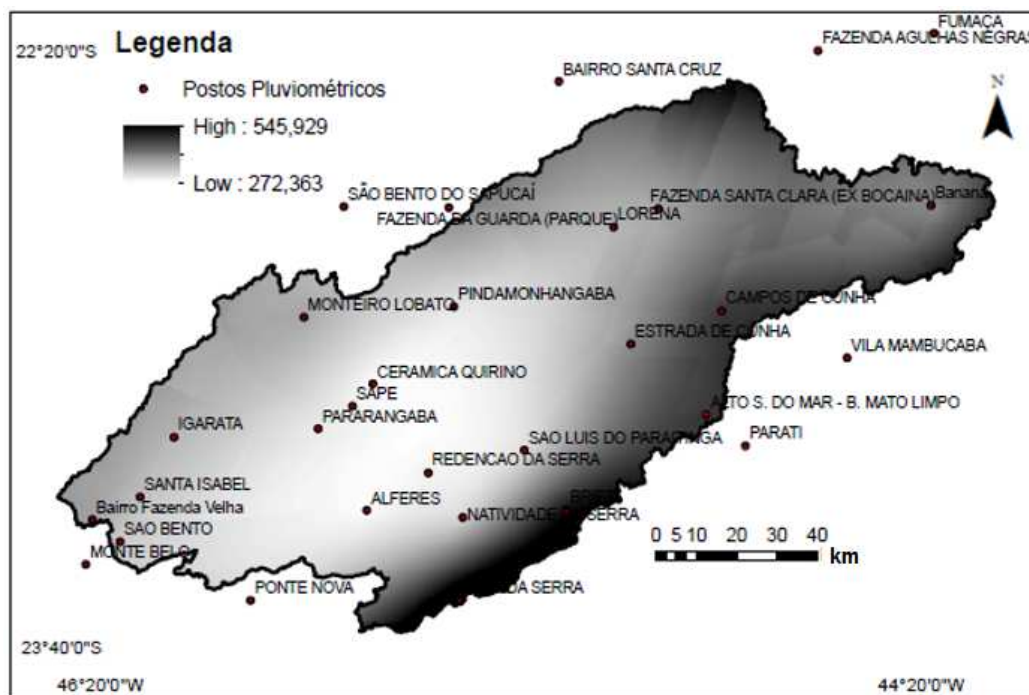
Figura 22 – Distribuição espacial da precipitação durante o período JJA



Fonte: produção do próprio autor

Para o período SON (primavera), as maiores taxas de concentração de precipitação localizam-se em porções semelhantes ao período DJF, isto é, na região norte, nordeste e sul. Os resultados obtidos por Silva e Simões (2014) também apontam como região de maior taxa de concentração de precipitação a porção norte e nordeste. As áreas apontadas por estes autores com relação as menores precipitações coincidem com as obtidas neste trabalho, abrangendo a porção sudoeste até a parte central da bacia.

Figura 23 – Distribuição espacial da precipitação durante o período SON



Fonte: produção do próprio autor

4.3 ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO

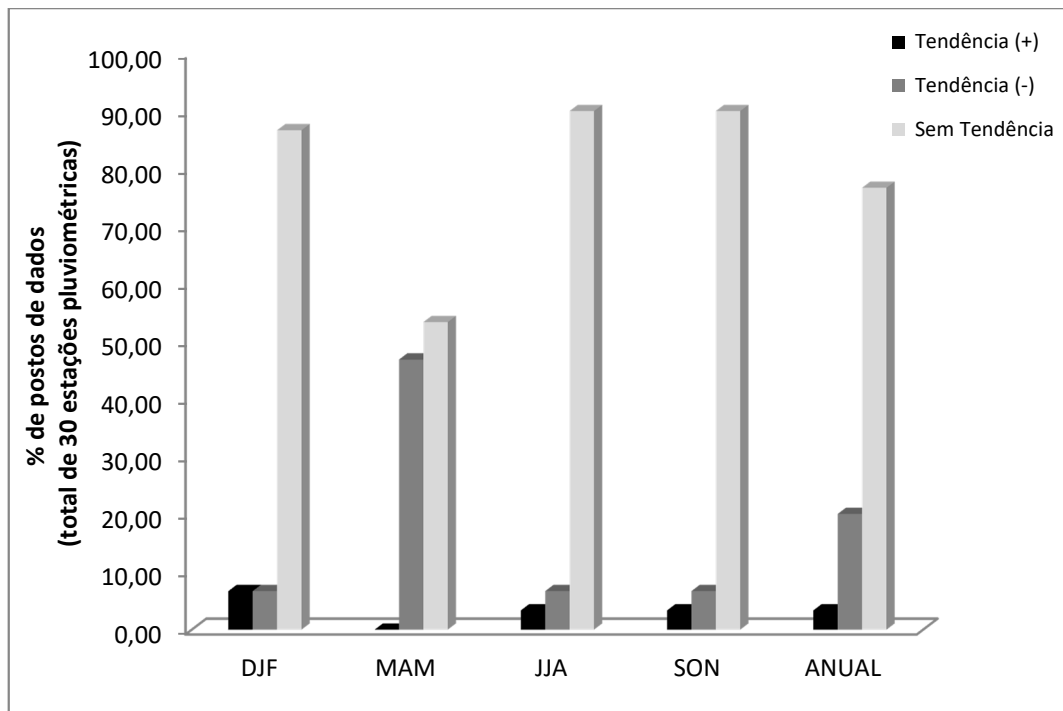
Com intuito de verificar se as séries históricas dos postos pluviométricos localizados na bacia do rio Paraíba do Sul e na sua região de entorno possuem tendências, foi realizado o teste estatístico de Mann-Kendall para um nível de confiança de 95%, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Por meio da análise dos registros dos mensais de precipitação em escala de tempo intra-anual foram observadas mudanças estatisticamente significativas no padrão precipitação para o período de MAM, conforme pode ser visto no histograma (Figura 24). Verifica-se que este é único período em que praticamente a metade dos postos pluviométricos apontam uma tendência significativa na direção de diminuição da quantidade de precipitação (Figura 25). Os períodos DJF, JJA e SON apresentaram um pequeno número de postos pluviométricos com tendências de uma diminuição ou aumento de precipitação.

Para o período chuvoso (DJF), Marengo e Alves (2005) realizaram análises com relação à tendência hidrológica da bacia do rio Paraíba do Sul, para isto, analisaram séries históricas de precipitação de 1930 a 2000 de 9 estações, situadas na porção paulista e no Estado do Rio de Janeiro. O resultado obtido por estes autores corrobora com este estudo, uma vez que não foi identificada uma tendência de precipitação significativa para este período.

A partir da análise dos dados de precipitação em escala de tempo interanual, verificou-se que grande parte das estações pluviométricas não apresentou mudança estatisticamente significativa no padrão precipitação.

Figura 24 - Comportamento das tendências para os dados de precipitação da bacia do rio Paraíba do Sul (1970 – 2014)



Fonte: produção do próprio autor

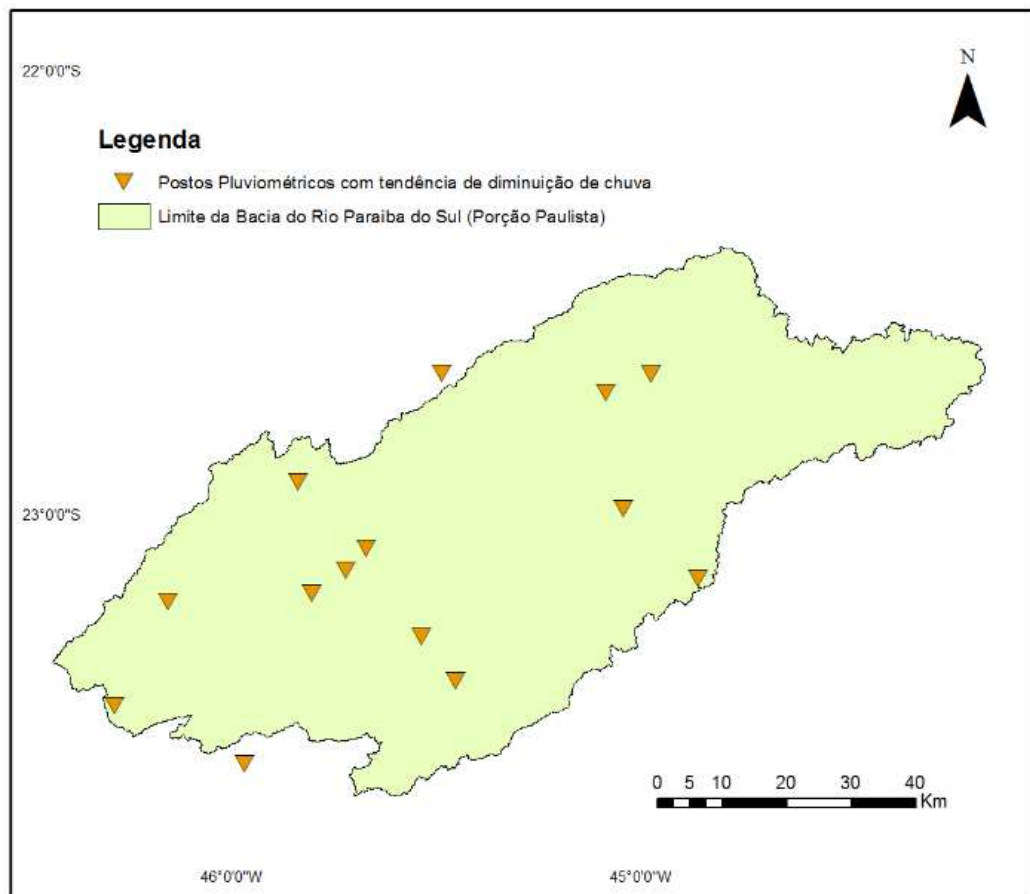
Tabela 3 – Postos pluviométricos empregados para análise das tendências de precipitação em períodos intra e interanual

Nome da Estação	Período	ANUAL		DJF		MAM		JJA		SON	
		Parametro Mann-Kendall	Significância Estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância Estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância Estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância Estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância Estatística
ALTO DA SERRA	1982 - 2014	-0,071	CS-	0,048	SS	-0,141	SS	-0,065	SS	-0,056	SS
SÃO LUIZ DO PARAITINGA	1972 - 2008	0,011	SS	-0,006	SS	0,48	SS	-0,129	SS	0,035	SS
SANTA ISABEL	1970 - 2014	-0,011	SS	0,106	SS	-0,001	SS	-0,031	SS	-0,019	SS
BAIRRO FAZENDA VELHA	1974 - 2014	-0,01	SS	0,033	SS	-0,013	SS	-0,008	SS	-0,09	SS
IGARATÁ	1982 - 2014	-0,071	CS-	-0,097	SS	-0,44	CS-	-0,046	SS	-0,004	SS
PINDAMONHANGABA	1982 - 2014	0,022	SS	0,129	SS	0,012	SS	0,145	SS	0,047	SS
SÃO BENTO	1982 - 2014	-0,035	SS	-0,014	SS	-0,238	CS-	0,06	SS	-0,008	SS
BRIET	1982 - 2014	0,069	CS+	0,302	CS+	-0,06	SS	0,298	CS+	0,236	SS
PARARANGABA	1982 - 2014	-0,042	SS	0,024	SS	-0,29	CS-	0,028	SS	0,073	SS
CERÂMICA QUIRINO	1982 - 2014	-0,281	CS-	-0,573	CS-	-0,657	CS-	-0,38	CS-	-0,472	CS-
SAPE	1982 - 2014	-0,048	SS	-0,077	SS	-0,339	CS-	0,069	SS	0,113	SS
FAZENDA SANTA CLARA (EX BOCAINA)	1982 - 2014	-0,034	SS	0,081	SS	-0,301	CS-	0,06	SS	-0,097	SS
CAMPOS DE CUNHA	1982 - 2014	-0,053	SS	-0,105	SS	-0,224	SS	-0,242	CS-	0,153	SS
ESTRADA DE CUNHA	1982 - 2014	-0,085	CS-	-0,016	SS	-0,516	CS-	-0,065	SS	0,04	SS
ALTO s. DO MAR - B. MATO LIMPO	1982 - 2014	-0,173	CS-	-0,294	CS-	-0,274	CS-	-0,143	SS	-0,419	CS-
REDENÇÃO DA SERRA	1982 - 2014	-0,028	SS	0,141	SS	-0,302	CS-	-0,008	SS	0,097	SS
ALFERES	1980 - 2014	-0,025	SS	-0,002	SS	-0,191	SS	0,062	SS	-0,084	SS
NATIVIDADE DA SERRA	1982 - 2014	-0,04	SS	-0,109	SS	-0,25	CS-	0,105	SS	-0,06	SS
LORENA	1982 - 2014	-0,073	CS-	-0,069	SS	-0,371	CS-	-0,012	SS	-0,177	SS
MONTEIRO LOBATO	1982 - 2014	-0,032	SS	0,06	SS	-0,258	CS-	0,044	SS	-0,016	SS
BANANAL	1982 - 2014	-0,025	SS	0,024	SS	-0,181	SS	0,145	SS	0,004	SS
FAZENDA AGULHAS NEGRAS	1982 - 2014	0,001	SS	-0,129	SS	0,109	SS	0,117	SS	0,109	SS
FUMAÇA	1982 - 2014	-0,029	SS	-0,085	SS	-0,218	SS	0,145	SS	0,184	SS
FAZENDA DA GUARDA (PARQUE)	1982 - 2012	-0,044	SS	-0,117	SS	-0,26	CS-	-0,147	SS	0,122	SS
SÃO BENTO DO SAPUCAÍ	1981 - 2010	-0,002	SS	0,192	SS	-0,1433	SS	-0,015	SS	0,143	SS
BAIRRO SANTA CRUZ	1973 - 2013	0,001	SS	0,223	CS+	-0,112	SS	-0,098	SS	0,004	SS
VILA MAMBUCA	1982 - 2014	0,026	SS	0,125	SS	-0,036	SS	0,206	SS	-0,02	SS
PARATI	1982 - 2014	0,021	SS	0,161	SS	-0,022	SS	0,286	CS+	0,118	SS
PONTE NOVA	1982 - 2014	-0,052	SS	-0,008	SS	-0,234	CS-	-0,079	SS	-0,006	SS
MONTE BELO	1982 - 2014	-0,049	SS	-0,046	SS	-0,226	SS	-0,083	SS	-0,075	SS

Fonte: produção do próprio autor

Legenda: SS: série sem significância estatística; CS+ e CS-: série com significância estatística com tendência de aumento de precipitação e tendência diminuição da precipitação, respectivamente ($p < 0,05$).

Figura 25 - Localização dos postos pluviométricos com tendência de diminuição de precipitação

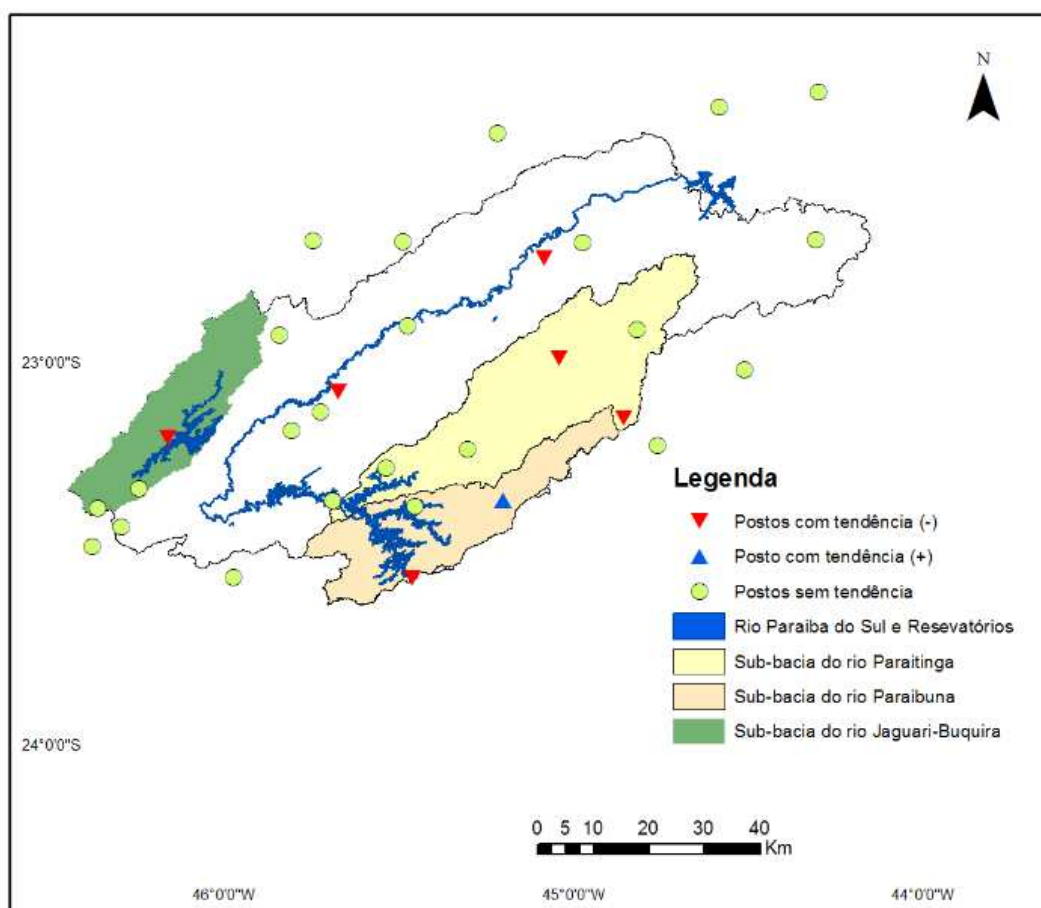


Fonte: produção do próprio autor

A Figura 26 apresenta a tendência de precipitação de 30 (trinta) estações pluviométricas utilizadas em escala de tempo interanual situadas na bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista). Destas 30 (trinta) estações escolhidas para realização deste trabalho, 23 (vinte três) delas não possuem tendência de precipitação. O número de estações obtidas com tendência de diminuição de precipitação foram 6 (seis), sendo que a maioria destas estações situa-se nas porções mais baixas da bacia, com cotas que variam entre 540 m a 790 m de altitude. Além disso, verifica-se que estes 6 (seis) postos pluviométricos, 4 (quatro) localizam-se dentro das sub-bacias hidrográficas (Paraitinga, Paraibuna e Jaguari-Buquira), onde situam-se parte dos reservatórios que compõem o sistema hidráulico do rio Paraíba do Sul na porção paulista e onde também há produção de energia elétrica da bacia. Por fim, observa-se que as estações pluviométricas com tendência de diminuição de precipitação não se concentram em uma única região, mas estão distribuídas ao longo da porção central da bacia.

A única estação pluviométrica que apresenta tendência de aumento de precipitação localiza-se dentro da bacia do rio Paraibuna e apresenta altitude de 815 m.

Figura 26 – Tendência das estações pluviométricas em escala de tempo interanual localizadas na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul



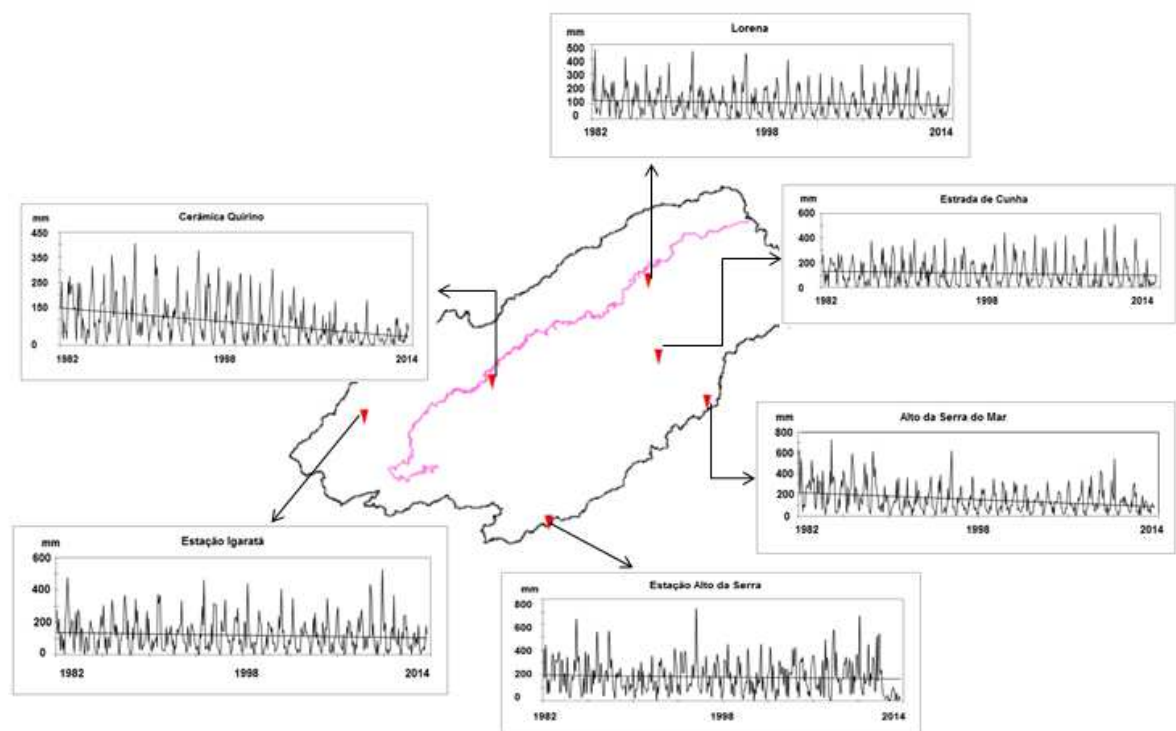
Fonte: produção do próprio autor

A Figura 27 apresenta as estações pluviométricas com tendência interanual de diminuição de precipitação, localizada na bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista). Por meio desta Figura observa-se que há postos que apresentam quedas sistemáticas nos índices de precipitação, tais postos podem ser exemplificados como os postos Alto da Serra do Mar e Cerâmica Quirino.

Além disso, pode-se observar por meio da análise da Figura 27 que os dois últimos anos de registro de precipitação (2013-2014) destas estações pluviométricas apresentaram as menores alturas de precipitação acumuladas já registradas.

Em razão do baixo índice pluviométrico na região do Vale do Paraíba os reservatórios do sistema hidráulico da bacia do rio Paraíba do Sul sofreram um intenso deplecionamento, atingindo níveis em seus reservatórios, como já citado anteriormente, prejudicou a produção de energia nas usinas hidrelétrica de Paraibuna e Santa Branca.

Figura 27 – Série temporal de precipitação (1982 até 2014) das estações pluviométricas que apresentaram tendência de diminuição de precipitação na porção paulista do Vale do Paraíba do Sul



Fonte: produção do próprio autor

4.4 ANÁLISE DE TENDÊNCIA DE VAZÃO NAS SUB-BACIAS DO RIO PARAÍBA DO SUL

Foi realizada para as sub-bacias do rio Paraíba do Sul (bacia do Jaguari-Buquira e bacia do Paraibuna - Paraitinga) uma análise de tendência de vazão, empregando o teste estatísticos Mann-Kendall para um nível de confiança igual a 95%. A escolha das estações fluviométricas localizadas nestas sub bacias, deve-se ao fato de não estarem submetidas ao efeito de regulação de vazão dos reservatórios que compõe o sistema hidráulico da bacia do rio Paraíba do Sul.

Para que não haja interferência nos resultados nos testes estatísticos de Mann-Kendall foram escolhidas estações fluviométricas situadas a montante dos reservatórios de Jaguari e de Paraibuna. Desta forma serão analisadas vazões naturais de corpos d'água sem a influência da operação dos reservatórios.

4.4.1 Análise dos dados fluviométricos para a bacia do Jaguari-Buquira

Os primeiros dados fluviométricos analisados foram de postos situados na bacia do rio Jaguari-Buquira, conforme pode ser observado na Tabela 4 e 5. Para esta localidade foram encontradas cinco estações fluviométricas com séries históricas de vazão desatualizadas, apresentando dados de vazão para o período de 1932 a 1972. Em razão da escassez de postos de dados de vazão, foram empregadas séries históricas com período de registro superiores a 17 anos para elaboração da análise de tendência de vazão desta bacia.

Por meio da análise dos registros em escala de tempo intra-anual, foram observadas mudanças estatisticamente significativas no padrão da vazão para o período de DJF, conforme pode ser visto na Figura 28. Este foi o único período em que 40% das estações fluviométricas apontaram uma tendência significativa na direção de aumento da vazão. Para os demais períodos não foi constatada mudança na tendência do padrão da vazão.

A partir da análise dos dados de vazão em escala de tempo interanual, verificou-se que a maioria das estações fluviométricas não apresentou mudanças estatisticamente significativas.

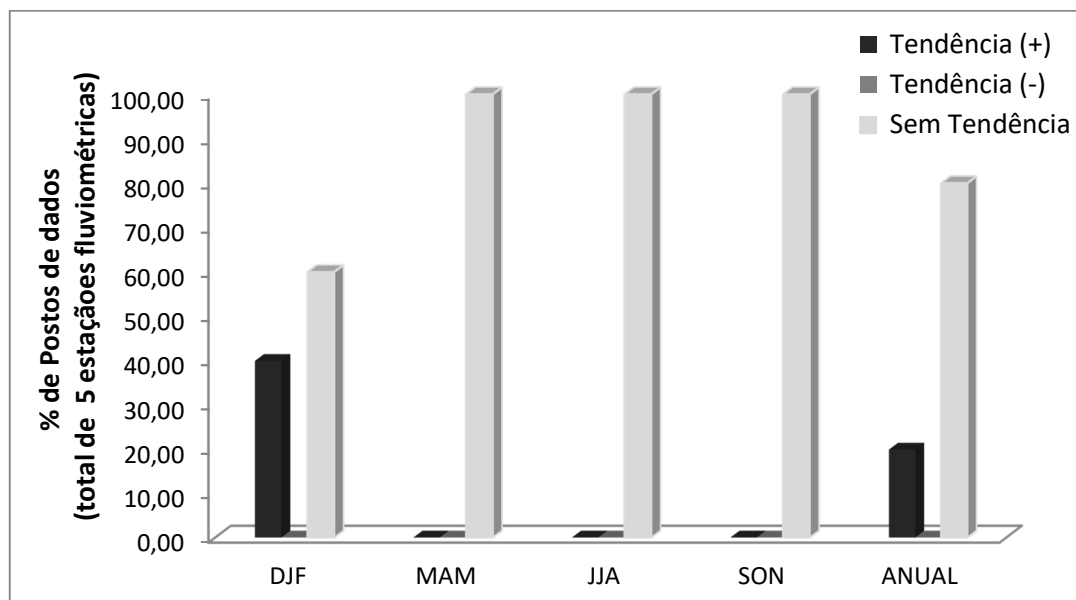
Tabela 4 – Postos fluviométricos situados na bacia do rio Jaguari-Buquira, empregados para análise das tendências das vazões em períodos intra e interanual (década de 30 a 70)

Nome	Período	ANUAL		DJF		MAM		JJA		SON	
		Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística
IGARATÁ 2	1950 a 1968	-0,027	SS	0,059	SS	-0,124	SS	-0,085	SS	-0,02	SS
USINA DO TURVO	1952 a 1969	0,115	CS+	0,426	CS+	0,206	SS	0,118	SS	0,265	SS
IGARATÁ 1	1935 a 1969	-0,009	SS	0,094	SS	-0,016	SS	-0,019	SS	0,08	SS
FAZENDA SÃO JOÃO	1950 a 1966	0,078	SS	0,417	CS+	0,0283	SS	0	SS	0,176	SS
BUQUIRINHA	1932 a 1972	-0,035	SS	-0,166	SS	-0,143	SS	-0,063	SS	0,019	SS

Fonte: produção do próprio autor

Legenda: SS: série sem significância estatística; CS+ e CS-: série com significância estatística com tendência de aumento de vazão e tendência diminuição de vazão, respectivamente ($p < 0,05$).

Figura 28 – Comportamento das tendências de vazão para a bacia do rio Jaguari-Buquira (1932-1972)



Fonte: produção do próprio autor

Para a bacia do rio Jaguari-Buquira, foi encontrada apenas um posto fluviométrico contendo série histórica de vazão atualizada, com dados de 1979 a 2015. Ao aplicar o teste estatístico de Mann-kedall para o período intra-anual, foi obtido uma tendência significativa

na direção de diminuição de vazão para o período JJA e SON, enquanto que os demais períodos (DJF e MAM) não foram encontradas tendências. Com relação ao período interanual o teste indicou uma tendência de diminuição de vazão.

Tabela 5 - Posto fluviométrico situado na bacia do rio Jaguari-Buquira, empregado para análise das tendências das vazões em períodos intra e interanual (década de 70 a 2015)

Nome	Período	ANUAL		DJF		MAM		JJA		SON	
		Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística
BUQUERINHA II	1979 a 2015	-0,168	CS-	-0,06	SS	-0,176	SS	-0,248	CS-	-0,354	CS-

Fonte: produção do próprio autor

Legenda: SS: série sem significância estatística; CS+ e CS-: série com significância estatística com tendência de aumento de vazão e tendência diminuição de vazão, respectivamente ($p < 0,05$).

4.4.2 Análise dos dados fluviométricos para a bacia do rio Paraibuna e do rio Paraitinga

A seguir são apresentados os resultados dos estudos da aplicação do teste estatístico Mann-Kendall para a análise de tendência das vazões de corpos de água da sub-bacia do rio Paraibuna e do rio Paraitinga.

Para a realização deste estudo foram empregados dados de estações fluviométricas, as quais foram divididas em dois grupos: a) o primeiro foi constituído por um conjunto de 8 (oito) postos fluviométricos com registros de séries históricas datadas até a década de 70 (Tabela 6); b) o segundo foi composto por 4 (quatro) postos fluviométricos com séries históricas de vazão contendo registros até o ano de 2015 (Tabela 7). Em razão da escassez de postos fluviométricos localizados nestas sub-bacias, foram utilizadas, para o primeiro grupo, séries históricas com período de registro superior a 28 anos e para o segundo grupo, em virtude do mesmo motivo, séries históricas com registros superiores a 24 anos.

Ao analisar as séries históricas de registros de dados de vazão para o período de 1934 a 1978, em escala de tempo interanual, observou-se que a metade dos postos fluviométricos localizados nas bacias do rio Paraibuna e do rio Paraitinga apresentaram tendências estatisticamente significativas na direção de aumento da vazão (Figura 29). Ao realizar esta mesma análise para as estações fluviométricas com séries históricas contendo registros entre os anos de 1934 a 2015, para a mesma escala de tempo, observou-se que ao contrário do que ocorreu para o período de 1934 a 1978, a grande maioria das estações fluviométricas

apresentou tendência na direção de diminuição de vazão, ou seja, ao introduzir no estudo os dados das séries históricas das vazões entre a década de 70 ao ano de 2015, verificou-se uma mudança da direção da tendência da vazão, uma vez que mais de 70% das estações apresentaram queda em seus registros mensais fluviométrico, conforme pode ser observado na Figura 30.

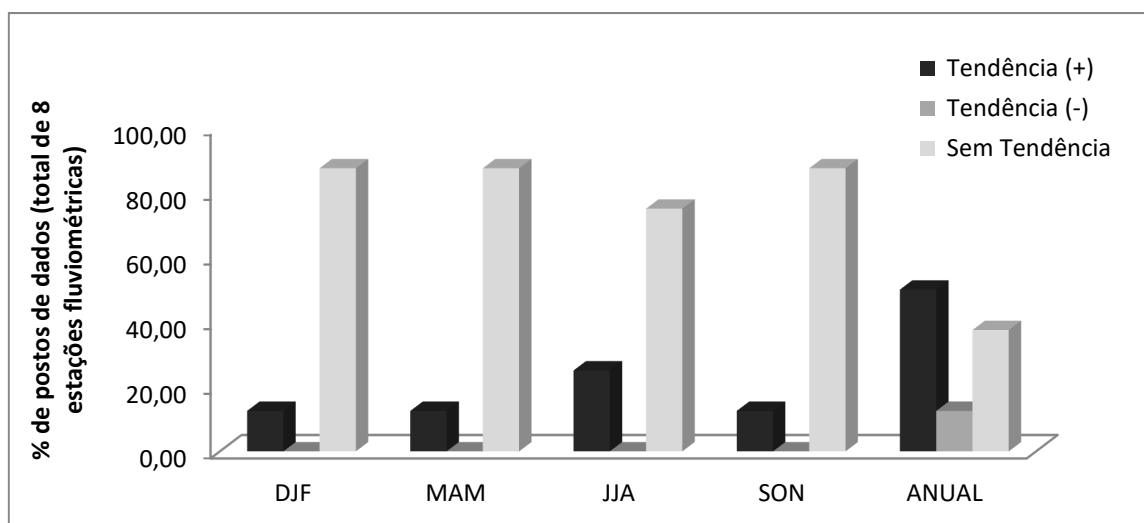
Tabela 6 – Postos fluviométricos situados na bacia do rio Paraibuna-Paraitinga. Para análise de tendência intra e interanual (década de 30 a 70)

Nome	Período	ANUAL		DJF		MAM		JJA		SON	
		Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística	Parametro Mann-Kendall	Significância estatística
Ponte Alta 1	1934-1978	-0,024	SS	0,048	SS	-0,109	SS	-0,075	SS	0,002	SS
Estrada do Cunha	1935-1978	0,104	CS+	0,197	SS	0,073	SS	0,254	CS+	0,196	SS
Ponte dos Mineiros	1951-1974	0,081	CS+	0,261	SS	-0,029	SS	0,029	SS	0,123	SS
Bairro Alto	1938-1968	-0,082	CS-	0,034	SS	-0,163	SS	0,025	SS	0,159	SS
Natividade da Serra 2	1953-1973	0,168	CS+	0,324	CS+	0,162	CS+	0,276	CS+	0,339	CS+
Natividade da Serra 1	1938-1973	0,004	SS	0,029	SS	-0,054	SS	0,044	SS	0,152	SS
São Luiz do Paraitinga	1931-1974	0,086	CS+	0,14	SS	0,085	SS	0,18	SS	0,156	SS
Ponte Alta 2	1935-1966	0,03	SS	0,02	SS	0,087	SS	0,153	SS	0,052	SS

Fonte: produção do próprio autor

Legenda: SS: série sem significância estatística; CS+ e CS-: série com significância estatística com tendência de aumento de vazão e tendência diminuição de vazão, respectivamente ($p < 0,05$).

Figura 29 – Comportamento das tendências para a vazão para a bacia do rio Paraibuna-Paraitinga (1931-1978)



Fonte: produção do próprio autor

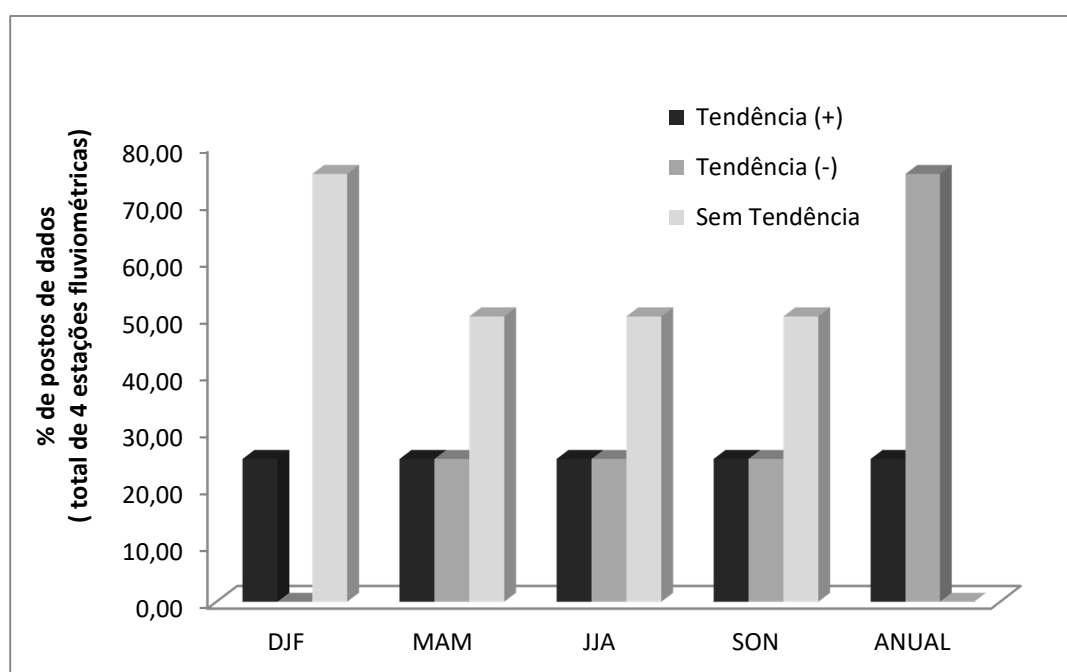
Tabela 7 – Postos fluviométricos situados na bacia do rio Paraibuna-Paraitinga, empregados para análise das tendências das vazões em períodos intra e interanual (década de 30 a 2015)

Nome	Período	ANUAL		DJF		MAM		JJA		SON	
		Parâmetro Mann-Kendall	Significância estatística	Parâmetro Mann-Kendall	Significância estatística	Parâmetro Mann-Kendall	Significância estatística	Parâmetro Mann-Kendall	Significância estatística	Parâmetro Mann-Kendall	Significância estatística
Estrada do Cunha	1935-2014	0,185	CS+	0,317	CS+	0,221	CS+	0,376	CS+	0,366	CS+
São Luiz Paraitinga	1988-2015	-0,179	CS-	-0,122	SS	-0,27	CS-	-0,302	CS-	-0,37	CS-
Ponte Alta 1	1934-2015	-0,051	CS-	-0,126	SS	-0,132	SS	-0,056	SS	-0,025	SS
Salesópolis	1979-2005	-0,108	CS-	-0,083	SS	-0,242	SS	-0,151	SS	-0,068	SS

Fonte: produção do próprio autor

Legenda: SS: série sem significância estatística; CS+ e CS-: série com significância estatística com tendência de aumento de vazão e tendência diminuição de vazão, respectivamente ($p < 0,05$).

Figura 30 – Comportamento das tendências de vazão para a bacia do rio Paraibuna-Paraitinga (1935 – 2014)



Fonte: produção do próprio autor

5 DISCUSSÃO

5.1 ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO

Atualmente diversas técnicas de interpolação de dados espaciais são comumente empregadas para analisar a variabilidade de parâmetros climáticos, tais como: IQD, Spline e krigagem.

Sadighi e Vafakhan (2015) e Bhowmik e Costa (2012) utilizaram diferentes interpoladores para analisar a distribuição espacial da precipitação. Esses autores, ao final dos estudos, constataram que o interpolador geoestatístico krigagem foi o que apresentou melhor resultado, pois em comparação aos demais métodos de interpolação produziram o menor erro para a distribuição espacial da precipitação.

Neste trabalho, o interpolador geoestatístico krigagem foi aplicado para estimar a precipitação para a porção paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Nas altitudes mais elevadas da região foram raras as estações pluviométricas que apresentaram dados atualizados e em altitudes com cotas entre 1.500 e 2.400 metros não existiam postos pluviométricos. A aplicação deste método possibilitou a estimativa da precipitação em localidades que inexisteriam ou careciam de dados de precipitação.

5.2 VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E DA VAZÃO

5.2.1 Análise de tendência de precipitação

No estudo de tendência de precipitação para a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul, empregando séries históricas de 1970 a 2014 em escala intra-anual, apresentado neste trabalho, não foram observadas mudanças estatisticamente significativa no padrão de precipitação, exceto para o período MAM, em que praticamente a metade dos postos pluviométricos apontavam tendência na direção de diminuição. Para os dados de precipitação interanual, a grande maioria das estações não apresentou tendência.

Marengo e Alves (2005) realizaram uma análise de tendência pluviométrica, abrangendo toda a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Para isso utilizaram séries de dados interanuais da década de 30 até o ano 2000. O resultado desta pesquisa corrobora com obtido neste trabalho, ou seja, não foi identificado tendência estatisticamente significativa para a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul.

Ao restringir o estudo de tendência, utilizando os dados de precipitação em escala interanual para as áreas das sub-bacias do rio Paraitinga e do rio Paraibuna, os resultados apontaram uma diminuição na quantidade de precipitação para um significativo número de postos pluviométricos da região. Das oito estações localizadas no interior dessas sub-bacias, três delas apresentam tendência para diminuição.

Vilanova (2014) também identificou tendência para diminuição de precipitação ao estudar o comportamento de dados hidroclimáticos da bacia do rio Paraibuna, utilizando série de dados de precipitação de 1967 a 2011.

Esta tendência de diminuição de precipitação observada poderá impactar as sub-bacias que promovem a drenagem de água para o principal reservatório de abastecimento do Sistema Hidráulico do Paraíba do Sul, o que implicaria no suprimento de água para abastecimento e produção de energia.

5.2.2 Análise de tendência de vazão

Cabe ressaltar que ao longo do curso do rio Paraíba do Sul existem diversas estações fluviométricas, com dados disponíveis e atualizados de série de vazão, entretanto, esses postos não puderam ser utilizados na análise de tendência, uma vez que não mediam a vazão natural. Assim, a fim de se evitar a interferência de ações antrópicas nas séries de vazões da bacia do rio Paraíba do Sul, os postos fluviométricos selecionados para o estudo de vazões foram aqueles localizados nas sub-bacias do rio Paraibuna, do rio Paraitinga e do rio Jaguari-Buquira, uma vez que os sistemas de drenagem dessas sub-bacias não estão submetidos ao processo de regularização de vazão.

Com relação à análise de tendência de vazão para as sub-bacias do rio Paraitinga e do rio Paraibuna, observou-se que em escala interanual, para o período de 1931 a 1978, metade dos postos fluviométricos registram tendência na direção de aumento da vazão. Ao contrário do que ocorreu neste período, ainda para mesma região e em escala interanual, de 1934 a 2015, três das quatro estações fluviométricas apresentaram tendência de diminuição da vazão. Para a sub-bacia do rio Jaguari-Buquira, com dados interanuais do período de 1932 a 1972, não houve registro de tendência de vazão e para a única estação que disponibilizava dados atualizados a tendência foi de diminuição.

Marengo (1995) e Marengo e Alves (2005) realizaram também uma análise de tendência de vazão para a bacia do rio Paraíba do Sul, aplicando o teste estatístico de Mann-Kendall. Os dados utilizados foram de estações fluviométricas situadas à jusante dos

reservatórios de Paraibuna, de Santa Branca e do Jaguari. Desta forma, os seus resultados baseiam em vazões controladas e não naturais e, por isso, não são indicadas para serem relacionadas com os efeitos da variabilidade climática sobre os recursos hídricos.

Os resultados obtidos por Marengo (1995), detectaram tendência para a diminuição da vazão, entretanto afirma este autor que não há evidências claras de que as alterações no escoamento dos rios sejam resultado de mudança climática. Para o estudo realizado por Marengo e Alves (2005), a conclusão foi de que os postos fluviométricos, analisados ao longo do rio Paraíba do Sul, apresentaram tendência estatisticamente significativa na direção na diminuição de vazão, podendo até afetar o abastecimento de água para a população, uso industrial e a geração de energia, colocando a bacia sob crise.

Assim, ao comparar as tendências de vazão obtidas por Marengo (1995) e Marengo e Alves (2005) com as deste trabalho, verifica-se que todos sinalizaram para uma diminuição de vazão, tanto para séries históricas de corpos de água situados a montante quanto a jusante dos reservatórios.

5.3 INTERFERÊNCIA DA SILVICULTURA NOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO TESTE DE MANN-KENDALL

A silvicultura de eucalipto tem se estabelecido em extensas áreas rurais desde do início do século XXI na bacia do rio Paraíba do Sul (VIANNA et al., 2007). Em 2010, cerca de 70% da silvicultura de eucalipto da porção paulista desta bacia hidrográfica foi realizada em áreas menos produtivas como pastagem e solo exposto (CARRIELLO e VICENS, 2011). Batista et al. (2007) afirmam que a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul tem no plantio do eucalipto um potencial crescimento em função do seu clima e solos degradados sem condições de uso, oferecendo aos produtores rurais uma alternativa de uso para suas terras degradadas. Arguello et al. (2010) avaliaram a evolução da área de plantio de eucalipto nos municípios do trecho paulista da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul entre os anos 2000 e 2007 e verificou um aumento de 32,2%.

Conforme apresentado por Changnon e Demissie (1996), as modificações na cobertura do solo em bacias hidrográficas são fatores que também podem interferir no escoamento dos rios. Por isto uma análise criteriosa deve ser realizada, levando-se em consideração esses fatores, para que se evite uma conclusão equivocada de que as alterações nas vazões dos rios tenham como causa fundamental as mudanças climáticas, quando na realidade a região estudada estaria submetida às ações antrópicas.

O uso do solo em bacias hidrográficas pode interferir na vazão dos rios. Bosch e Hewlett (1982) mencionam que na hidrologia, há o consenso geral indicando que, em relação aos outros tipos de uso do solo, a floresta consome mais água e reduz a vazão no rio. Estes autores mencionam que áreas passam por processo de reflorestamento apresentam uma redução no escoamento dos rios, enquanto que se houver uma redução na cobertura florestal haverá um aumento do escoamento. A cobertura florestal, através da interceptação, influencia a redistribuição da água da precipitação, sendo que as copas das árvores formam um sistema de amortecimento, direcionamento e retenção das gotas que chegam ao solo, afetando a dinâmica do escoamento superficial e o processo de infiltração (OLIVEIRA JR e DIAS, 2005). Com a interceptação vegetal, um outro processo ocorre também, isto é, parte da água é temporariamente retida pela massa da cobertura florestal e em seguida evaporada para a atmosfera (BALBINOT et al., 2008).

Trimble et al. (1997) afirmam que a taxa de evapotranspiração das árvores é semelhante às taxas de evaporação em solo exposto, mas as árvores podem manter elevadas taxas de transpiração, por meio da retirada de umidade de camadas mais profundas do solo mesmo quando a superfície está relativamente seca. De acordo com estes autores, o aumento da interceptação e da transpiração faz com que haja uma maior evapotranspiração e, conseqüentemente, redução de vazão.

Balbinot et al. (2008) concordam que por vezes era compreendido que as bacias florestadas produzem mais água do que bacias com outro tipo de cobertura vegetal, porém o que acontece realmente é que na bacia com total cobertura florestal há uma menor produção de água, mas o fluxo é mais estável e sustentável do que em outros casos.

Com o intuito de validar os resultados do estudo de tendência obtidos neste trabalho por meio da aplicação do teste estatístico de Mann-Kendall para séries históricas fluviométricas, foi analisada a evolução multitemporal do cultivo do eucalipto nas sub-bacias do rio Paraibuna e do rio Paraitinga para identificar uma suposta interferência desta atividade nas vazões. Os resultados obtidos com a aplicação do teste estatístico indicaram tendência de diminuição das vazões no período de 1970 a 2015 para a mesma região de análise da evolução do cultivo de eucalipto. A fim de avaliar as causas da diminuição de tendência de vazão nestas sub-bacias, buscou-se então correlacionar o aumento da área de cultivo do eucalipto com a diminuição de vazão identificada na região.

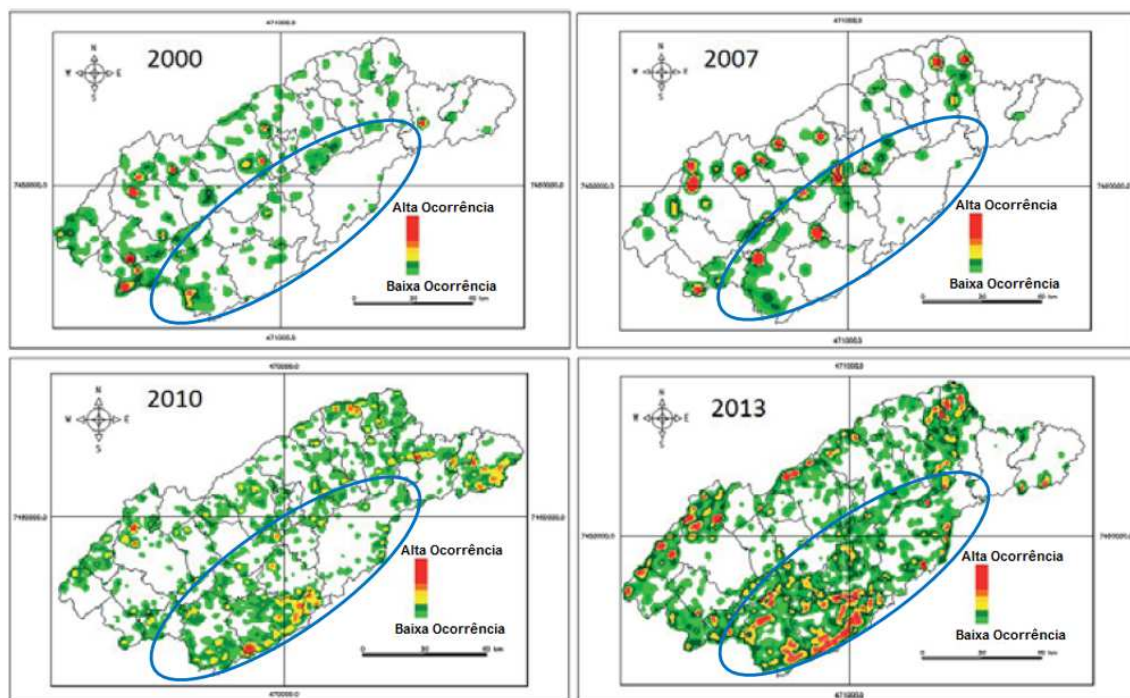
Para a análise da interferência da cobertura do solo no fluxo dos rios das sub-bacias mencionadas, foram considerados os dados de um estudo realizado por Anacleto e Batista

(2016). Estes autores diagnosticaram a expansão e a retração de áreas cobertas por eucalipto de forma multitemporal no trecho paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Para isso, realizaram um levantamento das áreas de cultivo de eucalipto dos anos de 2000, 2007, 2010 e 2013, a partir de trabalhos previamente realizados. Para este levantamento, foram utilizados dados disponibilizados por Kronka (2002) para o ano de 2000, por Arguello et al. (2010) para o ano de 2007 e por Batista et al. (2010) para o ano de 2010.

Para o ano de 2013, Anacleto e Batista (2016), a fim de identificar e quantificar as áreas de plantio de eucalipto, realizou a análise e interpretação de imagens de satélite Landsat 8 (órbita 219/76 com passagem em 25/03/2013 e órbita 218/76 com passagem em 24/04/2013). Além disso, utilizaram o estimador de densidade Kernel para analisar espacialmente as ocorrências de plantio de eucalipto para o mesmo período (2000, 2007, 2010 e 2013).

A Figura 31 apresenta as regiões de concentração de plantio de eucalipto nos municípios da porção paulista da bacia do Rio Paraíba do Sul para os anos de 2000, 2007, 2010 e 2013. Pode-se observar ainda que para o sul da região, onde se localizam as sub-bacias do rio Paraibuna e do rio Paraitinga (região circundada na Figura 31), houve, durante o período de 2000 a 2013, um gradativo aumento da concentração dessa cultura.

Figura 31 - Concentração de plantação de eucalipto nos municípios da porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul para os anos de 2000, 2007, 2010 e 2013



Fonte: Anacleto e Batista, 2016 (adaptado)

Para realização da análise da evolução da produção de eucalipto nas sub-bacias do rio Paraibuna e do rio Paraitinga foram selecionados os principais municípios que contribuem em área para a formação destas sub-bacias, tais como: Paraibuna, Natividade da Serra, São Luiz do Paraitinga, Cunha, Redenção da Serra e Lagoinha. A Tabela 8 apresenta a evolução do plantio de eucalipto nestes municípios.

Tabela 8 - Áreas plantadas com eucalipto para os anos de 2000, 2007, 2010 e 2013

Município	Área territorial (km²)	Reflorestamento 2000 (km²)	Reflorestamento 2007 (km²)	Reflorestamento 2010 (km²)	Reflorestamento 2013 (km²)
Paraibuna	809,8	104,7	202,8	136,8	138,5
Natividade da Serra	832,6	31,3	37,3	109,7	121,3
S. L. do Paraitinga	617,2	50,7	54,8	69,6	81,1
Cunha	1.407,2	18,5	30,2	69,5	79,6
Redenção da Serra	309,1	31,5	40,7	36,8	58,6
Lagoinha	255,9	4,8	6,6	6,9	19,0
Total	4.231,8	241,4	372,3	429,4	498,2

Fonte: Anacleto e Batista, 2016 (adaptado)

Levando em consideração os dados da Tabela 8, verifica-se que para o período de 2000 a 2013, a área de plantio de eucalipto para os municípios considerados das sub-bacias do rio Paraibuna e do rio Paraitinga apresentou uma evolução equivalente a 106%, isto é, partiu de uma área de plantio de 241,4 km² em 2000 para 498,1 km² em 2013. Para o ano de 2000 a área que representa o plantio de eucalipto é de 5,7% em relação a área total dos 6 (seis) municípios considerados nesta análise e para o ano de 2013 esta área atingiu 11,8%.

Sendo assim, pode-se afirmar que o resultado obtido com o teste de Mann-Kendall, que apontou para tendência de redução de vazão para as duas sub-bacias da região, pode ter sido influenciada pela dinâmica do cultivo do eucalipto. Uma bacia ao passar pelo processo de reflorestamento demanda um certo tempo para alcançar seu novo equilíbrio (BROWN et al., 2013). Com isso, as vazões das sub-bacias estudadas estariam passando por um período de estabilização.

Desta forma, reforça-se a hipótese de que as tendências de redução de vazão identificadas podem estar relacionadas ao cultivo de eucalipto desenvolvido nas sub-bacias do rio Paraibuna e do rio Paraitinga.

5.4 VARIABILIDADE DAS PRECIPITAÇÕES E DAS VAZÕES E A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Alterações na disponibilidade hídrica podem interferir em diversas atividades humanas, tais como abastecimento, produção de energia, irrigação, dentre outras.

Tanto o excesso quanto a escassez podem trazer consequências negativas. O Painel Brasileiro de Mudança Climática – PBMC (2013) afirmou que há a necessidade de adaptação à escassez ou ao excesso hídrico em alguns municípios da Região Sudeste. O PBMC (2013) apontou ainda que os modelos indicavam diminuição de precipitação em algumas regiões do Sudeste e aumento em outras, que acabaria influenciando não só a produção de alimentos, mas também o acesso à água.

A Agência Nacional de Águas (2010) afirma que com o aquecimento da atmosfera espera-se mudanças nos padrões precipitação, afetando a disponibilidade dos recursos hídricos.

Para Galvão e Bermann (2015) a diminuição do volume de precipitações e as mudanças apresentadas no padrão climático do Sudeste do país, a partir de 2012, indicavam que o abastecimento de água e atividades correlatas, como a produção de energia, poderiam ficar comprometidos nos anos seguintes.

Entre os anos de 2014 e 2015, foi registrado baixos índices pluviométricos em toda bacia do rio Paraíba do Sul que repercutiram na redução na disponibilidade hídrica. Isso fez com que os reservatórios do seu sistema hidráulico apresentassem uma intensa redução dos seus níveis, prejudicando o abastecimento de água e provocando uma interrupção temporária da produção de energia das usinas hidrelétrica de Paraibuna e Santa Branca.

A bacia do rio Paraíba do Sul obteve a classificação crítica quanto a disponibilidade per capita de água. Essa classificação foi atribuída em razão da transposição de parte de suas águas (160 m³/s) para abastecimento da região metropolitana do Estado do Rio de Janeiro (SÃO PAULO, 2013b).

A demanda de água para abastecimento urbano, em 2010, para a bacia do rio Paraíba do Sul (porção paulista) foi de 2,4 m³/s (SÃO PAULO, 2013b). No Plano Estadual de Recursos Hídricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE (2005) foi apresentada uma

projeção de demanda de água para abastecimento para o ano de 2020 da ordem de 6,14 m³/s, representando um aumento da demanda de mais de duas vezes e meia com relação a 2010.

Um estudo a respeito do projeto de transposição de água da bacia do rio Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira, elaborado por pesquisadores do Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente da COPPE-UFRJ, indica que com a transposição poderia ocorrer a diminuição de 4,2% da capacidade de geração de energia dos reservatórios da bacia e que essa queda de capacidade, em virtude de menor vazão do rio, teria um impacto de R\$ 20 milhões por ano para as geradoras e distribuidoras de energia (GALVÃO e BERMANN, 2015)

De acordo com Costa et al. (2015), houve um problema na gestão dos reservatórios do Sistema Hidráulico do rio Paraíba do Sul durante o período de estiagem de 2014, quando as regras de operação permitiram o uso intensivo de águas para geração de energia em um momento que a bacia estava hidrológicamente recessiva.

Neste trabalho, foi realizado o mapa de espacialização da precipitação para a região das sub-bacias que alimentam os reservatórios do Jaguari e Paraibuna, o qual identificou que principalmente no período de recarga dos reservatórios (dezembro a fevereiro), houve baixa concentração de precipitação. Com relação a tendência de precipitação, foi registrado um significativo número de estações pluviométricas com tendência de diminuição de precipitação nas sub-bacias que alimentam os reservatórios do Paraibuna e para o estudo de tendência de vazão, grande parte das estações fluviométricas apresentou tendência de diminuição do escoamento.

Se este cenário se concretizar, haverá o risco de redução na disponibilidade de água para os diversos usos da bacia do rio Paraíba do Sul, tais como agropecuária, abastecimento, produção de energia e atividades industriais.

O aumento da demanda por água e as alterações das vazões e do padrão das precipitações poderão exigir ainda mais da gestão dos recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul um trabalho de adaptação à realidade de uma possível redução na disponibilidade hídrica. A redução do uso considerado excessivo, a introdução de tecnologias adequadas, a eliminação de desperdício, a introdução de reuso da água e o controle de sua qualidade são algumas ações que podem ser praticadas, uma vez que o que se objetiva é a harmonização dos diversos usos e a busca da sustentabilidade deste bem essencial que é a água.

6 CONCLUSÕES

Ao comparar os mapas de distribuição espacial da precipitação para os diferentes períodos analisados (DJF, MAM, JJA e SON), observou-se uma significativa variação espacial da concentração de precipitação na porção paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. As maiores concentrações de precipitação identificadas para os períodos DJF, MAM e SON situam-se na região norte e sul da porção paulista da bacia e para o período JJA as maiores taxas ocorrem no sul. As menores concentrações de precipitação para os períodos DJF e SON localizam-se na região central e sudoeste, para o período JJA as menores taxas são para a região central e norte e para o período MAM os menores índices são para o nordeste. Para o período DJF, que é o de recarga dos reservatórios, ocorrem as menores concentrações de precipitação na área de contribuição das sub-bacias que abastecem os reservatórios do Paraibuna e do Jaguari. Esta baixa concentração de precipitação pode impactar a vazão afluente a estes reservatórios, o que potencialmente prejudicaria os usos múltiplos da bacia.

Para a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul não foi observada tendência significativa de precipitação em escala interanual. Entretanto, ao restringir o estudo de tendência para as sub-bacias do rio Paraitinga e do rio Paraibuna, os resultados apontaram para uma diminuição na quantidade de precipitação para um significativo número de postos pluviométricos. Esta tendência de diminuição de precipitação pode impactar as sub-bacias que promovem a drenagem de água para o principal reservatório de abastecimento do Sistema Hidráulico do Paraíba do Sul, o que implicaria em uma menor disponibilidade de recursos hídricos para o abastecimento e para a produção de energia.

Para o período de 1931 a 1978, metade dos postos fluviométricos localizados nas sub-bacias do rio Paraibuna e do rio Paraitinga registraram, em escala interanual, tendência na direção de aumento da vazão. Entretanto, para o período de 1934 a 2015, foi constatado, por meio da aplicação do teste estatístico de Mann-Kendall, tendência de diminuição da vazão para três das quatro estações fluviométricas analisadas.

Verificou-se que nas sub-bacias do rio Paraibuna e do rio Paraitinga houve um gradativo aumento da cultura do eucalipto de 2000 a 2013. A área de plantio para este período apresentou uma evolução equivalente a 106%. Em razão do histórico de mudança na cobertura do solo na região, é provável que as tendências de redução de vazão identificadas podem estar relacionadas ao cultivo de eucalipto desenvolvido nas sub-bacias do rio

Paraibuna e do rio Paraitinga. Assim, este trabalho aponta a necessidade de se considerar as alterações da cobertura vegetal em escala multitemporal na análise de tendência de vazão em bacias hidrográficas, quando da utilização do teste estatístico de Mann-Kendall, uma vez que as ações antrópicas podem interferir em seus resultados.

Se este cenário de diminuição das vazões juntamente com o aumento da demanda por água se concretizar, haverá o risco de redução na disponibilidade de água para as diversas atividades da porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul, como: agropecuária, abastecimento, produção de energia e indústria. Isto exigirá ações integradas da gestão de recursos hídricos da região no sentido do atendimento aos usos múltiplos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES. **Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate.** Sumário Executivo. 2013, 45p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos: desafios para a gestão.** 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2014.** Encarte Especial sobre a crise hídrica. Brasília, 2015a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Boletins de Monitoramento dos Reservatórios do Sistema Hidráulico do Rio Paraíba do Sul.** Brasília, v.10, out. 2015b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Plano de Ações Complementares para a Gestão da Crise Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul.** Versão 2.0, jun. 2015c.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Banco de Informações de Geração: BIG.** Disponível em:<
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em:
 Julho de 2015.

ANACLETO, L.M.O., BATISTA, G.T. Análise espacial das áreas cultivadas com eucalipto no trecho paulista da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul – SP. **Revista GeoPantanal**, n. 20, p. 77-92, 2016.

ARGUELLO, F.V. P.; BATISTA, G.T.; PONZONI, F.J.; DIAS, N.W. Distribuição espacial de plantios de eucalipto no trecho paulista da bacia hidrográfica Rio Paraíba do Sul, SP, Brasil. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 133-146, 2010.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICAS DO RIO PARAÍBA DO SUL - AGEVAP. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Resumo Análise dos Impactos e das Medidas Mitigadoras que envolvem a**

Construção e Operação de Usinas Hidrelétricas. Relatório Final. PSR-009-R1. Relatório Contratual-R-6. Resende: AGEVAP, 2007.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICAS DO RIO PARAÍBA DO SUL - AGEVAP. **Relatório Técnico sobre a situação dos reservatórios com subsídios para ações de melhoria da gestão na Bacia do Rio Paraíba do Sul. RP-03.** Resende: AGEVAP, 2010

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL - AGEVAP. **Avaliação dos impactos de novas transposições de vazão no rio Paraíba do Sul.** Resende: AGEVAP, 2013.

ALMEIDA, A.Q.; RIBEIRO, A.; PAIVA, Y.G.; NILTON JR, L.R.; LIMA, E.P. Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 354-358, 2011.

ANDRIOTTI, J.L.S. **Introdução à geoestatística linear.** Porto Alegre: Companhia de Pesquisas Minerais, 1988.

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística.** São Leopoldo, Unisinos, 2003. 165p.

BACK, A.J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 36, n. 5, p. 717-726, 2001.

BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N.K.; VANZETTO, S.C.; PEDROSO, K.; VALERIO, A.F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**. Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 131-149, 2008.

BATISTA, G.T., DIAS, N.W, CASTRO, R.M., MOREIRA, R.C. Análise espectral comparativa entre coberturas florestais de essências nativas e exóticas utilizando o sensor aerotransportado hiperespectral HSS (do visível ao infravermelho termal). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBSR, 2007, p. 6423-6430.

BATISTA, G.T.; SOUZA, C.F.; TARGA, M.S.; DIAS, N.W.; PAULA, G.R.; SANTOS, L.; MIRANDA, A. **Relatório Técnico Final: Projeto Comportamento da Água no Solo sob Cobertura Vegetal de Eucalipto e de Essências Florestais Nativas**. CNPq – Processo 480990/2007-7 - Edital MCT/CNPq 15/2007 - Universal Seleção Pública de Projetos de Pesquisa Científica, Tecnológica e Inovação, p. 72, 2010.

BROWN, A.E.; WESTERN, A.W.; MCMAHON, T.A.; ZHANG, L. Impact of forest cover changes on annual streamflow and flow duration curves. **Journal of hydrology**, v. 483, p. 39-50, 2013.

BHOWMIK, A.K.; COSTA, A.C. A geostatistical approach to the seasonal precipitation effect on boro rice production in Bangladesh. **International Journal of Geosciences**, v. 2012, 2012.

BIELENKI, C.J.; BARBASSA, A. P. **Geoprocessamento e recursos hídricos: aplicações práticas**. São Carlo/SP: EdUFSCar,, 2012.

BLAIN, G.C. Considerações estatísticas relativas a seis séries mensais de temperatura do ar da secretaria de agricultura e abastecimento do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 279-296, 2011.

BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal Hydrology**. Amsterdam, v.55, p.3-23, 1982.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional - BEN**. Brasília: MME, 2014.

BRASIL – Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. Mês de referência: Agosto de 2015.

CÂMARA, G., MEDEIROS, J.S. **Modelagem de dados em geoprocessamento**. In: Sistemas de Informações Geográficas – Aplicações na Agricultura. Brasília, DF: EMBRAPA – SPI / EMBRAPA – CPAC, 1998. p. 47-66.

CAMARGO, E.C.G.; MONTEIRO, A.M.V.; FELGUEIRAS, C.A.; FUKS, S.D. **Integração de Geoestatística e Sistemas de Informação Geográfica: Uma necessidade**. São José dos Campos, INPE. 2003.

CARRIELLO, F.; VICENS, R. S. 2011. Silvicultura de eucalipto no vale do Paraíba do Sul/SP no período entre 1986 e 2010. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBSR, 2011, p. 6403.

CARVALHO, J.R.P.; ASSAD, E. D. Comparação de interpoladores espaciais multivariados para precipitação pluvial anual no Estado de São Paulo. **Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado Técnico**, 2003.

CASTRO, W.S.; FERREIRA, M.E. Bases de dados geográficas digitais no Brasil: formatos, acessibilidade e aplicações-DOI 10.5216/ag. v6i1. 18764. **Ateliê Geográfico**, v. 6, n. 1, p. 92-122, 2012.

CHANGNON, S.A; DEMISSIE, M. Detection of changes in streamflow and floods resulting from climate fluctuations and land use-drainage changes. **Climatic change**, 32: 411-421. 1996.

CHILÉS J.P.; DELFINER P. Geostatistics : modeling spatial uncertainty. New York: **John Wiley and Sons**. 1999. 695p.

CLARK, I. **Practical Geostatistics**. London: Applied Science Publisher. 1979.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL - CEIVAP. **Plano de recursos hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul: resumo: diagnóstico dos recursos hídricos: relatório final**. Resende: AGEVAP, 2006.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – CEIVAP. Disponível em <<http://www.ceivap.org.br/apresentacao.php>>. Acesso em Novembro de 2016.

COPPETEC. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Resende: AGEVAP, 2006.

COSTA, L.F.; FARIAS JR, J.E.F.; FORMIGA-JOHNSON, R.M.; SILVA, L.D.D.; ACSELRAD, M.V. Crise hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul: enfrentando a pior estiagem dos últimos 85 anos. **Revista Ineaana**, v. 3, n. 1, p. 26 – 47, 2015.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Plano Estadual De Recursos Hídricos 2004 – 2007**. São Paulo, 2005.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS - DIEESE. Nota técnica nº 147, Agosto 2015: **Comportamento das tarifas de Energia elétrica no Brasil**.

DEVI, G.K; GANASRI, B.P.; DWARAKISH, G.S. A review on hydrological models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001-1007, 2015.

DOS SANTOS, A.M.; GALVINCIO, J.D.; DE MOURA, M.S.B. Os recursos hídricos e as mudanças climáticas: discursos, impactos e conflitos. **Revista Geográfica Venezuelana**, v. 51, n. 1, p. 59-68, 2010

EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO - EBC. Disponível em <http://www.ebc.com.br>. Acesso em Janeiro de 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia – 2030**. Rio de janeiro, 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanço Energético Nacional ano base 2014**. Relatório Síntese, 2015.

FAYAL, M.A. de A. 2008. **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008. 158p.

FERREIRA, K.R. **Interface para operações espaciais em banco de dados geográficos**. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

FITZ, P.R. **Geoprocessamento sem complicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160p.

FUNDAÇÃO COORDENAÇÃO DE PROJETOS, PESQUISAS E ESTUDOS TECNOLÓGICOS – COPPETEC. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro**. Relatório Gerencial. Rio de Janeiro, 2014. 69 p.

FREITAS, M.A.V.; SOITO, J. L. S. Energia e recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 177-216, 2008.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos avançados**, v. 29, n. 84, p. 43-68, 2015.

GASSMAN, P.W.; REYES, M.R.; GREEN, C.H., ARNOLD, J.G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GLEICK, P.H. Climate change, hydrology, and water resources. **Reviews of Geophysics**, v. 27, n. 3, p. 329-344, 1989.

GOLDEMBERG, J. O estado atual do setor elétrico brasileiro. **Revista USP**, n. 104, p. 37-44, 2015.

GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 228, p. 113-129, 2000.

GUIMARÃES, F.L. A crise da energia elétrica e o seu custo. **Revista USP**, n. 104, p. 83-90, 2015.

GREGO, C.R.; DE OLIVEIRA, R.P., VIEIRA, S.R. **Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão**. In: Bernardi, Alberto Carlos de Campos; Naime, João de Mendonça; Resende, Álvaro Vilela de.; Basso, Luis Henrique; Inamasu, Ricardo Yassushi.. (Org.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. 2ed. Brasília, DF: Embrapa, 2014, v. 1, p. 74-83.

HADDELAND, I., SKAUGEN, T.; LETTENMAIER, D.P. Anthropogenic impacts on continental surface water fluxes. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 8, 2006.

HAMED, K. H. Trend detection in hydrologic data: the Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. **Journal of hydrology**, v. 349, n. 3-4, p. 350-363, 2008.

HANNAH, D.M.; DEMUTH, S.; VAN LANEN, H.A.; LOOSER, U.; PRUDHOMME, C.; REES, G.; TALLAKSEN, L.M. Large scale river flow archives: importance, current status and future needs. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 7, p. 1191-1200, 2011.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGES – IPCC. Climate Changes 2007: **The Scientific Basis**. Cambridge University Press, 2007.

IORIS, A.A.R. Os limites políticos de uma reforma incompleta: a implementação da Lei dos Recursos Hídricos na Bacia do Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 10, n. 1, p. 61-85, 2011.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An Introduction to Applied Geosttistics**. New York, Oxford University Press. 1989, 560p.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DO ESTAO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. Volume I. Governo de São Paulo, IPT, 1981.

JACOBI, P.R.; CIBIM, J. C.; SOUZA, A. N. Crise da água na Região Metropolitana de São Paulo – 2013- 2015. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 422-444, 2016.

KENNEDY, M.D. **Introducing geographic information systems with ARCGIS: a workbook approach to learning GIS**. John Wiley & Sons, 2013.

KRIGE, D.G. A statistical approach to some basic mine evalution problems on the Witwatersrand. **Johanesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South Africa**, v.52, p.151-163, 1951.

LACRUZ, L.J.; SERRANO, V.S.M; MORENO, L.J.I; TEJEDA, M.E.; ZABALZA, J. Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). **Journal of Hydrology**, v. 414, p. 463-475, 2012.

LANDIM, P.M.B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terræ Didática**, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LETTENMAIER, D.P.; WOOD, E.F.; WALLIS, J.R. Hydro-climatological trends in the continental United States, 1948-88. **Journal of Climate**, v. 7, n. 4, p. 586-607, 1994.

LIMA, M.I.P.; MARQUES, A.C.; LIMA, J.L. Análise de tendência da precipitação anual e mensal no período 1900-2000, em Portugal Continental. **Territorium**, pp. 11–18, 2005.

LINS, H.F.; SLACK, J.R. Streamflow trends in the United States. **Geophysical research letters**, v. 26, n. 2, p. 227-230, 1999.

LONGLEY, P.A.; GOODCHILD, M.F.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W. **Geographic information systems and science**. John Wiley & Sons Ltd, 2001.

LUCENA, A.F.P. **Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas globais no setor hidroelétrico**. 2010. Tese de Doutorado (Doutorado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

KRONKA, F. J. N. (org.). **Inventário florestal das áreas reflorestadas do Estado de São Paulo**. São Paulo, Secretaria de Estado do Meio Ambiente-Instituto Florestal, 76 p., 2002.

MACHADO, R.E. **Simulação de Escoamento e de Produção de Sedimentos em uma microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo-USP. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. São Paulo, 2002. 166p.

MAGUIRE, D.J. The raster GIS design model—A profile of ERDAS. **Computers & Geosciences**, v. 18, n. 4, p. 463-470, 1992.

MANN, H.B. Econometrica. **The Econometric Society**, v.13, n.3, p.245-259, 1945.

MARENGO, J.A. Variations and change in South American streamflow. **Climatic Change**, v. 31, n. 1, p. 99-117, 1995.

MARENGO, J.A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25-32, 2014.

MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, A.; ALVES, L.M., MENDIONDO, E.M.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, n. 106, p. 31-44, 2015.

MARENGO, J.A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

MARINHO FILHO, G.M.; ANDRADE, R.S.; ZUKOWSKI, J.C.; MAGALHÃES, L.L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. p. 35-47, 2013.

MILLER, S.N.; SEMMENS, D.J.; GOODRICH, D.C.; HERNANDEZ, M.; MILLER, R.C.; KEPNER, W.G.; GUERTIN, D.P. The automated geospatial watershed assessment tool. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 3, p. 365-377, 2007.

MIRANDA, G.M. **Indicadores do potencial de gestão municipal de recursos hídricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista-Unesp. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2012. 96p.

MORTATTI, J.; BORTOLETTO JR, M.J.; MILDE, L.C.E.; PROBST, J.L. Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: series temporais de vazão e hidrogramas de cheia. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 23, p. 55-67, 2004.

NAGUETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2009**. Temple, Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory. Disponível em:< www.brc.tamus.edu/swat/doc.html>. Acesso:1 Junho 2015.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.C.; DIAS, H.C.T.; Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p.9-15. 2005.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. Disponível em <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: Novembro de 2015.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL - OMM: **Climatic Change**. WMO, Geneva, Switzerland, 80p. 1966.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – PBMC. Contribuição do **Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo do GT2. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. 2013. 28p

PENEREIRO, J.C.; FERREIRA, D.H.L. Statistics supported by technology: A proposal to identify climate trends. **Acta Scientiae**, v. 13, n. 1, p. 87-105, 2012.

PEREIRA FILHO, A.J. Análise da escassez hídrica brasileira em 2014. **Revista USP**, n. 104, p. 125-132, 2015.

PFISTER, L.; HUMBERT, J.; HOFFMANN, L. Recent trends in rainfall-runoff characteristics in the Alzette river basin, Luxembourg. **Climatic Change**, v. 45, n. 2, p. 323-337, 2000.

RAPER, J.F.; MAGUIRE, D. J. Design models and functionality in GIS. **Computers & Geosciences**, v. 18, n. 4, p. 387-394, 1992.

RENNÓ, C.D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. Ministério da Ciência e Tecnologia: INPE, Relatório Técnico Parcial. Dezembro, 2000.

RÍO, S.D., HERRERO, L.; FRAILE, R.; PENAS, A. Spatial distribution of recent rainfall trends in Spain (1961–2006). **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 5, p. 656-667, 2011.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Uberlândia: EDUFU, 2009. 262p.

SADIGHI, F.; VAFAKHAH, M. Evaluation of the Spatial Variability of Annual Precipitation Using Geostatistics in the Lorestan Province, Iran. **Current World Environment**, v. 10, n. Special Issue 1 (2015), p. 1016-1023.

SALLA, M.R.; ARQUIOLA, J.P.; ELVIRA, N.L.; ALAMY FILHO, J.E.; PEREIRA, C.E.; COSTA, E.S. Aplicação da ferramenta EVALHID para calibração de parâmetros e simulação de vazões no alto curso do rio Araguari, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, p. 276-285, 2015.

SÃO PAULO. **Caracterização socioeconômica de São Paulo - Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte**. São Paulo: Imprensa Oficial, 2013a.

SÃO PAULO. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Coordenadoria de Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH): 2012/2015**. São Paulo: SSRH/CRHI, 2013b. 210 p.

SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente. **Adaptação às Mudanças Climáticas: o papel essencial da água UN Water – Resumo Executivo**. Disponível em <<http://www.ambiente.sp.gov.br/pactodasaguas/files/2011/10/UN-Water-AMC.pdf>>. Acesso em Junho de 2016.

SÁTIRO, T.P.O.; SIMÕES, S.J.C.; AUTOMARE, G.B.; BERNARDES, G.P.; SOARES, P.V.; TRANNIN, I.C.B.; DIAS, J.F. Metodologia para a elaboração de mapa de potencialidade para a silvicultura com base em álgebra de mapas: a porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul, Brasil. **Geociências (São Paulo)**, v. 32, n. 4, p. 746-759, 2013.

SILVA R.A.; SILVA, V.P.R.; CAVALCANTI, E.P.; SANTOS, D.N. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 5, p. 501-509, 2010.

SILVA, J.W.; GUIMARÃES, E.C.; TAVARES, M. Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 3, p. 665-674, 2003.

SILVA, W.M.; SIMÕES, S.J.C. Spatial Intra-Annual Variability of Precipitation Based on Geostatistics. A Case Study for the Paraíba Do Sul Basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Geosciences**, v. 2014, 2014.

STAHL, K.; HISDAL, H.; HANNAFORD, J.; TALLAKSEN, L.; VAN LANEN, H.; SAUQUET, E.; JORDAR, J. Streamflow trends in Europe, evidence from a dataset of near-natural catchments. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 14, 2367–2382, 2010.

SUNDE, M.; HE, H.S.; HUBBART, J.A.; SCROGGINS, C. Forecasting streamflow response to increased imperviousness in an urbanizing Midwestern watershed using a coupled modeling approach. **Applied Geography**, v. 72, p. 14-25, 2016.

SVENSSON, C.; HANNAFORD, J.; KUNDZEWICZ, Z.W.; MARSH, T.J. Trends in river floods: why is there no clear signal in observations? **IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports**, v. 305, p. 1-18, 2006.

TANCREDI, M.; ABBUD, O. A. **Por que o Brasil está trocando as hidrelétricas e seus reservatórios por energia mais cara e poluente?** Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado, p. 42, 2013.

TAROLLI, P.; CAVALLI, M. **Geographic Information Systems (GIS) and Natural Hazards**. In: Encyclopedia of Natural Hazards. Springer Netherlands, 2013. p. 378-385.

TIEZZI, R.O. **Variabilidade Hidroclimatológica e seus Efeitos no Suprimento de Energia Elétrica do Sistema Interligado Nacional**. 2015. Tese de Doutorado (Doutorado em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais), UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas.

TRIMBLE, S.W.; WEIRICH, F.H.; HOAG, B.L. Reforestation and the reduction of water yield on the Southern Piedmont since circa 1940. **Water Resources Research**, v. 23, n. 3, p. 425-437, 1987.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

TUCCI, C.E.M; HESPANHOL, I; NETTO, O.D.M.C. **Gestão da água no Brasil**. Brasília: Unesco, 2001.

TUCCI, C.E.M. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. **Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas–Câmara Temática de Recursos Hídricos**, Brasília, 2002.

TUCCI, C.E.M.; MENDES, C.A.B. **Avaliação Ambiental Integrada de Bacias Hidrográficas**. Ministério do Meio Ambiente e PNUD (Projeto PNUD 00/20). Apoio a Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental. Brasília-DF. 2006. 362p

TUCCI, C.E.M. Mudanças climáticas e impactos sobre os recursos hídricos no Brasil. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, RS, n. 34, p. 137-156, 2007.

TUCCI, C.E.M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre, ABRH, 943 p., 2014.

TUNDISI, J.G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, n. 70, p. 24-35, 2006.

TUNDISI, J.G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.

UNESCO. **Water for a Sustainable World**. Paris, 2015.

VIANNA, L.G.G.; SATO, A. M.; FERNANDES, M. C.; NETTO, A. L. C. Fronteira de expansão dos plantios de eucalipto no geoeossistema do médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/ RJ). In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO, 1., 2007, Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi, 2007, p. 367-369.

VILANOVA, M.R.N. Tendências hidrológicas anuais e sazonais na bacia do rio Paraibuna, Parque Estadual da Serra do Mar (SP). **Sociedade & Natureza**, p. 301-316, 2014.

VIOLA, M.R.; MELLO, C.D.; ACERBI JR, F.W.; SILVA, A.D. MModelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 581-590, 2009.

VIOLA, M.R.; MELLO, C.D.; PINTO, D.B.; MELLO, J.D.; ÁVILA, L.F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.

WHEATER, H.; SOROOSHIAN, S.; SHARMA, K.D. **Hydrological modelling in arid and semi-arid areas**. Cambridge University Press, 2007.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Analyzing long time series of hydrological data with respect to climate variability**, Wcap-3, WMO/TD 224, 1988.

YAMAMOTO, J.K. **Avaliação e classificação de reservas minerais**. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 2001. 226p.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. Oficina de Textos, 2013.

YEVJEVICH, V. **Probability and statistics in hydrology**. Fort Collins: Water Resources Publication, 1972. 276 p.

YUE, S.; PILON P.; CAVADIAS G. Power of Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**. v. 259, p. 254-271, 2002.