



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO – ÁREA DE CONCENTRAÇÃO RECURSOS HÍDRICOS

BRUNO COSTA CASTRO ALVES

AVALIAÇÃO DOS PADRÕES DE VARIABILIDADE E MUDANÇA CLIMÁTICA NO
SETOR HIDRELÉTRICO BRASILEIRO

FORTALEZA

2012

BRUNO COSTA CASTRO ALVES

AVALIAÇÃO DOS PADRÕES DE VARIABILIDADE E MUDANÇA CLIMÁTICA NO
SETOR HIDRELÉTRICO BRASILEIRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho

FORTALEZA - CEARÁ

2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE**

A477a **Alves, Bruno Costa Castro.**
 **Avaliação dos padrões de variabilidade e mudança climática no setor hidrelétrico brasileiro / Bruno
Costa Castro Alves – 2012.**
 98 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

**Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e
Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2012**
 Área de Concentração: Recursos Hídricos.
 Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

1. Recursos Hídricos. 2. Mudanças climáticas. I. Título.

BRUNO COSTA CASTRO ALVES

AVALIAÇÃO DOS PADRÕES DE VARIABILIDADE E MUDANÇA CLIMÁTICA NO
SETOR HIDRELÉTRICO BRASILEIRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho

Aprovada em 13/06/2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcio Cataldi
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Dedico esta dissertação aos meus avós Ivan, Margarida, Afrânio (*in memoriam*) e Vilalba, meus pais, meu irmão, minha irmã e a minha esposa Giovana.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Francisco de Assis de Souza Filho pela orientação e paciência nas correções deste trabalho.

Ao Cleiton pela imensa ajuda neste trabalho.

Aos meus pais pelo apoio incondicional em todas as etapas de minha vida.

Ao meu irmão Victor que sempre esteve do meu lado.

À minha irmã Liana que me mata de orgulho.

À minha esposa Giovana, que sempre acreditou em mim e me ajudou muito neste trabalho.

Aos meus avós paternos e maternos, em especial, ao meu avô Afrânio (*in memoriam*).

E a todos aqueles que me ajudaram e me apoiaram na realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar as possíveis tendências aliadas às mudanças climáticas, em séries históricas de vazões naturalizadas nos postos do Operador Nacional do Sistema (ONS). Os métodos de análise utilizados foram os métodos ditos clássicos (média e mediana móvel, regressão linear, LOWESS e Mann-Kendall-Sen), o estudo de cheias através do ajuste das séries à distribuição de Gumbel, análise da transformada em ondeletas (*Wavelets*) e a correlação entre vazões e índices climáticos. Os resultados mostraram que existe uma tendência ou uma variabilidade de baixa frequência positiva nas regiões sul, sudeste e centro-oeste, enquanto que na região nordeste, existe uma tendência ou variabilidade de baixa frequência negativa nas vazões. Identificou-se ainda, uma coincidência entre a mudança de patamar de regime de vazões em alguns postos com valores elevados do índice PDO, podendo indicar que existe uma variabilidade de baixa frequência nas vazões. Observou-se através da análise da transformada em ondeletas que existe uma variabilidade de baixa frequência de período igual entre 40 e 80 anos e uma variabilidade de média frequência de período entre 10 e 20 anos na maioria dos postos analisados. Os resultados para os modelos climáticos do CMIP3 indicam que no cenário A1B do IPCC (século XXI) há um aumento na variabilidade das vazões em relação ao século XX (20C3M) na maioria dos modelos para os 24 postos selecionados do Sistema Interligado Nacional. Os resultados da correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS com os índices climáticos, mostraram que apenas o índice Niño1+2 apresentou uma correlação linear moderada com as mesmas.

Palavras-chave: Análise de tendências. Setor hidroelétrico e mudança climática.

ABSTRACT

This study aims to evaluate possible trends, coupled with climate change, in naturalized flows time series at the stations of the Operador Nacional do Sistema (ONS). The analytical methods used were the so-called classical methods (mean and median mobile, linear regression, LOWESS and Mann-Kendall-Sen), the study of peak floods by adjusting the time series to Gumbel distribution, analysis of wavelet transforms and the correlation between flows and climate indices. The results showed that there is a positive trend or a possible low-frequency variability in south, southeast and midwest of Brazil, while in the northwest, there is a negative trend or low frequency variability in flows. It was also found a coincidence between the step change of flow regime in some stations with high values of PDO index, which may indicate that there is a low frequency variability in flows. The analysis of wavelet transformation indicate that there is a low frequency of variability with a period between 40 and 80 years and an average frequency of variability with a period between 10 and 20 years in most flow stations analyzed. The results for the CMIP3 climate models indicate that, in the IPCC A1B scenario for the 21st century, there is an increase in the variability of flows over the twentieth century in the most of models of the 24 selected stations of SIN for this study. The results of the correlation between the average monthly flow and the climate indices, showed that only Niño 1+2 index have a moderate linear correlation.

Keywords: Trend analysis. Hydropower sector. Climate change.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Ondeleita de Morlet..... | 19 |
| Figura 2.2 – Oceano Pacífico em condições normais | 22 |
| Figura 2.3 – Oceano Pacífico em condições de El Niño..... | 23 |
| Figura 2.4 – Oceano Pacífico em condições de La Niña..... | 23 |
| Figura 2.5 – Regiões do ENSO | 24 |
| Figura 2.6 – Índice PDO..... | 25 |
| Figura 2.7 – Fases da Oscilação Decadal do Pacífico..... | 26 |
| Figura 2.8 – Anomalia, em °C, da temperatura média da superfície do globo observada e das simulações dos AOGCMs..... | 28 |
| Figura 3.1 – Matriz de energia elétrica | 31 |
| Figura 3.2 – Mapa de localização das usinas hidrelétricas do SIN selecionadas para este estudo..... | 33 |
| Figura 4.1 – Fluxograma metodológico..... | 36 |
| Figura 4.2 – Índice da Oscilação Decadal do Pacífico – PDO..... | 41 |
| Figura 4.3 – TSM na região NINO 1+2 do Oceano Pacífico..... | 42 |
| Figura 4.4 – TSM na região NINO 3 do Oceano Pacífico..... | 42 |
| Figura 4.5 – TSM na região NINO 4 do Oceano Pacífico..... | 43 |
| Figura 4.6 – TSM na região NINO 3.4 do Oceano Pacífico..... | 43 |
| Figura 4.7 – Esquema do modelo SMAP..... | 52 |
| Figura 4.8 – Ajuste de escala através da função gama..... | 55 |
| Figura 4.9 – Regiões propostas..... | 57 |
| Figura 5.1 – Mapa das porcentagens da variância explicada pela banda de alta frequência (1 a 8 anos)..... | 61 |
| Figura 5.2 – Mapa das porcentagens da variância explicada pela banda de média frequência (9 a 39 anos)..... | 62 |
| Figura 5.3 – Mapa das porcentagens da variância explicada pela banda de baixa frequência. 63 | |
| Figura 5.4 – Mapa das tendências de Sen | 64 |
| Figura 5.5 – Gráfico Tipo 1: Ascendente (Posto Barra Bonita (237) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 30 anos)..... | 67 |
| Figura 5.6 – Gráfico Tipo 2: Ascendente com Patamar: (Três Marias (156) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 20 anos)..... | 67 |
| Figura 5.7 – Gráfico Tipo 3: Descendente: (Posto A. S. Oliveira (16) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 20 anos)..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.8 – Gráfico Tipo 4: Descendente com Patamar: (Posto Barra Grande (215) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 30 anos)..... | 68 |
| Figura 5.9 – Gráfico Tipo 5: Forma de “U”: (Posto Aimorés (18) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 30 anos)..... | 69 |
| Figura 5.10 – Gráfico Tipo 6: Forma de “U” invertido: (Posto Salto Pilão (101) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 20 anos)..... | 69 |
| Figura 5.11 – Distribuição espacial dos tipos de gráfico para uma janela de ajuste de 20 anos..... | 71 |
| Figura 5.12 – Distribuição espacial dos tipos de gráfico para uma janela de ajuste de 30 anos..... | 72 |
| Figura 5.13 – Distribuição espacial dos tipos de gráfico para uma janela de ajuste de 40 anos..... | 73 |
| Figura 5.14 – Índice climático PDO médio..... | 78 |
| Figura 5.15 – Anomalia do índices climático NINO 1+2..... | 79 |
| Figura 5.16 – Anomalia do índices climático NINO 3..... | 79 |
| Figura 5.17 – Anomalia do índices climático NINO 4..... | 80 |
| Figura 5.18 – Anomalia do índice climáticos NINO 3.4..... | 80 |
| Figura 5.19 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias..... | 82 |
| Figura 5.20 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático Niño3..... | 83 |
| Figura 5.21 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático Niño4..... | 84 |
| Figura 5.22 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático Niño4..... | 85 |
| Figura 5.23 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático PDO..... | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1. Cenários IPCC - AR4..... | 28 |
| Tabela 3.1. Usinas hidrelétricas e bacias hidrográficas selecionadas para este estudo | 34 |
| Tabela 4.1. Dados utilizados, suas fontes e o tipo de análise..... | 37 |
| Tabela 4.2. Postos do SIN com série de vazões mensais | 38 |
| Tabela 4.3. Postos do SIN com série de vazões diárias..... | 39 |
| Tabela 4.4. Modelos AOGCMs do CMIP3 | 40 |
| Tabela 4.5. Grau de correlação entre as variáveis | 49 |
| Tabela 4.6. Parâmetros do modelo SMAP..... | 53 |
| Tabela 4.7. Classificação dos modelos do CMIP3 para cada uma das três regiões..... | 58 |
| Tabela 5.1. Resultado da Análise de Tendência de Sen para 21 Bacias do SIN..... | 60 |
| Tabela 5.2. Postos com série de vazões naturalizadas com período maior ou igual a 60 anos. 66 | |
| Tabela 5.3. Classificação dos gráficos de vazões extremas dos postos das sub-bacias selecionadas para este estudo - períodos de retorno de 100 e 1.000 anos..... | 70 |
| Tabela 5.4. Classificação das bacias do SIN de acordo com as regiões propostas por Silveira et al. (2011)..... | 74 |
| Tabela 5.5. Vazões médias observadas e vazões médias dos modelos selecionados do CMIP3 do século XX (20C3M) | 75 |
| Tabela 5.6. Comparação das vazões médias e dos coeficientes de variação dos modelos do CMIP3 selecionados do século XX (20C3M) com os do cenário A1B para o século XXI do IPCC-AR4 (Bacias 1 a 12)..... | 76 |
| Tabela 5.7. Comparação das vazões médias e dos coeficientes de variação dos modelos do CMIP3 selecionados do século XX (20C3M) com os do cenário A1B para o século XXI do IPCC-AR4 (Bacias 13 a 24)..... | 77 |
| Tabela 5.8. Maiores Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as vazões naturalizadas das 21 bacias do SIN e os índices climáticos Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4 e o índice PDO..... | 81 |
| Tabela 5.9. Grau de correlação linear entre entre as vazões naturalizadas das 21 bacias do SIN e os índices climáticos Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4 e o índice PDO..... | 81 |
| Tabela 6.1. Postos do SIN com maiores tendências de aumento das vazões..... | 87 |
| Tabela 6.2. Postos do SIN com maiores tendências de redução das vazões..... | 87 |
| Tabela 6.3. Classificação dos gráficos da avaliação de extremos – quantidade de gráficos classificados por tipo – período de retorno de 100 e 1.000 anos..... | 88 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 . Objetivos gerais..... | 14 |
| 1.2 . Objetivos específicos..... | 14 |
| 1.3 . Organização da dissertação..... | 15 |
| 2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 2.1 . Variabilidade climática e estacionariedade das séries históricas de vazões..... | 15 |
| 2.2 . Técnica de avaliação da variabilidade (wavelet)..... | 17 |
| 2.3 . Técnica de avaliação de tendência..... | 20 |
| 2.4 . Fenômenos climáticos..... | 21 |
| 2.4.1 . <i>Oscilação Sul - El Niño/La Niña</i> | 22 |
| 2.4.2 . <i>Oscilação Decadal do Pacífico</i> | 24 |
| 2.5 . Mudanças climáticas..... | 26 |
| 2.6 . Modelos de mudança climática (CMIP3)..... | 27 |
| 2.7 . Estudos sobre tendências e mudanças climáticas no Brasil..... | 30 |
| 3 . SETOR HIDRELÉTRICO BRASILEIRO..... | 31 |
| 4 . METODOLOGIA..... | 35 |
| 4.1 . Dados..... | 37 |
| 4.2 . Avaliação do padrão de variação e de tendências nas séries históricas de vazão..... | 44 |
| 4.3 . Avaliação de extremos: Cheias..... | 47 |
| 4.4 . Identificação dos Índices Climáticos que expliquem os padrões de variação..... | 49 |
| 4.5 . Avaliação dos modelos de mudança climática para as bacias: Precipitação..... | 51 |
| 4.6 . Avaliação dos modelos de mudança climática para as bacias: Vazões..... | 51 |
| 5 . RESULTADOS..... | 59 |
| 5.1 . Avaliação dos padrões de variação e de tendências nas séries históricas de vazão..... | 59 |
| 5.2 . Avaliação de extremos: cheias..... | 65 |
| 5.3 . Avaliação dos modelos de mudança climática para as bacias: Vazões..... | 74 |
| 5.4 . Identificação dos índices climáticos que expliquem os padrões de variação..... | 78 |
| 6 . ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 87 |
| 6.1 . Avaliação dos padrões de variação e de tendências nas séries históricas de vazão..... | 87 |
| 6.2 . Avaliação de extremos: cheias..... | 88 |
| 6.3 . Identificação dos índices climáticos que expliquem os padrões de variação..... | 88 |
| 6.4 . Avaliação dos modelos de mudança climática para as bacias: Vazões..... | 89 |
| 7 . CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 90 |

| | |
|---|----|
| 7.1 . Recomendações para trabalhos futuros..... | 92 |
| 8 . BIBLIOGRAFIA..... | 93 |
| 9 . ANEXOS..... | 98 |

1 INTRODUÇÃO

A análise de tendências em séries temporais de vazões é de extrema importância para a gestão dos recursos hídricos. Em geral, os sistemas de recursos hídricos são projetados e operados a partir da hipótese da estacionariedade estatística das séries históricas. Entretanto, esta suposição pode ser inválida no contexto da variabilidade climática decadal e mudanças no uso e ocupação do solo, sem falar na mudança climática. Essa não estacionariedade dificulta bastante a cenarização das projeções com escala de 1 a 10 anos, já que essa escala temporal apresenta sinais de variabilidade decadal e de mudanças climáticas (Alves et al, 2011).

A hipótese da estacionariedade das séries deve ser verificada e nos sistemas de recursos hídricos, onde a mesma não for válida, deve-se avaliar os possíveis impactos oriundos desta não-estacionariedade.

A matriz de energia elétrica brasileira é constituída, majoritariamente, por fontes de energia consideradas limpas, como as hidrelétricas. Considerando apenas os empreendimentos em operação, o setor elétrico brasileiro possui uma potência outorgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) de 119.277 MW, dos quais 82.831 MW (69,4%) estão alocados em Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) (ANEEL, 2012).

A hegemonia da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica brasileiro impõe cautelosa análise sobre o regime fluvial e seus padrões de variação temporal, tendo em vista o significativo impacto que estas variações podem produzir na oferta de energia e, conseqüentemente, em toda a economia nacional.

O planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável por 96,6% da produção de energia elétrica no Brasil, é feito pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) mensalmente. O seu Plano de Operação Mensal consiste na tomada de decisão sobre a alocação da produção de energia elétrica entre as diversas fontes de energia (termoelétrica, hidroelétrica, eólica, etc.). Esta tomada de decisão é apoiada por modelos de otimização alimentados por previsões de vazões, obtidas através de modelos estocásticos, sem considerar as informações climáticas. Nos horizontes acima de um mês, o aumento da incerteza das aflúncias torna necessária a geração de séries sintéticas obtidas através de modelos estocásticos autorregressivos endógenos (vazão gera vazão).

Hipoteticamente, devido ao atual estado das ciências climáticas, a incorporação de modelagem climática nestes modelos de otimização poderá melhorar a previsão de vazões na escala de tempo sazonal utilizadas na tomada de decisão. Já nas escala interanuais a incorporação de modelagem climática, associada a variabilidade de baixa frequência, pode prover cenários climáticos de longo prazo mais verossímeis.

Este trabalho utiliza métodos clássicos de análise de tendências e propõe uma metodologia baseada na análise da transformada em ondeletas (*wavelets*) para identificar tendências e padrões de variação das séries de vazões. De forma complementar são analisadas as cheias de recorrência de 100 e 1.000 anos para verificar se os eventos extremos possuem os mesmos padrões de variação de baixa frequência do escoamento médio e se a variabilidade de alta frequência está associada a algum processo climático.

Os impactos das mudanças climáticas nas vazões serão avaliados através da comparação das vazões obtidas através dos modelos climáticos para o século XX com as vazões destes mesmos modelos para um cenário do século XXI.

A correlação entre as vazões dos postos do ONS e os índices climáticos foi feita através da correlação linear de Pearson.

1.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar os padrões de variabilidade e de tendências nos regimes de vazões do setor hidroelétrico brasileiro.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliação dos modos de variação das séries históricas de vazões, identificando as variações de baixa e alta frequência;
- Identificação de índices climáticos que possam explicar parte desta variação de baixa e de alta frequência, através da análise visual das séries de vazões máximas e da correlação entre as vazões máximas diárias e índices climáticos médios mensais;
- Avaliação do cenário A1B (século XXI) dos modelos de mudança climática (CMIP3 – terceira fase do *Coupled Model Intercomparison Project* do *World Climate Research Programme's*) para 24 bacias selecionadas do SIN;
- Propor uma metodologia para avaliação de mudança e variabilidade climática, identificando-as separadamente.

1.3 Organização da dissertação

Esta tese está dividida em oito capítulos e um anexo, sendo o primeiro capítulo esta introdução e a apresentação dos objetivos gerais e específicos. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica onde são abordadas as técnicas de análise de variabilidade e de tendências, os fenômenos climáticos e alguns dos seus respectivos índices e os modelos de mudança climática do CMIP3, além de apresentar alguns estudos de tendência e mudança climática no Brasil. O terceiro capítulo apresenta os aspectos gerais do setor hidroelétrico brasileiro. O quarto capítulo apresenta a metodologia utilizada neste trabalho, incluindo os métodos de análise da variabilidade e das tendências, os métodos de avaliação de extremos e dos modelos climáticos, a identificação dos índices climáticos e a classificação dos gráficos de vazões extremas. O quinto capítulo apresenta os resultados dos padrões de variabilidade nas séries históricas de vazões, da avaliação de extremos, dos índices climáticos e dos modelos de mudança climática. O sexto capítulo discorre sobre a análise dos resultados obtidos. O sétimo capítulo apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros. O último capítulo apresenta a bibliografia. Os anexos digitais apresentam os resultados obtidos neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo é dividido em seis partes onde se apresenta uma revisão da variabilidade climática, da estacionariedade das séries históricas, das técnicas de análise de variabilidade e de tendências, dos fenômenos climáticos e alguns dos seus respectivos índices e dos modelos de mudança climática do CMIP3, além de apresentar alguns estudos sobre tendências e mudança climática no Brasil.

2.1 Variabilidade climática e estacionariedade das séries históricas de vazões

A variabilidade climática é uma propriedade intrínseca do sistema climático global, responsável por oscilações naturais nos padrões climáticos (CONFALONIERI, 2003) e que se refere a variações no estado médio do clima nas escalas temporais e espaciais além de eventos climáticos individuais (USAID, 2007). Embora seja uma componente conhecida da dinâmica climática global, seu impacto, mesmo dentro dos limites esperados, podem ter reflexos significativos nas atividades humanas (NUNES e LOMBARDO, 1995). A variabilidade climática temporal possui diversas escalas, como a variabilidade climática

interdecadal (escala de décadas), interanual (escala de anos) e intersazonal (escala de meses ou estações).

O principal sistema gerador de precipitações sobre a região equatorial do oceano Atlântico é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), como foi mostrado por Hastenrath e Heller (1977) e Citeau *et al.* (1988).

A região Nordeste possui um regime pluvial caracterizado pela sazonalidade, onde existem dois períodos distintos: o período chuvoso e o período seco (ALBUQUERQUE *et al.*, 2009). O período chuvoso se concentra entre dezembro e julho, quando a ZCIT migra da sua posição mais ao norte (14° N) para a sua posição mais ao sul (3° S) entre os meses de março e abril. Durante o período seco há um predomínio de altas pressões atmosféricas e a quase ausência de eventos de precipitação.

As regiões Sul e Sudeste do Brasil têm seus regimes de precipitação influenciados pela passagem e intensidade de sistemas frontais (OLIVEIRA, 1986; GUEDES *et al.*, 1994), pelo posicionamento do jato subtropical da América do Sul (KOUSKY e CAVALCANTI, 1984) e por Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (MADDOX, 1983; MILLER e FRITSCH, 1991).

A variabilidade temporal destes processos climáticos condiciona o regime de precipitação e evaporação em uma bacia hidrográfica, determinando os padrões de variação das vazões.

A estacionariedade é o conceito de que os sistemas naturais flutuam dentro de um espaço imutável de variabilidade. É um conceito fundamental que permeia a formação e prática na engenharia de recursos hídricos. A suposição da estacionariedade de séries históricas foi, há muito tempo, comprometida pelas mudanças impostas pelo homem nas bacias hidrográficas. Riscos de inundações, abastecimento e qualidade da água foram afetados pelas obras de infraestrutura, modificações de canais, obras de drenagem e cobertura e uso do solo (MILLY *et al.*, 2008).

A não-estacionariedade das séries de vazões podem estar associadas a forçantes climáticas e não climáticas. As forçantes não-climáticas influenciam os recursos hídricos através da mudança do uso do solo, construção de reservatório e emissões de poluentes (IPCC, 2007a). A influências das forçantes climáticas globais sobre o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas apresenta uma ampla documentação na literatura (ALVES *et al.*, 2011).

A análise da não-estacionariedade das séries hidrológicas demanda informações sobre tendências e padrões de variação de baixa frequência do clima (de décadas a séculos). O clima das próximas décadas depende tanto de variações climáticas naturais como das forças antropogênicas. Previsões climáticas decadais devem tentar cobrir a lacuna entre a previsão sazonal/interanual com prazos de dois anos ou menos e projeções de mudanças climáticas de um século à frente (CANE, 2010). Não há nenhuma teoria amplamente aceita para este tipo de previsão e não se sabe se a sua evolução passada é a chave para seu futuro (CANE, 2010). No entanto, como a extensão de registros tem aumentado, os hidrólogos tomaram consciência da estrutura de baixa frequência do clima (por exemplo, as oscilações ENSO – Oscilação Sul do El Niño / La Niña, PDO – Oscilação Decadal do Pacífico e NAO – Oscilação do Atlântico Norte) e tem procurado desenvolver cenários de vazões considerando essa variabilidade (GHIL e VAUTARD, 1991; KEPPENE e GHIL, 1992; KEPPENE e LALL, 1996; LALL e MANN, 1995)

2.2 Técnica de avaliação da variabilidade (*wavelet*)

A análise da transformada em ondeletas (*wavelets*) vem se tornando uma ferramenta bastante utilizada para a análise de variações locais de séries temporais, uma vez que os sistemas físicos apresentam várias frequências de características não-estacionárias (BOLZAN, 2004). A decomposição de séries históricas em espaços de tempo-frequência permite a determinação dos modos dominantes de variabilidade, bem como a variação destes modos no tempo (TORRENCE e COMPO, 1998).

O método das ondeletas assemelha-se ao método de Fourier ao decompor a série temporal em um série de funções ortogonais. As funções da série de Fourier (seno e cosseno) têm seu domínio nos números reais, tendo dificuldades para capturar mudanças temporais na intensidade do sinal de uma dada frequência. As ondeletas têm seu domínio em uma janela temporal finita e definida, o que possibilita superar esta dificuldade do método de Fourier. Para uma visualização mais nítida do método das ondeletas em comparação ao método de Fourier, descreve-se inicialmente este para depois apresentar o das ondeletas.

Joseph Fourier afirmou, em 1827, (BOLZAN, 2004) na sua teoria de análise de frequências, que qualquer função periódica $f(x)$ é a somatória de:

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)) \quad (2.1)$$

Onde a_0 , a_k e b_k são constantes dadas por:

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (2.2)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (2.3)$$

$$b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \text{sen}(kx) dx \quad (2.4)$$

A transformada de Fourier pode ser considerada como um limite de uma combinação linear infinita de ondas senoidais. Uma função aperiódica pode ser considerada como o caso limite de uma função periódica, cujo período tende ao infinito. Assim, pode-se representar uma série temporal como (BOLZAN, 2004):

$$\langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.5)$$

Onde: $\psi(t)$ é a função geradora simples, a é a variável de dilatação, b é a variável de translação e t é o tempo.

O termo ondeletas se refere a um conjunto de pequenas ondas formadas por dilatações ($\psi(t) \rightarrow \psi(2t)$) e translações ($\psi(t) \rightarrow \psi(t+1)$) de uma função $\psi(t)$, que é quadraticamente integrável sobre um intervalo real ou espaço real ($L^2(\mathbf{R})$), ou seja, apresenta energia finita. A função $\psi(t)$ pode ser chamada de “ondeleta-mãe”, “ondeleta básica” ou “ondeleta de análise”. As funções translacionadas e/ou dilatadas derivadas da “ondeleta mãe” são chamadas de “ondeletas filhas” ou, simplesmente, “ondeletas”. Estas ondeletas apresentam a mesma forma da ondeleta-mãe (WENG e LAU, 1994). Segundo Bolzan (2004) a expansão em série de ondeletas é dada por:

$$\psi_{a,b} = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.6)$$

Onde o parâmetro de dilatação a é um número real positivo e o parâmetro de translação b é um número real, sendo t o tempo. O termo $a^{-1/2}$ regulariza a ondeleta, de forma que a energia da mesma é igual a energia da ondeleta-mãe. Para uma função $\psi(t)$ ser uma ondeleta-mãe, ela deve ter energia finita e média igual a zero (WENG e LAU, 1994). Estas condições são chamadas de “Condição de Admissibilidade” (FARGE, 1992).

A transformada em ondeletas permite a análise de séries históricas que possuem modos de variação dominantes não-estacionários. Assumindo que se tenha uma série histórica x_n , espaçada igualmente a um intervalo δt e que os valores de n variam de zero à $N-1$.

Assume-se, também, que se tenha uma função ondeleta, $\psi_0(\eta)$, que depende de um parâmetro adimensional η . Assim, a função ondeleta de Morlet com o domínio no tempo pode ser escrita como (TORRENCE e COMPO, 1998):

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (2.7)$$

Onde ω_0 é a frequência adimensional, que no caso da ondeleta de Morlet é igual a 6, de forma a satisfazer a condição de admissibilidade e η é o parâmetro adimensional do tempo.

Já a função ondeleta de Morlet com o domínio na frequência pode ser escrita como (TORRENCE e COMPO, 1998):

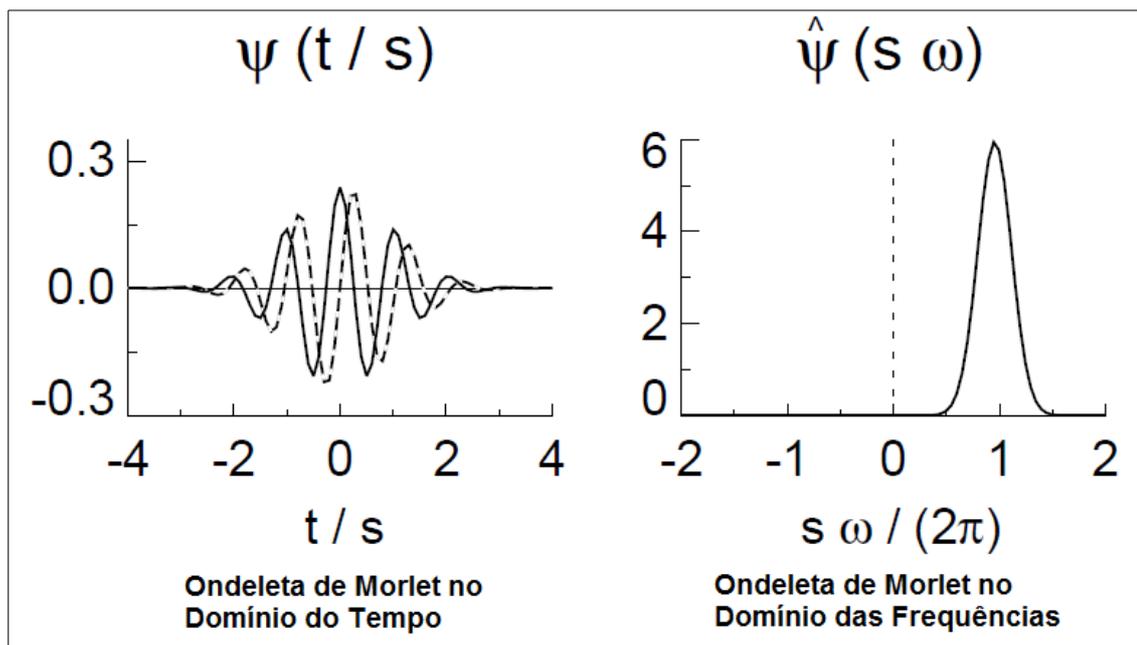
$$\hat{\Psi}_0(s\omega) = \pi^{-1/4} H(\omega) e^{-(s\omega - \omega_0)^2/2} \quad (2.8)$$

Onde ω_0 é a frequência adimensional e $H(\omega)$ é uma função passo, dada por:

$$\begin{aligned} H(\omega) &= 1 \quad \text{se } \omega > 0 \\ H(\omega) &= 0 \quad \text{se } \omega \leq 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

A ondeleta de Morlet está apresentada na Figura 2.1, onde o gráfico da esquerda representa a ondeleta no domínio do tempo, sendo que a linha sólida apresenta a parte real da ondeleta e a linha tracejada apresenta a parte imaginária da mesma e o gráfico da direita representa a ondeleta no domínio da frequência. Para uma melhor visualização da ondeleta, o fator de escala utilizado nos gráficos foi tomado com sendo $s = 10\delta t$ (TORRENCE e COMPO, 1998).

Figura 2.1 – Ondeleta de Morlet



Adaptado de Torrence e Compo (1998).

Uma vez que a transformada em ondeleta é basicamente um filtro passa-banda (filtro que atenua ou rejeita as frequências fora de uma determinada faixa, ou seja, filtro que reduz o sinal a uma determinada faixa de frequência (SHENOI, 2005)) com uma função de resposta conhecida (a própria função ondeleta) é possível reconstruir a série temporal original utilizando o filtro inverso ou uma desconvolução (TORRENCE e COMPO 1998). Mas no caso das ondeletas contínuas, utilizadas neste trabalho, a reconstrução se torna complicada devido a redundância do tempo e da escala. Desta forma, a reconstrução da série temporal é feita utilizando-se uma função ondeleta diferente da função ondeleta original, a função delta (δ) (FARGE, 1992). Neste caso a reconstrução da série é a somatória das partes reais de todas as escalas da transformada em ondeletas (TORRENCE e COMPO, 1998).

2.3 Técnica de avaliação de tendência

Este item aborda as técnicas utilizadas na avaliação de tendência das séries de vazões naturalizadas dos postos do SIN.

Se uma tendência linear está presente em uma série, a declividade (mudança por unidade de tempo) pode ser estimada usando o método não-paramétrico desenvolvido por Sen (1968) (KAHYA e KALAYCI, 2004). No método de Sen são computados a declividade de N pares de dados através da equação:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (2.8)$$

Para $i = 1, 2, \dots, N$ e onde x_j e x_k são os valores de x nos períodos j e k , com $j > k$. A declividade de Sen será a mediana dos N valores de Q_i . O valor de $Q_{mediana}$ (declividade de Sen) é então testado estatisticamente através de um teste bicaudal com grau de confiança de $100(1 - \alpha)\%$ e a declividade estimada é obtida através de um teste não paramétrico, como o método de Mann-Kendall (KAHYA e KALAYCI, 2004).

O teste de tendência de Man-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975; KENDALL e GIBBONS, 1990) é um dos mais utilizados na avaliação de tendências de séries históricas naturais que se distanciam da distribuição normal, como a de qualidade da água, vazões, temperatura e precipitação (HAMED, 2009).

No teste de Mann-Kendall, também conhecido por *Kendall's tau* (KAHYA e KALAYCI, 2004), assume-se que os dados estão aleatoriamente distribuídos, caso das séries históricas naturais.

O teste estatístico de Mann-Kendall, S , é calculado para um grande número de diferentes ordenações (permutações) aleatórias do conjunto de dados. O teste estatístico para os dados originais é, então, comparado com a distribuição do teste estatístico obtido dos dados permutados, obtendo-se o nível de significância para esta distribuição. A lógica por trás desta abordagem é que no caso da hipótese nula de não existir uma tendência no conjunto de dados, cada ordenamento dos dados são igualmente prováveis. O teste estatístico é dado com se segue (BURN *et al.*, 2002):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_i) \quad (2.9)$$

Onde x_i e x_j são valores sequenciais, n é o tamanho da série de dados e Sgn é a função sinal, dada por (BURN *et al.*, 2002):

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{se}(x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se}(x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se}(x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

O teste de Mann-Kendall possui dois parâmetros importantes para a análise de tendência: o nível de significância α , que indica a “força” da tendência, e a declividade β , que indica a direção e a magnitude da tendência (BURN *et al.*, 2002). A magnitude da declividade β é determinada por (HIRST *et al.*, 1982):

$$\beta = \text{Mediana} \left[\frac{(x - x_i)}{(j - i)} \right] \text{ para todo } i < j \quad (2.11)$$

2.4 Fenômenos climáticos

A variabilidade temporal dos fenômenos climáticos condiciona o regime de precipitação e evaporação em uma bacia hidrográfica, e desta forma, determina os padrões de variação das vazões.

Alguns fenômenos climáticos podem ser representados através de índices climáticos que quantificam a sua intensidade, como por exemplo os índices NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 4 e NIÑO 3.4, que representam a temperatura média na superfície do mar (TSM) em quatro regiões do oceano Pacífico, o índice PDO (*Pacific Decadal Oscillation Index*) que representa a anomalia da TSM no oceano pacífico, o índice SOI (*Southern Oscillation Index*), o índice AMO (*Atlantic Multi-decadal Oscillation*), dentre outros. Neste item são

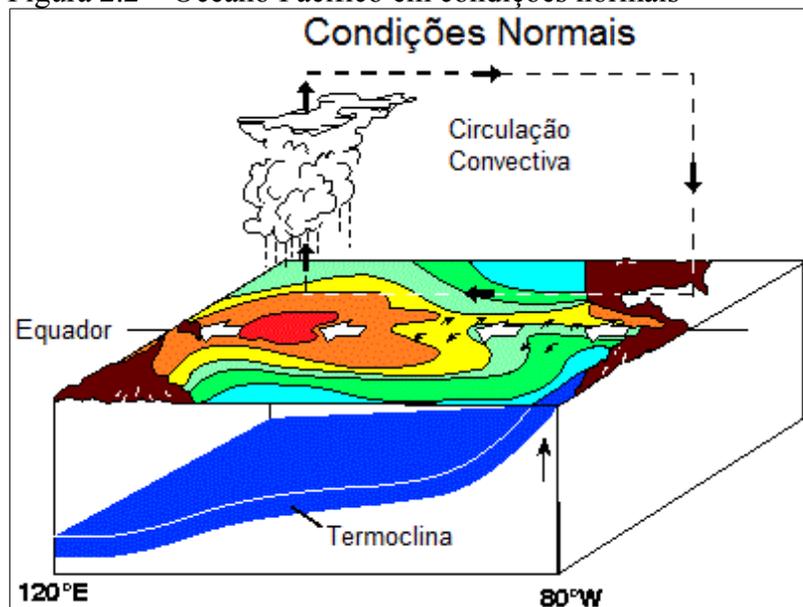
apresentados os fenômenos El Niño/La Niña e a Oscilação Decadal do Pacífico e os índices climáticos NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 4, NIÑO 3.4 e o índice PDO.

2.4.1 Oscilação Sul - El Niño/La Niña

O fenômeno Oscilação Sul – El Niño (ENSO) é uma perturbação interanual do sistema climático, caracterizada pelo enfraquecimento dos ventos alísios e aquecimento das águas superficiais do Oceano Pacífico Equatorial. Atualmente o El Niño é definido com um aumento de pelo menos 0,5°C da temperatura da superfície do mar na região leste-central equatorial do Oceano Pacífico Sul durante um período mínimo de 3 meses, ocorrendo em intervalos irregulares de 2 a 7 anos. A La Niña é o processo inverso, ou seja, é a redução da temperatura da superfície do mar durante 3 meses em pelo menos 0,5°C, que ocorre em intervalos de 3 a 5 anos (Climate Prediction Center, 2011).

Em anos normais, observa-se a célula de Walker de circulação atmosférica caracterizada por movimentos ascendentes no Pacífico Central/Oriental e movimentos descendentes na região oriental da América do Sul, com ventos na alta atmosfera indo do oeste para o leste e com ventos superficiais (alísios) indo do leste para o oeste (Figura 2.2). A Termoclina é a interface entre uma camada inferior de água fria e densa (hipolímnio) e uma camada superior mais quente e menos densa (epilímnio), onde ocorre uma rápida troca de calor (BERGMAN, 2011).

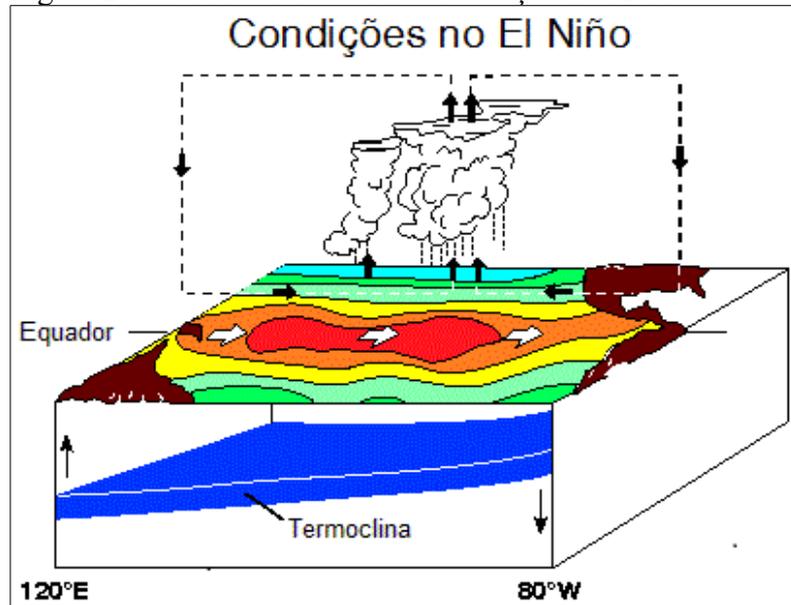
Figura 2.2 – Oceano Pacífico em condições normais



Fonte: El Niño Theme Page <<http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/nino-home.html>>, acesso em 20/01/2012.

Nos anos de El Niño ocorre a bifurcação da célula de Walker, com os ventos alísios tornando-se menos intensos, associada com o aumento da temperatura na superfície do Pacífico Tropical (Figura 2.3).

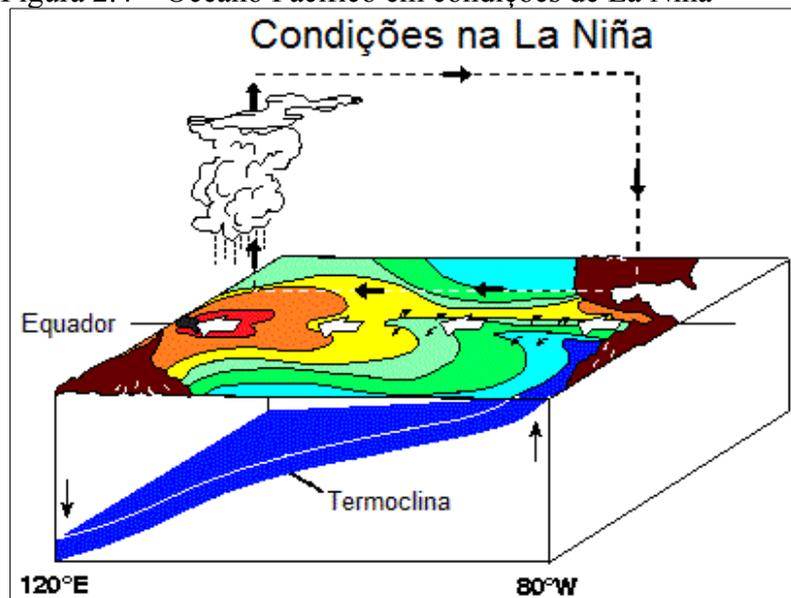
Figura 2.3 – Oceano Pacífico em condições de El Niño



Fonte: El Niño Theme Page <<http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/nino-home.html>>, acesso em 20/01/2012.

Nos anos de La Niña os ventos alísios tornam-se mais intensos e a TSM do oceano pacífico se torna mais baixa que a habitual (Figura 2.4).

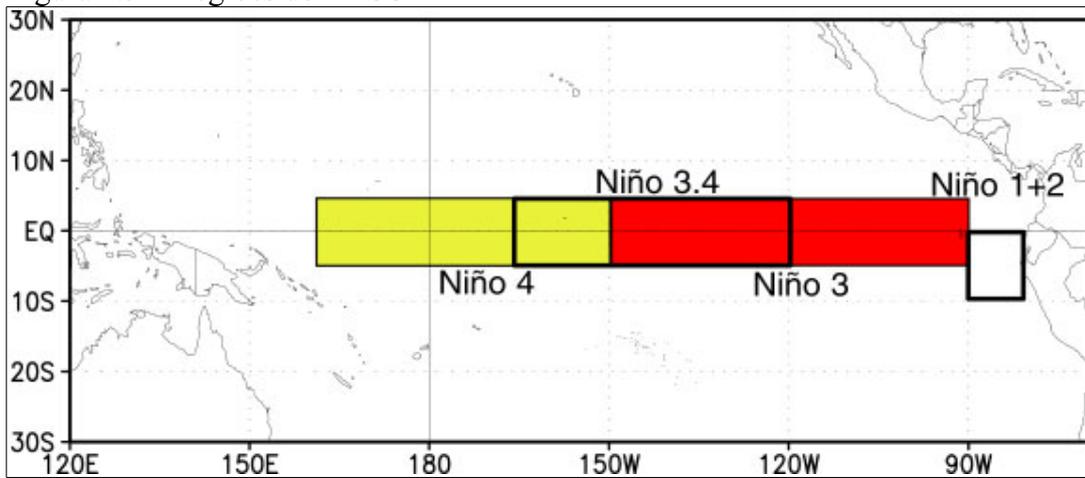
Figura 2.4 – Oceano Pacífico em condições de La Niña



Fonte: El Niño Theme Page <<http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/nino-home.html>>, acesso em 20/01/2012.

De forma a monitorar as alterações na TSM do Oceano Pacífico foram criados quatro índices: NIÑO 1+2, NIÑO 3, NIÑO 4 e NIÑO 3.4. Estes índices correspondem as TSM nas regiões da costa oriental da América do Sul (0 à 10°S e 90 a 80°W) (NIÑO 1+2), Pacífico Ocidental/Central (5°S a 5°N e 150 a 90°W) (NIÑO 3), Pacífico Oriental/Central (5°S a 5°N e 160°E a 150°W) (NIÑO 4) e Pacífico Central (5°S a 5°N e 170 a 120°W) (NIÑO 3.4), conforme Figura 2.5. Segundo Sleiman e Silva (2010), comumente se analisa a correlação existente entre a TSM destas regiões com a precipitação na América do Sul.

Figura 2.5 – Regiões do ENSO



Fonte: Equatorial Currents and El Niño

<<http://oceanworld.tamu.edu/resources/oceanography-book/equatorialcurrents.htm>>.

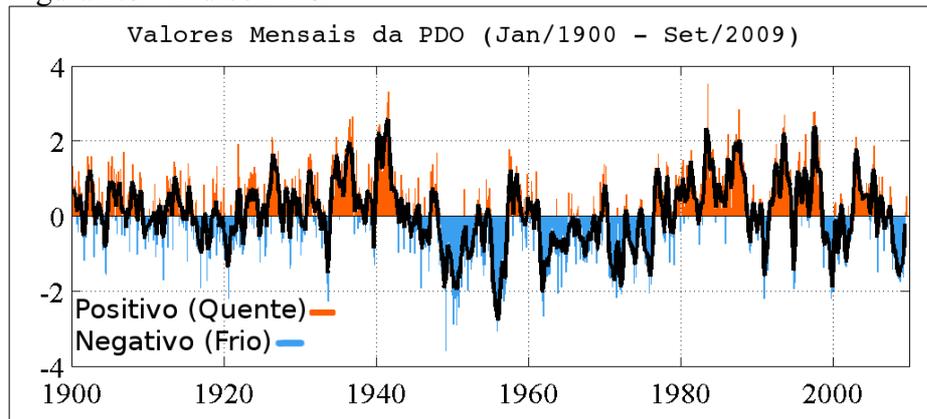
Acesso em 25/01/2012.

2.4.2 Oscilação Decadal do Pacífico

A Oscilação Decadal do Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation – PDO*), também conhecida como Oscilação Interdecadal do Pacífico (*Interdecadal Pacific Oscillation – IPO*) (MANTUA e HARE, 2002) pode ser definida como a componente principal da variabilidade da temperatura na superfície do mar (TSM) do oceano Pacífico (MANTUA *et al.*, 1997). O índice PDO criado por Hare (1996) e Zhang (1996) e utilizado por Mantua *et al.* (1997) é medido pela anomalia da intensidade da PDO em relação aos valores médios.

Utilizando a TSM do Oceano Pacífico e outros índices no período de 1900 a 1995, Mantua *et al.* (1997) mostraram que existe uma inversão de polaridade da PDO nos anos de 1925, 1947 e 1977 (Figura 2.6). Observa-se que atualmente a PDO pode estar passando por uma fase fria, onde a inversão de polaridade ocorreu em 1999 (Sousa *et al.*, 2010).

Figura 2.6 – Índice PDO



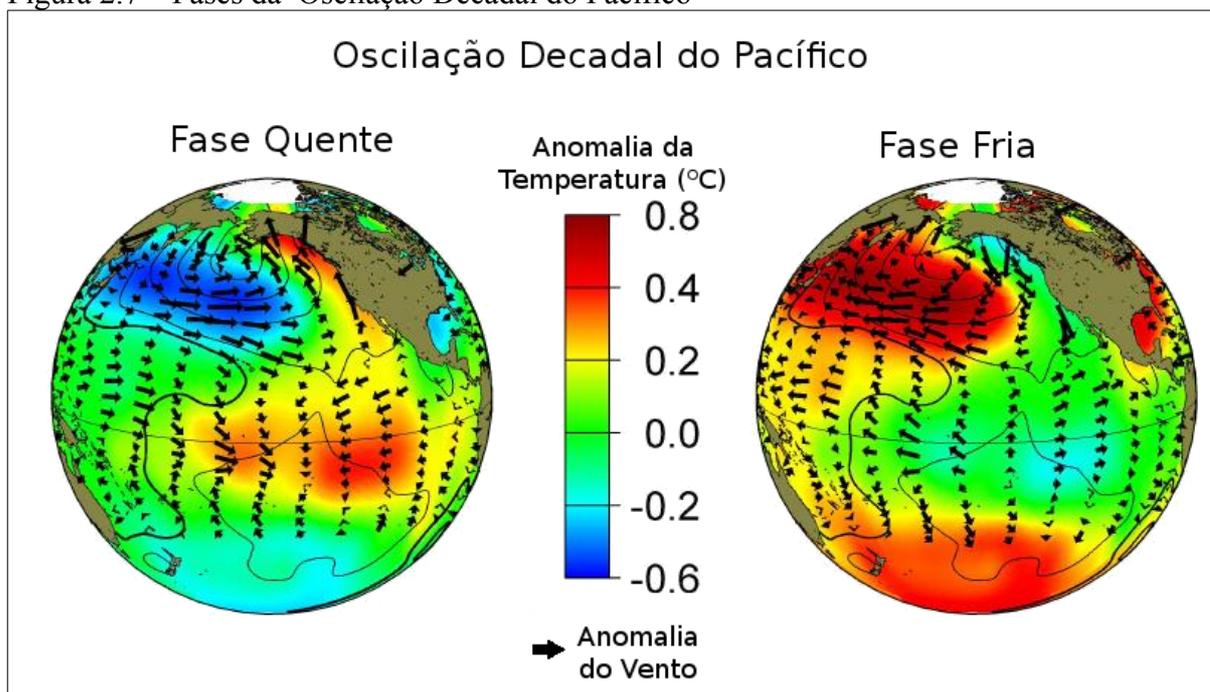
Fonte: Pacific Decadal Oscillation (PDO) Graphics

<<http://jisao.washington.edu/pdo/graphics.html>>. Acesso em 10/04/2012.

A PDO se diferencia da Oscilação Sul – El Niño (ENSO) por três características principais: eventos da PDO no século XX persistem por um período de 20 a 30 anos, enquanto os períodos típicos do ENSO duram de 6 a 18 meses; as anomalias climáticas provenientes da PDO são mais visíveis nas regiões extratropicais, com assinaturas secundárias nas regiões intertropicais, enquanto que para o ENSO ocorre o oposto; os mecanismos causadores da variabilidade da PDO ainda não são conhecidos, enquanto que no caso do ENSO, estes mecanismos são bem conhecidos (ZHANG *et al.*, 1997; MANTUA *et al.*, 1997; NRC, 1998).

A PDO possui duas fases distintas de aquecimento e resfriamento no pacífico que estão intimamente ligadas à instabilidade termodinâmica da atmosfera. Estas fases recebem as denominações de frias e quentes porque representam alterações anômalas na TSM no Pacífico Tropical (SLEIMAN e SILVA, 2010). Os períodos de 1900 a 1924 e de 1947 a 1976 são as fases frias da PDO (anomalias negativas na TSM do oceano Pacífico Tropical e anomalias positivas na TSM do oceano Pacífico Extratropical) e os períodos de 1925 a 1946 e de 1977 a 1998 são as fases quentes da PDO (anomalias positivas na TSM do oceano Pacífico Tropical e anomalias negativas da TSM do oceano Pacífico Extratropical). A Figura 2.7 apresenta as duas fases da Oscilação Decadal do Pacífico.

Figura 2.7 – Fases da Oscilação Decadal do Pacífico



Fonte: Pacific Decadal Oscillation (PDO) Graphics
 <<http://jisao.washington.edu/pdo/graphics.html>>. Acesso em 17/03/2012.

Segundo Mantua e Hare (2002), várias evidências nos trabalhos de White e Cayan (1998), Garreaud e Battisti (1999) e Dettinger *et al.* (2000) sugerem que o modo de variação da PDO exhibe uma simetria com as variações climáticas interdecadais nos hemisférios norte e sul, em especial na Ásia Oriental, nas Américas e na Austrália.

Segundo Sleiman e Silva (2010) o clima na América do Sul é modificado por flutuações de prazos mais longos, além da variabilidade interanual, tal como a PDO, que apresenta uma periodicidade característica de 20 a 30 anos.

2.5 Mudanças climáticas

O clima médio da Terra é determinado pela energia transmitida pelo Sol e pelas propriedades físicas do globo e de sua atmosfera (reflexão, absorção e emissão de energia pela superfície). Alterações nos aspectos da atmosfera e da superfície terrestre alteram o balanço energético global e podem levar a mudanças climáticas. Entre estas alterações, estão o aumento nas concentrações de gases do efeito estufa, que aumentam as quantidades de aerossóis (partículas ou gotículas microscópicas suspensas na atmosfera), alterando a reflexão e absorvendo a radiação solar incidente sobre o planeta. (IPCC, 2007a).

De acordo com os estudos descritos no IPCC (2007a) e em suas referências, a mudança climática global tem resultado em um aumento da temperatura atmosférica e uma

mudança nos regimes de precipitação, tanto no espaço como no tempo. Os impactos destas mudanças nos sistemas de recursos hídricos fica evidente nas mudanças dos fluxos hidrológicos e na qualidade da água, afetando os serviços oferecidos por esses sistemas (YANG, 2010).

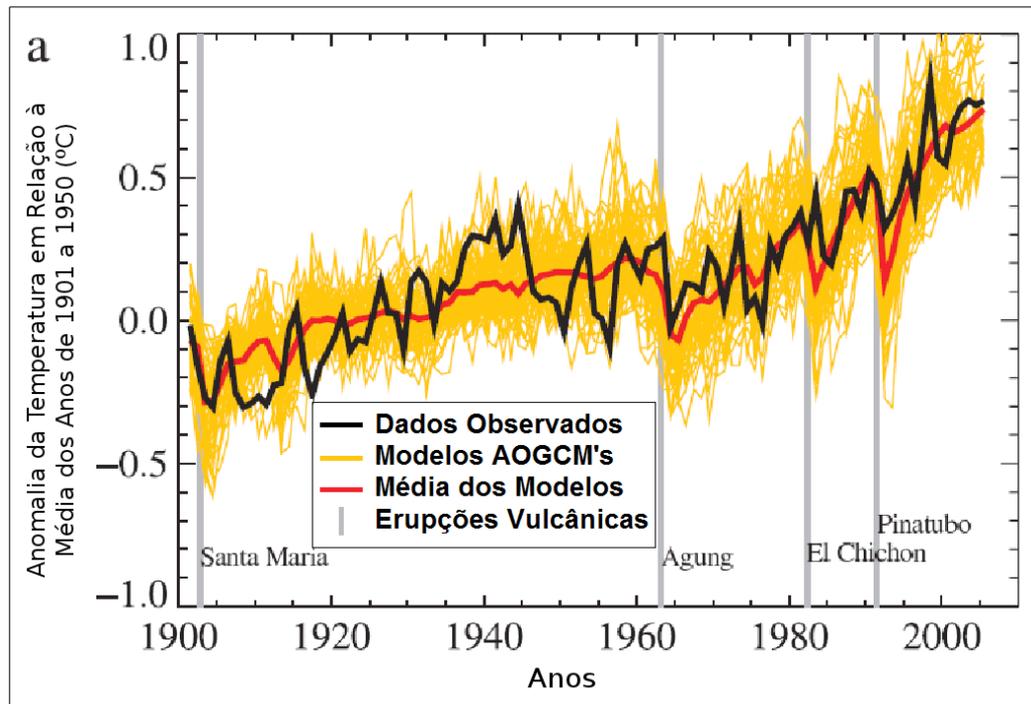
2.6 Modelos de mudança climática (CMIP3)

Os modelos climáticos são representações matemáticas do sistema climático, expressados em códigos de computadores. Os princípios básicos destes modelos são baseados em leis físicas estabelecidas, como conservação da massa, energia e momento, junto com um vasto número de observações (IPCC, 2007a).

Os modelos climáticos podem ser os Modelos Globais Atmosféricos (GCM – *Global Circulation Models*) e Modelos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera (AOGCM – *Atmosphere-Ocean General Circulation Models*). Estes modelos numéricos provêm de uma visão tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos e dinâmicos, assim como as interações entre os componentes do sistema climático e os mecanismos de retro-alimentação entre os processos. (MARENGO e VALVERDE, 2007). Vale salientar que apesar da alta complexidade destes modelos, eles apresentam várias incertezas e simplificações.

A Figura 2.8 apresenta a anomalia da Temperatura Média da Superfície do Globo, em °C, entre os anos de 1900 e 2005, em relação à média do período de 1901 a 1950, para os dados observados e os dados das simulações dos AOGCMs para o século XX (Climate of the 20th Century – 20C3M) (IPCC, 2007a). Ressalva-se que a fonte deste gráfico não informa a metodologia de cálculo da temperatura média da superfície do globo, portanto, não se pode concluir que a temperatura média da superfície global está em franca ascensão.

Figura 2.8 – Anomalia, em °C, da temperatura média da superfície do globo observada e das simulações dos AOGCMs



Fonte: IPCC (2007a).

Os cenários SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) propostos pelo IPCC para os modelos do Quarto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC-AR4) são divididos em quatro famílias, apresentadas na Tabela 2.1. Em seguida estão apresentadas as principais características dos cenários e grupos.

Tabela 2.1. Cenários IPCC - AR4

| | Foco na economia | Foco no meio ambiente |
|---|--|--|
| Globalização (mundo homogêneo) | A1 – Rápido crescimento econômico (grupos: A1T, A1B e A1FI). Aumento na temperatura: 1,4 – 6,4 °C | B1 - Sustentabilidade do meio ambiente global. Aumento na temperatura: 1,1 – 2,9 °C |
| Regionalização (mundo heterogêneo) | A2 – Desenvolvimento econômico no âmbito regional. Aumento na temperatura: 2,0 – 5,4 °C | B2 - Sustentabilidade do meio ambiente local. Aumento na temperatura: 1,4 – 3,8 °C |

Fonte: IPCC (2007b).

- **Cenário A1:**

- Rápido crescimento econômico;
- População global atinge um pico de 9 bilhões em 2050 e começa a cair gradativamente;

- Rápida disseminação de novas tecnologias mais eficientes;
- Convergência de renda e de estilo de vida, com extensivas interações sociais e culturais.
- **Grupo A1FI:**
 - Mesmas características do cenário A1;
 - Ênfase na utilização de combustíveis fósseis.
- **Grupo A1B:**
 - Mesmas características do cenário A1;
 - Balanceamento entre a utilização dos diferentes tipos de fontes de energia.
- **Grupo A1T:**
 - Mesmas características do cenário A1;
 - Ênfase nas fontes de energia não-fósseis.
- **Cenário A2:**
 - Nações alto suficientes e independentes;
 - Crescimento populacional contínuo;
 - Orientação regional no desenvolvimento econômico.
- **Cenário B1:**
 - Rápido crescimento econômico como no cenário A1, mas voltado para o setor de serviços e de informação;
 - População global atinge um pico de 9 bilhões em 2050 e começa a cair gradativamente;
 - Introdução de tecnologias limpas e que utilizem menos recursos materiais;
 - Ênfase em soluções globais para a economia, sociedade e estabilidade do meio ambiente;
- **Cenário B2:**
 - Crescimento populacional contínuo como no cenário A2, mas a uma taxa menor;
 - Ênfase em soluções locais para a economia, sociedade e estabilidade do meio ambiente;
 - Nível intermediário de desenvolvimento econômico;
 - Introdução de tecnologias limpas e que utilizem menos recursos materiais como nos cenários A1 e B1, mas mais lentamente.

2.7 Estudos sobre tendências e mudanças climáticas no Brasil

Vários estudos sobre tendências e mudanças climáticas tem sido feitos no Brasil. Estes estudos tiveram como objetivos associar índices climáticos e anomalias na precipitação/vazão e identificar tendências de diversas regiões..

Na região Sul, Rebello (2006) mostrou que existe uma boa relação entre os índices da Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) e as anomalias positivas e negativas de precipitação no Estado do Rio Grande do Sul. Sperling *et al.* (2011) mostraram que a última fase fria completa da PDO apresentou uma relação com a anomalia negativa de precipitação no verão e que a última fase positiva da PDO mostrou relações com o aumento nas precipitações de verão no Rio Grande do Sul. Streck *et al.* (2009) observaram que a Oscilação Decadal do Pacífico é responsável pela variabilidade interanual, sazonal e mensal de precipitação em Santa Maria – RS.

Na região Sudeste, Alexandre *et al.* (2010) com base em dados de 20 estações pluviométricas, observaram uma possível tendência de aumento nas precipitações no período mais seco (abril – setembro) e uma possível tendência de redução no período mais chuvoso (outubro – março) na região metropolitana de Belo Horizonte.

Na Região Centro-Oeste, Silva *et al.* (2010) mostraram que praticamente todas as anomalias negativas da precipitação na cidade de Goiânia ocorreram durante as fases frias da PDO enquanto que as anomalias positivas da precipitação ocorreram, em sua maior parte, nas fases quentes da PDO.

Na região Nordeste, Moura *et al.* (2010) mostraram que as vazões do Rio Salgado, no Ceará, apresentam sua variabilidade dominada pela escala decadal associada a outras escalas temporais (sazonais, interanuais e interanuais ligadas ao ENSO – Oscilação Sul do El-Niño). Haylock *et al.* (2006) observaram uma tendência de aumento total anual de chuva na região. Santos e Britto (2007) mostraram que existe uma tendência de aumento de precipitação nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Segundo o Programa WAVES (GAISER *et al.* 2003), haverá uma redução de precipitação sobre os estados do Piauí e Ceará no século XXI. Nobre e Melo (2001) mostraram que as ocorrências de episódios secos e chuvosos dentro das estações chuvosas entre os anos 1999 e 2000 no Nordeste estiveram associadas às oscilações intrasazonais que se propagam dos oceanos Índico e Pacífico (Oscilações Madden e Julian ou Oscilações 30-60 dias). Santos *et al.* (2008), através da

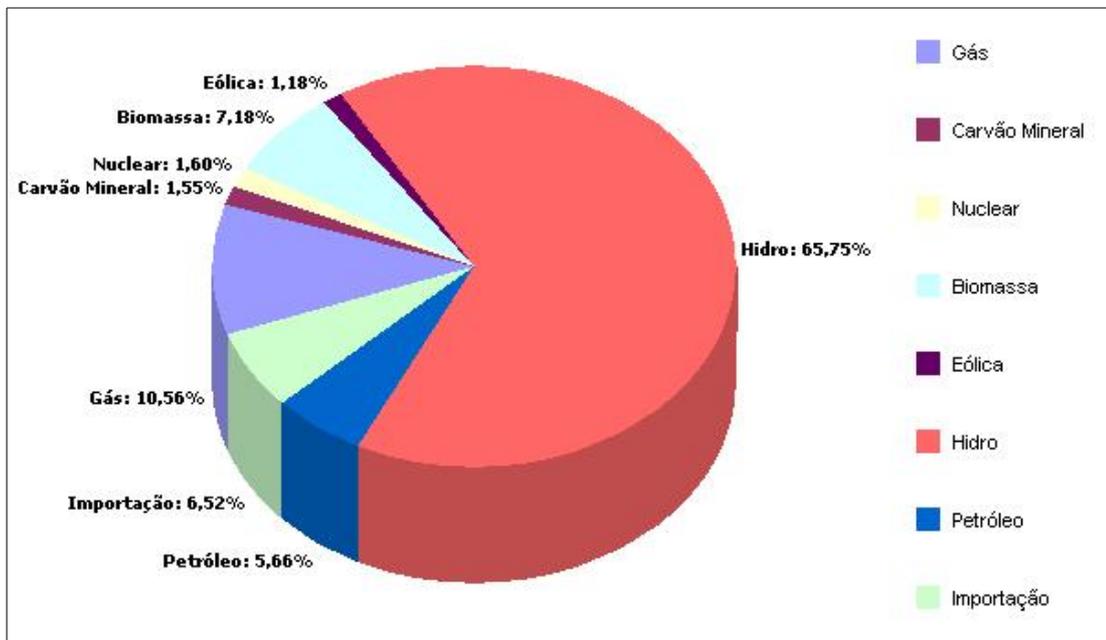
análise da precipitação diária de 18 postos no estado do Ceará, observaram um visível aumento de umidade sobre o estado do Ceará. Silva *et al.* (2010) observaram através de correlações lineares, que a Oscilação Decadal do Pacífico interfere nas chuvas da região do Alto Mundaú em Pernambuco e que, a partir da análise de ondeletas, a variabilidade de precipitação na região é definida por multiescalas temporais (11 e 22 anos) ligadas ao ENSO (El Niño Southern Oscillation).

Na região Norte, Chu *et al.* (1994) mostraram que na Amazônia um aumento sistemático da convecção sobre o Norte da Amazônia desde 1975 pode indicar um aumento nas chuvas na região. Marengo (2004) mostra que, na Amazônia, ocorreram mudanças de fase na precipitação em meados das décadas de 1940 e 1970.

3 SETOR HIDRELÉTRICO BRASILEIRO

O setor elétrico brasileiro possui uma capacidade instalada de empreendimentos em operação de 125.252 MW, sendo que 82.345.591 MW (65,7%) correspondem ao setor hidrelétrico (ANEEL, 2012). A matriz de energia elétrica está apresentada a seguir.

Figura 3.1 – Matriz de energia elétrica



Fonte: ANEEL (2012).

A potência total outorgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é de 119.277 MW, sendo que 82.831 MW (69,4%) correspondem às Central Geradora Hidrelétrica

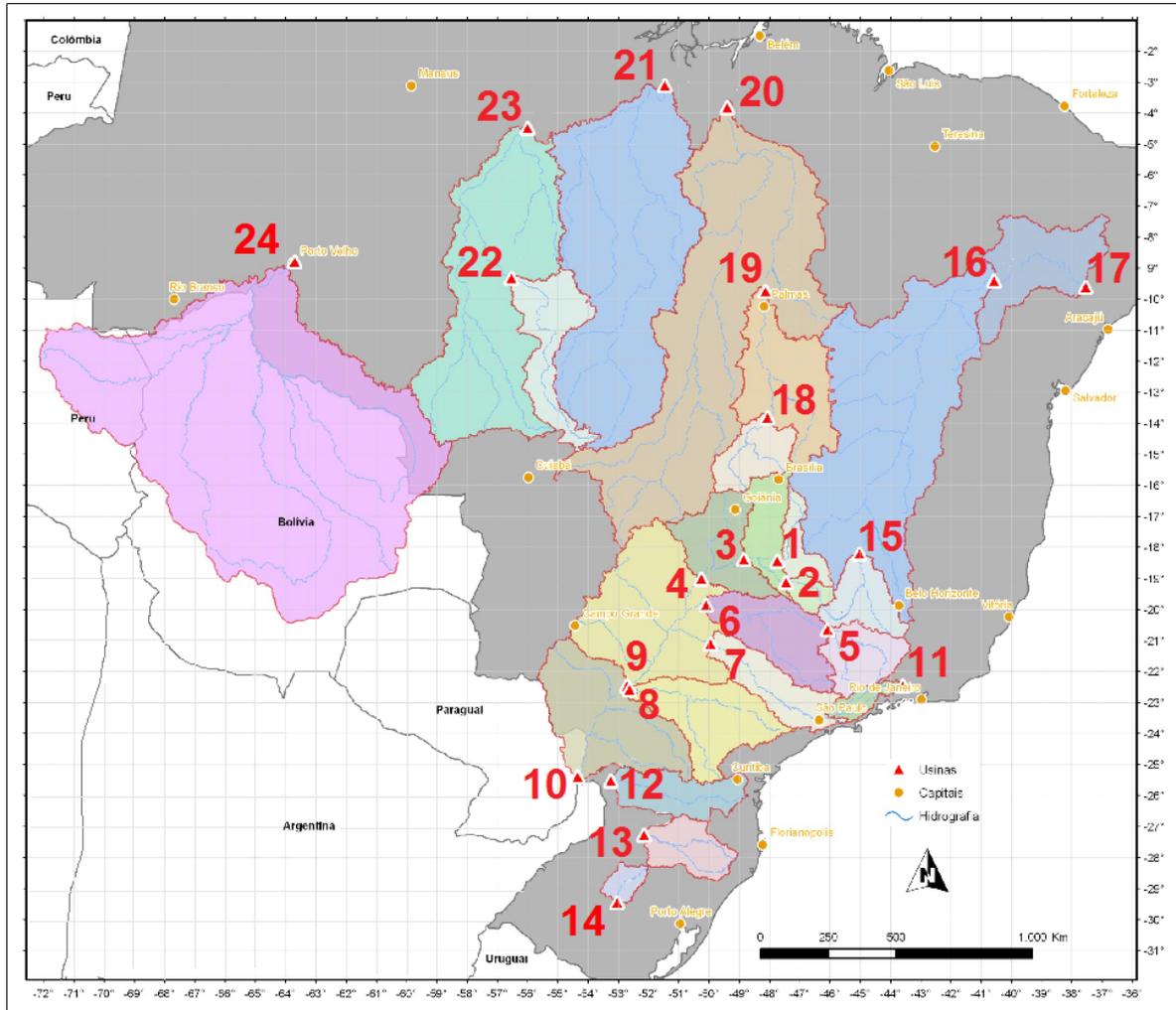
(CGH), Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) (ANEEL, 2012).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é o principal sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. É, ainda, um sistema hidrotérmico de grande porte com forte predominância de usinas hidrelétricas com múltiplos proprietários. O SIN é formado pelas empresas geradoras de energia elétrica das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do País encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados, principalmente, na região amazônica (ONS, 2012).

O Operador Nacional do Sistema (ONS) foi criado em 1998, com a finalidade de operar o Sistema Interligado Nacional e administrar a rede básica de transmissão de energia no País sob fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (CAMARGO, 2005).

O sistema hidroelétrico nacional possui 12 bacias hidrográficas principais apresentadas na Figura 3.2, juntamente com as 24 usinas selecionadas para este estudo. Estas usinas e suas respectivas bacias hidrográficas estão apresentadas na Tabela 3.1.

Figura 3.2 – Mapa de localização das usinas hidrelétricas do SIN selecionadas para este estudo



Fonte: ONS (2011).

Tabela 3.1. Usinas hidrelétricas e bacias hidrográficas selecionadas para este estudo

| Número da Sub Bacia | Número ONS | Usina Hidroelétrica | Bacia Hidrográfica | Potência Efetiva (MW) |
|---------------------|------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 24 | Emborcação | Alto Paranaíba | 1.192,0 |
| 2 | 25 | Nova Ponte | Alto Paranaíba | 510,0 |
| 3 | 31 | Itumbiara | Paranaíba | 2.280,0 |
| 4 | 33 | São Simão | Paranaíba | 1.710,0 |
| 5 | 6 | Furnas | Alto Grande | 1.312,0 |
| 6 | 18 | Água Vermelha | Grande | 1.396,2 |
| 7 | 242 | N. Avanhandava | Tietê | 347,4 |
| 8 | 246 | Porto Primavera | Paraná | 1.540,0 |
| 9 | 63 | Rosana | Paranapanema | 372,0 |
| 10 | 266 | Itaipú | Paraná | 7.000,0 |
| 11 | 125 | Santa Cecília | Paraíba do Sul | ** |
| 12 | 222 | Salto Caxias | Iguaçu | - |
| 13 | 92 | Ita | Uruguai | 1.450,0 |
| 14 | 114 | Dona Francisca | Jacuí | 125,0 |
| 15 | 156 | Três Marias | Alto São Francisco | 396,0 |
| 16 | 169 | Sobradinho | Médio São Francisco | 1.050,0 |
| 17 | 178 | Xingó | Baixo São Francisco | 3.162,0 |
| 18 | 270 | Serra da Mesa | Alto Tocantins | 1.275,0 |
| 19 | 273 | Lajeado | Tocantins | 902,5 |
| 20 | 275 | Tucuruí + Tucuruí II | Tocantins | 8.370,0 |
| 21 | 288 | Belo Monte | Xingú | - |
| 22 | 229 | Teles Pires | Alto Tapajós | - |
| 23 | 490 | S. L. Tapajós | Tapajós | - |
| 24 | 287 | Santo Antônio | Madeira | 3.151,2* |

* Potência Outorgada

** Usina de Bombeamento

Fonte: ONS (2011) e Mapas do SIN

<<http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>>. Acesso em 17/04/2012.

4 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta a metodologia utilizada neste trabalho, incluindo a aquisição de dados, avaliação do padrão de variação e de tendências nas séries históricas, avaliação de extremos (cheias), os fenômenos climáticos considerados e a avaliação dos modelos climáticos do CMIP3 para as principais bacias do SIN, incluindo a metodologia utilizada para a transformação chuva-vazão. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma metodológico utilizado neste estudo para a avaliação dos padrões de variação e mudança das vazões e sua relação com o clima.

Figura 4.1 – Fluxograma metodológico

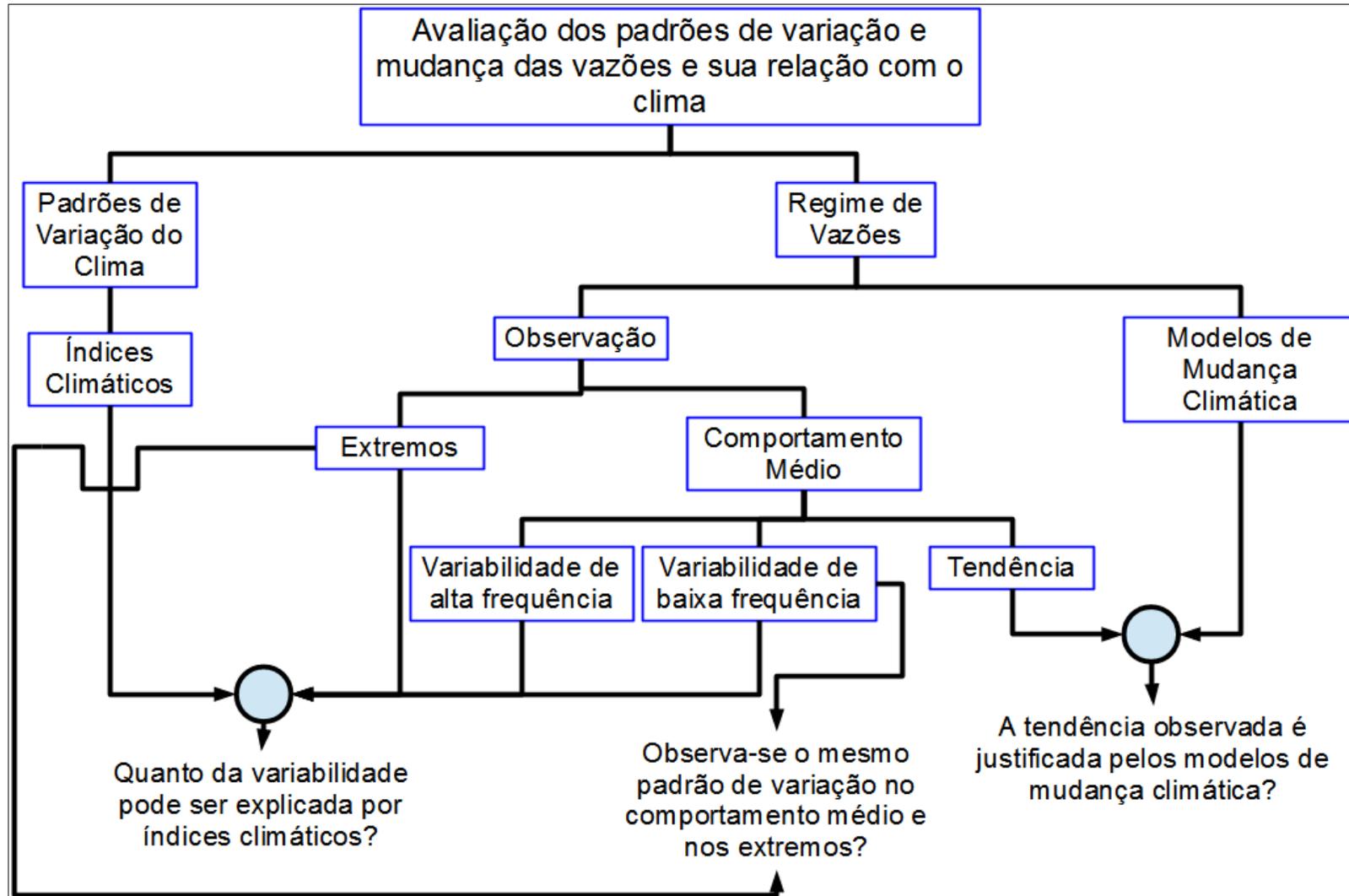


Figura criada pelo autor.

4.1 Dados

Os dados utilizados neste trabalho provém de cinco fontes: ONS (2011), CRU (*Climate Research Unit - University of East Anglia*), WRCP (*World Climate Research Programme*), JISAO (*Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean*) e WGSP/ESRL-NOAA (*Working Group on Surface Pressure/Eart System Research Laboratory-National Oceanic e Atmospheric Administration*). A Tabela 4.1 apresenta estes dados, suas fontes e o tipo de análise utilizada em cada um deles.

Tabela 4.1. Dados utilizados, suas fontes e o tipo de análise

| Dado | Fonte | Tipo de Análise |
|--|--|---|
| Vazões Naturalizadas Mensais | ONS, 2011 | Análise dos padrões de variação e de tendência: Média e mediana móvel, regressão LOWESS, regressão linear, tendência (método de Mann-Kendal-Sen) e análise da transformada em ondeletas |
| Vazões Naturalizadas Diárias | ONS, 2011 | Avaliação de extremos: Cheias |
| Precipitações Médias das 24 sub-bacias selecionadas do SIN | CRU (http://badc.nerc.ac.uk/data/cru/) | Entrada do modelo SMAP para o cálculo das vazões do século XX consideradas como observadas |
| Precipitações dos modelos AOGCM's CMIP3 do século XX – 20C3M | WRCP | Entrada do modelo SMAP para o cálculo das vazões dos modelos AOGCM's do século XX |
| Precipitações dos modelos AOGCM's CMIP3 do século XXI – Cenário A1B | WRCP | Entrada do modelo SMAP para o cálculo das vazões dos modelos AOGCM's do século XX, cenário A1B |
| Índice climático da Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) | JISAO (http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest) | Correlação entre o índice PDO e as vazões naturalizadas mensais |
| Temperaturas médias da superfície do mar nas regiões do oceano Pacífico NINO1+2, NINO 3, NINO 4 E NINO 3.4 | WGSP/ESRL-NOAA (http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/) | Correlação entre os índices Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 e Niño 3.4 e as vazões naturalizadas mensais |

Os dados obtidos através do ONS (2011) se referem à série histórica de vazões médias mensais naturalizadas, em metros cúbicos por segundo, dos 192 postos (aproveitamentos) do Sistema Interligado Nacional (SIN) e à série histórica de vazões naturalizadas médias diárias de 143 postos do SIN. A série histórica de vazões médias mensais naturalizadas abrange o período de 1931 à 2010, enquanto que a série histórica de vazões médias diárias apresenta um período para cada um dos postos, variando entre uma série mais longa (1931 a 2010) e uma série mais curta (2009 a 2010). Os postos das séries de vazões mensais estão listados na Tabela 4.2, enquanto que os postos das séries de vazões diárias estão listados na Tabela 4.3.

Tabela 4.2. Postos do SIN com série de vazões mensais

| Postos do Sistema Interligado Nacional (SIN) | | |
|--|---------------------------------------|----------------------------------|
| CAMARGOS (1) | SALTO PILÃO (101) | CAMPOS NOVOS (216) |
| ITUTINGA (2) | SÃO JOSÉ (102) | MACHADINHO (217) |
| FURNAS (6) | PASSO SÃO JOÃO (103) | MONJOLINHO (220) |
| MASCARENHAS DE MORAES (7) | TRAIÇÃO (104) | SALTO CAXIAS (222) |
| ESTREITO (8) | PEDREIRA (109) | BARRA BONITA (237) |
| JAGUARA (9) | ERNESTINA (110) | A.S. LIMA (238) |
| IGARAPAVA (10) | PASSO REAL (111) | IBITINGA (239) |
| VOLTA GRANDE (11) | JACUÍ (112) | PROMISSÃO (240) |
| PORTO COLÔMBIA (12) | ITAUBA (113) | SALTO VERDINHO (241) |
| CACONDE (14) | DONA FRANCISCA (114) | NOVA AVANHANDAVA (242) |
| EUCLIDES DA CUNHA (15) | GOVERNADOR PARIGOT DE SOUZA (115) | TRÊS IRMÃOS (243) |
| A.S.OLIVEIRA (16) | PEDRAS (116) | ILHA SOLTEIRA EQUIVALENTE (244) |
| MARIMBONDO (17) | GUARAPIRANGA (117) | JUPIÁ (245) |
| ÁGUA VERMELHA (18) | BILLINGS (118) | PORTO PRIMAVERA (246) |
| BATALHA (22) | BILLINGS+PEDRAS (119) | CAÇU (247) |
| CORUMBÁ III (23) | JAGUARI (120) | BARRA DOS COQUEIROS (248) |
| EMBORÇAÇÃO (24) | PARAIBUNA (121) | OURINHOS (249) |
| NOVA PONTE (25) | SANTA BRANCA (122) | SERRA DO FACÃO (251) |
| CAPIM BRANCO II (28) | FUNIL (123) | SÃO SALVADOR (253) |
| ITUMBIARA (31) | STA CECILIA (125) | PEDRA DO CAVALO (254) |
| CACHOEIRA DOURADA (32) | SIMPLÍCIO (127) | IRAPÉ (255) |
| SÃO SIMÃO (33) | SIMPLÍCIO (129) | PEIXE ANGICAL (257) |
| ILHA SOLTEIRA (34) | ILHA DOS POMBOS (130) | MURTA (258) |
| BARRA BONITA ARTIFICIAL (37) | NILO PEÇANHA ARTIFICIAL (131) | ITIQUEIRA I e II (259) |
| A.S. LIMA ARTIFICIAL (38) | LAJES ARTIFICIAL (132) | FOZ DO RIO CLARO (261) |
| IBITINGA ARTIFICIAL (39) | SALTO GRANDE (134) | GUILMAN-AMORIM (262) |
| PROMISSÃO ARTIFICIAL (40) | BAGUARI (141) | PORTO ESTRELA (263) |
| NOVA AVANHANDAVA ARTIFICIAL (42) | MASCARENHAS (144) | ITAIPU (266) |
| TRÊS IRMÃOS ARTIFICIAL (43) | RONDON 2 (145) | BAÚ I (267) |
| ILHA SOLTEIRA EQUIVALENTE ARTIFICIAL (44) | AIMORÉS (148) | BALBINA (269) |
| JUPIÁ ARTIFICIAL (45) | CANDONGA (149) | SERRA DA MESA (270) |
| PORTO PRIMAVERA ARTIFICIAL (46) | SÃO DOMINGOS (154) | ESTREITO TOCANTINS (271) |
| A.A. LAYDNER (47) | RETIRO BAIXO (155) | LAJEADO (273) |
| PIRAJU (48) | TRÊS MARIAS (156) | SERRA QUEBRADA (274) |
| CHAVANTES (49) | QUEIMADO (158) | TUCURUI (275) |
| LUCAS NOGUEIRA GARCEZ (50) | ALTO TIETÊ (160) | SANTA ISABEL (276) |
| CANOAS II (51) | EDGARD DE SOUZA COM TRIBUTÁRIOS (161) | CURUÁ-UNA (277) |
| CANOAS I (52) | EDGARD DE SOUZA SEM TRIBUTÁRIOS (164) | MANSO (278) |
| MAUÁ (57) | SOBRADINHO INCREMENTAL (168) | SAMUEL (279) |
| SÃO JERÔNIMO (58) | SOBRADINHO (169) | COARACY NUNES (280) |
| CAPIVARA (61) | ITAPARICA (172) | PONTE DE PEDRA (281) |
| TAQUARUÇU (62) | MOXOTÓ (173) | OLHO D'ÁGUA (282) |
| ROSANA (63) | PAULO AFONSO (175) | SANTA CLARA MG (283) |
| SALTO GRANDE CHOPIM (65) | COMPLEXO PAULO AFONSO/MOXOTÓ (176) | 14 DE JULHO (284) |
| ITAIPU ARTIFICIAL (66) | XINGÓ (178) | JIRAU (285) |
| DESVIO JORDÃO ARTIFICIAL (70) | ANTÔNIO DIAS + SÁ CARVALHO (183) | QUEBRA QUEIXO (286) |
| SANTA CLARA PR (71) | COUTO MAGALHÃES (187) | SANTO ANTONIO (287) |
| FUNDÃO (72) | ITAPEBI (188) | ITUMIRIM (289) |
| DESVIO JORDAO (73) | BOA ESPERANÇA (190) | DARDANELOS (291) |
| FOZ DO AREIA (74) | CANA BRAVA (191) | SALTO (294) |
| [SEGREGO + DESVIO] ARTIFICIAL (75) | ROSAL (196) | JAURU (295) |
| SEGREGO (76) | PICADA (197) | GUAPORÉ (296) |
| SALTO SANTIAGO (77) | SOBRAGI (198) | SANTA CECÍLIA BOMBEAMENTO (298) |
| SALTO OSORIO (78) | ITAOCARA (199) | ILHA DOS POMBOS ARTIFICIAL (299) |
| SÃO JOÃO (80) | TOCOS (201) | POSTO NULO (300) |
| BAIXO IGUAÇU (81) | LAJES/P.PASSOS/FONTES NOVA (202) | FONTES ARTIFICIAL (303) |
| CACHOIRINHA (83) | SANTANA (203) | SANTANA VERTIMENTO (304) |
| ITÁ (92) | CORUMBÁ IV (205) | PEREIRA PASSOS ARTIFICIAL (306) |
| PASSO FUNDO (93) | MIRANDA (206) | ITAGUAÇU (313) |
| FOZ DO CHAPECÓ (94) | CAPIM BRANCO I (207) | SANTANA ARTIFICIAL (315) |
| MONTE CLARO (97) | CORUMBÁ I (209) | VIGARIO ARTIFICIAL (316) |
| CASTRO ALVES (98) | FUNIL-GRANDE (211) | TOCOS VERTIMENTO (317) |
| ESPORA (99) | PAI QUERÊ (213) | HENRY BORDEN ARTIFICIAL (318) |
| CUBATÃO-SUL (100) | BARRA GRANDE (215) | BILLINGS ARTIFICIAL (319) |

Fonte: ONS (2011).

Tabela 4.3. Postos do SIN com série de vazões diárias

| Postos do Sistema Interligado Nacional (SIN) | | |
|--|------------------------------|---------------------------------|
| CAMARGOS (1) | PASSO REAL (111) | FUNIL-GRANDE (211) |
| ITUTINGA (2) | JACUI (112) | BARRA GRANDE (215) |
| FURNAS (6) | ITAUBA (113) | CAMPOS NOVOS (216) |
| M. DE MORAES (7) | D. FRANCISCA (114) | MACHADINHO (217) |
| ESTREITO (8) | G.P. SOUZA (115) | MONJOLINHO (220) |
| JAGUARA (9) | PEDRAS (116) | SALTO CAXIAS (222) |
| IGARAPAVA (10) | GUARAPIRANGA (117) | BARRA BONITA (237) |
| VOLTA GRANDE (11) | BILLINGS (118) | A.S. LIMA (238) |
| P. COLOMBIA (12) | BILLINGS+PEDRAS (119) | IBITINGA (239) |
| CACONDE (14) | JAGUARI (120) | PROMISSAO (240) |
| E. DA CUNHA (15) | PARAIBUNA (121) | SLT VERDINHO (241) |
| A.S. OLIVEIRA (16) | SANTA BRANCA (122) | NAVANHANDAVA (242) |
| MARIMBONDO (17) | FUNIL (123) | TRES IRMAOS (243) |
| A. VERMELHA (18) | STA CECILIA (125) | I. SOLT. EQV (244) |
| CORUMBA III (23) | ILHA POMBOS (130) | JUPIA (245) |
| EMBORCACAO (24) | SALTO GRANDE (134) | P. PRIMAVERA (246) |
| NOVA PONTE (25) | BAGUARI (141) | CACU (247) |
| CAPIM BRANC2 (28) | MASCARENHAS (144) | B. COQUEIROS (248) |
| ITUMBIARA (31) | RONDON II (145) | OURINHOS (249) |
| CACH.DOURADA (32) | AIMORES (148) | SA FACAO (251) |
| SAO SIMAO (33) | CANDONGA (149) | ITQUIRA II (252) |
| I. SOLTEIRA (34) | RETIRO BAIXO (155) | SAO SALVADOR (253) |
| A.A. LAYDNER (47) | TRES MARIAS (156) | P. CAVALO (254) |
| PIRAJU (48) | QUEIMADO (158) | IRAPE (255) |
| CHAVANTES (49) | ALTO TIETÊ (160) | PEIXE ANGIC (257) |
| L.N. GARCEZ (50) | EDGARD DE SOUZA (164) | ITQUIRA I (259) |
| CANOAS II (51) | SOBRADINHO INCREMENTAL (168) | FOZ DO RIO CLARO (261) |
| CANOAS I (52) | SOBRADINHO (169) | GUILMAN-AMOR (262) |
| CAPIVARA (61) | ITAPARICA INCREMENTAL (171) | P. ESTRELA (263) |
| TAQUARUCU (62) | ITAPARICA (172) | ITAIPU (266) |
| ROSANA (63) | MOXOTO (173) | SA MESA (270) |
| STA CLARA PR (71) | P.AFONSO (175) | ESTREITO TOCANTINS (271) |
| FUNDAO (72) | COMP PAF-MOX (176) | LAJEADO (273) |
| JORDAO (73) | XINGO (178) | TUCURUI (275) |
| G.B. MUNHOZ (74) | A.DIAS+S.CAR (183) | CURUA-UNA (277) |
| SEGREDO (76) | ITAPEBI (188) | MANSO (278) |
| SLT.SANTIAGO (77) | B. ESPERANCA (190) | SAMUEL (279) |
| SALTO OSORIO (78) | CANA BRAVA (191) | PONTE PEDRA (281) |
| ITA (92) | ROSAL (196) | STA CLARA MG (283) |
| PASSO FUNDO (93) | PICADA (197) | 14 DE JULHO (284) |
| FOZ CHAPECO (94) | SOBRAGI (198) | QUEBRA QUEIX (286) |
| MONTE CLARO (97) | TOCOS (201) | DARDANELOS (291) |
| CASTRO ALVES (98) | LAJES (202) | SALTO (294) |
| ESPORA (99) | SANTANA (203) | JAURU (295) |
| SALTO PILAO (101) | CORUMBA IV (205) | GUAPORE (296) |
| SAO JOSE (102) | MIRANDA (206) | SANTA CECILIA BOMBEAMENTO (298) |
| PASSO SAO JOAO (103) | CAPIM BRANC1 (207) | HENRY BORDEN 1 (318) |
| ERNESTINA (110) | CORUMBA I (209) | |

Fonte: ONS (2011).

Os dados obtidos através do CRU (<http://badc.nerc.ac.uk/data/cru/>) se referem aos dados observacionais de precipitação entre os anos de 1901 e 1999 sobre as 24 sub-bacias do SIN selecionadas para este estudo.

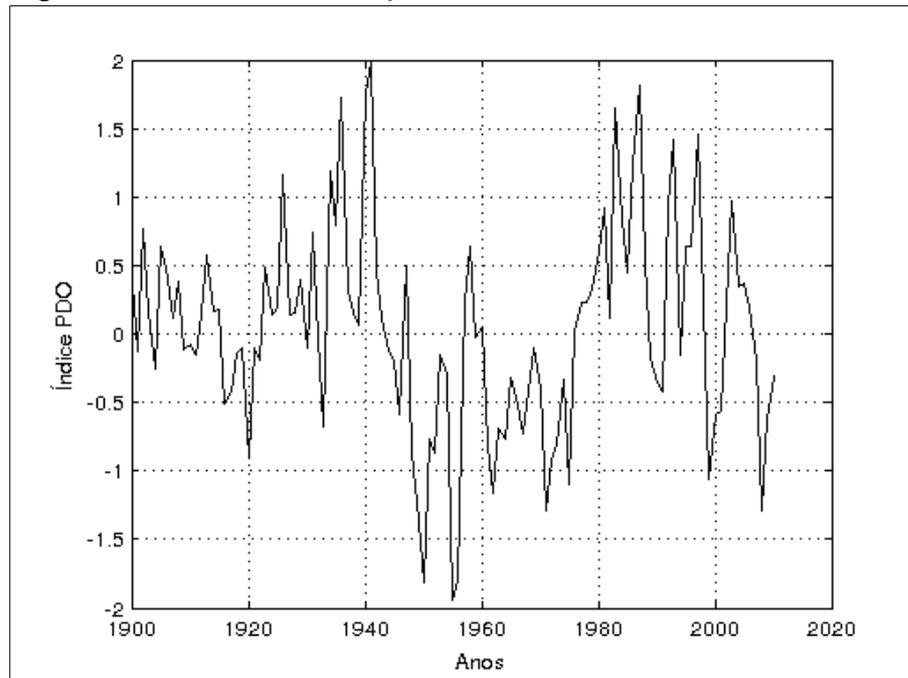
Os dados obtidos através do WRCP se referem às precipitações dos modelos AOGCMs (*Atmosphere-Ocean General Circulation Models*) do século XX (20C3M - *Climate of the 20th Century Experiment*) e do cenário A1B do IPCC-AR4 (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) para o século XXI. Estes são os modelos de mudança climática da fase 3 do CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*). Os modelos AOGCM's do CMIP3 estão listados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Modelos AOGCMs do CMIP3

| Grupo de Origem | País | CMIP3 I.D. |
|--|--------------------------|------------------|
| Beijing Climate Center | China | BCC-CM1 |
| Bjerknes Centre for Climate Research | Noruega | BCCR-BCM2.0 |
| National Center for Atmospheric Research | Estados Unidos | CCSM3 |
| Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis | Canadá | CGCM3.1(T47) |
| Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis | Canadá | CGCM3.1(T63) |
| Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques | França | CNRM-CM3 |
| CSIRO Atmospheric Research | Austrália | CSIRO-Mk3.0 |
| CSIRO Atmospheric Research | Austrália | CSIRO-Mk3.5 |
| Max Planck Institute for Meteorology | Alemanha | ECHAM5/MPI-OM |
| Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of KMA, and Model and Data group. | Alemanha / Coreia do sul | ECHO-G |
| LASG / Institute of Atmospheric Physics | China | FGOALS-g1.0 |
| US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory | Estados Unidos | GFDL-CM2.0 |
| US Dept. of Commerce / NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory | Estados Unidos | GFDL-CM2.1 |
| NASA / Goddard Institute for Space Studies | Estados Unidos | GISS-AOM |
| NASA / Goddard Institute for Space Studies | Estados Unidos | GISS-EH |
| NASA / Goddard Institute for Space Studies | Estados Unidos | GISS-ER |
| Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia | Itália | INGV-SXG |
| Institute for Numerical Mathematics | Rússia | INM-CM3.0 |
| Institut Pierre Simon Laplace | França | IPSL-CM4 |
| Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC) | Japão | MIROC3.2(hires) |
| Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC) | Japão | MIROC3.2(medres) |
| Meteorological Research Institute | Japão | MRI-CGCM2.3.2 |
| National Center for Atmospheric Research | Estados Unidos | PCM |
| Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office | Reino Unido | UKMO-HadCM3 |
| Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office | Reino Unido | UKMO-HadGEM1 |

Os dados obtidos junto ao JISAO (Figura 4.2) se referem ao índice climático PDO (anomalia da PDO em relação a média de longo prazo) mensal entre os anos 1900 e 2010. O índice PDO é definido como a componente principal da variabilidade da temperatura média mensal da superfície do oceano pacífico.

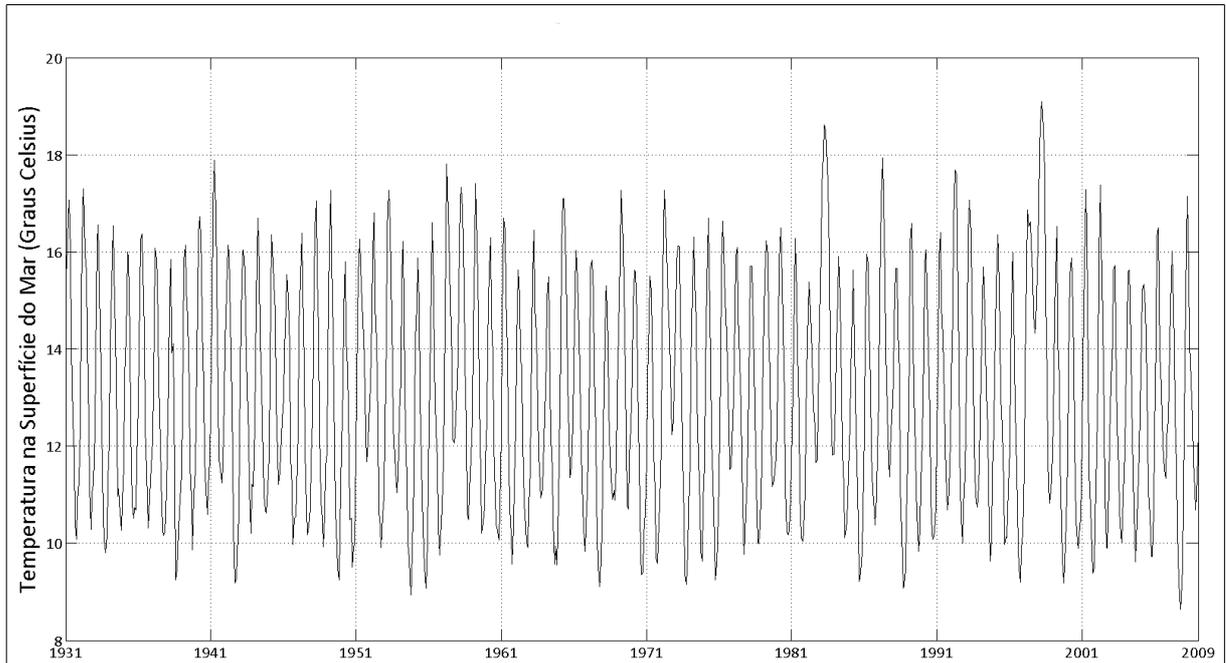
Figura 4.2 – Índice da Oscilação Decadal do Pacífico – PDO



Fonte: Dados disponíveis em The Pacific Decadal Oscillation (PDO) <<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>>. Acesso em 11/12/2011.

Os dados obtidos junto ao WGSP/ESRL-NOAA se referem às temperaturas médias da superfície do mar nas regiões do oceano Pacífico (Figura 2.5), denominadas NINO 1+2 (Figura 4.3), NINO 3 (Figura 4.4), NINO 4 (Figura 4.5) e NINO 3.4 (Figura 4.6),

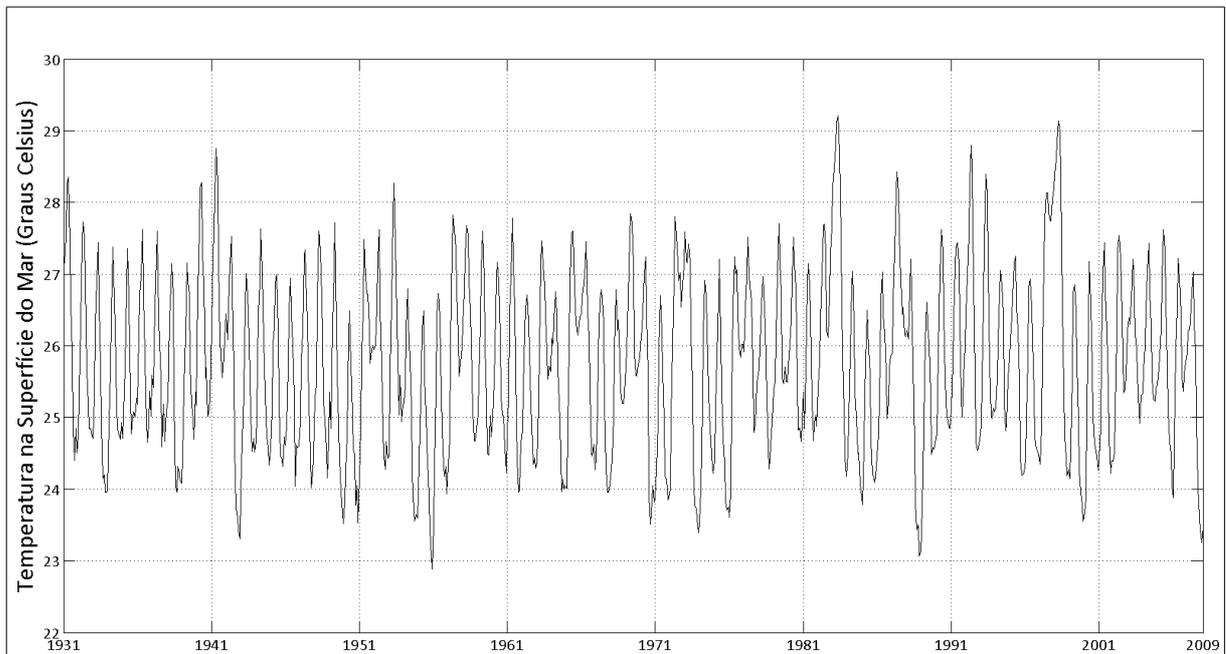
Figura 4.3 – TSM na região NINO 1+2 do Oceano Pacífico



Fonte: Dados disponíveis em Download Climate Timeseries

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/>. Acesso em 10/12/2011.

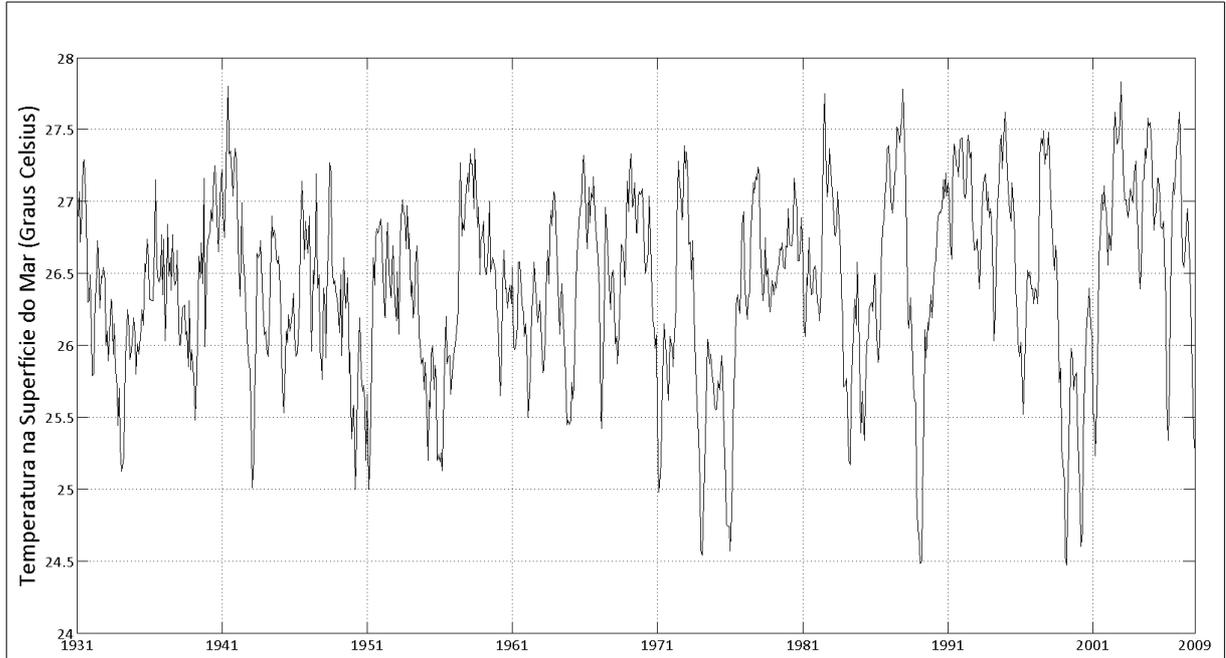
Figura 4.4 – TSM na região NINO 3 do Oceano Pacífico



Fonte: Dados disponíveis em Download Climate Timeseries

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/>. Acesso em 10/12/2011.

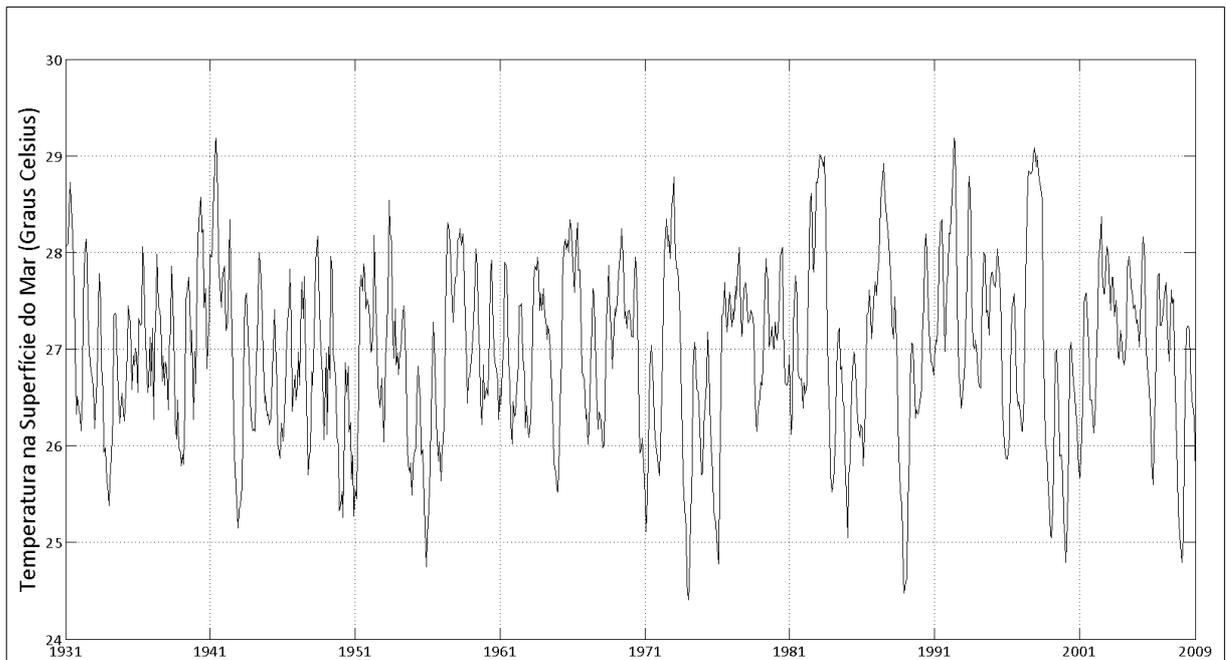
Figura 4.5 – TSM na região NINO 4 do Oceano Pacífico



Fonte: Dados disponíveis em Download Climate Timeseries

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/>. Acesso em 10/12/2011.

Figura 4.6 – TSM na região NINO 3.4 do Oceano Pacífico



Fonte: Dados disponíveis em Download Climate Timeseries

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/>. Acesso em 10/12/2011.

4.2 Avaliação do padrão de variação e de tendências nas séries históricas de vazão

Para a avaliação dos padrões de variação e de tendências nas séries históricas de precipitação utilizou-se de métodos como média e mediana móvel (com janela de 10 anos, para a análise da variabilidade interdecadal), regressão linear, regressão local (LOWESS – *Locally Weighted Scatterplot Smoothing*), declividade de Sen, através do método de Mann-Kendall, e análise da transformada em ondeletas (*Wavelets*).

Os dados mensais de vazões dos postos do SIN foram convertidos em vazões médias anuais, uma vez que o objetivo da análise é a variação interanual da série histórica.

Na análise da tendência linear das séries históricas foram utilizados dois métodos: Regressão Linear e Declividade de Sen. A regressão linear (Equação 4.1) foi feita utilizando-se a função *polyfit* da linguagem de programação MATLAB, onde os parâmetros de entrada são os anos da série histórica, as vazões e o grau do polinômio de ajuste, no caso da regressão linear o polinômio será de primeiro grau.

$$p(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_nx + p_{n+1} \quad (4.1)$$

Onde:

- $p(x)$ é o polinômio de ajuste;
- p_i é o coeficiente do termo i ;
- n é o grau do polinômio.

A obtenção do polinômio de ajuste através da função *polyfit* se dá através do método dos mínimos quadrados. Abaixo está apresentada a implementação em linguagem MATLAB do *script* de regressão linear.

Código 4.1 – Regressão Linear

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Regressão Linear %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
grau = 1; % Grau do polinômio de ajuste
p = polyfit(vetorAnos, vetorVazoes, grau); % Ajuste do polinômio
ajusteCurva = polyval(p, vetorAnos); % Gerando os valores numéricos
% do polinômio de ajuste

```

O cálculo da declividade de Sen foi feita utilizando-se a função *ktaub* implementada por Burkey (2008), em linguagem MATLAB. Esta função realiza o teste estatístico de significância através do método de Mann-Kendall. Para este teste, foi adotado

um grau de confiança de 95%. Os parâmetros de entrada da função são as séries de vazões médias anuais e a significância, além do parâmetro que permite gerar os gráficos dos resultados. O *scripts* que utiliza esta função está apresentado a seguir.

Código 4.2 – Tendência de Mann-Ken-Sen

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Tendencia de Mann-Kendall-Sen %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
alpha = 0.05; % Erro aceitável
wantplot = 1; % Não plotar a partir do script
[taub tau h sig sen] = ktaub(matrizAnosVazoes, alpha, wantplot);

```

A variabilidade da série foi analisada utilizando-se as médias e medianas móveis e a função de regressão local *LOWESS* (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*).

A regressão local *LOWESS* (CLEVELAND, 1979) foi feita através da função *lowess*, implementada por Burkey (2009) em linguagem MATLAB. Segundo Helsel e Hirsch (2002), a regressão *LOWESS* é um dos mais flexíveis e utilizados métodos de suavização.

Este método consiste no ajuste de retas a uma determinada janela ou subconjunto de dados, através do método dos mínimos quadrados, ponderados por uma função peso. Estas retas, ajustadas a estes subconjuntos de dados, são da forma:

$$Z = a + bt + \varepsilon \quad (4.9)$$

Onde os valores a e b são estimados pelos valores que minimizam a seguinte função:

$$\sum_{k=1}^N h_j(t_k) (Z_k - a - bt_k)^2 \quad (4.10)$$

Onde N é o número de períodos da série, $h_j(t_k)$ é uma função peso, que para cada subconjunto de dados j é dada por:

$$h_j(t_k) = \left(\frac{t_j - t_k}{d_j} \right)^3 \quad (4.11)$$

Onde d_j é a janela de análise, t_k é um ponto do conjunto de dados e t_j é o ponto no qual se deseja efetuar a regressão.

A função peso utilizada neste trabalho foi a função tri-cúbica dada por (MORETTIN e TOLOI, 2006):

$$h(u) = \begin{cases} (1 - |u|^3)^3 & \text{se } |u| < 1 \\ 0 & \text{se } |u| > 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

Assim, os valores suavizados da série histórica são dados por (Morettin e Tolo, 2006):

$$\hat{Z}_j = \hat{a} + \hat{b} t_j \quad (4.13)$$

Os parâmetros de entrada da função são as séries de vazões médias anuais e o fator de escala, que neste caso foi adotado com sendo igual a 0,25 (quanto mais próximo de 1, mais suave será a curva de regressão e maior será o subconjunto ou janela de dados utilizados na suavização da série) que corresponde a uma janela igual a 20 anos, de modo a se verificar a variabilidade interdecadal da série. O *script* que utiliza a função *lowess* está apresentado a seguir.

Código 4.3 – Regressão local *LOWESS*

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Regressão Local LOWESS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
imagefile = ''; % Saída do gráfico (NULO)
f = 0.25; % Fator de Escala

[dataout lowerLimit upperLimit xy] = lowess(matrizAnosVazoes,f,imagefile);
resultadoLowess = dataout(:,3);

```

A análise da transformada em ondeletas (*wavelets*) foi feita a partir da remoção da média das séries históricas de vazões ($Q-Q_{\text{médio}}$), utilizando-se a ondeleta de Morlet (parâmetro de frequência igual a 6). Neste estudo foram utilizados três bandas: uma de alta frequência, de um a oito anos, uma de média frequência, de nove a 40 anos, e uma de baixa frequência (maior que 40 anos) obtida através da diferença entre os dados da série e as demais bandas.

As ondeletas são funções ortogonais, portanto, as suas bandas também o são, de modo que a correlação entre elas não é significativa. Assim, usufruindo-se desta ortogonalidade, pode-se obter a banda de baixa frequência através da equação 4.14.

$$R(i) = Q(i) - Q_1(i) - Q_2(i) \quad (4.14)$$

Onde: $Q(i)$ é o valor da vazão média no ano i ; $Q_1(i)$ é o valor da banda de alta frequência (um a oito anos) no ano i ; $Q_2(i)$ é o valor da banda de média frequência (nove a 40 anos) no ano i e $R(i)$ é o valor da banda de baixa frequência (acima de 40 anos).

A seguir estão apresentados o código em MATLAB e as equações da análise da transformada em ondeletas.

Código 4.4 – Análise da transformada em ondeletas (*wavelet*)

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Análise da Transformada em Ondeletas - Wavelet %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[~,~,RC_BAND1] = Wave_RC(vetorVazoes,1,8.9); % Banda de 1 a 8 anos
[~,~,RC_BAND2] = Wave_RC(vetorVazoes,9,39); % Banda de 9 a 39 anos
mediaVazoes = mean(vetorVazoes); % Vazão média
baixaFrequencia = vetorVazoes - RC_BAND1 - RC_BAND2 - mediaVazoes; % Banda
de baixa frequência

```

A determinação de quanto da variância da série de vazões é explicada por cada faixa de frequência foi definida pela razão da variância da série filtrada para uma dada banda e a variância da série histórica de vazões, como descrito na Equação 4.9.

$$VarExp_i = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{total}^2} \quad (4.9)$$

Onde: $VarExp_i$ é o percentual da variância explicada pela banda de frequência i ; σ_i^2 é a variância da série reconstruída associada a banda i e σ_{total}^2 é a variância da série histórica de vazões.

4.3 Avaliação de extremos: Cheias

A avaliação de extremos constituiu-se no ajuste das vazões diárias máximas anuais à distribuição de extremos de Gumbel, usando-se três janelas temporais distintas (20, 30 e 40 anos) e dois períodos de retorno (100 e 1.000 anos), de forma a detectar as possíveis variações de alta, média e baixa frequência. Cada ordenada dos gráficos resultantes desta série corresponde à máxima vazão diária em um dado ano com um dos dois períodos de retorno (100 ou 1.000 anos) para o ano final da janela temporal (20, 30 e 40 anos). O ajuste à distribuição de Gumbel é feito utilizando-se a Equação 4.10.

$$E(x) = \beta - (\log(-\log(1 - 1/TR)))/\alpha \quad (4.10)$$

Onde:

- $E(x)$ é o valor da vazão ajustada à distribuição de Gumbel;
- α é o parâmetro de escala da distribuição de Gumbel;
- β é o parâmetro de forma da distribuição de Gumbel;
- TR é o período de retorno em anos.


```

for numeroClusters = 2:7 % Numero de agrupamentos
    [IDX, ctrs] = kmeans(matrizResultadosPadronizados, numeroClusters);
end

```

4.4 Identificação dos Índices Climáticos que expliquem os padrões de variação

Os índices climáticos que possam explicar os padrões de variação foram identificados através de uma inspeção visual, de forma que apresentassem as mesmas características gerais dos dados analisados, como mudança de regimes (mais ou menos intensos), frequência, amplitude e, principalmente, a mudança de fase sincrônica aos dados de vazões e através de correlação, utilizando-se o coeficiente de correlação linear de Pearson, das vazões médias mensais e dos índices climáticos padronizados, obtidos através da seguinte equação:

$$X_{\text{padronizado}} = \frac{x_i - x_{\text{médio}}}{\sigma} \quad (4.11)$$

Onde x_i é a vazão ou índice climático no mês i , $x_{\text{médio}}$ é a vazão ou índice climático médio e σ é o desvio padrão da vazão ou do índice climático.

O coeficiente de correlação linear de Pearson, também chamado de coeficiente de correlação produto-momento, mede o grau de correlação entre duas variáveis. Ele pode assumir valores entre -1 e +1, onde os valores negativos indicam uma correlação negativa e os valores positivos indicam uma correlação positiva, enquanto que o valor nulo indica que as variáveis não dependem linearmente uma da outra. O coeficiente de correlação linear de Pearson é dado por (WALPOLE *et al.*, 2007):

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{var}(x) \cdot \text{var}(y)}} \quad (4.12)$$

Onde ρ é o coeficiente de correlação linear de Pearson, cov é a covariância, var é a variância e x e y são as variáveis no qual se deseja correlacionar.

A correlação entre as vazões médias e os índices climáticos foi feita com sem defasagem.

A classificação adotada para o grau de correlação entre as variáveis, está apresentada na Tabela 4.5. Em seguida apresenta-se a implementação em MATLAB do *script* que executa a função $\text{corr}(x,y)$, que calcula o coeficiente de correlação linear de Pearson.

Tabela 4.5. Grau de correlação entre as variáveis

| Correlação Positiva | Correlação negativa | Grau de Correlação |
|------------------------|--------------------------|--------------------|
| $\rho = 0$ | $\rho = 0$ | Inexistente |
| $0 < \rho < 0,50$ | $0 > \rho > -0,50$ | Fraca |
| $0,5 \leq \rho < 0,75$ | $-0,5 \geq \rho > -0,75$ | Moderada |
| $0,75 \leq \rho < 1$ | $-0,75 \geq \rho > -1$ | Forte |
| $\rho = 1$ | $\rho = -1$ | Perfeita |

Código 4.7 – Script para o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson entre as vazões médias e os índices climáticos Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4 e o índice PDO

```
% Script para o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson entre as
% vazões médias e os índices climáticos Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4 e o
% índice PDO

matrizMesesVazoes(:,1) = vetorMeses; % Meses
vazoesMensaisPadronizadas = zeros(size(vetorMeses),1);
for i = 1:192 % Percorrendo todos os postos analisados
    matrizVazoes = matrizDados((1+5)+contadorCapturaDados: ...
    (78+5)+contadorCapturaDados,2:13);
    [sizeY,sizeX] = size(matrizVazoes);
    vetorVazoes = reshape(matrizVazoes',sizeY*sizeX,1); % Vazões médias
mensais
    matrizMesesVazoes(:,2) = vetorVazoes;
    mediaVazoesMensais = mean(vetorVazoes);
    desvioPadraoVazoesMensais = std(vetorVazoes);

    for j = 1:size(vetorVazoes)
        vazoesMensaisPadronizadas(j) = (vetorVazoes(j)-mediaVazoesMensais)
.../(desvioPadraoVazoesMensais);

    end

    % Correlação com o índice Niño1+2:
    [rho12 pval12] = corr(vazoesMensaisPadronizadas,
ninoPadronizado(:,2));
    % Correlação com o índice Niño3:
    [rho3 pval3] = corr(vazoesMensaisPadronizadas, ninoPadronizado(:,3));
    % Correlação com o índice Niño4:
    [rho4 pval4] = corr(vazoesMensaisPadronizadas, ninoPadronizado(:,4));
    % Correlação com o índice Niño3.4:
    [rho34 pval34] = corr(vazoesMensaisPadronizadas,
ninoPadronizado(:,5));
    % Correlação com o Índice PDO:
    [rhoPDO pvalPDO] = corr(vazoesMensaisPadronizadas, PDOpadronizado);
    resultadosCorrelacaoIndices(i,1:10) = [rho12 pval12 rho3 pval3 ...
    rho4 pval4 rho34 pval34 rhoPDO pvalPDO];
    contadorCapturaDados = contadorCapturaDados + 83;
end
% Salvando os resultados em um arquivo texto
% Correlação
% [rho pval rho pval rho pval ...]
save resultadosCorrelacaoIndices.txt resultadosCorrelacaoIndices -ascii
```

4.5 Avaliação dos modelos de mudança climática para as bacias: Precipitação

Os dados de precipitação de cada modelo do CMIP3 e dos dados observacionais do CRU foram utilizados para o cálculo da precipitação média para 24 bacias do SIN, apresentadas na Figura 3.2. A precipitação média de cada uma das bacias foi calculada através do *software* de visualização e análise de dados *FERRET*, desenvolvido pelo *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

4.6 Avaliação dos modelos de mudança climática para as bacias: Vazões

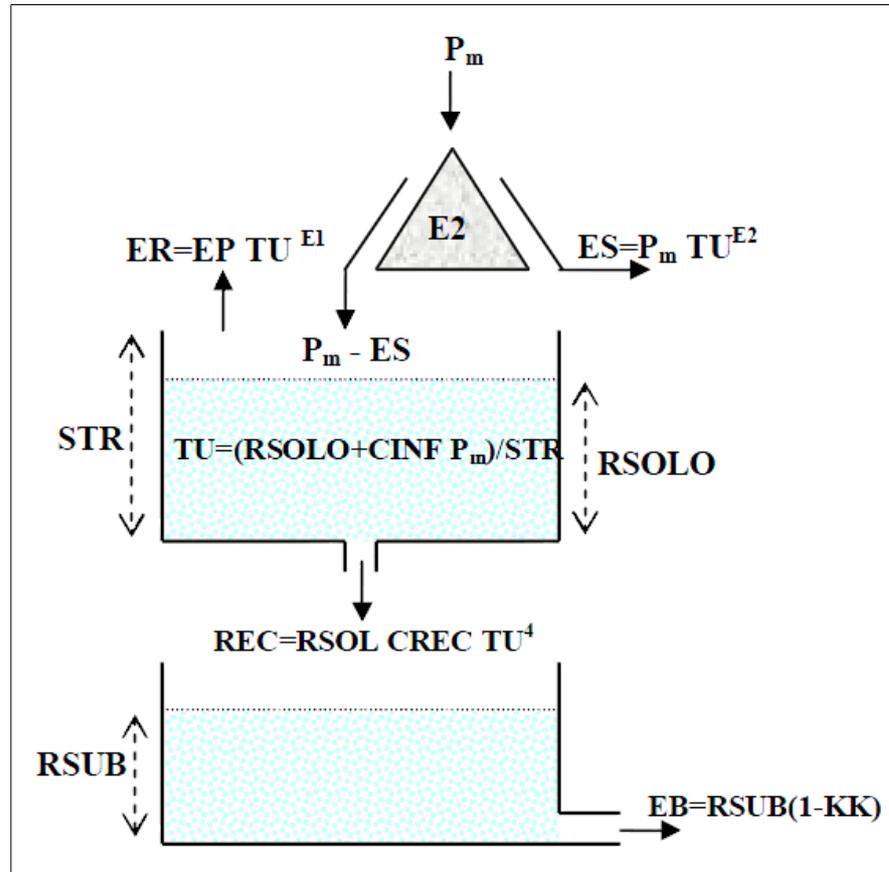
As vazões das bacias do SIN para os modelos do CMIP3 e para os dados observacionais do CRU foram calculadas através das precipitações médias de cada bacia para cada período de tempo, através do modelo hidrológico concentrado SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), em sua versão mensal.

Os modelos de chuva-vazão podem ser agrupados em modelos concentrados e distribuídos. Os modelos concentrados representam os processos hidrológicos por meio de valores médios calculados na seção de referência da bacia hidrográfica, ou seja, são modelos discretos (WOOD, 1995). Os modelos distribuídos utilizam equações contínuas que descrevem a variação espacial e temporal dos processos hidrológicos (BEVEN e O'CONNELL, 1982).

O modelo de chuva-vazão utilizado neste trabalho é o modelo concentrado SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) em versão mensal, uma vez que os dados coletados estão, em sua maioria, com resolução temporal mensal. Segundo Lopes *et al.* (2008), o SMAP foi desenvolvido em 1981 por Lopes, J.E.G., Braga, B.P.F. e Conejo, J.G.L., e apresentado no *International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling* realizado em Mississippi, Estados Unidos e publicado pela *Water Resources Publications* (1982).

O SMAP, em sua versão mensal, realiza o balanço da umidade do solo baseado em dois reservatórios matemáticos lineares que representam o solo (camada superior) e o aquífero (DINIZ, 2008) e quatro funções de transferências, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada mês (LOPES *et al.*, 2008), conforme Figura 4.7.

Figura 4.7 – Esquema do modelo SMAP



Fonte: Diniz (2008).

A cada consunto de eventos pluviométricos (P_m) é feito um balanço de massa onde uma parte da precipitação é transformada em escoamento superficial (ES), que é função da precipitação, da taxa de umidade do solo (TU) e do parâmetro ($E2$) que controla o escoamento superficial. A massa resultante ($P_m - ES$) é adicionada ao reservatório que representa a camada superior do solo. Neste reservatório superficial, a umidade é atualizada ao longo do tempo através da subtração da evapotranspiração real (ER), que é função da evapotranspiração potencial (EP), da taxa de umidade do solo e do parâmetro que regula a taxa de umidade do solo ($E1$) (DINIZ, 2008).

A recarga (REC) para o reservatório subterrâneo ocorre quando o nível do reservatório superficial ($RSOLO$) for maior que a capacidade de saturação do solo (STR). A recarga é função da taxa de umidade do solo, do coeficiente de recarga ($CREC$) e do coeficiente de infiltração ($CINF$). No reservatório subterrâneo o nível de água existente

(*RSUB*) é reduzido a uma taxa constante (*KK*), resultando em um escoamento de base (*EB*) (DINIZ, 2008).

Os dados de entrada do modelo são: área da bacia, a evaporação potencial mensal, a precipitação média mensal, o teor de umidade inicial do solo (*TUIN*), o escoamento de base inicial (*EBIN*), o volume máximo armazenado no reservatório subterrâneo (*SAT*), o coeficiente de recarga subterrânea (*CREC*), o parâmetro de recessão (*K*) e o parâmetro *pes*. Os parâmetros do modelo SMAP utilizados para cada uma das 24 sub-bacias estudadas estão apresentados na Tabela 4.6 e em seguida está apresentada a implementação em MATLAB do modelo SMAP.

Tabela 4.6. Parâmetros do modelo SMAP

| Bacia | Nome do Posto | Nome da Bacia | Área da Bacia (km ²) | STR | E1 | E2 | CREC | KK | TU inicial | EB inicial |
|-------|-----------------|---------------------|----------------------------------|-------|----|----|------|----|------------|------------|
| 1 | Emborcação | Alto Paranaíba | 29.000 | 900 | 1 | 3 | 20 | 2 | 55 | 96 |
| 2 | Nova Ponte | Alto Paranaíba | 15.300 | 1.100 | 1 | 3 | 25 | 2 | 52 | 70 |
| 3 | Itumbiara | Paranaíba | 51.011 | 2.000 | 1 | 3 | 9 | 2 | 52 | 170 |
| 4 | São Simão | Paranaíba | 85.729 | 2.100 | 1 | 5 | 7 | 2 | 60 | 349 |
| 5 | Furnas | Alto Grande | 50.464 | 1.400 | 1 | 2 | 26 | 2 | 48 | 221 |
| 6 | A. Vermelha | Grande | 89.436 | 1.200 | 1 | 3 | 20 | 2 | 55 | 449 |
| 7 | N. Avanhandava | Tietê | 62.300 | 1.200 | 1 | 5 | 10 | 3 | 67 | 352 |
| 8 | Porto Primavera | Paraná | 190.760 | 1.400 | 1 | 3 | 20 | 3 | 54 | 1.071 |
| 9 | Rosana | Parapanema | 100.799 | 1.300 | 1 | 3 | 22 | 2 | 65 | 1.149 |
| 10 | Itaipú | Paraná | 149.000 | 1.000 | 1 | 3 | 50 | 1 | 59 | 2.204 |
| 11 | Santa Cecília | Paraíba do Sul | 16.694 | 2.000 | 1 | 4 | 8 | 3 | 63 | 110 |
| 12 | Salto Caxias | Iguaçu | 57.000 | 400 | 1 | 2 | 70 | 1 | 61 | 762 |
| 13 | Ita | Uruguai | 44.500 | 600 | 1 | 4 | 15 | 1 | 78 | 513 |
| 14 | Dona Francisca | Jacuí | 14.014 | 1.900 | 1 | 7 | 2 | 1 | 92 | 120 |
| 15 | Três Marias | Alto São Francisco | 50.600 | 1.300 | 1 | 2 | 18 | 1 | 45 | 85 |
| 16 | Sobradinho | Médio São Francisco | 447.825 | 1.800 | 1 | 3 | 50 | 6 | 31 | 541 |
| 17 | Xingó | Baixo São Francisco | 110.275 | 500 | 1 | 3 | 1 | 1 | 22 | 0 |
| 18 | Serra Mesa | Alto Tocantins | 50.975 | 1.800 | 1 | 4 | 3 | 2 | 63 | 107 |
| 19 | Lajeado | Tocantins | 134.543 | 1.350 | 1 | 4 | 5 | 1 | 59 | 163 |
| 20 | Tucuruí | Tocantins | 572.482 | 1.200 | 1 | 5 | 4 | 1 | 59 | 919 |
| 21 | Belo Monte | Xingú | 480.000 | 2.580 | 1 | 10 | 1 | 1 | 72 | 588 |
| 22 | Teles Pires | Alto Tapajós | 90.707 | 1.300 | 1 | 4 | 9 | 2 | 61 | 382 |
| 23 | S. L. Tapajós | Tapajós | 362.293 | 1.300 | 1 | 4 | 6 | 2 | 56 | 1.684 |
| 24 | Santo Antônio | Madeira | 988.873 | 2.700 | 1 | 6 | 2 | 2 | 71 | 3.283 |

Fonte: Lopes (2011).

Código 4.8 – Implementação do modelo SMAP mensal

```

function [Qcalc,ebTime,tuTime] = smap(para,EP,Area)
Prec=EP(:,2);
E=EP(:,1);
n=length(Prec);
sat=para(1);      % Volume máximo armazenado no reservatório do solo
pes=para(2);
crec=para(3);    % Coeficiente de recarga do subterrânea
crecp=crec/100;
k=para(4);      % Coeficiente de recessão
ke=0.5^(1/k);
tuin=para(5);   % Teor de umidade do solo inicial
tuinp=tuin/100;
ebin=para(6);   % Escoamento de base inicial

for i=1:n+1
    if i==1
        Rsol(i)=tuinp*sat;
        rsub(i)=ebin/(1-ke)/Area*2630;
        tuTime(i) = tuin;
        ebTime(i) = ebin;
    else
        tu0(i)=Rsol(i-1)/sat;
        dsol(i)=0.5*(Prec(i-1)-Prec(i-1)*(tu0(i)^pes)-E(i-1)*tu0(i)...
        ...-Rsol(i-1)*crecp*(tu0(i)^4));
        tu(i)=(Rsol(i-1)+dsol(i))/sat;
        es(i)=Prec(i-1)*tu(i)^pes;
        er(i)=E(i-1)*tu(i);
        rec(i)=Rsol(i-1)*crecp*(tu(i)^4);
        eb(i)=rsub(i-1)*(1-ke);
        rsub(i)=rsub(i-1)-eb(i)+rec(i);
        Rsol(i)=Rsol(i-1)+Prec(i-1)-es(i)-er(i)-rec(i);
        Qcalc(i-1)=(es(i)+eb(i))*Area/2630;
        tuTime(i) = tu(i)*100; % Teor de umidade do solo inicial em cada
                               periodo
        ebTime(i) = eb(i)*Area*2630; % Vazão de base inicial para cada
                                     periodo
    end
end

tuTime = tuTime(2:end)';
ebTime = ebTime(2:end)';
Qcalc=Qcalc';

```

Cada um dos modelos do CMIP3 apresentam escalas espaciais distintas, diferentes da escala dos dados de precipitação do CRU. Desta forma se faz necessário o ajuste de escala entre as precipitações dos modelos do CMIP3 e as vazões consideradas como observadas do CRU para cada uma das bacias. Este ajuste de escala se baseou na função gama e consiste na aplicação dos parâmetros de forma e de escala desta função ajustada às precipitações dos dados do CRU aos dados de precipitação dos modelos do CMIP3 do século XX (20C3M) e do

cenário A1B para o século XXI ou seja, a partir de uma precipitação associada ao modelo de mudança climática, obtêm-se a probabilidade acumulada desta precipitação através da curva de probabilidades acumuladas dos dados do modelo, esta probabilidade acumulada é então aplicada à curva de probabilidades acumuladas das precipitações observadas, obtendo-se assim, a precipitação corrigida (ajustada). A Figura 4.8 exemplifica este processo. A implementação em MATLAB deste ajuste de escala está apresentada no Código 4.8.

Figura 4.8 – Ajuste de escala através da função gama.

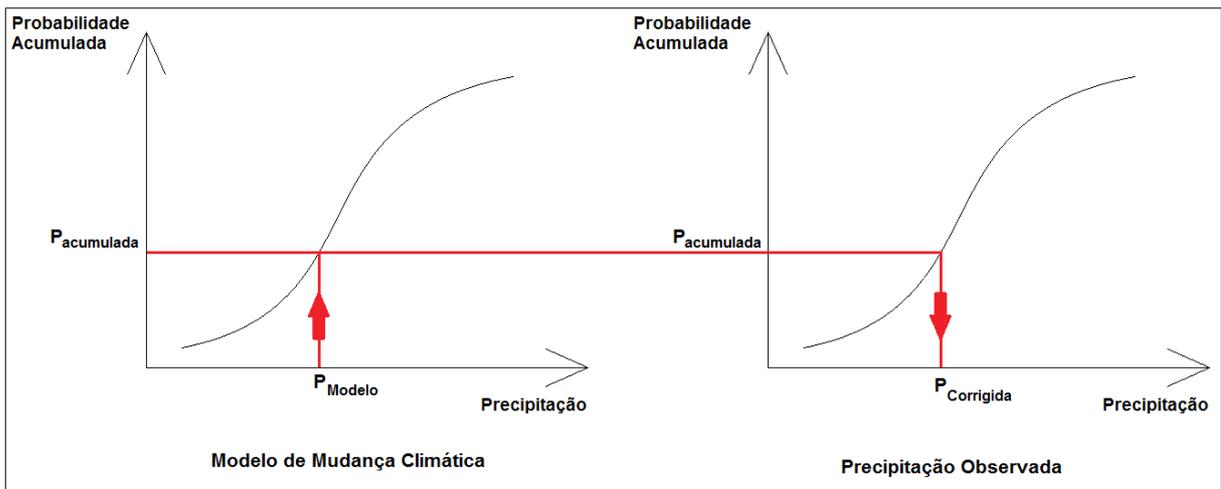


Figura criada pelo autor.

Código 4.8 – Ajuste de escala das vazões do SMAP através da função gama

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ajuste de escala das precipitações dos Modelos do CMIP3 através do %
% ajuste dos parâmetros da função gama aos dados do CRU           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

parametrosFuncaoGama = zeros(2, numeroBacias); % Matriz de parametros da
                                                % funcao gama

for i = 1:numeroBacias
    matrizTemporaria = load(strcat('mensal_EXPERIMENTO_ONS',mat2str(i),...
    '.txt'));
    precipitacoesCRU(:, i + 2) = matrizTemporaria(:, 3);
    [parametrosGama, ~] = gamfit(matrizTemporaria(:, 3));
    parametrosFuncaoGama(1, i) = parametrosGama(1); % parâmetro de forma
                                                    da função gama
    parametrosFuncaoGama(2, i) = parametrosGama(2); % parâmetro de posição
                                                    da função gama
end

...
% Ajuste das precipitações do século XX (20C3M)
precipitacaoAjustadaModelo20C3M = zeros(size(precipitacaoModelo));
for i = 1:size(precipitacaoModelo, 2)
    for j = 1:size(precipitacaoModelo, 1)
        [parametrosFuncaoGama20C3M,~]=gamfit(precipitacaoModelo(:,... i));
        probabilidade = gamcdf(precipitacaoModelo(j,i),
parametrosFuncaoGama20C3M(1),parametrosFuncaoGama20C3M(2));
        precipitacaoAjustadaModelo20C3M(j,i) =gaminv(probabilidade,...
parametrosFuncaoGamaCRU(1,numeroBacia),
parametrosFuncaoGamaCRU(2,numeroBacia));
    end
end

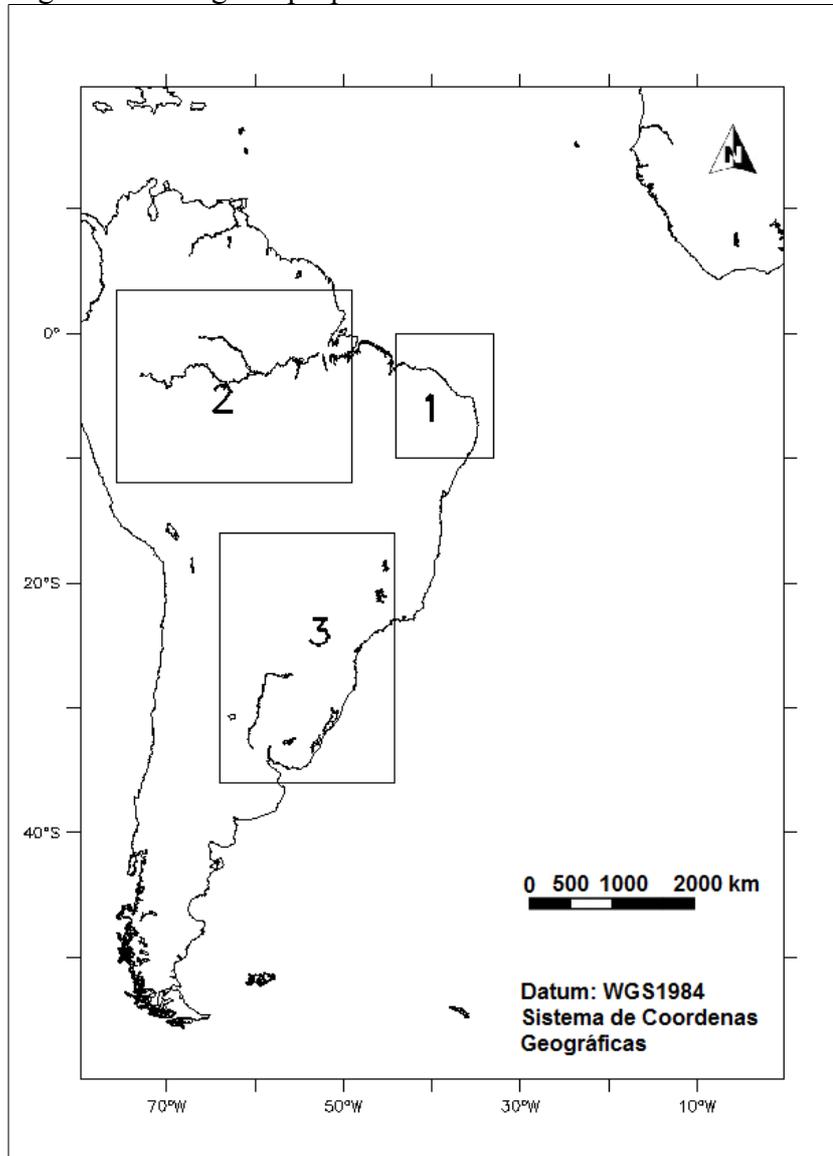
...
% Ajuste das precipitações do cenário A1B (século XXI)
precipitacaoAjustadaModeloA1B = zeros(size(precipitacaoModelo));
for i = 1:size(precipitacaoModelo, 2)
    for j = 1:size(precipitacaoModelo, 1)
        [parametrosFuncaoGamaA1B, ~] = gamfit(precipitacaoModelo(:,...
i));
        probabilidade = gamcdf(precipitacaoModelo(j,i),...
parametrosFuncaoGamaA1B(1), parametrosFuncaoGamaA1B(2));
        precipitacaoAjustadaModeloA1B(j,i) = gaminv(probabilidade,...
parametrosFuncaoGamaCRU(1,numeroBacia),
parametrosFuncaoGamaCRU(2,numeroBacia));
    end
    disp(strcat('Bacia',mat2str(numeroBacia),' - modelo',mat2str(i)));
end

```

As bacias do SIN foram agrupadas, de acordo com a sua posição, em cada uma das seguintes regiões propostas por Silveira *et al.* (2011): região 1 (Nordeste brasileiro), região 2 (Amazônia) e região 3 (Bacia do Prata) apresentadas na Figura 4.9. As bacias

localizadas entre as regiões foram agrupadas na região em que está localizada a maior parte da sua área.

Figura 4.9 – Regiões propostas



Fonte: Silveira *et al.* (2011).

Silveira *et al.* (2011) propuseram um índice de desempenho dos modelos climáticos do CMIP3 com base em índices de correlação e erro quadrático médio das precipitações. Cada uma das três regiões citadas acima apresenta uma classificação diferente, devido a diferença de desempenho de um modelo de uma região para outra, conforme a Tabela 4.7.

Esta classificação se baseia em dois índices estatísticos: raiz do erro quadrático médio da contribuição percentual mensal em relação às chuvas anuais ($RMSE_{PC}$) e a correlação ($CORREL$) (WILKS (1995) *apud* SILVEIRA *et al.* (2011)).

A classificação é dada pela avaliação ponderada entre estes índices para cada um dos modelos do CMIP3. Esta avaliação é dada por (SILVEIRA *et al.*, 2011):

$$AVAL_S = \alpha_c \left(\frac{CORREL - CORREL_{MIN}}{CORREL_{MAX} - CORREL_{MIN}} \right) + \alpha_r \left(\frac{RMSEPC - RMSEPC_{MIN}}{RMSEPC_{MAX} - RMSEPC_{MIN}} \right) \quad (4.13)$$

Sendo $AVAL_S$ a avaliação ponderada, $CORREL_{MIN}$ e $CORREL_{MAX}$ as menores e maiores correlações entre os modelos do CMIP3, e $RMSEPC_{MIN}$ e $RMSEPC_{MAX}$ as menores e maiores raízes do erro quadrático médio. Os valores dos fatores de ponderação α_c e α_r variam entre 0 e 1, e as suas somas sempre serão igual a 1. Para os valores de $\alpha_c > \alpha_r$, a correlação exerce uma maior influência na avaliação e para $\alpha_c < \alpha_r$ a raiz do erro quadrático médio exerce uma maior influência. A classificação dos modelos propostas por Silveira *et al.* (2011) adotada neste trabalho utilizou os valores $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$, dando um mesmo peso para a correlação e o erro quadrático médio.

Tabela 4.7. Classificação dos modelos do CMIP3 para cada uma das três regiões

| Modelos do IPCC-AR4 | NEB | AMZ | BPR | Modelos do IPCC-AR4 | NEB | AMZ | BPR |
|---------------------|-----|-----|-----|--------------------------|-----|-----|-----|
| BCCR-BCM2.0 (run1) | 8 | 48 | 59 | FGOALS-g1.0 (run3) | 40 | 39 | 66 |
| CGCM3.1(T47) (run1) | 17 | 3 | 4 | INGV-ECHAM4 (run1) | 44 | 4 | 42 |
| CGCM3.1(T47) (run2) | 20 | 45 | 1 | INM-CM3.0 (run1) | 48 | 34 | 52 |
| CGCM3.1(T47) (run3) | 11 | 55 | 21 | IPSL-CM4 (run1) | 32 | 6 | 24 |
| CGCM3.1(T47) (run4) | 25 | 32 | 10 | MIROC3.2 (hires) (run1) | 36 | 7 | 20 |
| CGCM3.1(T47) (run5) | 49 | 51 | 73 | MIROC3.2 (medres) (run1) | 10 | 22 | 57 |
| CGCM3.1(T63) (run1) | 9 | 5 | 43 | MIROC3.2 (medres) (run2) | 29 | 19 | 60 |
| CNRM-CM3 (run1) | 12 | 23 | 37 | MIROC3.2 (medres) (run3) | 15 | 71 | 28 |
| CSIRO-Mk3.0 (run1) | 7 | 2 | 27 | ECHO-G (run1) | 52 | 49 | 14 |
| CSIRO-Mk3.0 (run2) | 1 | 41 | 40 | ECHO-G (run2) | 69 | 47 | 71 |
| CSIRO-Mk3.0 (run3) | 35 | 15 | 69 | ECHO-G (run3) | 55 | 27 | 64 |
| CSIRO-Mk3.5 (run1) | 61 | 50 | 49 | ECHO-G (run4) | 58 | 13 | 53 |
| CSIRO-Mk3.5 (run2) | 30 | 60 | 51 | ECHO-G (run5) | 65 | 18 | 68 |
| CSIRO-Mk3.5 (run3) | 42 | 17 | 17 | ECHAM5/MPI-OM (run1) | 64 | 66 | 35 |
| GFDL-CM2.0 (run1) | 56 | 59 | 11 | ECHAM5/MPI-OM (run2) | 67 | 31 | 12 |
| GFDL-CM2.0 (run2) | 46 | 42 | 2 | ECHAM5/MPI-OM (run3) | 71 | 70 | 44 |
| GFDL-CM2.0 (run3) | 53 | 21 | 62 | ECHAM5/MPI-OM (run4) | 34 | 69 | 15 |
| GFDL-CM2.1 (run1) | 47 | 62 | 33 | MRI-CGCM2.3.2 (run1) | 19 | 28 | 41 |
| GFDL-CM2.1 (run2) | 38 | 36 | 46 | MRI-CGCM2.3.2 (run2) | 31 | 65 | 30 |
| GISS-AOM (run1) | 24 | 40 | 55 | MRI-CGCM2.3.2 (run3) | 3 | 29 | 25 |
| GISS-AOM (run2) | 43 | 33 | 26 | MRI-CGCM2.3.2 (run4) | 60 | 53 | 31 |
| GISS-EH (run1) | 45 | 20 | 6 | CCSM3 (run1) | 66 | 68 | 38 |
| GISS-EH (run2) | 28 | 14 | 47 | CCSM3 (run2) | 54 | 64 | 36 |
| GISS-EH (run3) | 16 | 9 | 8 | CCSM3 (run3) | 62 | 46 | 70 |
| GISS-EH (run4) | 26 | 24 | 29 | CCSM3 (run4) | 59 | 57 | 5 |
| GISS-EH (run5) | 14 | 63 | 22 | CCSM3 (run5) | 39 | 58 | 61 |
| GISS-ER (run1) | 21 | 10 | 65 | CCSM3 (run6) | 50 | 16 | 23 |
| GISS-ER (run2) | 4 | 25 | 34 | CCSM3 (run7) | 63 | 30 | 13 |
| GISS-ER (run3) | 22 | 44 | 48 | CCSM3 (run9) | 72 | 35 | 16 |
| GISS-ER (run4) | 27 | 8 | 18 | PCM (run1) | 70 | 12 | 3 |
| GISS-ER (run5) | 13 | 11 | 39 | PCM (run2) | 68 | 43 | 67 |
| GISS-ER (run6) | 6 | 1 | 19 | PCM (run3) | 73 | 54 | 56 |
| GISS-ER (run7) | 33 | 56 | 7 | PCM (run4) | 41 | 38 | 50 |
| GISS-ER (run8) | 2 | 26 | 32 | UKMO-HadCM3 (run1) | 5 | 37 | 54 |
| GISS-ER (run9) | 18 | 67 | 58 | UKMO-HadCM3 (run2) | 23 | 61 | 9 |
| FGOALS-g1.0 (run1) | 51 | 72 | 63 | UKMO-HadGEM1 (run1) | 37 | 52 | 45 |
| FGOALS-g1.0 (run2) | 57 | 73 | 72 | | | | |

OBS: NEB (Nordeste Brasileiro) – Região 1, AMZ (Amazônia) – Região 2 e BPR (Bacia do Prata) – Região 3.
Fonte: Silveira *et al.* (2011).

5 RESULTADOS

O presente capítulo apresenta um resumo dos resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho. São apresentados os resultados da análise da tendência de Sen, os mapas das percentagens da variância explicadas por cada uma das três bandas analisadas, os tipos de gráficos identificados na análise de vazões extremas, os resultados da avaliação dos modelos de mudança climática para as vazões e a identificação dos índices climáticos que expliquem os padrões de variação nas vazões.

Os resultados completos estão apresentados nos Anexos Digitais, disponíveis nos endereços <https://www.dropbox.com/sh/2bebnt02811baax/O_RyYZrvzj> e <<http://goo.gl/awJXT>> disponibilizados pelo autor. São eles:

- Anexo Digital I – Análise de Tendência;
- Anexo Digital II – Análise da Transformada em Ondeletas;
- Anexo Digital III – Avaliação de Extremos de Vazões;
- Anexo Digital IV – Correlação das Vazões Naturalizadas com os Índices Climáticos.

5.1 Avaliação dos padrões de variação e de tendências nas séries históricas de vazão

Os resultados referentes à avaliação dos padrões de variação e de tendência das series históricas de vazões compreendem as médias e medianas móveis, a regressão linear, regressão LOWESS, declividade de Sen, através do método de Mann-Kendall e a análise da transformada em ondeletas. Serão apresentados neste item o resumo destes resultados, que compreendem 21 postos estratégicos de previsão, do Sistema Interligado Nacional (SIN) em vez dos 24 postos, pois os postos Belo Monte (288), Teles Pires (229) e S. L. Tapajós (490) não possuem uma série histórica de vazões naturalizadas na fonte de dados utilizada (ONS, 2011). Estes 21 postos correspondem a 21 das 24 bacias analisadas na avaliação dos modelos de mudança climática.

Os resultados das análises de tendência (declividade de Sen) para 21 bacias do SIN estão apresentados na Tabela 5.1. Em seguida, apresenta-se os mapas referentes as percentagens das variâncias associadas à banda de alta frequência (Figura 5.1), à banda de média frequência (Figura 5.2) e à banda de baixa frequência (Figura 5.3), utilizadas na análise de ondeletas para todos os postos avaliados, bem como o mapa com as tendências de Sen para as mesmas (Figura 5.4), onde o tamanho dos círculos indica a tendência (em partes por mil, ‰, por ano).

Os gráficos de tendências (declividade de Sen, média e mediana móvel, regressão linear e regressão local LOWESS) estão apresentados no Anexo Digital I. Os gráficos da análise da transformada em ondeletas (*wavelets*) estão apresentados no Anexo Digital II.

Tabela 5.1. Resultado da Análise de Tendência de Sen para 21 Bacias do SIN

| Postos do Sistema Interligado Nacional (SIN) | Número da Bacia | Nome da Bacia | Mann-Kendall Ajustado (Taub) | Teste de Hipótese (h) | Declividade de Sen (m ³ /s/ano) | Vazão Média (m ³ /s) 1931-2010 | Varição em 100 anos (%) |
|--|-----------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|--|---|-------------------------|
| EMBORÇAÇÃO (24) | 1 | Alto Paranaíba | -0,030 | 0 | -0,242 | 486 | -4,97% |
| NOVA PONTE (25) | 2 | Alto Paranaíba | -0,076 | 0 | -0,443 | 299 | -14,83% |
| ITUMBIARA (31) | 3 | Paranaíba | -0,054 | 0 | -1,349 | 1557 | -8,67% |
| SÃO SIMÃO (33) | 4 | Paranaíba | 0,195 | 1 | 7,599 | 2410 | 31,53% |
| FURNAS (6) | 5 | Alto Grande | -0,029 | 0 | -0,443 | 927 | -4,78% |
| ÁGUA VERMELHA (18) | 6 | Grande | 0,051 | 0 | 1,614 | 2102 | 7,68% |
| NOVA AVANHANDAVA (242) | 7 | Tietê | 0,216 | 1 | 2,567 | 753 | 34,09% |
| PORTO PRIMAVERA (246) | 8 | Paraná | 0,314 | 1 | 26,824 | 7259 | 36,95% |
| ROSANA (63) | 9 | Parapanema | 0,273 | 1 | 6,967 | 1293 | 53,88% |
| ITAÍPU (266) | 10 | Paraná | 0,421 | 1 | 57,201 | 10239 | 55,87% |
| STA CECÍLIA (125) | 11 | Paraíba do Sul | -0,100 | 0 | -0,370 | 297 | -12,47% |
| SALTO CAXIAS (222) | 12 | Iguaçu | 0,217 | 1 | 6,990 | 1339 | 52,20% |
| ITA (92) | 13 | Uruguai | 0,190 | 1 | 4,932 | 1033 | 47,75% |
| DONA FRANCISCA (114) | 14 | Jacuí | 0,135 | 0 | 1,016 | 324 | 31,35% |
| TRÊS MARIAS (156) | 15 | Alto São Francisco | -0,019 | 0 | -0,199 | 691 | -2,88% |
| SOBRADINHO (169) | 16 | Médio São Francisco | -0,160 | 1 | -6,652 | 2666 | -24,95% |
| XINGÓ (178) | 17 | Baixo São Francisco | -0,143 | 0 | -6,016 | 2763 | -21,77% |
| SERRA DA MESA (270) | 18 | Alto Tocantins | -0,114 | 0 | -1,659 | 774 | -21,44% |
| LAJEADO (273) | 19 | Tocantins | -0,069 | 0 | -2,858 | 2444 | -11,69% |
| TUCURUI (275) | 20 | Tocantins | 0,021 | 0 | 3,278 | 10980 | 2,98% |
| SANTO ANTONIO (287) | 24 | Madeira | -0,083 | 0 | -18,090 | 18890 | -9,58% |

OBS: No teste de hipótese, $h = 0$ significa a ausência de tendência significativa

Observa-se através da Tabela 5.1 que apenas oito dos vinte e um postos (São Simão (33), Nova Avanhandava (242), Porto Primavera (246), Rosana (63), Itaipú (266), Salto Caxias (222), Itá (92) e Sobradinho (169)) apresentaram uma declividade de Sen significativa.

Figura 5.1 – Mapa das porcentagens da variância explicada pela banda de alta frequência (1 a 8 anos)

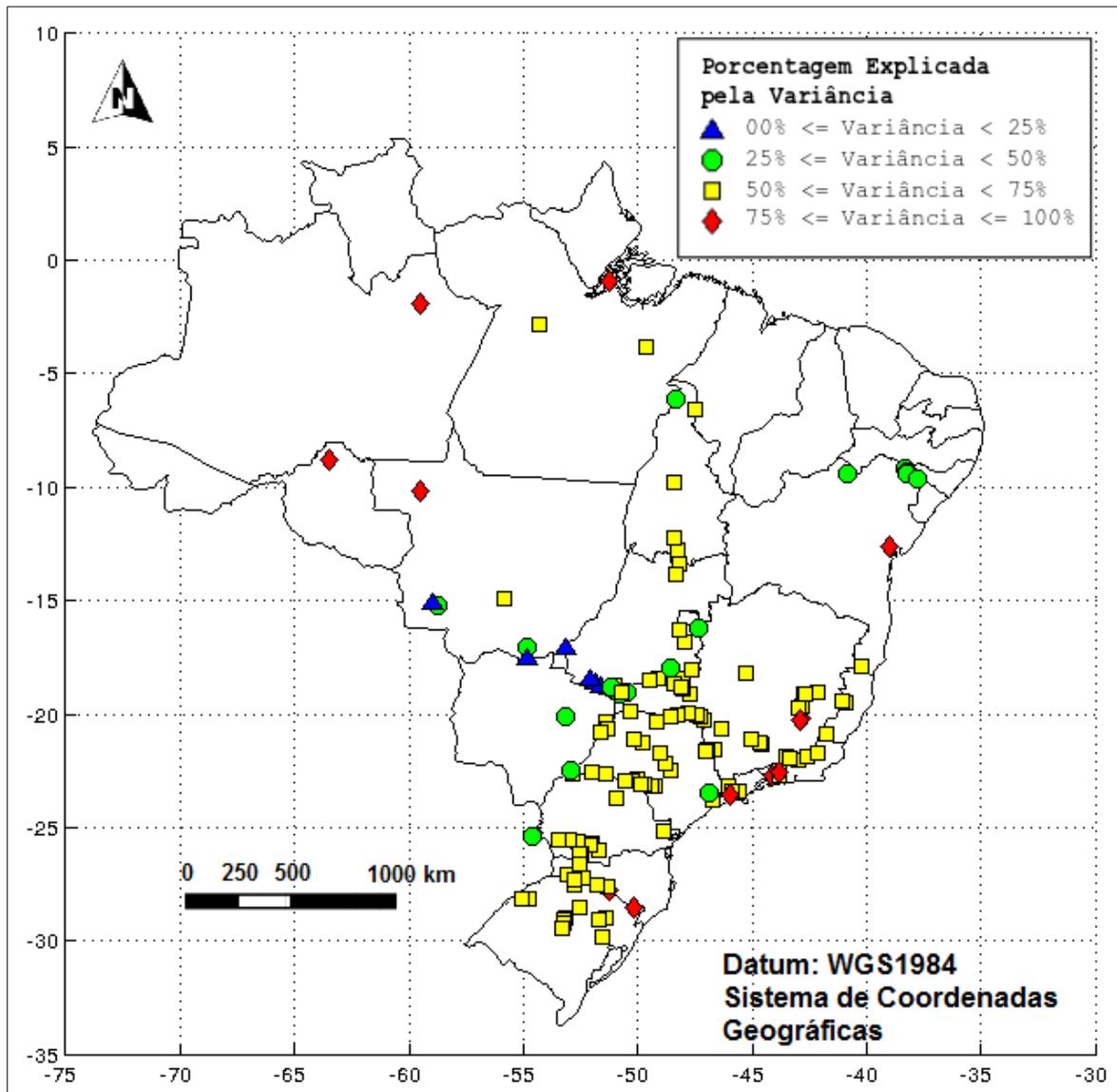


Figura criada pelo autor a partir dos resultados.

Observa-se na Figura 5.1 que a banda de alta frequência é responsável por mais de 50 % da variância na maioria das séries de vazões dos postos localizados nas regiões Norte, Sul e Sudeste. Já para as regiões Centro-Oeste e Nordeste, a banda de alta frequência é responsável por menos de 50 % da variância na maioria dos postos, com exceção dos postos localizados próximos a divisa da região Centro-Oeste com a região Sudeste, um posto localizado entre os estados da Bahia e Espírito Santo, um entre a divisa dos estados do Maranhão e Tocantins, dois postos no Mato Grosso e dois postos localizados na divisa entre Goiás e Tocantins.

Figura 5.2 – Mapa das porcentagens da variância explicada pela banda de média frequência (9 a 39 anos)

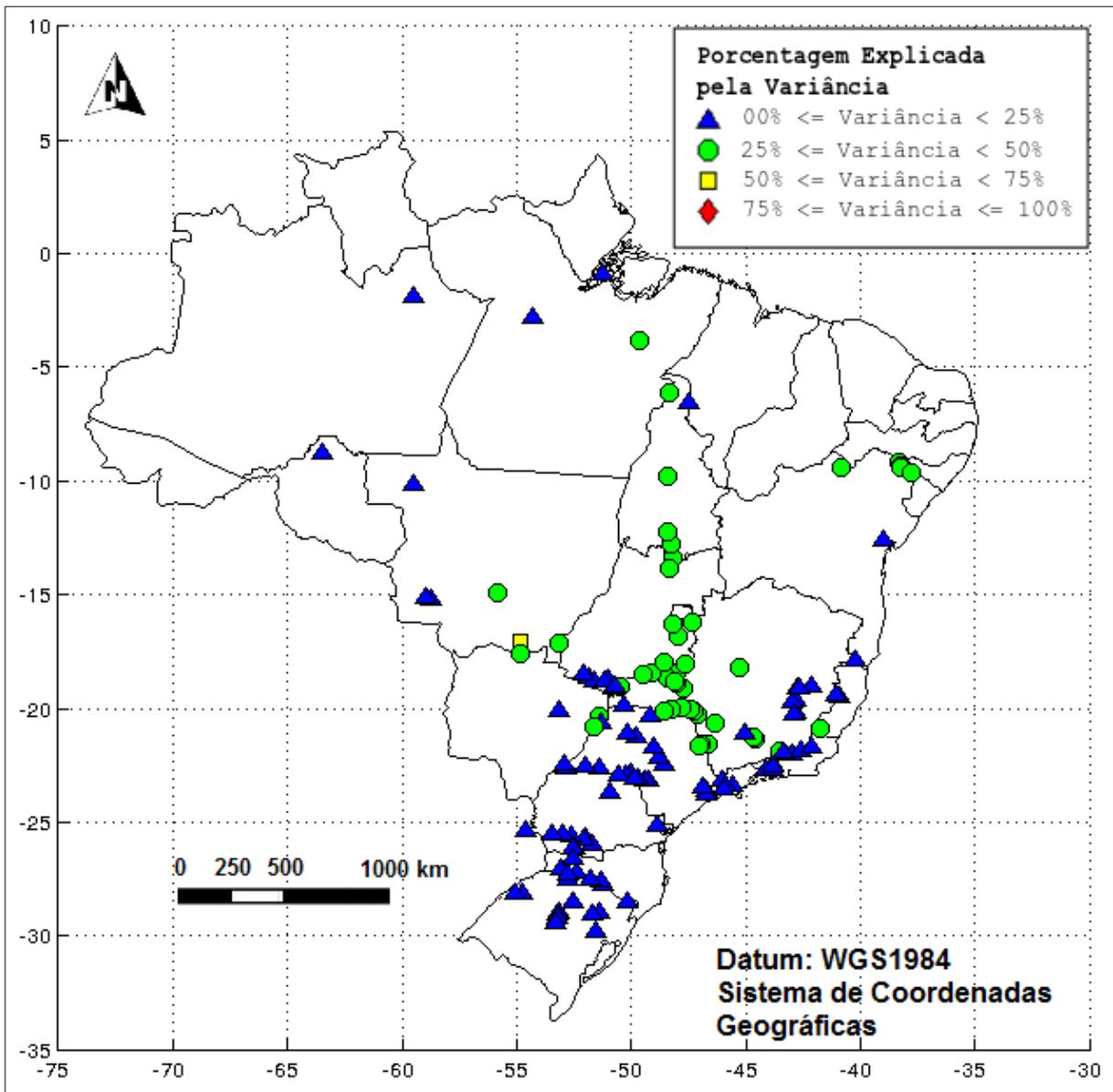


Figura criada pelo autor a partir dos resultados.

A Figura 5.2 mostra que a banda de média frequência é responsável por menos de 25 % da variância nas séries de vazão dos postos na região Sul, no leste da região Sudeste, no estado de São Paulo e nos áreas central e oeste da região Norte. Em parte da região Centro-Oeste, leste da região Norte e na maioria do Nordeste a banda de média frequência é responsável por até 50 % da variância das séries.

Figura 5.3 – Mapa das porcentagens da variância explicada pela banda de baixa frequência

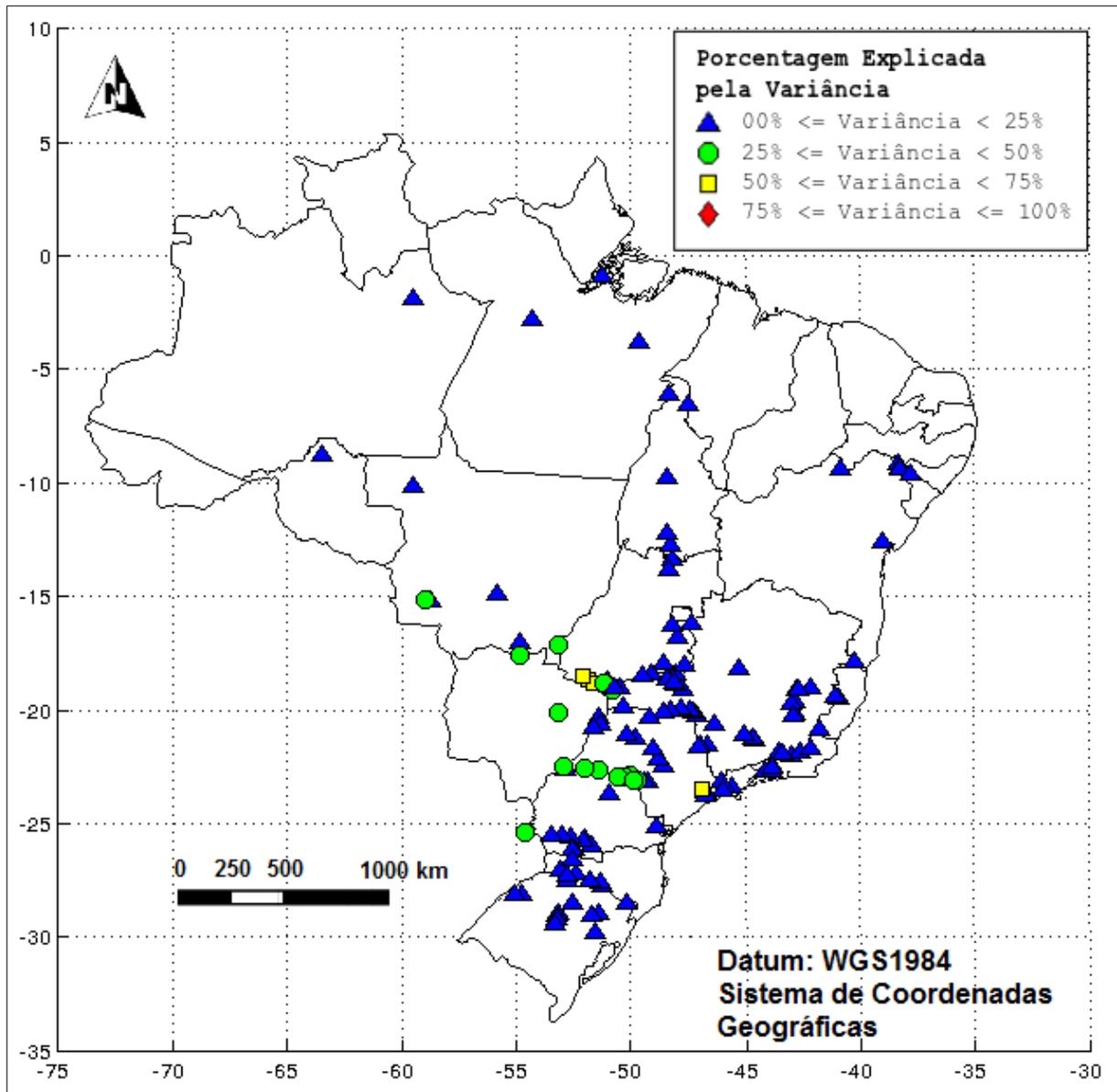


Figura criada pelo autor a partir dos resultados.

A Figura 5.3 mostra que na maior parte do País a banda de baixa frequência é responsável por menos de 25% da variância da série, exceto em partes da região centro-oeste nos postos na fronteira dos estados de São Paulo e Paraná e em mais dois postos na região sudeste.

Figura 5.4 – Mapa das tendências de Sen

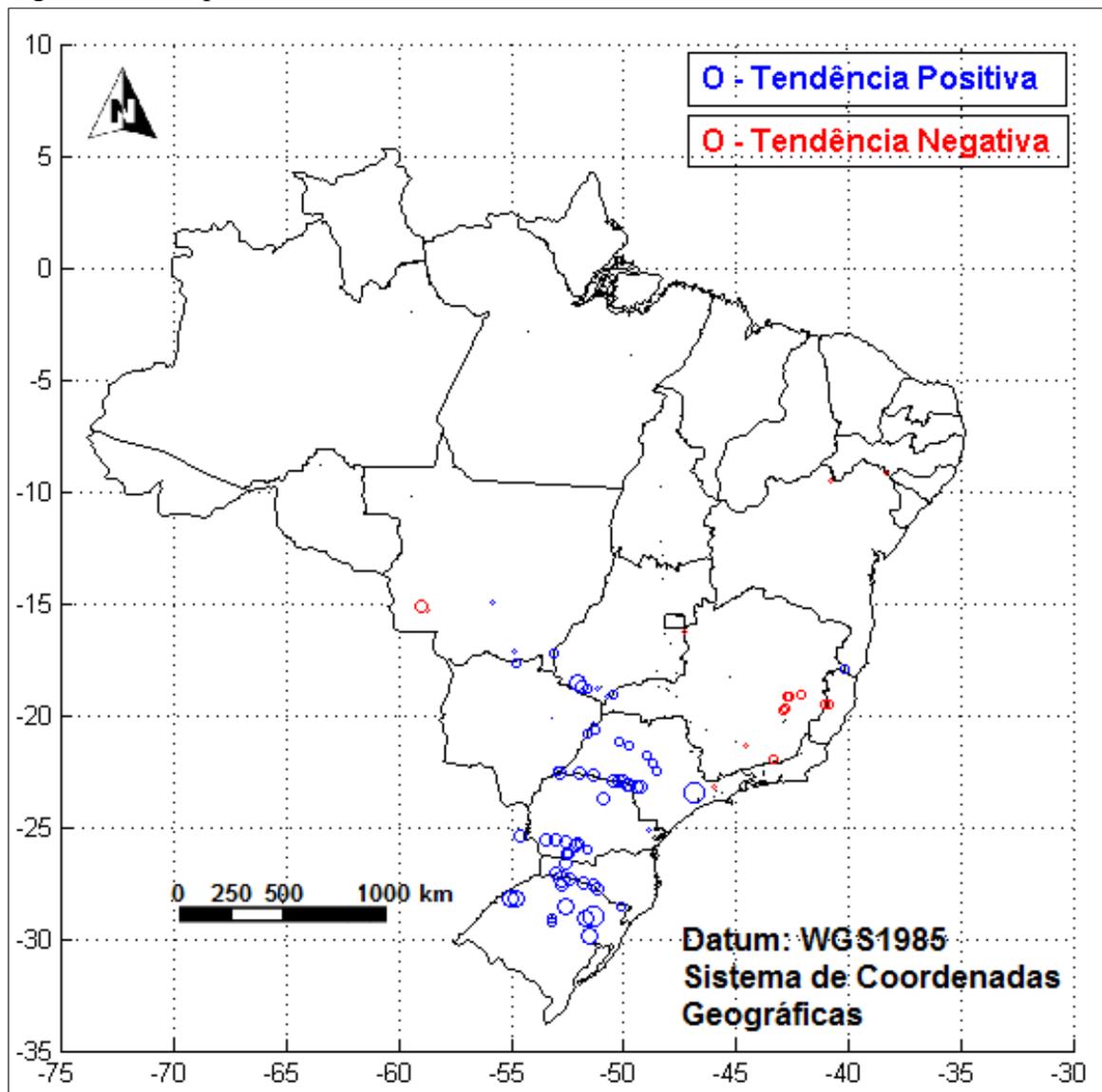


Figura criada pelo autor a partir dos resultados.

A Figura 5.4, onde o tamanho dos círculos corresponde a declividade anual em partes por milhar (%), mostra que existem três áreas de tendência no País: tendência positiva (região Sul, Mato Grosso do Sul, São Paulo e sul de Goiás), tendência negativa (região Nordeste, Espírito Santo, Minas Gerais e leste de São Paulo) e ausência de tendência (demais estados e regiões).

5.2 Avaliação de extremos: cheias

Este item apresenta os resultados para a avaliação de extremos, mais especificamente, às cheias máximas diárias.

A classificação visual dos gráficos permitiu identificar seis tipos de gráficos, apresentados a seguir:

- Tipo 1: Ascendente: Apresenta uma tendência de aumento nas vazões de pico, mas sem nenhum patamar significativo de mudança de regime de vazões;
- Tipo 2: Ascendente com Patamar: Apresenta uma tendência de aumento nas vazões de pico com a presença de patamares de mudança de regime das vazões;
- Tipo 3: Descendente: Apresenta uma tendência de redução nas vazões de pico, mas sem nenhum patamar significativo de mudança de regime de vazões;
- Tipo 4: Descendente com Patamar: Apresenta uma tendência de redução nas vazões de pico com a presença de patamares de mudança de regime das vazões;
- Tipo 5: Forma em “U”: Apresenta uma redução nos valores das vazões de pico na parte interna do gráfico, aproximadamente, na metade do período analisado;
- Tipo 6: Forma em “U” invertido: Apresenta um aumento nos valores das vazões de pico na parte interna do gráfico, aproximadamente, na metade do período analisado;
- Tipo 7: Outros: Apresentam uma forma que não foi classificada dentre os outros seis tipos de gráfico.

Os dados de vazões diárias apresentam séries históricas de diferentes períodos portanto, de forma a se classificar os gráficos, optou-se por utilizar apenas as séries dos postos que possuem 60 ou mais anos. Desta forma, foram classificados 91 postos. Estes postos estão listados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Postos com série de vazões naturalizadas com período maior ou igual a 60 anos

| Postos do ONS | | |
|--------------------|------------------------------|---------------------------------|
| CAMARGOS (1) | ITA (92) | COMP PAF-MOX (176) |
| ITUTINGA (2) | PASSO FUNDO (93) | XINGO (178) |
| FURNAS (6) | FOZ CHAPECO (94) | A.DIAS+S.CAR (183) |
| M. DE MORAES (7) | MONTE CLARO (97) | ITAPEBI (188) |
| ESTREITO (8) | CASTRO ALVES (98) | ROSAL (196) |
| JAGUARA (9) | SALTO PILAO (101) | PICADA (197) |
| IGARAPAVA (10) | SAO JOSE (102) | TOCOS (201) |
| VOLTA GRANDE (11) | PASSO SAO JOAO (103) | LAJES (202) |
| P. COLOMBIA (12) | ERNESTINA (110) | SANTANA (203) |
| CACONDE (14) | PASSO REAL (111) | MIRANDA (206) |
| E. DA CUNHA (15) | JACUI (112) | CAPIM BRANC1 (207) |
| A.S. OLIVEIRA (16) | ITAUBA (113) | FUNIL-GRANDE (211) |
| MARIMBONDO (17) | D. FRANCISCA (114) | BARRA GRANDE (215) |
| A. VERMELHA (18) | PEDRAS (116) | CAMPOS NOVOS (216) |
| NOVA PONTE (25) | GUARAPIRANGA (117) | MACHADINHO (217) |
| CAPIM BRANC2 (28) | BILLINGS (118) | MONJOLINHO (220) |
| I. SOLTEIRA (34) | BILLINGS+PEDRAS (119) | BARRA BONITA (237) |
| A.A. LAYDNER (47) | JAGUARI (120) | A.S. LIMA (238) |
| PIRAJU (48) | PARAIBUNA (121) | JUPIA (245) |
| CHAVANTES (49) | SANTA BRANCA (122) | P. PRIMAVERA (246) |
| L.N. GARCEZ (50) | MASCARENHAS (144) | OURINHOS (249) |
| CANOAS II (51) | AIMORES (148) | IRAPE (255) |
| CANOAS I (52) | CANDONGA (149) | GUILMAN-AMOR (262) |
| CAPIVARA (61) | TRES MARIAS (156) | ITAIPIU (266) |
| TAQUARUCU (62) | ALTO TIETÉ (160) | PONTE PEDRA (281) |
| ROSANA (63) | EDGARD DE SOUZA (164) | STA CLARA MG (283) |
| STA CLARA PR (71) | SOBRADINHO INCREMENTAL (168) | 14 DE JULHO (284) |
| FUNDAO (72) | SOBRADINHO (169) | SANTA CECÍLIA BOMBEAMENTO (298) |
| JORDAO (73) | ITAPARICA INCREMENTAL (171) | HENRY BORDEN 1 (318) |
| SLT. SANTIAGO (77) | ITAPARICA (172) | |
| SALTO OSORIO (78) | MOXOTO (173) | |

As Figuras 5.5 à 5.10 apresentam exemplos de gráficos dos postos classificados em cada um dos seis tipos de gráfico enquanto que a Tabelas 5.3 apresenta a classificação dos gráficos para 24 postos selecionados do SIN (correspondentes às 24 sub-bacias analisadas no estudo de vazões dos modelos de mudança climática), para os períodos de retorno de 100 e 1.000 anos e para cada uma das janelas de ajuste (20, 30 e 40 anos).

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam a distribuição espacial de cada um dos postos analisados, de acordo com a classificação do tipo de gráfico, para cada uma das três janelas de ajuste (20, 30 e 40 anos). Os resultados para todos os postos avaliados estão no Anexo Digital III.

Figura 5.5 – Gráfico Tipo 1: Ascendente (Posto Barra Bonita (237) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 30 anos)

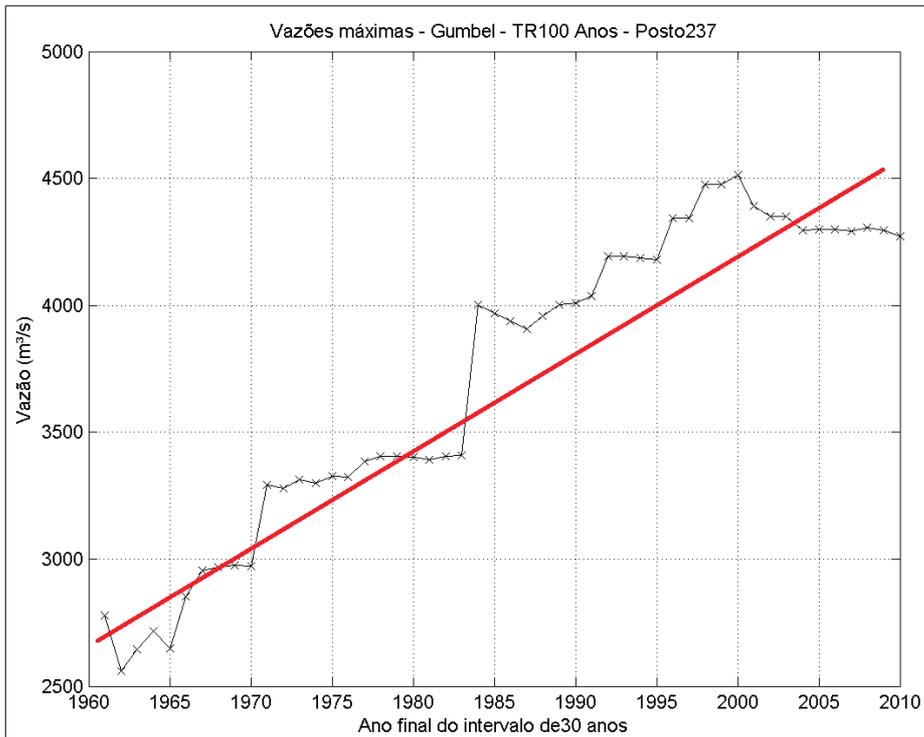


Figura criada pelo autor.

Figura 5.6 – Gráfico Tipo 2: Ascendente com Patamar: (Três Marias (156) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 20 anos)

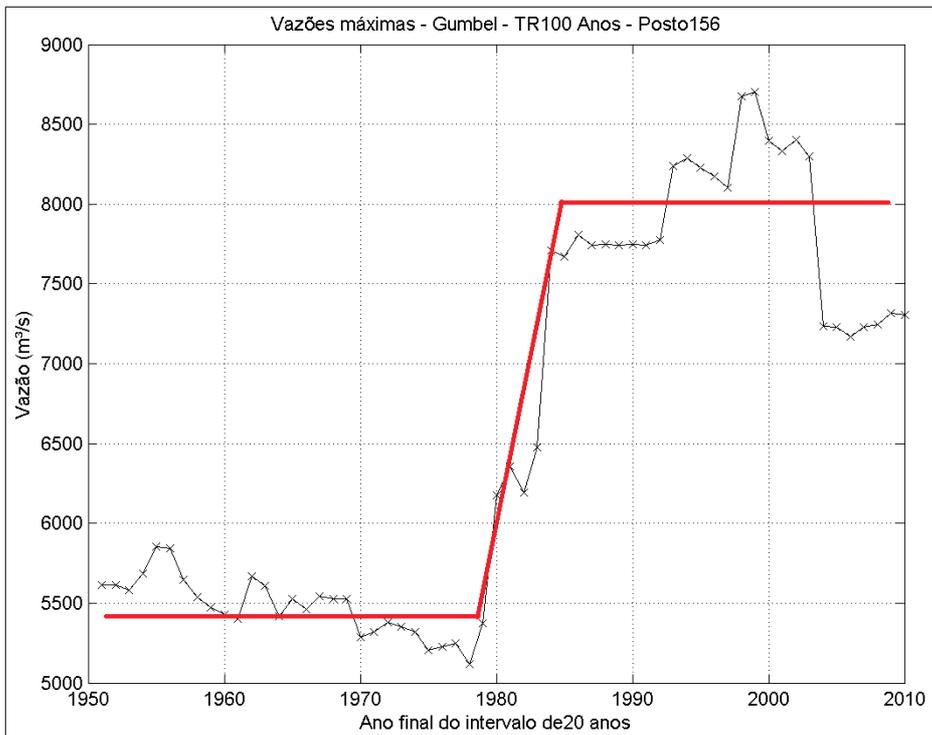


Figura criada pelo autor.

Figura 5.7 – Gráfico Tipo 3: Descendente: (Posto A. S. Oliveira (16) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 20 anos)

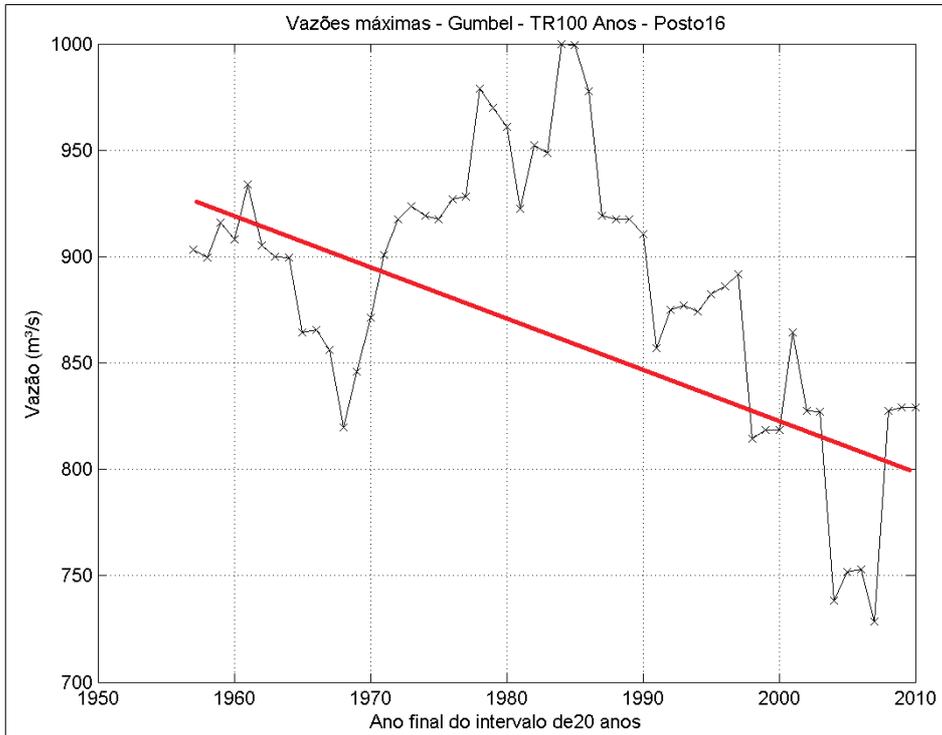


Figura criada pelo autor.

Figura 5.8 – Gráfico Tipo 4: Descendente com Patamar: (Posto Barra Grande (215) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 30 anos)

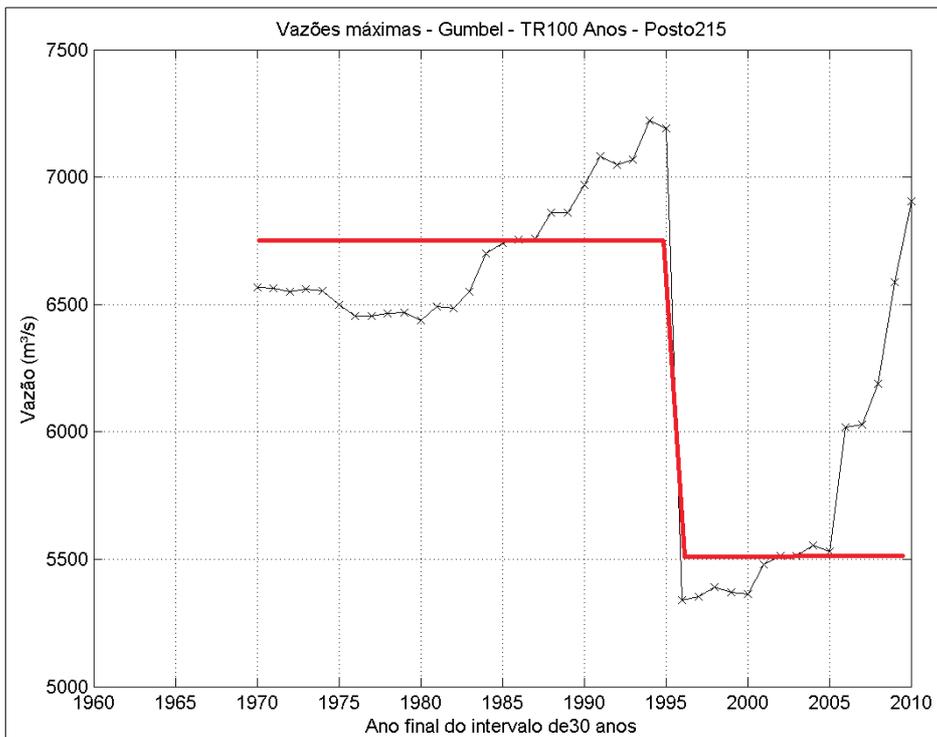


Figura criada pelo autor.

Figura 5.9 – Gráfico Tipo 5: Forma de “U”: (Posto Aimorés (18) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 30 anos)

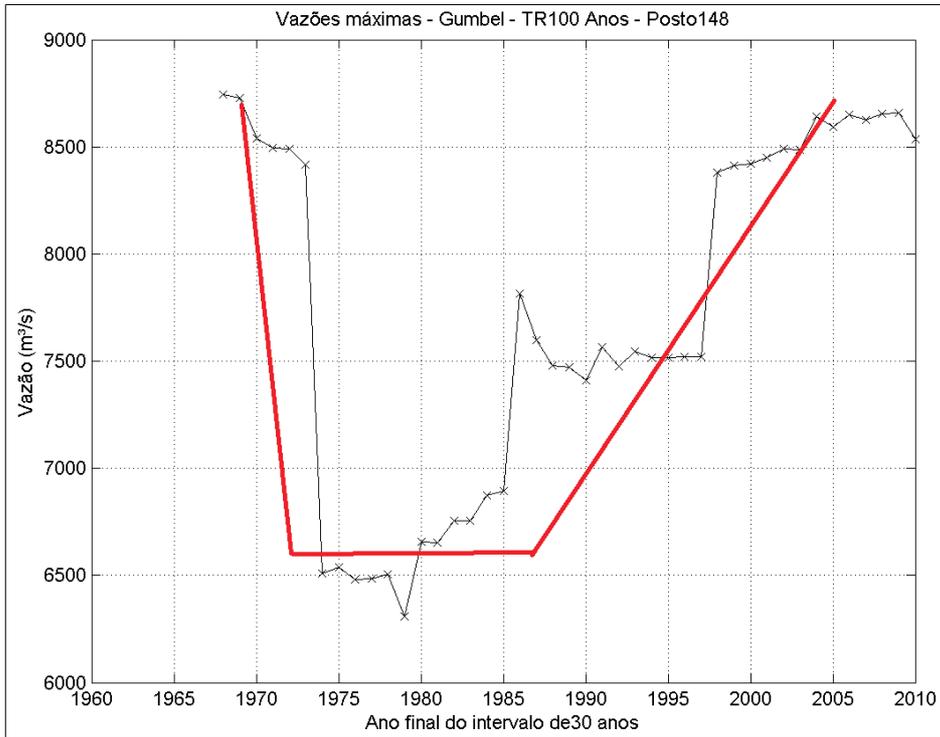


Figura criada pelo autor.

Figura 5.10 – Gráfico Tipo 6: Forma de “U” invertido: (Posto Salto Pilão (101) – Período de Retorno: 100 anos – Janela de Ajuste: 20 anos)

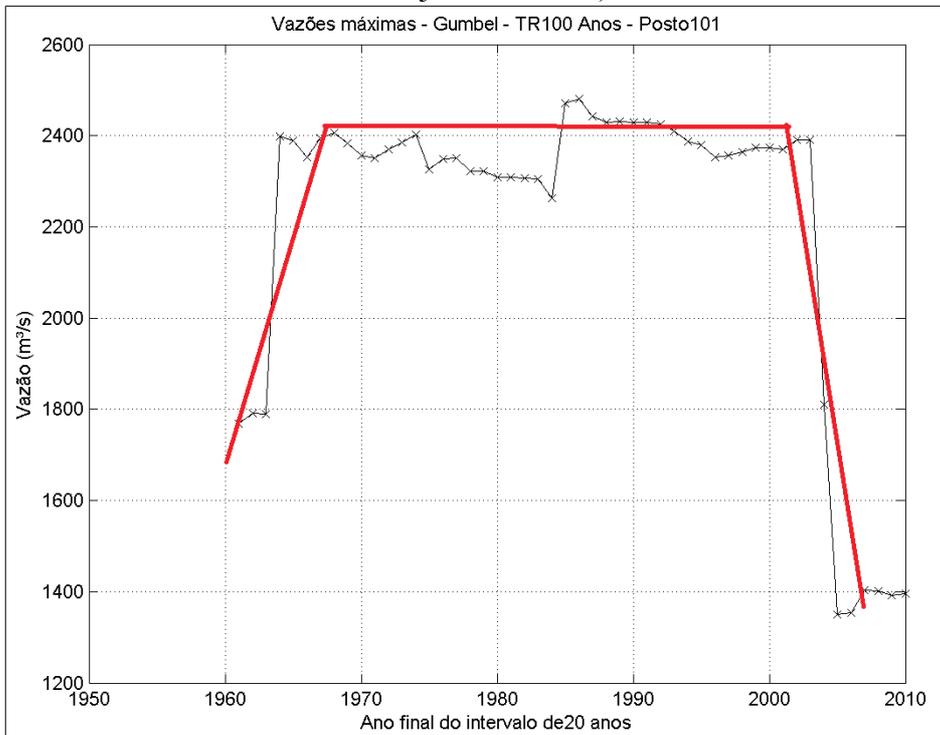


Figura criada pelo autor.

Tabela 5.3. Classificação dos gráficos de vazões extremas dos postos das sub-bacias selecionadas para este estudo - períodos de retorno de 100 e 1.000 anos

| Nome do Posto | Bacia | Número da Bacia | Janela de 20 anos | Janela de 30 anos | Janela de 40 anos |
|--------------------|---------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| EMBORCACAO (24) | Alto Paranaíba | 1 | Período < 60 Anos | | |
| NOVA PONTE (25) | Alto Paranaíba | 2 | Tipo 2 | Tipo 1 | Tipo 2 |
| ITUMBIARA (31) | Paranaíba | 3 | Período < 60 Anos | | |
| SAO SIMAO (33) | Paranaíba | 4 | Período < 60 Anos | | |
| FURNAS (6) | Alto Grande | 5 | Tipo 2 | Tipo 5 | Tipo 2 |
| A. VERMELHA (18) | Grande | 6 | Tipo 2 | Tipo 2 | Tipo 2 |
| NAVANHANDAVA (242) | Tietê | 7 | Período < 60 Anos | | |
| P. PRIMAVERA (246) | Paraná | 8 | Tipo 2 | Tipo 2 | Tipo 2 |
| ROSANA (63) | Paranapanema | 9 | Tipo 2 | Tipo 2 | Tipo 2 |
| ITAIPU (266) | Paraná | 10 | Tipo 2 | Tipo 2 | Tipo 1 |
| STA CECILIA (125) | Paraíba do Sul | 11 | Período < 60 Anos | | |
| SALTO CAXIAS (222) | Iguaçu | 12 | Período < 60 Anos | | |
| ITA (92) | Uruguai | 13 | Tipo 6 | Tipo 2 | Tipo 2 |
| D. FRANCISCA (114) | Jacuí | 14 | Tipo 1 | Tipo 1 | Tipo 1 |
| TRES MARIAS (156) | Alto São Francisco | 15 | Tipo 2 | Tipo 2 | Tipo 2 |
| SOBRADINHO (169) | Médio São Francisco | 16 | Tipo 5 | Tipo 2 | Tipo 2 |
| XINGO (178) | Baixa São Francisco | 17 | Tipo 5 | Tipo 2 | Tipo 2 |
| SA MESA (270) | Alto Tocantins | 18 | Período < 60 Anos | | |
| LAJEADO (273) | Tocantins | 19 | Período < 60 Anos | | |
| TUCURUI (275) | Tocantins | 20 | Período < 60 Anos | | |
| BELO MONTE | Xingú | 21 | Sem Dados | | |
| TELES PIRES | Alto Tapajós | 22 | Sem Dados | | |
| S. L. TAPAJÓS | Tapajós | 23 | Sem Dados | | |
| SANTO ANTONIO | Madeira | 24 | Sem Dados | | |

A classificação supervisionada K-Means não conseguiu separar os tipos de gráficos, uma vez que gráficos completamente diferentes foram agrupados nos mesmos *clusters* (agrupamentos). Isto mostra que a classificação supervisionada K-Means não classificou os gráficos quanto a forma, mas sim, através de outros parâmetros.

Figura 5.11 – Distribuição espacial dos tipos de gráfico para uma janela de ajuste de 20 anos

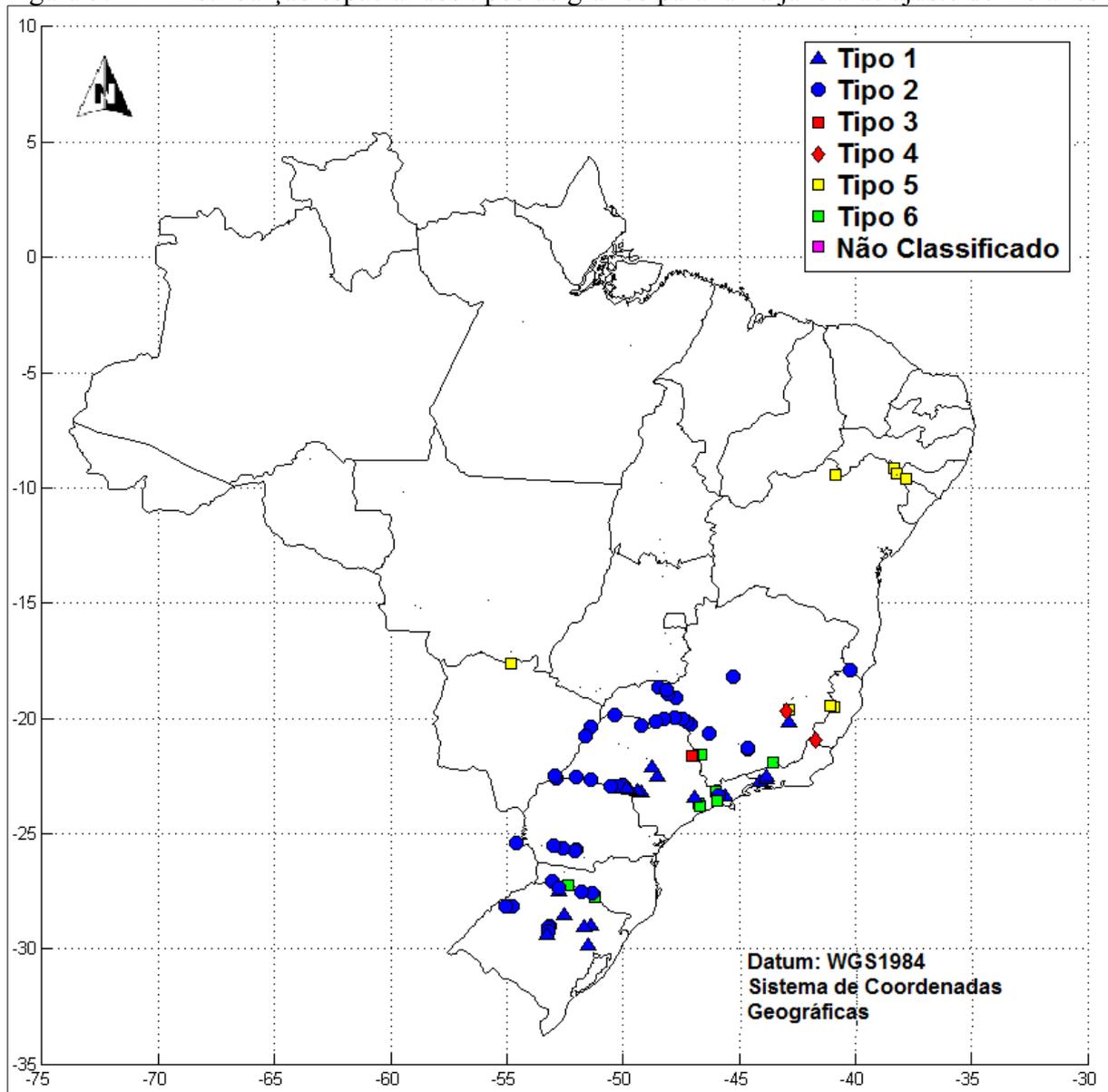


Figura criada pelo autor a partir dos resultados deste estudo.

Observa-se na Figura 5.11 que existe uma concentração de postos classificados nos tipos 1 e 2 (ascendente e ascendente com patamar) no norte do estado do Rio Grande do Sul, nos estados de Santa Catarina, Paraná e São Paulo. Observa-se ainda uma “sequência” de postos não classificados na fronteira entre os estados de São Paulo e Minas Gerais. Observa-se também uma concentração de postos do tipo 5 (forma de “U”) na fronteira entre os estados da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe.

Figura 5.12 – Distribuição espacial dos tipos de gráfico para uma janela de ajuste de 30 anos

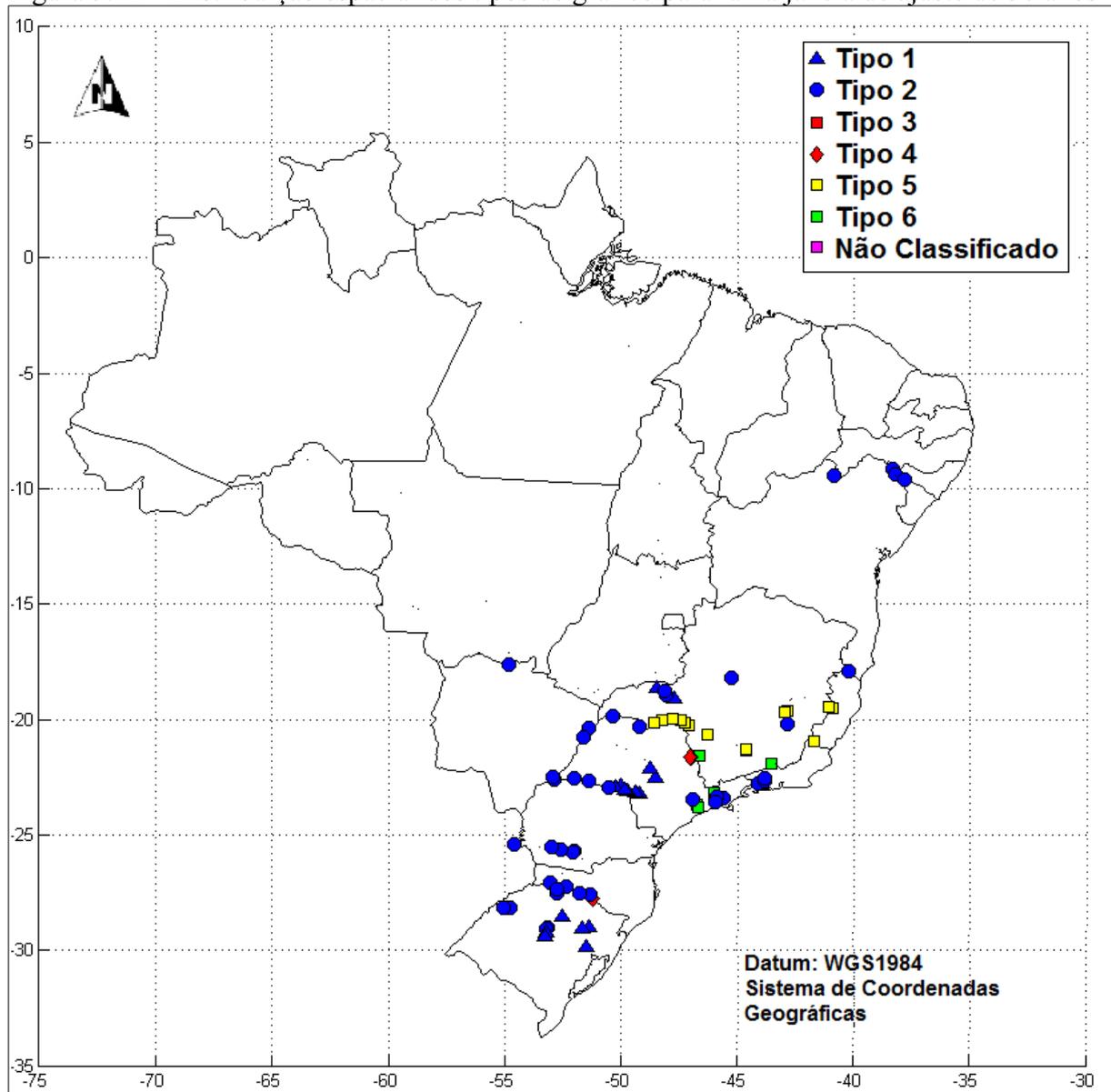


Figura criada pelo autor a partir dos resultados deste estudo.

Observa-se na Figura 5.12 que existe uma concentração de postos classificados nos tipos 1 e 2 (ascendente e ascendente com patamar) nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo, e na fronteira entre os estados de Alagoas, Sergipe, Pernambuco e Bahia. Observa-se ainda uma concentração de postos classificados como Tipo 5 (forma de “U”) na divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, além do Sul e Leste de Minas Gerais.

Figura 5.13 – Distribuição espacial dos tipos de gráfico para uma janela de ajuste de 40 anos

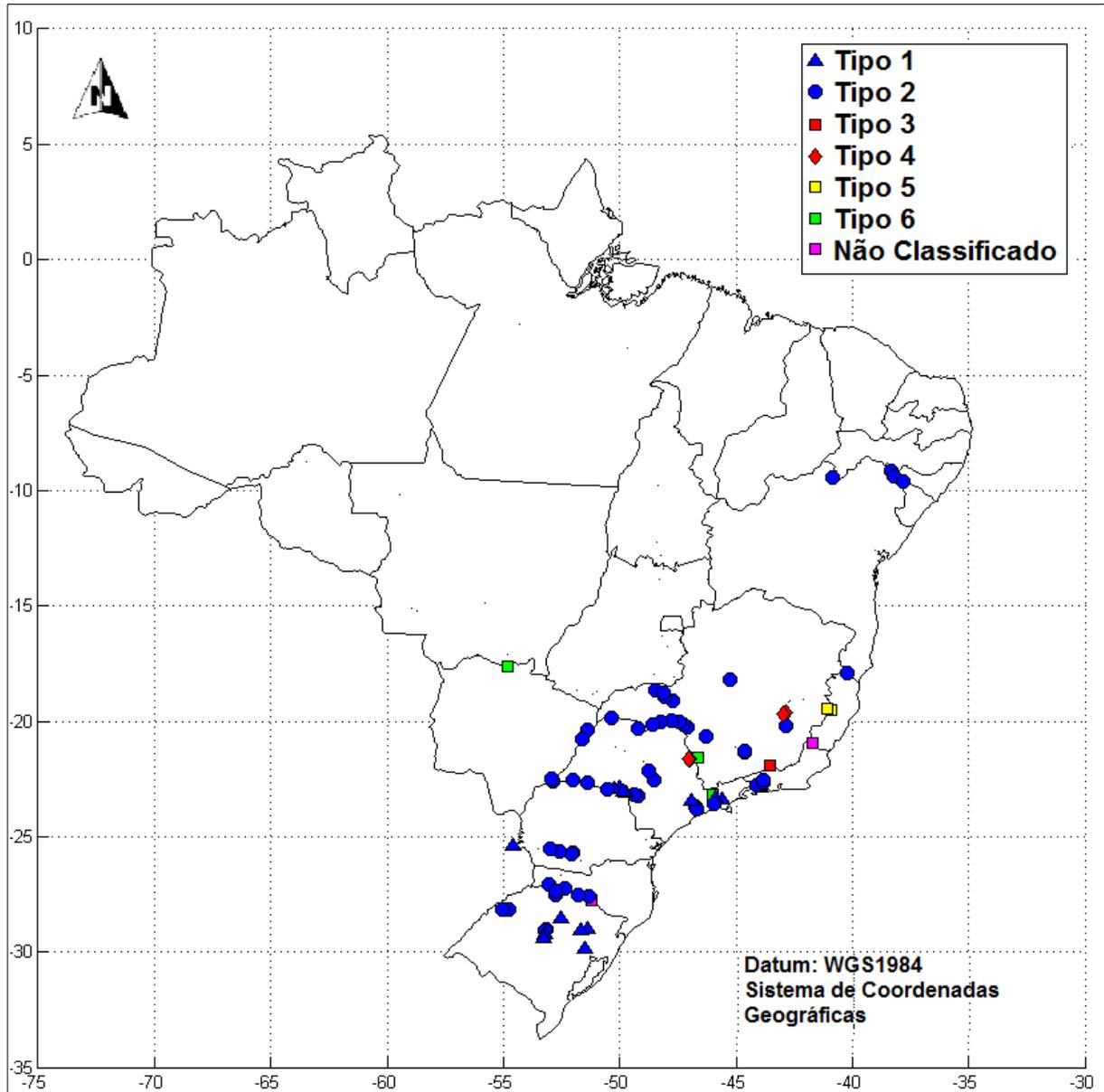


Figura criada pelo autor a partir dos resultados deste estudo.

Observa-se na Figura 5.13 que existe uma concentração de postos classificados nos tipos 1 e 2 (ascendente e ascendente com patamar) nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro e na divisa entre os estados de Alagoas, Sergipe, Pernambuco e Bahia. Observa-se ainda a ocorrência de postos classificados com Tipo 5 entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

5.3 Avaliação dos modelos de mudança climática para as bacias: Vazões

Este item apresenta um resumo dos resultados do modelo SMAP utilizado para a transformação dos dados de precipitação dos modelos do CMIP3 para vazões, no período de 1931 a 1999.

A Tabela 5.4 apresenta a região atribuída a cada uma das 24 bacias do SIN. A Tabela 5.5 apresenta as vazões médias obtidas através da modelagem hidrológica dos dados do CRU e as vazões médias obtidas através da modelagem hidrológica a partir dos dados dos três modelos do CMIP3 melhor classificados dentre os disponíveis, para cada uma das três regiões propostas por Silveira *et al.* (2010). As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam a variação entre as vazões médias dos modelos selecionados (três melhores classificados para cada bacia) no cenário A1B para o século XXI (no período de 2010 a 2099) e as vazões médias para os modelos do século XX (no período de 1901 a 1999).

Tabela 5.4. Classificação das bacias do SIN de acordo com as regiões propostas por Silveira *et al.* (2011)

| Posto | Número ONS | Bacia | Número da Bacia | Região |
|----------------------|------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| Emborcação | 24 | Alto Paranaíba | 1 | 3 - Bacia do Prata |
| Nova Ponte | 25 | Alto Paranaíba | 2 | 3 - Bacia do Prata |
| Itumbiara | 31 | Paranaíba | 3 | 3 - Bacia do Prata |
| São Simão | 33 | Paranaíba | 4 | 3 - Bacia do Prata |
| Furnas | 6 | Alto Grande | 5 | 3 - Bacia do Prata |
| Água Vermelha | 18 | Grande | 6 | 3 - Bacia do Prata |
| N. Avanhandava | 242 | Tietê | 7 | 3 - Bacia do Prata |
| Porto Primavera | 246 | Paraná | 8 | 3 - Bacia do Prata |
| Rosana | 63 | Parapanema | 9 | 3 - Bacia do Prata |
| Itaipú | 266 | Paraná | 10 | 3 - Bacia do Prata |
| Santa Cecília | 125 | Paraíba do Sul | 11 | 3 - Bacia do Prata |
| Salto Caxias | 222 | Iguaçu | 12 | 3 - Bacia do Prata |
| Ita | 92 | Uruguai | 13 | 3 - Bacia do Prata |
| Dona Francisca | 114 | Jacuí | 14 | 3 - Bacia do Prata |
| Três Marias | 156 | Alto São Francisco | 15 | 3 - Bacia do Prata |
| Sobradinho | 169 | Médio São Francisco | 16 | 1 - Nordeste |
| Xingó | 178 | Baixo São Francisco | 17 | 1 - Nordeste |
| Serra da Mesa | 270 | Alto Tocantins | 18 | 3 - Bacia do Prata |
| Lajeado | 273 | Tocantins | 19 | 2 - Amazônia |
| Tucuruí + Tucuruí II | 275 | Tocantins | 20 | 2 - Amazônia |
| Belo Monte | 288 | Xingú | 21 | 2 - Amazônia |
| Teles Pires | 229 | Alto Tapajós | 22 | 2 - Amazônia |
| S. L. Tapajós | 490 | Tapajós | 23 | 2 - Amazônia |
| Santo Antônio | 287 | Madeira | 24 | 2 - Amazônia |

Tabela 5.5. Vazões médias observadas e vazões médias dos modelos selecionados do CMIP3 do século XX (20C3M)

| Posto – ONS | Número da Bacia | Bacia | Vazão Média Observada (CRU) (m³/s) | Coefficiente de Variação da Vazão Observada (CRU) | Modelo AOGCM – IPCC – Século XX (20C3M) | Vazão Média do Modelo (m³/s) | Coefficiente de Variação das Vazões do Modelo (20C3M) | Variação da Vazão Média (%) | Variação do Coef. De Variação (%) |
|----------------------------|-----------------|---------------------|------------------------------------|---|---|------------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------------|
| Emborcação (24) | 1 | Alto Parnaíba | 458,54 | 0,74 | CGCM3.1 (T47) (run2) | 462,10 | 0,82 | -0,77% | -10,43% |
| | | | | | PCM (run1) | 445,23 | 0,83 | 2,90% | -12,22% |
| Nova Ponte (25) | 2 | Alto Parnaíba | 274,22 | 0,67 | CGCM3.1 (T47) (run1) | 461,05 | 0,79 | -0,55% | -6,71% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run2) | 274,79 | 0,65 | -0,21% | 3,21% |
| Itumbiara (31) | 3 | Paranaíba | 802,77 | 0,57 | PCM (run1) | 269,69 | 0,58 | 1,65% | 13,88% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 274,45 | 0,64 | -0,08% | 5,62% |
| São Simão (33) | 4 | Paranaíba | 1.226,84 | 0,47 | CGCM3.1 (T47) (run2) | 798,24 | 0,57 | 0,57% | -1,69% |
| | | | | | PCM (run1) | 736,86 | 0,64 | 8,21% | -12,82% |
| Fumas (6) | 5 | Alto Grande | 962,43 | 0,62 | CGCM3.1 (T47) (run1) | 797,77 | 0,55 | 0,62% | 2,78% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.221,27 | 0,47 | 0,45% | 1,31% |
| Água Vermelha (18) | 6 | Grande | 1.375,92 | 0,58 | PCM (run1) | 1.103,91 | 0,54 | 10,02% | -12,83% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.221,99 | 0,44 | 0,40% | 7,13% |
| N. Avanhadava (242) | 7 | Tietê | 893,27 | 0,55 | CGCM3.1 (T47) (run2) | 982,43 | 0,73 | -2,08% | -17,70% |
| | | | | | PCM (run1) | 964,23 | 0,74 | -0,19% | -20,69% |
| Porto Primavera (246) | 8 | Paraná | 2.667,75 | 0,41 | CGCM3.1 (T47) (run1) | 980,35 | 0,71 | -1,86% | -14,97% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.371,23 | 0,54 | 0,34% | 7,78% |
| Rosana (63) | 9 | Parapanema | 1.335,69 | 0,38 | PCM (run1) | 1.343,44 | 0,52 | 2,36% | 10,91% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.370,17 | 0,52 | 0,42% | 11,03% |
| Itaipú (266) | 10 | Paraná | 2.855,90 | 0,39 | CGCM3.1 (T47) (run2) | 892,11 | 0,51 | 0,13% | 7,45% |
| | | | | | PCM (run1) | 878,70 | 0,55 | 1,63% | -0,67% |
| Santa Cecília (125) | 11 | Paraíba do Sul | 372,65 | 0,50 | CGCM3.1 (T47) (run1) | 891,81 | 0,49 | 0,16% | 11,13% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run2) | 2.655,82 | 0,37 | 0,45% | 9,55% |
| Salto Caxias (222) | 12 | Iguaçu | 1.641,29 | 0,42 | PCM (run1) | 2.419,44 | 0,46 | 9,31% | -10,64% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 2.657,01 | 0,36 | 0,40% | 12,28% |
| Ita (92) | 13 | Uruguai | 1.085,96 | 0,43 | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.326,05 | 0,30 | 0,72% | 19,46% |
| | | | | | PCM (run1) | 1.315,01 | 0,35 | 1,55% | 8,04% |
| Dona Francisca (114) | 14 | Jacuí | 315,83 | 0,49 | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.327,47 | 0,30 | 0,62% | 21,00% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run2) | 2.823,80 | 0,29 | 1,12% | 26,14% |
| Três Marias (156) | 15 | Alto São Francisco | 759,09 | 0,74 | PCM (run1) | 2.818,56 | 0,31 | 1,31% | 20,43% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 2.823,73 | 0,29 | 1,13% | 26,69% |
| Sobradinho (169) | 16 | Médio São Francisco | 1.561,08 | 0,70 | CGCM3.1 (T47) (run2) | 372,09 | 0,50 | 0,15% | -0,04% |
| | | | | | PCM (run1) | 370,99 | 0,58 | 0,44% | -15,15% |
| Xingó (178) | 17 | Baixo São Francisco | 100,02 | 2,62 | CGCM3.1 (T47) (run1) | 371,76 | 0,49 | 0,24% | 3,09% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.634,33 | 0,38 | 0,42% | 10,87% |
| Serra da Mesa (270) | 18 | Alto Tocantins | 847,48 | 0,81 | PCM (run1) | 1.640,62 | 0,40 | 0,04% | 4,66% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.634,04 | 0,37 | 0,44% | 11,63% |
| Lajeado (273) | 19 | Tocantins | 2.038,01 | 0,91 | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.078,53 | 0,35 | 0,68% | 18,02% |
| | | | | | PCM (run1) | 1.083,88 | 0,40 | 0,19% | 7,89% |
| Tucuruí + Tucuruí II (275) | 20 | Tocantins | 9.650,79 | 0,86 | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.078,13 | 0,36 | 0,72% | 16,14% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run2) | 312,66 | 0,37 | 1,01% | 24,24% |
| Belo Monte (288) | 21 | Xingó | 8.318,38 | 0,78 | PCM (run1) | 314,56 | 0,40 | 0,40% | 18,13% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 312,51 | 0,37 | 1,05% | 23,43% |
| Teles Pires (229) | 22 | Alto Tapajós | 2.703,50 | 0,68 | CGCM3.1 (T47) (run2) | 769,10 | 0,83 | -1,32% | -11,63% |
| | | | | | PCM (run1) | 752,68 | 0,71 | 0,84% | 3,31% |
| S. L. Tapajós (490) | 23 | Tapajós | 10.298,83 | 0,64 | CGCM3.1 (T47) (run1) | 768,01 | 0,82 | -1,18% | -10,97% |
| | | | | | GISS-ER (run2) | 1.571,36 | 0,63 | -0,66% | 10,04% |
| Santo Antônio (287) | 24 | Madeira | 9.769,80 | 0,50 | UKMO-HadCM3 (run1) | 1.503,18 | 0,62 | 3,71% | 10,65% |
| | | | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 1.511,97 | 0,69 | 3,15% | 1,88% |
| | | | | | GISS-ER (run2) | 86,38 | 1,64 | 13,63% | 37,34% |
| | | | | | UKMO-HadCM3 (run1) | 91,49 | 2,22 | 8,52% | 15,10% |
| | | | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 94,14 | 1,96 | 5,87% | 25,20% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run2) | 836,40 | 0,77 | 1,31% | 4,94% |
| | | | | | PCM (run1) | 748,32 | 0,91 | 11,70% | -12,77% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 836,29 | 0,75 | 1,32% | 7,27% |
| | | | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 2.116,39 | 0,75 | -3,85% | 17,10% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 2.014,00 | 0,84 | 1,18% | 7,76% |
| | | | | | INGV-SXG (run1) | 1.915,37 | 0,96 | 6,02% | -5,24% |
| | | | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 10.012,31 | 0,68 | -3,75% | 21,31% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 9.654,81 | 0,71 | -0,04% | 18,24% |
| | | | | | INGV-SXG (run1) | 10.066,31 | 0,62 | -4,31% | 28,09% |
| | | | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 9.053,92 | 0,73 | -8,84% | 7,15% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 8.533,37 | 0,71 | -2,58% | 9,98% |
| | | | | | INGV-SXG (run1) | 8.949,07 | 0,68 | -7,58% | 13,06% |
| | | | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 2.974,36 | 0,68 | -10,02% | 0,01% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 2.774,52 | 0,73 | -2,63% | -6,88% |
| | | | | | INGV-SXG (run1) | 2.932,15 | 0,83 | -8,46% | -21,66% |
| | | | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 10.867,01 | 0,61 | -5,52% | 5,02% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 10.492,40 | 0,71 | -1,88% | -9,72% |
| | | | | | INGV-SXG (run1) | 10.702,65 | 0,72 | -3,92% | -11,95% |
| | | | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 9.766,25 | 0,45 | 0,04% | 9,92% |
| | | | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 9.688,37 | 0,59 | 0,83% | -17,56% |
| | | | | | INGV-SXG (run1) | 9.830,65 | 0,39 | -0,62% | 21,40% |

Tabela 5.6. Comparação das vazões médias e dos coeficientes de variação dos modelos do CMIP3 selecionados do século XX (20C3M) com os do cenário A1B para o século XXI do IPCC-AR4 (Bacias 1 a 12)

| Posto – ONS | Número da Bacia | Bacia | Modelo AOGCM – IPCC | Vazão Média do Modelo (20C3M) | Coef. de variação das Vazões do Modelo (20C3M) | Vazão Média do Modelo (A1B) Século XXI | Coef. de variação das Vazões dos Modelos (A1B) | Varição das Vazões Médias (%) | Varição dos Coef. de Variação (%) |
|-----------------------|-----------------|----------------|----------------------|-------------------------------|--|--|--|-------------------------------|-----------------------------------|
| Emborcação (24) | 1 | Alto Parnaíba | CGCM3.1 (T47) (run2) | 462,10 | 0,82 | 460,24 | 0,82 | -0,40% | -0,01% |
| | | | PCM (run1) | 445,23 | 0,83 | 455,58 | 0,68 | 2,32% | -18,56% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 461,05 | 0,79 | 461,06 | 0,84 | 0,00% | 5,36% |
| Nova Ponte (25) | 2 | Alto Parnaíba | CGCM3.1 (T47) (run2) | 274,79 | 0,65 | 274,08 | 0,67 | -0,26% | 2,31% |
| | | | PCM (run1) | 269,69 | 0,58 | 270,29 | 0,57 | 0,22% | -1,23% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 274,45 | 0,64 | 274,27 | 0,66 | -0,07% | 4,00% |
| Itumbiara (31) | 3 | Paranaíba | CGCM3.1 (T47) (run2) | 798,24 | 0,57 | 796,68 | 0,57 | -0,19% | -0,96% |
| | | | PCM (run1) | 736,86 | 0,64 | 727,68 | 0,64 | -1,25% | -0,09% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 797,77 | 0,55 | 796,55 | 0,57 | -0,15% | 4,19% |
| São Simão (33) | 4 | Paranaíba | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.221,27 | 0,47 | 1.220,36 | 0,46 | -0,08% | -2,51% |
| | | | PCM (run1) | 1.103,91 | 0,54 | 1.086,97 | 0,54 | -1,54% | 0,19% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.221,99 | 0,44 | 1.220,92 | 0,45 | -0,09% | 2,50% |
| Furnas (6) | 5 | Alto Grande | CGCM3.1 (T47) (run2) | 982,43 | 0,73 | 980,64 | 0,75 | -0,18% | 3,87% |
| | | | PCM (run1) | 964,23 | 0,74 | 962,67 | 0,71 | -0,16% | -5,15% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 980,35 | 0,71 | 980,87 | 0,75 | 0,05% | 5,58% |
| Água Vermelha (18) | 6 | Grande | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.371,23 | 0,54 | 1.369,13 | 0,54 | -0,15% | 0,76% |
| | | | PCM (run1) | 1.343,44 | 0,52 | 1.346,97 | 0,51 | 0,26% | -1,48% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.370,17 | 0,52 | 1.370,36 | 0,53 | 0,01% | 1,43% |
| N. Avanhadava (242) | 7 | Tietê | CGCM3.1 (T47) (run2) | 892,11 | 0,51 | 891,61 | 0,51 | -0,06% | 0,62% |
| | | | PCM (run1) | 878,70 | 0,55 | 879,81 | 0,55 | 0,13% | -1,01% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 891,81 | 0,49 | 892,33 | 0,49 | 0,06% | 1,32% |
| Porto Primavera (246) | 8 | Paraná | CGCM3.1 (T47) (run2) | 2.655,82 | 0,37 | 2.652,70 | 0,36 | -0,12% | -3,64% |
| | | | PCM (run1) | 2.419,44 | 0,46 | 2.389,76 | 0,47 | -1,23% | 2,86% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 2.657,01 | 0,36 | 2.658,26 | 0,36 | 0,05% | -0,53% |
| Rosana (63) | 9 | Parapanema | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.326,05 | 0,30 | 1.326,97 | 0,30 | 0,07% | -0,76% |
| | | | PCM (run1) | 1.315,01 | 0,35 | 1.317,78 | 0,34 | 0,21% | -0,13% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.327,47 | 0,30 | 1.328,61 | 0,30 | 0,09% | -0,21% |
| Itaipú (266) | 10 | Paraná | CGCM3.1 (T47) (run2) | 2.823,80 | 0,29 | 2.825,40 | 0,29 | 0,06% | -0,67% |
| | | | PCM (run1) | 2.818,56 | 0,31 | 2.826,67 | 0,31 | 0,29% | 0,84% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 2.823,73 | 0,29 | 2.825,96 | 0,29 | 0,08% | 1,15% |
| Santa Cecília (125) | 11 | Paraíba do Sul | CGCM3.1 (T47) (run2) | 372,09 | 0,50 | 371,48 | 0,51 | -0,16% | 2,57% |
| | | | PCM (run1) | 370,99 | 0,58 | 370,15 | 0,54 | -0,23% | -6,82% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 371,76 | 0,49 | 371,70 | 0,51 | -0,01% | 4,11% |
| Salto Caxias (222) | 12 | Iguaçu | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.634,33 | 0,38 | 1.633,58 | 0,38 | -0,05% | 1,15% |
| | | | PCM (run1) | 1.640,62 | 0,40 | 1.642,11 | 0,40 | 0,09% | -1,01% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.634,04 | 0,37 | 1.634,26 | 0,38 | 0,01% | 2,25% |

Tabela 5.7. Comparação das vazões médias e dos coeficientes de variação dos modelos do CMIP3 selecionados do século XX (20C3M) com os do cenário A1B para o século XXI do IPCC-AR4 (Bacias 13 a 24)

| Posto – ONS | Número da Bacia | Bacia | Modelo AOGCM – IPCC | Vazão Média do Modelo (20C3M) | Coef. de variação das Vazões do Modelo (20C3M) | Vazão Média do Modelo (A1B) Século XXI | Coef. de variação das Vazões dos Modelos (A1B) | Varição das Vazões Médias (%) | Varição dos Coef. de Variação (%) |
|----------------------------|-----------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|--|--|--|-------------------------------|-----------------------------------|
| Ita (92) | 13 | Uruguai | CGCM3.1 (T47) (run2) | 1.078,53 | 0,35 | 1.078,05 | 0,36 | -0,04% | 2,74% |
| | | | PCM (run1) | 1.083,88 | 0,40 | 1.084,43 | 0,39 | 0,05% | -1,12% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 1.078,13 | 0,36 | 1.078,78 | 0,37 | 0,06% | 1,64% |
| Dona Francisca (114) | 14 | Jacuí | CGCM3.1 (T47) (run2) | 312,66 | 0,37 | 312,57 | 0,38 | -0,03% | 2,65% |
| | | | PCM (run1) | 314,56 | 0,40 | 315,16 | 0,39 | 0,19% | -2,28% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 312,51 | 0,37 | 312,98 | 0,38 | 0,15% | 3,52% |
| Três Marias (156) | 15 | Alto São Francisco | CGCM3.1 (T47) (run2) | 769,10 | 0,83 | 766,97 | 0,86 | -0,28% | 3,81% |
| | | | PCM (run1) | 752,68 | 0,71 | 752,38 | 0,71 | -0,04% | -0,16% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 768,01 | 0,82 | 767,08 | 0,88 | -0,12% | 6,73% |
| Sobradinho (169) | 16 | Médio São Francisco | GISS-ER (run2) | 1.571,36 | 0,63 | 1.583,21 | 0,66 | 0,75% | 4,17% |
| | | | UKMO-HadCM3 (run1) | 1.503,18 | 0,62 | 1.531,52 | 0,55 | 1,89% | -11,75% |
| | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 1.511,97 | 0,69 | 1.503,84 | 0,67 | -4,30% | 6,36% |
| Xingó (178) | 17 | Baixo São Francisco | GISS-ER (run2) | 86,38 | 1,64 | 82,77 | 1,48 | -4,18% | -9,78% |
| | | | UKMO-HadCM3 (run1) | 91,49 | 2,22 | 113,81 | 3,63 | 24,39% | 63,52% |
| | | | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 94,14 | 1,96 | 102,25 | 2,24 | 8,61% | 14,33% |
| Serra da Mesa (270) | 18 | Alto Tocantins | CGCM3.1 (T47) (run2) | 836,40 | 0,77 | 837,02 | 0,75 | 0,07% | -1,92% |
| | | | PCM (run1) | 748,32 | 0,91 | 743,16 | 0,92 | -0,69% | 0,46% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 836,29 | 0,75 | 836,05 | 0,77 | -0,03% | 3,24% |
| Lajeado (273) | 19 | Tocantins | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 2.116,39 | 0,75 | 2.154,21 | 0,75 | 1,79% | -1,16% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 2.014,00 | 0,84 | 2.015,94 | 0,83 | 0,10% | -0,99% |
| | | | INGV-SXG (run1) | 1.915,37 | 0,96 | 1.873,44 | 0,98 | -2,19% | 2,37% |
| Tucuruí + Tucuruí II (275) | 20 | Tocantins | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 10.012,31 | 0,68 | 10.047,98 | 0,68 | 0,36% | 0,08% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 9.654,81 | 0,71 | 9.681,54 | 0,71 | 0,28% | 1,23% |
| | | | INGV-SXG (run1) | 10.066,31 | 0,62 | 10.123,91 | 0,64 | 0,57% | 2,53% |
| Belo Monte (288) | 21 | Xingó | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 9.053,92 | 0,73 | 9.025,66 | 0,74 | -0,31% | 1,94% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 8.533,37 | 0,71 | 8.563,65 | 0,75 | 0,35% | 6,35% |
| | | | INGV-SXG (run1) | 8.949,07 | 0,68 | 8.959,97 | 0,71 | 0,12% | 4,40% |
| Teles Pires (229) | 22 | Alto Tapajós | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 2.974,36 | 0,68 | 3.012,54 | 0,68 | 1,28% | 0,12% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 2.774,52 | 0,73 | 2.779,26 | 0,72 | 0,17% | -1,85% |
| | | | INGV-SXG (run1) | 2.932,15 | 0,83 | 2.913,03 | 0,85 | -0,65% | 1,98% |
| S. L. Tapajós (490) | 23 | Tapajós | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 10.867,01 | 0,61 | 10.798,43 | 0,65 | -0,63% | 6,08% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 10.492,40 | 0,71 | 10.498,78 | 0,60 | 0,06% | -15,79% |
| | | | INGV-SXG (run1) | 10.702,65 | 0,72 | 10.568,99 | 0,75 | -1,25% | 4,44% |
| Santo Antônio (287) | 24 | Madeira | CSIRO-Mk3.0 (run1) | 9.766,25 | 0,45 | 9.805,85 | 0,45 | 0,41% | 1,01% |
| | | | CGCM3.1 (T47) (run1) | 9.688,37 | 0,59 | 9.706,34 | 0,43 | 0,19% | -27,01% |
| | | | INGV-SXG (run1) | 9.830,65 | 0,39 | 9.827,73 | 0,40 | -0,03% | 1,43% |

5.4 Identificação dos índices climáticos que expliquem os padrões de variação

Este item apresenta os gráficos dos índice climático PDO, com a identificação de suas fases (fria e quente) (Figura 5.14), e as anomalias em relação a média de longo prazo para os índices climáticos Nino 1+2 (Figura 5.15), Nino 3 (Figura 5.16), Nino 4 (Figura 5.17) e Nino 3.4 (Figura 5.18) e os coeficientes de correlação linear de Pearson entre as vazões médias mensais naturalizadas dos postos do ONS e os índices climáticos acima descritos (Tabelas 5.7 a 5.8). As Figuras 5.19 a 5.23 apresentam a distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e os índices climáticos. Os resultados completos da correlação estão apresentados no Anexo Digital IV.

Figura 5.14 – Índice climático PDO médio

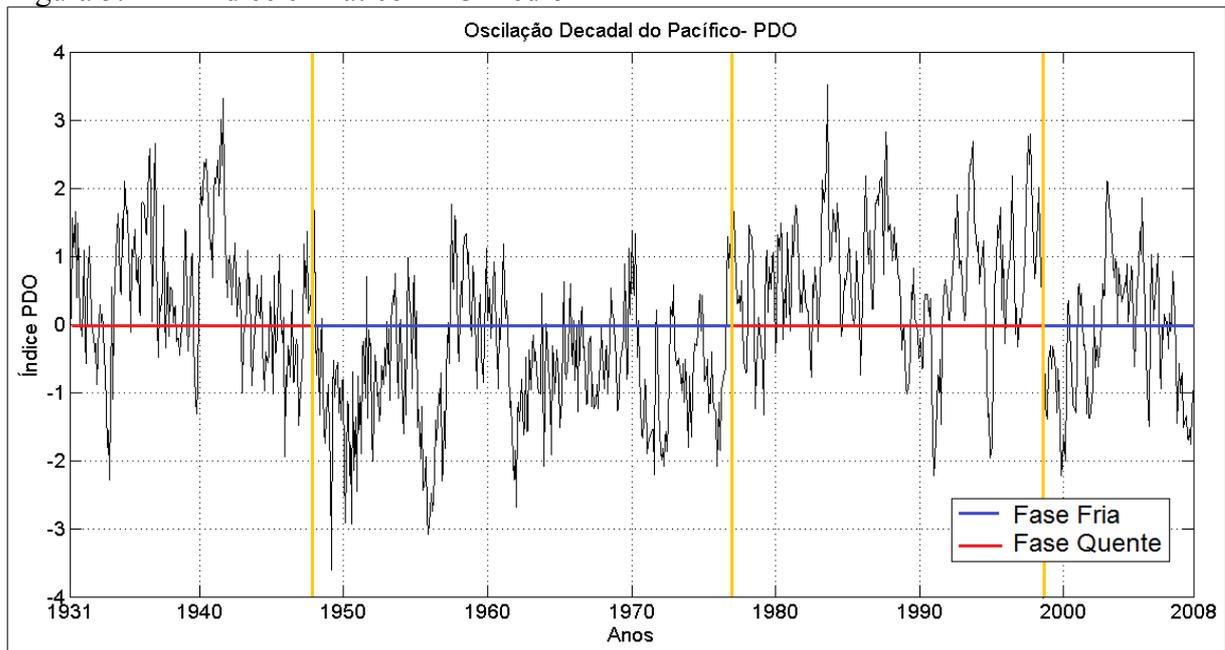


Figura criada pelo autor através dos dados do índice PDO.

Figura 5.15 – Anomalia do índices climático NINO 1+2

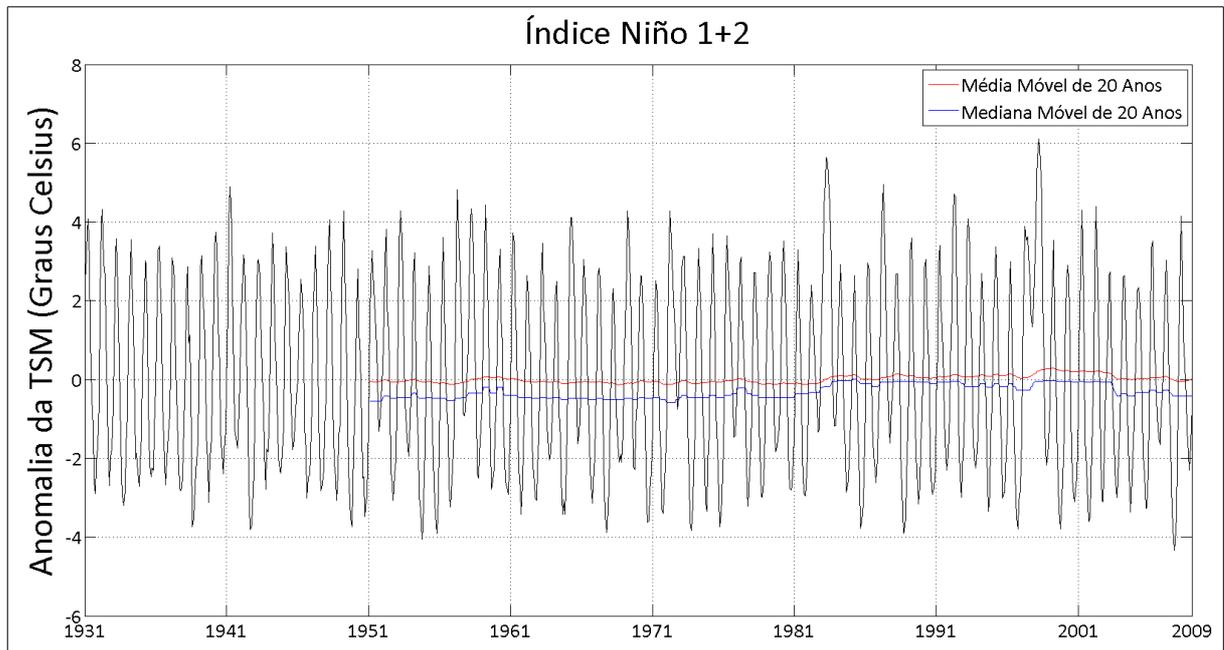


Figura criada pelo autor através dos dados dos índices Niño.

Figura 5.16 – Anomalia do índices climático NINO 3

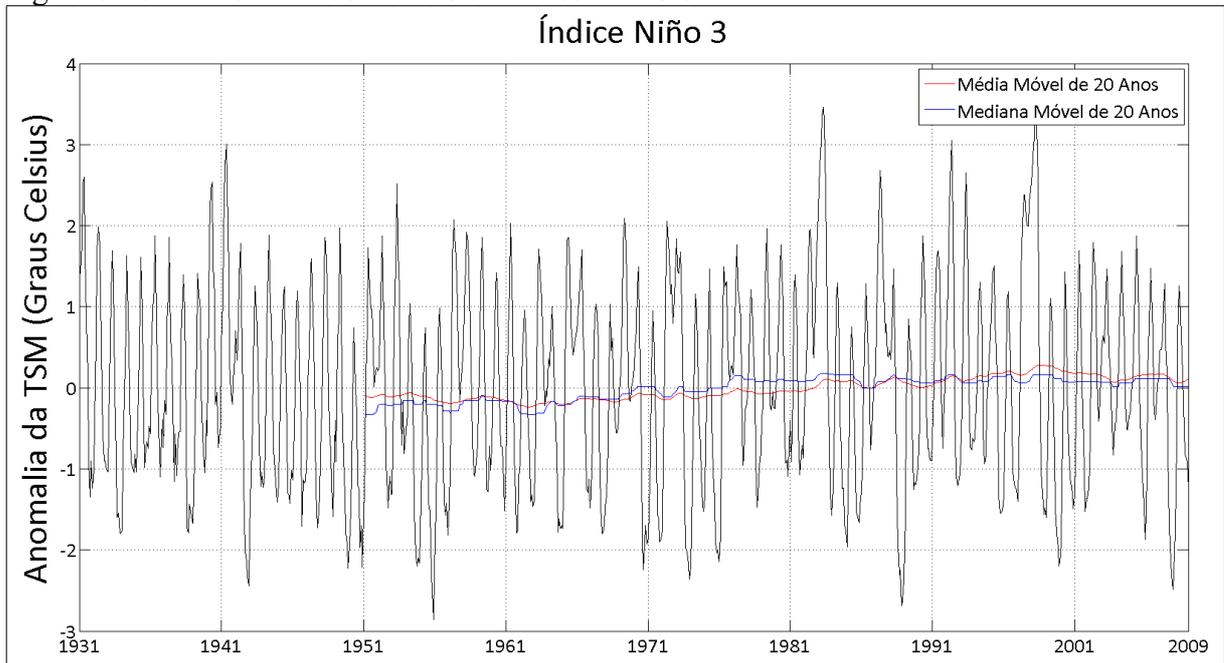


Figura criada pelo autor através dos dados dos índices Niño.

Figura 5.17 – Anomalia do índices climático NINO 4

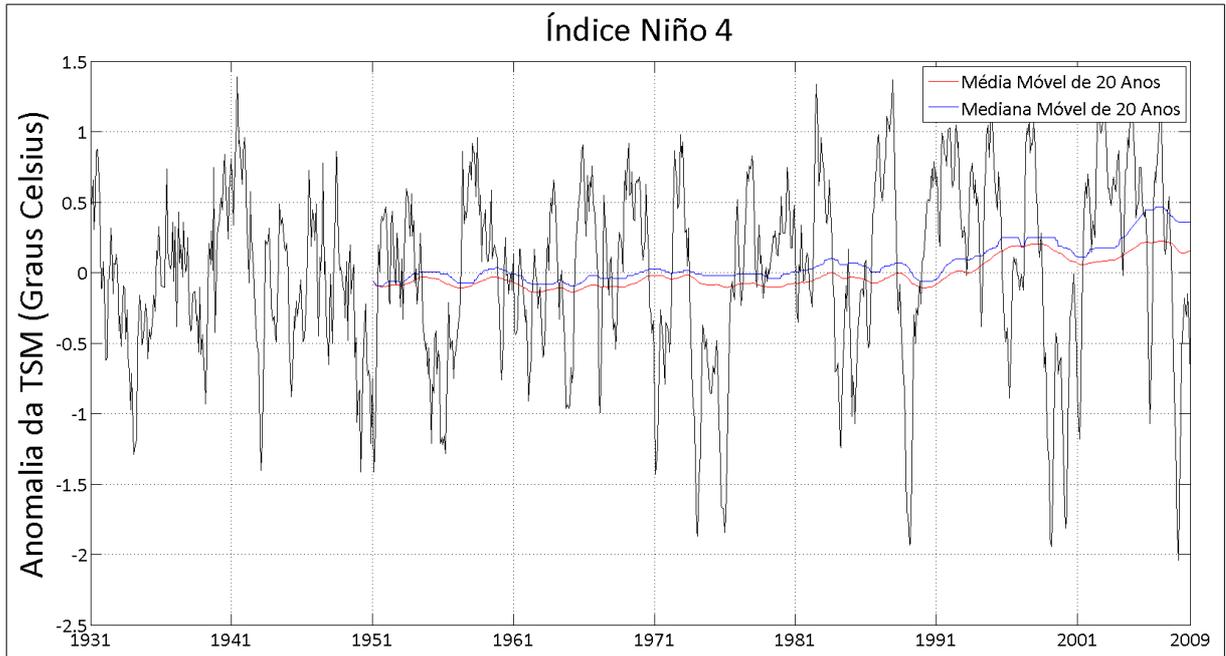


Figura criada pelo autor através dos dados dos índices Niño.

Figura 5.18 – Anomalia do índice climáticos NINO 3.4

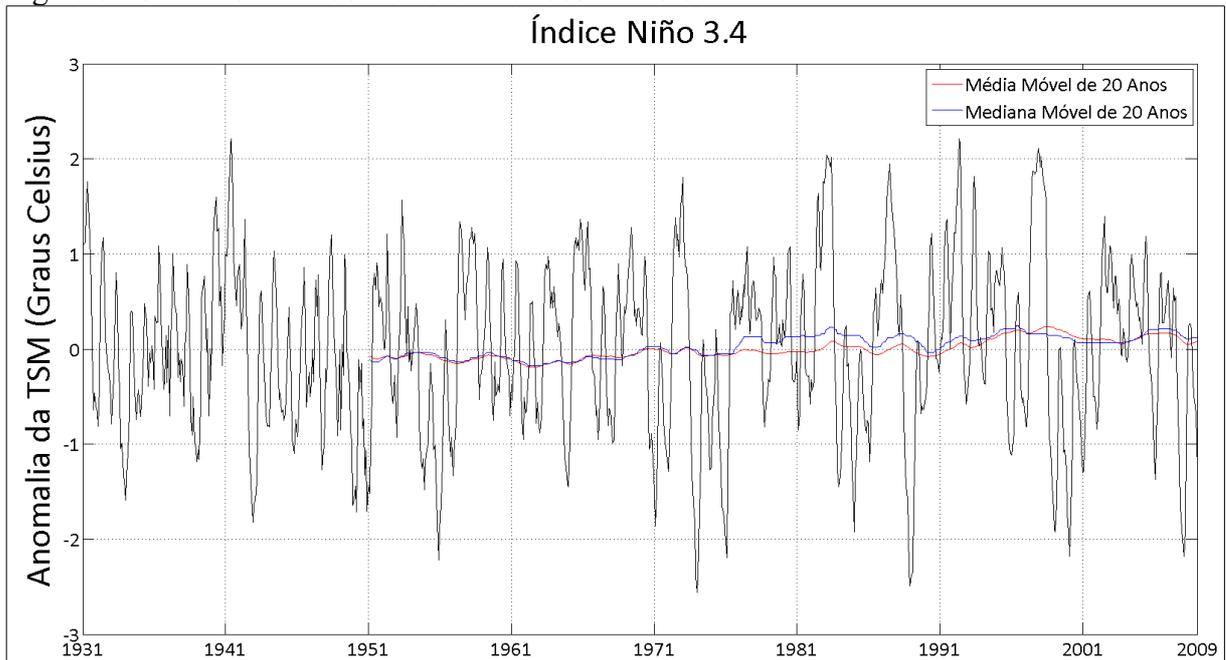


Figura criada pelo autor através dos dados dos índices Niño.

Tabela 5.8. Maiores Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as vazões naturalizadas das 21 bacias do SIN e os índices climáticos Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4 e o índice PDO

| Nome do Posto – ONS | Número do Posto - ONS | Número da Sub Bacia | Índice Niño1+2 | Índice Niño3 | Índice Niño4 | Índice Niño3.4 | Índice PDO |
|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------|--------------|--------------|----------------|------------|
| Emborcação | 24 | 1 | 0,621 | 0,325 | -0,129 | 0,047 | 0,038 |
| Nova Ponte | 25 | 2 | 0,643 | 0,341 | -0,170 | 0,047 | 0,031 |
| Itumbiara | 31 | 3 | 0,661 | 0,362 | -0,144 | 0,063 | 0,055 |
| São Simão | 33 | 4 | 0,677 | 0,391 | -0,124 | 0,085 | 0,088 |
| Furnas | 6 | 5 | 0,602 | 0,294 | -0,152 | 0,022 | 0,091 |
| Água Vermelha | 18 | 6 | 0,665 | 0,372 | -0,155 | 0,067 | 0,124 |
| N. Avanhadava | 242 | 7 | 0,580 | 0,328 | -0,134 | 0,064 | 0,136 |
| Porto Primavera | 246 | 8 | 0,708 | 0,420 | -0,143 | 0,094 | 0,137 |
| Rosana | 63 | 9 | 0,317 | 0,218 | -0,015 | 0,097 | 0,114 |
| Itaipú | 266 | 10 | 0,663 | 0,431 | -0,085 | 0,139 | 0,175 |
| Santa Cecília | 125 | 11 | 0,639 | 0,307 | -0,248 | -0,021 | 0,056 |
| Salto Caxias | 222 | 12 | -0,035 | 0,049 | 0,112 | 0,104 | 0,095 |
| Ita | 92 | 13 | -0,190 | -0,030 | 0,170 | 0,110 | 0,103 |
| Dona Francisca | 114 | 14 | -0,269 | -0,045 | 0,238 | 0,156 | 0,127 |
| Três Marias | 156 | 15 | 0,533 | 0,214 | -0,165 | -0,039 | 0,037 |
| Sobradinho | 169 | 16 | 0,637 | 0,336 | -0,151 | 0,041 | 0,055 |
| Xingó | 178 | 17 | 0,658 | 0,373 | -0,145 | 0,068 | 0,071 |
| Serra da Mesa | 270 | 18 | 0,597 | 0,311 | -0,128 | 0,042 | 0,106 |
| Lajeado | 273 | 19 | 0,633 | 0,342 | -0,148 | 0,045 | 0,105 |
| Tucuruí + Tucuruí II | 275 | 20 | 0,774 | 0,573 | -0,119 | 0,213 | 0,151 |
| Santo Antônio | 287 | 24 | 0,849 | 0,658 | -0,118 | 0,279 | 0,149 |

Tabela 5.9. Grau de correlação linear entre as vazões naturalizadas das 21 bacias do SIN e os índices climáticos Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4 e o índice PDO

| Nome do Posto – ONS | Número do Posto - ONS | Número da Sub Bacia | Índice Niño1+2 | Índice Niño3 | Índice Niño4 | Índice Niño3.4 | Índice PDO |
|----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------|
| Emborcação | 24 | 1 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Nova Ponte | 25 | 2 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Itumbiara | 31 | 3 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| São Simão | 33 | 4 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Furnas | 6 | 5 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Água Vermelha | 18 | 6 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| N. Avanhadava | 242 | 7 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Porto Primavera | 246 | 8 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Rosana | 63 | 9 | Fraca | Fraca | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Itaipú | 266 | 10 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Santa Cecília | 125 | 11 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Salto Caxias | 222 | 12 | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca | Fraca (Negativa) | Fraca |
| Ita | 92 | 13 | Fraca (Negativa) | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca | Fraca |
| Dona Francisca | 114 | 14 | Moderada (Negativa) | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca | Fraca |
| Três Marias | 156 | 15 | Moderada | Fraca | Fraca (Negativa) | Fraca (Negativa) | Fraca |
| Sobradinho | 169 | 16 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Xingó | 178 | 17 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Serra da Mesa | 270 | 18 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Lajeado | 273 | 19 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Tucuruí + Tucuruí II | 275 | 20 | Forte | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Santo Antônio | 287 | 24 | Forte | Moderada | Fraca (Negativa) | Moderada | Fraca |
| Lajeado | 273 | 19 | Moderada | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Tucuruí + Tucuruí II | 275 | 20 | Forte | Moderada | Fraca (Negativa) | Fraca | Fraca |
| Santo Antônio | 287 | 24 | Forte | Moderada | Fraca (Negativa) | Moderada | Fraca |

Figura 5.19 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático Niño1+2

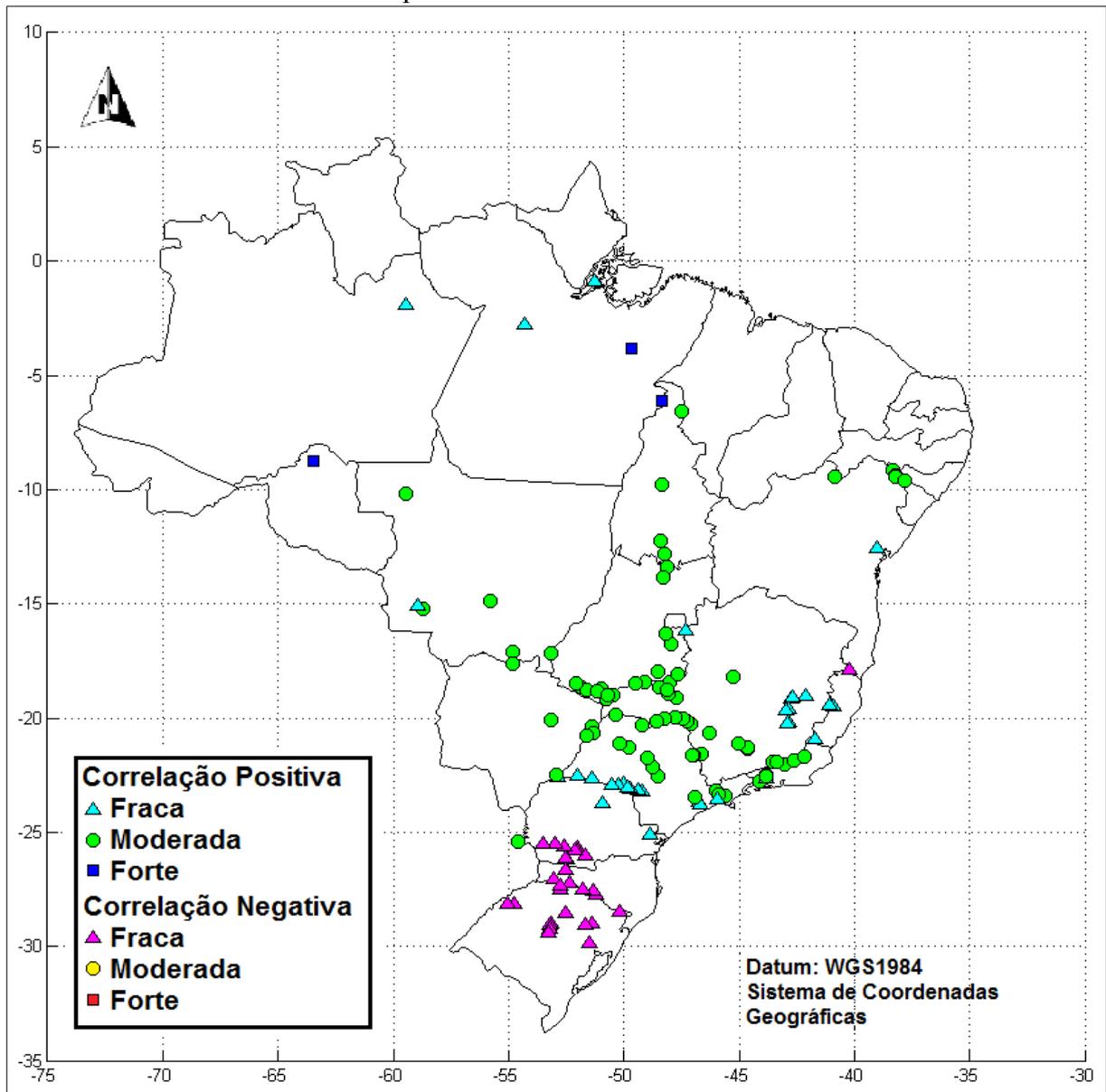


Figura criada pelo autor a partir dos resultados deste estudo.

Observa-se através da Figura 5.19 que existe uma correlação positiva moderada entre os valores do índice Niño1+2 e as vazões médias mensais naturalizadas em uma região que vai do estado do Rio de Janeiro, passa pelo sul de Minas Gerais e Norte de São Paulo e vai até o noroeste do do Mato Grosso e ao norte de Tocantins. Observa-se a presença de uma correlação moderada na fronteira entre os estados da Bahia, Alagoas, Sergipe e Pernambuco. Existe uma região de correlação negativa fraca na região central norte do Rio Grande do Sul e no oeste de Santa Catarina e sudoeste do Paraná.

Figura 5.20 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático Niño3

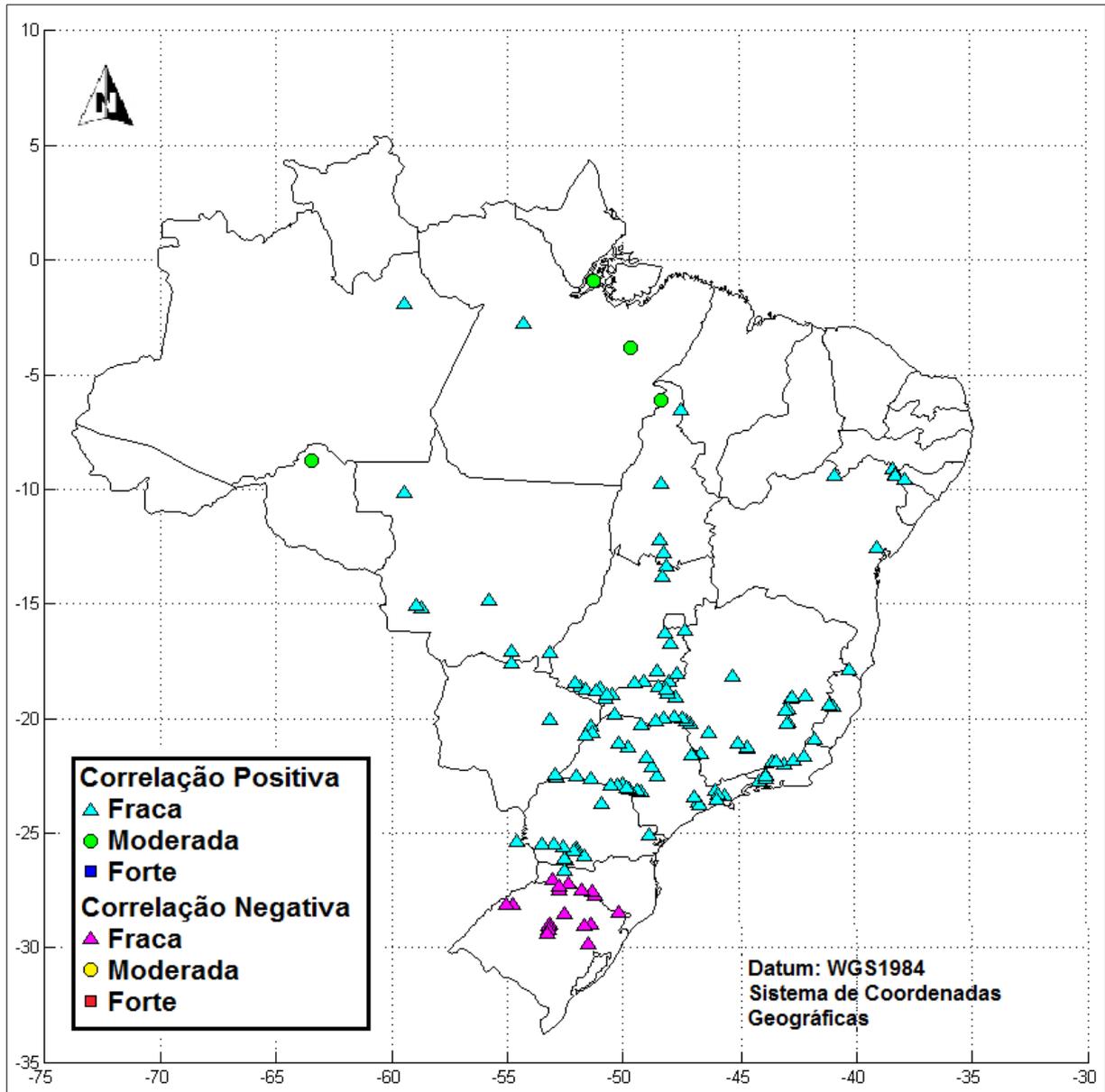


Figura criada pelo autor a partir dos resultados deste estudo.

Observa-se através da Figura 5.20 que exceto em algumas áreas da região Norte (correlação positiva moderada) e no Rio Grande do Sul (correlação negativa fraca), a correlação entre as vazões médias naturalizadas e o índice Niño3 é positiva de grau fraco.

Figura 5.21 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático Niño4

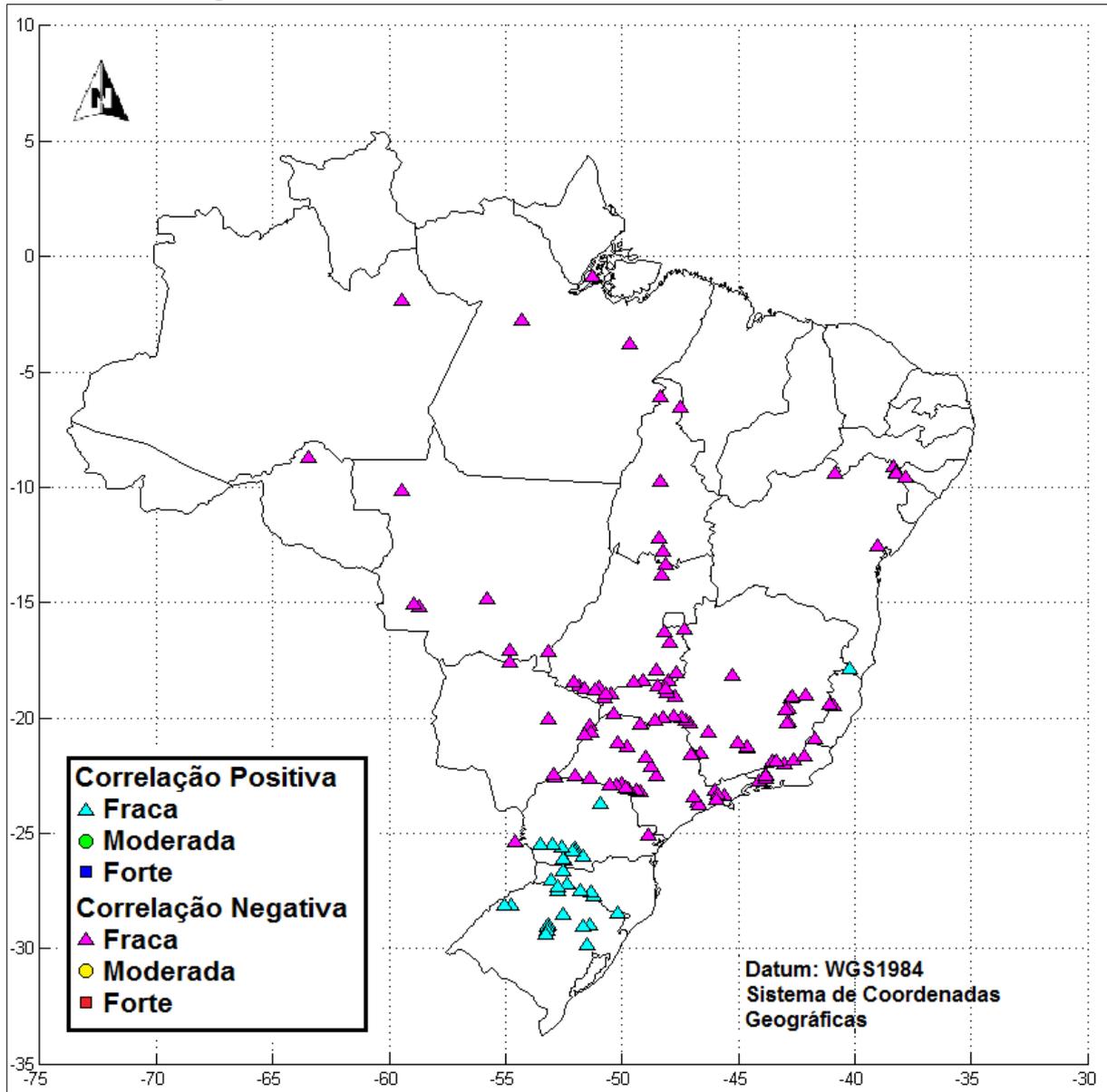


Figura criada pelo autor a partir dos resultados deste estudo.

Observa-se na Figura 5.21 que exceto na região Sul, onde a correlação é positiva de grau fraco, a correlação é negativa de grau fraco.

Figura 5.22 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático Niño4

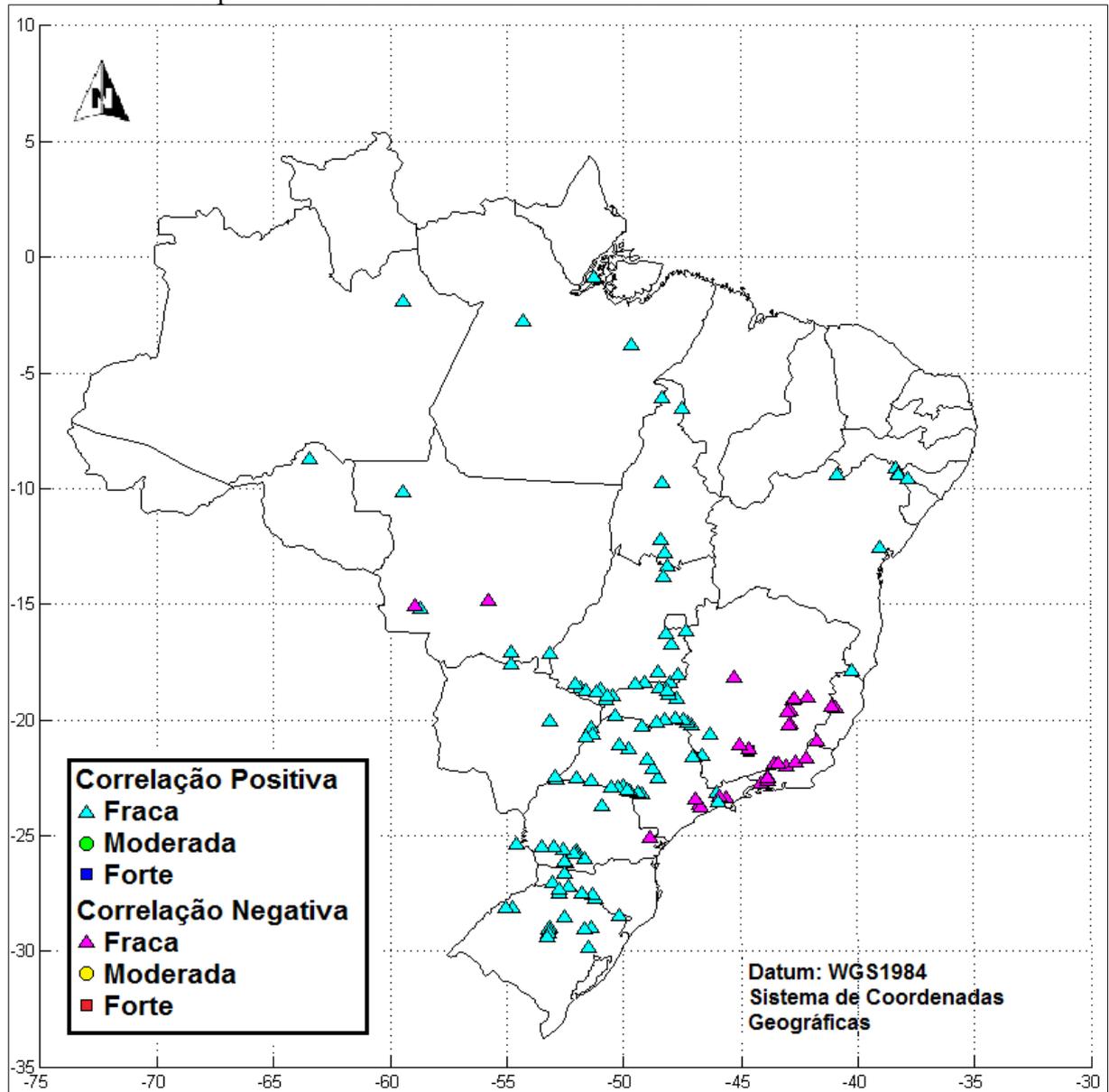


Figura criada pelo autor a partir dos resultados deste estudo.

Observa-se na Figura 5.22 que ocorre uma predominância de correlações positivas de grau fraco, exceto no leste de Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo, onde a correlação é negativa de grau fraco.

Figura 5.23 – Distribuição espacial dos graus de correlação entre as vazões médias naturalizadas dos postos do ONS e o índice climático PDO

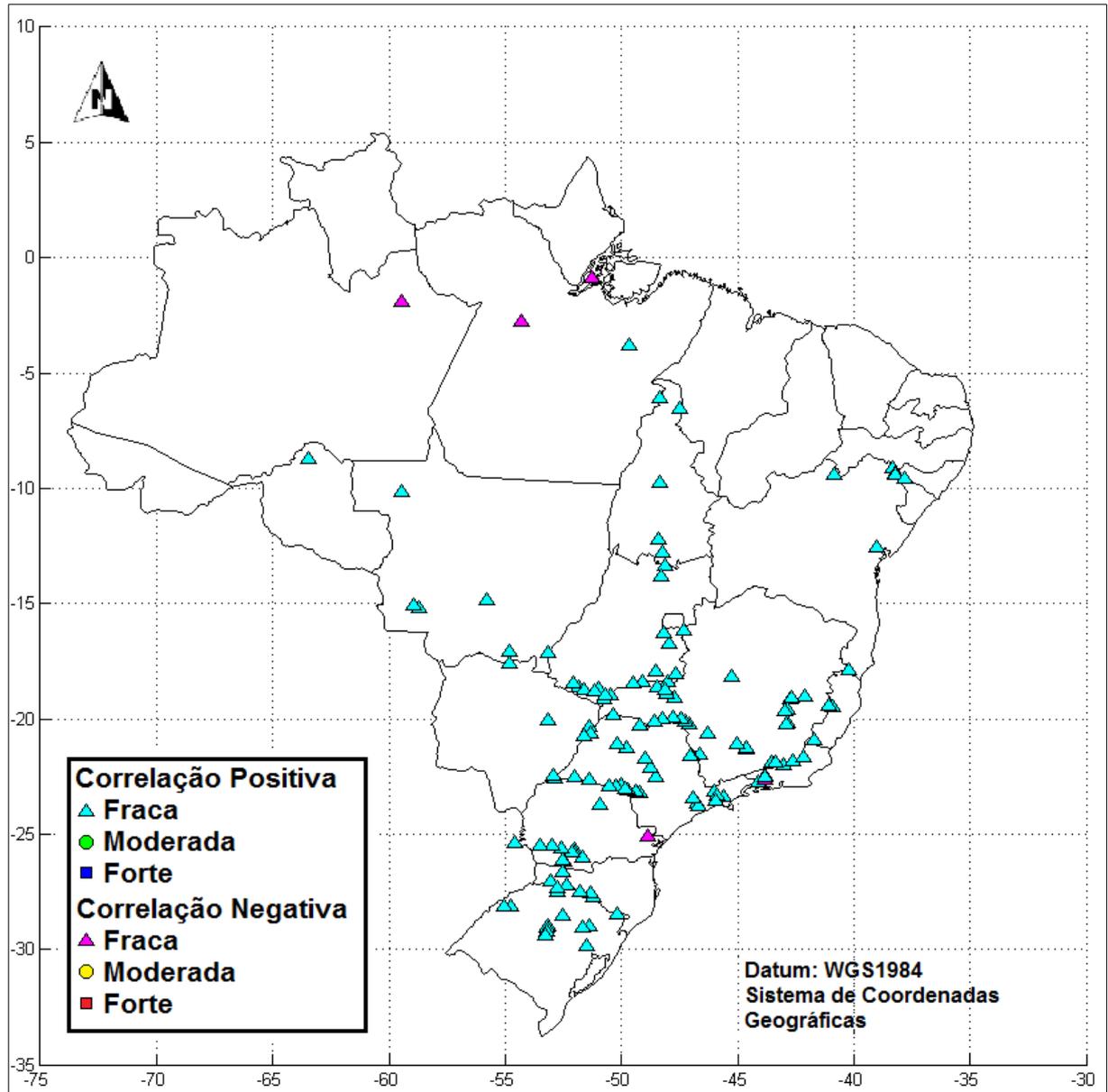


Figura criada pelo autor a partir dos resultados deste estudo.

A Figura 5.23 mostra que a correlação entre as vazões médias naturalizadas e o índice PDO é positiva de grau fraco em quase que na totalidade dos postos no País.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Avaliação dos padrões de variação e de tendências nas séries históricas de vazão

A análise de tendências, utilizando o método de Mann-Kendall-Sen, mostrou que existem uma tendência significativa de aumento das vazões nas estações localizadas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do País, enquanto que nas regiões norte e nordeste a tendência é de uma pequena queda (Figura 5.4). Observa-se que mesmo que o número de postos nas regiões Norte e Nordeste seja pequeno, a maioria apresenta uma tendência de queda nas vazões, confirmando a análise.

Os dez postos que apresentam as maiores tendências ou variabilidade de baixa frequência significativas de aumento das vazões estão apresentadas na Tabela 6.1, enquanto que os dez postos que apresentam as maiores tendências significativas de redução das vazões estão apresentadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.1. Postos do SIN com maiores tendências de aumento das vazões

| Posto | Declividade de Sen (m ³ /s/ano) | Vazão Média (m ³ /s) 1931-2010 | Varição Anual (‰) |
|-----------------------|--|---|-------------------|
| Taquaruçu (62) | 6,8 | 1.152,0 | 5,90 |
| Capivara (61) | 6,2 | 1.091,0 | 5,68 |
| Itaipú (266) | 57,2 | 10.239,0 | 5,59 |
| Rosana (63) | 7,0 | 1.293,0 | 5,41 |
| Baixo Iguaçu (81) | 7,6 | 1.447,0 | 5,25 |
| Salto Caxias (222) | 7,0 | 1.339,0 | 5,23 |
| Porto Primavera (246) | 26,8 | 7.259,0 | 3,69 |
| Jupia (245) | 21,6 | 6.451,0 | 3,35 |
| São Simão (33) | 7,6 | 2.410,0 | 3,15 |
| Ilha Solteira (34) | 13,1 | 5.321,0 | 2,46 |

Tabela 6.2. Postos do SIN com maiores tendências de redução das vazões

| Posto | Declividade de Sen (m ³ /s/ano) | Vazão Média (m ³ /s) 1931-2010 | Varição Anual (‰) |
|----------------------------------|--|---|-------------------|
| Aimorés (148) | -3,2 | 839,0 | -3,81 |
| Mascarenhas (144) | -3,7 | 973,0 | -3,80 |
| Antônio Dias + Sá Carvalho (183) | -0,3 | 85,0 | -3,53 |
| Baguari (141) | -2,0 | 572,0 | -3,50 |
| Salto Grande (134) | -0,5 | 155,0 | -3,23 |
| Porto Estrela (263) | -0,5 | 162,0 | -3,09 |
| Sobradinho (169) | -6,7 | 2.666,0 | -2,51 |
| Itaparica (172) | -6,3 | 2.746,0 | -2,29 |
| Camargos (1) | -0,3 | 133,0 | -2,26 |
| Itutinga (2) | -0,3 | 133,0 | -2,26 |

Observando-se as Tabelas 6.1 e 6.2, nota-se que os postos apresentados possuem uma tendência ou variabilidade de baixa frequência bastante significativa, com um aumento de até 5,90 % anuais para o posto de Taquaraçu (62) e uma redução de até 3,81 % anuais para o posto Aimorés (148).

6.2 Avaliação de extremos: cheias

A classificação dos gráficos permitiu identificar os tipos de comportamento mais comuns das séries de vazões. Observa-se na Tabela 5.3 e na tabela do Anexo Digital IV, que dependendo do tamanho da janela de ajuste, a classificação dos gráficos de um mesmo posto pode ser diferente, enquanto que a variação no período de retorno (100 e 1.000 anos) não muda a classificação do tipo de gráfico. A Tabela 6.3 apresenta o número de postos classificados por cada tipo para cada uma das janelas de ajuste e para os dois períodos de retorno utilizados.

Tabela 6.3. Classificação dos gráficos da avaliação de extremos – quantidade de gráficos classificados por tipo – período de retorno de 100 e 1.000 anos

| Número de postos classificados por cada tipo de gráfico – Períodos de Retorno de 100 e 1.000 anos | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| Janela (anos) | Tipo 1 | Tipo 2 | Tipo 3 | Tipo 4 | Tipo 5 | Tipo 6 | Sem Classificação |
| 20 | 18 | 44 | 2 | 2 | 11 | 13 | 1 |
| 30 | 16 | 47 | 0 | 3 | 14 | 9 | 2 |
| 40 | 14 | 60 | 1 | 4 | 3 | 6 | 3 |

Observa-se ainda, que a maioria dos postos foram classificados no tipo 2 – ascendente com patamar.

Observa-se, através das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 que nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, além das divisas entre os estados da Bahia, Alagoas, Sergipe e Pernambuco, existe uma concentração de gráficos classificados nos tipos 1 e 2 (ascendente e ascendente com patamar), independentemente da janela de ajuste. Nas outras regiões, a mudança da janela de ajuste afeta significativamente a forma do gráfico de cheias mudando a sua classificação.

6.3 Identificação dos índices climáticos que expliquem os padrões de variação

Observa-se na Figura 5.14 que existe uma mudança de polaridade na PDO no final da década de 1970, mais precisamente no ano de 1977. Observa-se ainda, que entre os anos de 1982 e 1985 os valores do índice PDO são bastante elevados, coincidindo com com a mudança de patamar de vazões observado na maioria dos gráficos de vazões extrema dos

tipos 2 e 4, mostrados nas Figuras 5.6 e 5.8 e no Anexo Digital III. Isto pode ser um indício que estas mudanças de patamar podem ser devidas a uma variabilidade de baixa frequência.

Observa-se através da Tabela 5.9 que para as 21 bacias do SIN, os índices Niño1+2 e Niño3 apresentaram uma maioria de seus postos com uma correlação positiva entre moderada e forte, enquanto que o índice Niño 3.4 e o índice PDO apresentaram uma correlação positiva fraca. Já o índice Niño4 apresentou uma maioria de graus de correlação negativa fraca.

6.4 Avaliação dos modelos de mudança climática para as bacias: Vazões

Os resultados para os modelos do século XX (Tabela 5.5) mostram que as vazões médias dos mesmos apresentaram valores similares aos valores de vazões médias observadas (CRU), devido ao ajuste de escala, exceto no caso de 13 modelos (dentre os 72 avaliados) em 9 bacias, que apresentaram uma variação acima de 5% em módulo (entre -10,02% e +13,62%). No caso da variabilidade, os modelos não apresentaram o mesmo desempenho das vazões médias observadas (CRU), pois os valores dos coeficientes de variação (C. V.) dos modelos apresentam uma variação percentual maior em relação aos coeficientes de variação do CRU do que na comparação entre as vazões médias dos modelos e as vazões observadas, sendo que apenas 11 modelos (dentre os 72 avaliados) em 10 bacias apresentaram uma variação abaixo de 5% em módulo.

Os resultados das comparações entre as vazões médias dos modelos para o século XX (20C3M) e dos modelos para o cenário A1B do século XXI (Tabelas 5.6 e 5.7) mostraram que dos 72 modelos avaliados, 38, ou seja 52,8%, apresentaram um pequeno aumento nos valores da vazão média, enquanto que 34, ou seja, 47,2% apresentaram uma pequena redução nos valores. Este resultado já era esperado, uma vez que a utilização do ajuste de escala entre as precipitações dos modelos com base nas precipitações observadas tende a aproximar as vazões médias dos modelos às vazões médias observadas. Os coeficientes de variação dos modelos apresentaram uma variação positiva em 44, ou seja, 66,1% dos modelos apresentados, indicando que na maioria dos modelos do cenário A1B para o século XXI há um aumento na variabilidade das vazões médias.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados apresentados para as médias e medianas móveis, além do método LOWESS, mostra que existe uma variabilidade de alta frequência, com período de poucos anos, nas séries de vazões naturalizadas estudadas.

Os resultados mostram que existe uma tendência de aumento, ou variabilidade de baixa frequência, nas vazões nos postos das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, enquanto que existem uma tendência de redução, ou variabilidade de baixa frequência, nas vazões das regiões Norte e Nordeste, segundo o método de Mann-Kendall-Sen. Esta tendência de redução nas vazões nas regiões Norte e Nordeste pode resultar em uma perda da capacidade de produção de hidroeletricidade nestas regiões na janela de tempo considerada, no caso de ser uma tendência. Já no caso de ser uma variabilidade de baixa frequência, esta perda só ocorrerá até o restabelecimento do atual patamar de vazões após o período de baixa nas vazões. Por outro lado, a tendência de aumento, ou variabilidade de baixa frequência, das vazões nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste pode suprimir esta possível perda, caso se considere que estas tendências sejam permanentes, uma vez que a maior parte da produção de hidroeletricidade no País proveem destas regiões.

A análise da transformada em ondeletas mostrou que existe uma variabilidade de baixa frequência com período entre 40 e 80 anos na maioria dos postos analisados. Observou-se uma mudança de fase das vazões extremas, no caso dos gráficos classificados no tipo 2 (ascendente com patamar), entre os anos de 1983 e 1985, coincidindo com um período de altos valores do índice climático PDO. Foi detectado, também, uma variabilidade de média frequência com período entre 10 e 20 anos na maioria dos postos.

Na análise de extremos de vazões, as vazões com períodos de retorno igual a 100 e 1.000 anos apresentaram uma mudança de fase com uma certa defasagem em relação às mudanças de fase observadas na análise da transformada em ondeletas. Esta defasagem pode ser explicada pelas janelas de ajuste (20, 30 e 40 anos) à distribuição de Gumbel, onde uma mudança de patamar nas vazões será detectada apenas após o decorrer de alguns anos, uma vez que os pontos plotados nos gráficos correspondem ao final da janela de ajuste. Observou-se uma constância na forma dos gráficos dos tipos ascendente e ascendentes com patamar, cujos postos estão localizados nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Tocantins e no sul do estado de Goiás, indicando que nestes postos a mudança da janela de ajuste é pouco significativa na avaliação dos gráficos do estudo de cheias.

Identificou-se que dos cinco índices analisados (Niño1+2, Niño3, Niño4, Niño3.4 e índice PDO), apenas o índice Niño1+2 apresentou correlação linear positiva moderada com

as vazões médias mensais naturalizadas dos postos do ONS. Resalta-se que como o efeito de um fenômeno climático pode demorar mais de um mês para se manifestar em uma determinada região, esta correlação sem utilizar uma defasagem no tempo nas séries de vazões, pode estar levando a resultados errôneos.

Os resultados obtidos para as vazões médias dos modelos AOGCMs do IPCC para o século XX (20C3M) indicaram que o ajuste de escala, através da função gama, apresentou um bom desempenho em termos de vazões médias, com apenas 13 modelos (dentre os 72 avaliados) apresentando um desvio maior do que 5% em relação às vazões médias observadas do CRU. Apesar disso, a discrepância entre os valores do coeficiente de variação, onde apenas 11 modelos (dentre os 72 avaliados) apresentaram um desvio menor do que 5% em relação ao coeficiente de variação das vazões observadas do CRU, indicando que o desempenho do ajuste não pode se limitar à comparação entre as vazões médias.

Os resultados obtidos para as vazões dos modelos AOGCMS para o cenário A1B do século XXI mostram os modelos apresentam uma média similar as das vazões em relação ao século XX (20C3M), resultado já esperado devido ao ajuste de escala através da função gama, exceto no caso da bacia do Baixo São Francisco (posto Xingó (178)), onde a variação da vazão média ficou acima dos 5% para os modelos UKMO-HadCM3(run1) e CSIRO-Mk3.0(run1). Os resultados mostram ainda que a maioria (61,1%) dos modelos apresentaram um aumento nos valores do coeficientes de variação, variando entre um aumento de 0,08% e 63,5%. Estes resultados mostram que segundo esses modelos, no cenário A1B do século XXI haverá um aumento na variabilidade das vazões médias na maioria das bacias do Sistema Interligado Nacional. Por outro lado, os modelos aplicados a uma mesma bacia apresentaram valores de variação do C.V. inconsistentes, como por exemplo os modelos UKMO-HadCM3(run1), GISS-ER (run2) e CSIRO-Mk3.0(run1), aplicados ao posto Xingó(178) da bacia do Baixo São Francisco, que apresentaram uma variação do C.V. de -9,78%, 63,52% e 14,33% respectivamente. A inconsistência destes valores de variação do C.V. para os três modelos de uma mesma bacia, leva a conclusão de que a escolha dos modelos melhores classificados para cada bacia de acordo com a precipitação não pode ser aplicada para a análise das vazões geradas pelo modelo SMAP, uma vez que os resultados são inconsistentes para uma mesma bacia.

Sem levar em conta o aumento ou a redução nas vazões médias, o aumento na variabilidade das vazões pode reduzir a vazão regularizada pelos reservatórios das hidroelétricas do Sistema Interligado Nacional. Esta redução pode afetar a produção de

energia elétrica no País. Algumas formas de contornar este problema são a construção de novos reservatórios de acumulação e a diversificação da matriz energética nacional.

7.1 Recomendações para trabalhos futuros

- Analisar os modelos AOGCMs que melhor se ajustem às precipitações observadas do século XX no para cada uma das bacias do Sistema Interligado Nacional;
- No estudo de cheias, ajustar as vazões máximas às distribuições de extremos que melhor se ajustarem em cada caso, como a distribuição de Gumbel, Log-Pearson Tipo III, Weibull, dentre outras;
- Analisar outros índices climáticos;
- Aplicar os métodos de correlação entre os dados dos índices climáticos e os dados, defasados em alguns meses, de vazões e precipitações;
- Utilizar outros métodos de correlação para identificar os índices climáticos que melhor expliquem as mudanças de comportamento nas vazões;
- Recalibrar os parâmetros do SMAP, principalmente o escoamento de base inicial ($EB_{inicial}$) e a taxa de umidade inicial ($TU_{inicial}$), com as vazões naturalizadas dos postos do SIN;
- Avaliar os impactos econômicos e operacionais do aumento da variabilidade das vazões no cenário A1B do IPCC para o século XXI;
- Analisar os outros cenários propostos pelo IPCC;
- Analisar os processos físicos que influenciam as teleconexões entre os fenômenos climáticos e os regimes pluviais nas bacias do SIN.

8 BIBLIOGRAFIA

- ALBURQUERQUE, I. F., FERREIRA, J. N., SILVA, M. G., DIAS, M. F. Tempo e Clima no Brasil. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2009;
- ALEXANDRE, G. R., BAPTISTA, M. B., NAGHETTINI, M., **Estudo para Identificação de Tendências do Regime Pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a Partir de Métodos Estatísticos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.5, nº 2, p. 115-126, 2010;
- ALVES, B. C. C.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVEIRA, C.S. **Análise de Tendências e Padrões de Variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS)**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011;
- ANEEL. **Banco de Geração de Informações – Capacidade de Geração do Brasil**. <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>> . Acesso em 10/01/2012;
- BERGMAN, J. **Temperature of Ocean Water** <<http://www.windows2universe.org/earth/Water/temp.html>>. Acesso em 04/04/2012. Última modificação em 16/02/2011.
- BEVEN, K., O'Connell, P. E. **On the role of physically-based distributed modelling in hydrology**. Report N. 81, Institute of Hydrology, Wallingford, Reino Unido, 1982;
- BOLZAN, M. J. A., **Análise da transformada em ondas aplicadas em sinal geofísico**. Revista Brasileira de Ensino de Física. Volume 26 Nº 1, 37-41, 2004;
- BURN, D. H., ELNUR, M. A. H., **Detection of hydrologic trends and variability**. Journal of Hydrology, v. 255, p. 107-122, 2002;
- CAMARGO, L. G. B. C., **O Setor Elétrico Brasileiro e sua Normatização Contemporânea**. Dissertação de Bacharelado em Direito. Universidade Católica de Santos. Santos, 2005;
- CANE, M. A., **Decadal predictions in demand**. Nature Geoscience, Advance online publication, p. 231-232, 2010;
- CLEVELAND, W. S., **Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots**. Journal of the American Statistical Association, v.74, p. 829-836, 1979;
- CLIMATE PREDICTION CENTER, **Frequently Asked Questions About El Niño and La Niña** <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml> . Acesso em 20/11/2011;
- CHU, P.-S., YU, Z.-P., HASTENRATH, S., **Detecting Climate Concurrent with Deforestation in the Amazon Basin: Which Way Has It Gone?** Bulletin of the American Meteorological Society, v. 75, n. 4, p. 579-583, 1994;
- CITEAU, J.; BERGES, J.; DEMARCQ, H.; MAHÉ, G. **The watch of ITCZ migrations over tropical Atlantic as an indicator in drought forecast over Sahelian area**. Ocean-Atmosphere Newsletter, v. 45 p. 1-3, 1988;

CONFALONIERI, U. E. C. **Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil**. Revista Terra, v. I, n. 20, p. 193-204, 2003;

DETTINGER, M. D., BATTISTI, D. S., GARREAUD, R. D., McCABE Jr., G. J., BITZ, C. M. **Interhemispheric effects of interannual and decadal ENSO-like climate variations on the Americas**. In: Present and Past Interhemispheric Climate Linkages in the Americas and their Societal Effects. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2000;

DINIZ, L. S. **Regionalização de Parâmetros de Modelo Chuva-Vazão Usando Redes Neurais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008;

FARGE, M. **Wavelet transforms and their applications to turbulence**. Annual Rev. Fluid Mech., v. 24, p. 395-457, 1992;

FINLEY, T., JOACHIMS, T. **Supervised k-Means Clustering**. Computing and Information Science Technical Reports. Cornell University. 2008.

GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C. **Global Change and Regional Impacts**. Ed. Springer, 2003;

GERREAUD, R. D., BATTISTI, D. S. **Interannual ENSO and interdecadal ENSO-like variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation**. Journal of Climate, v. 12, p. 2.113-2.123, 1999;

GHIL, M., VAUTARD, R., **Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series**. Nature, v. 350, p. 324-327, 1991;

GUEDES, R.L., MACHADO, L.A.T., SILVEIRA, J.M.B., ALVES, M. A. S. e WALTZ, R.C. **Trajatórias dos sistemas convectivos sobre o continente americano**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8:77-80. Anais II. Belo Horizonte, 1994;

HAMED, K. H., **Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data**. Journal of Hydrology v. 365, p. 86-94, 2009;

HARE, S. R. **Low frequency climate variability and salmon production**. Dissertação de Ph.D. University of Washington, Seattle, WA, 1996;

HASTENRATH, S., L. HELLER, **Dynamics of Climate Hazards in Northeast Brazil**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society v. 103, p. 77-92, 1977;

HELSEL, D. R., HIRSCH, R. M., **Statistical methods in water resources: U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations**. Capítulo A3. Disponível em <<http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3/>>. 2002;

HIRSCH, R. M., SLACK, J. R., SMITH, R. A., **Techniques of trend analysis for monthly water quality data**. Water Resources Research, v.18, p. 107-121, 1982;

HAYLOCK, M., PETERSON, T., ALVES, L., AMBRIZZI, T., ANUNCIACÃO, M., BAEZ, J., BARROS, V., BERLATO, M., BIDEGAIN, M., CORONEL, G., CORRADI, V., GARCIA, V., GRIMM, A., KAROLY, D., MARENGO J. A., MARINO, M., MONCUNILL, D., NECHET, D., QUINTANA, J., REBELLO, E., RUSTICUCCI, M., SANTOS, J., TREBEJO, I., VINCENT, L., **Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960-2000**

and links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, v. 19, I. 8, p. 1490-1512, 2006;

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2007a;

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report (AR4).** Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2007b;

KAHYA, E., KALAYCI, E., **Trend analysis of streamflow in Turkey.** *Journal of Hydrology* v. 289, p. 128-144, 2004;

KENDALL, M. G., **Rank Correlation Measures.** Ed. Charles Griffin. London, 1975;

KENDALL, M. G., GIBBONS, J. D., **Rank Correlation Methods.** 5a ed. Ed. Griffin. London, 1990;

KEPPENE, C. L., GHIL, M., **Adaptative Filtering and Prediction of the Southern Oscillation Index.** *Journal of Geophysical Research*, v. 97, N. D18, p. 20.449 – 20.454, 1992;

KOUSKY, V. E., CAVALCANTI, I. F. A., **Eventos Oscilação do Sul / El Niño: Características, evolução e anomalias de precipitação.** *Ciência e Cultura*, v. 36 (11), p. 1888-1899, 1984;

LALL, U., MANN, M., **The Great Salt Lake: A barometer of interannual climatic variability.** *Water Resource Research*, v. 35, p. 1143-1154, 1995;

LOPES, J. E., **Contato pessoal,** 2011;

LOPES, J. E. G., BARROS, M. T. L., ZAMBON, R. C., FRANCATO, A. L., BARBOSA, P. S. F., ZANFELICE, F. R., CORRÊA, F. I. M., GOMES, L. V., DALL'ORTO, C. E. **Previsão Climática de Vazões para o Sistema Interligado Nacional.** II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, 2008;

MADOX, R.A. **Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes.** *Mon. Weather Rev.*, v. 111, p. 1475-1493, 1983;

MANN, H. B., **Non-parametric tests against trend.** *Econometrica* 13, 245-259;

MANTUA, N. J., HARE, S. R. **The Pacific Decadal Oscillation.** *Journal of Oceanography*, v. 58, p. 35-44, 2002;

MANTUA, N. J., HARE, S. R., ZHANG, Y., WALLACE, J. M., FRANCIS, R. C. **A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon productions.** *Bulletin of The American Meteorological Society*, v. 78, p. 1069-1079, 1997;

MARENGO, J. A., **Interdecadal Variability and Trends of Rainfall Across the Amazon Basin.** *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, p. 79-96, 2004;

MARENGO, J. A., VALVERDE, M. C. **Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de Clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4.** *Revista Multiciência*, n. 9, Campinas-SP, 2007;

MILLER D.; FRISCH, J.M. **Mesoscale convective complexes in the Western Pacific region**. Mon. Weather Rev, v.119, p. 2978-2992. 1991;

MILLY, P. C. D., BETANCOURT, J., FALKENMARK, M., HIRSCH, R. M., KUNDZEWICZ, Z. W., LETTENMAIER, D. P., STOUFFER, R. J. **Stationarity is Dead: Whither Water Management?**. Science, v. 319, 2008;

MOURA, E. da S., SANTOS, C. A. M. dos, SILVA, D. F. da, **Deteção de Ciclos e Escalas Temporais na Vazão do Rio Salgado Através de Análises de Onduletas**. II Congresso de Agroecologia, 2010;

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Learning to Predict Climate Variations Associated with El Niño and the Southern Oscillation**. National Academy Press, Washington D.C., 1996;

NOBRE, P., MELO, A. B. C. de, **Variabilidade Climática Intrasazonal Sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000**. Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática, CPTEC/INPE, 2001;

NUNES, L. H., LOMBARDO, M. A. **A questão da variabilidade climática: Uma reflexão crítica**. Revista do Instituto Geológico, V. 16 (½), p. 21-31, São Paulo, 1995;

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas na América do Sul e convecção na Amazônia**. Dissertação de Mestrado em meteorologia - INPE, São José dos Campos, 1986;

ONS. Atuação do ONS sobre o Sistema Interligado Nacional. <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/index.aspx> . Acesso em 10/01/2012;

REBELLO, E. R. G., **As Oscilações Decadais do Pacífico e suas possíveis influências no estado do Rio Grande do Sul**. Anais do XIV VBMET, Florianópolis, 2006;

SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B. **Análise dos índices de extremos para o semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 22, n. 3, p. 303-312, 2007;

SANTOS, C. A. C. dos, BRITO, J. I. B. De, RAO, T. V. R., MENEZES, H. E. A. **Tendências dos Índices de Precipitação no Estado do Ceará**. Revista Brasileira de Meteorologia v.24, n.1, 39-47, 2009;

SHENOI, B. A., **Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design**. John Wiley e Sons, 2005;

SILVA, D. F. da, SOUZA, F. de A. S. de, KAYANO, M. T., GALVÍNCIO, J. D., **Influência da Variabilidade Climática Global e de suas Escalas Temporais sobre a Precipitação no Alto Mundaú (PE)**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 2, n. 3, p. 64-82, Recife-PE, 2010;

SILVEIRA, C. da S., SOUZA FILHO, F. de A. de, LÁZARO, Y. M. C., FERNANDES, W. de S., **Avaliação de Desempenho dos Modelos de Mudança Climática do IPCC-AR4 Quanto a Sazonalidade e os Padrões de Variabilidade Interanual da Precipitação Sobre a América do Sul**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió, AL, 2011;

SLEIMAN, J., SILVA, M. E. S. **Padrões Atmosféricos Associados a Eventos Extremos de Precipitação sobre a Região Sul do Brasil**. Revista do Departamento de Geografia, v. 20, p. 93-109, 2010;

SOUSA, A. J. da S., FERREIRA, E. A., SOUSA, J. R. A. De, ROLIM, P. A. M. **A Oscilação Decadal do Pacífico e sua Influência na Precipitação de Goiânia – GO**. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, 2010;

SPERLING, V., FERNANDES, V., MARQUES, J. R., **Relação Entre a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Precipitação de Verão no Rio Grande do Sul**. IV Simpósio Internacional de Climatologia, 2011;

STRECK, N. A., BURIOL, G. A., HELDWEIN, A. B., GABRIEL, L. F., PAULA, G. M. de, **Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a Oscilação Decadal do Pacífico**. Pesq. agropec. bras., v. 44, n. 12, p. 1553-1561, Brasília, 2009;

TORRENCE, C., COMPO, G. P. **A Practical Guide to Wavelet Analysis**. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1998;

USAID – United States Agency for International Development. **Adapting to climate variability and change: A guidance manual for development planning**. Washington, DC, 2007;

WALPOLE, R. E., MYERS, R. H., MYERS, S. L., YE, K., **Probability e Statistics for Engineers e Scientists**. Ed. Pearson Prentice Hall, 8 ed., 2007;

WENG, H., LAU, K.-M. **Wavelets, Period Doubling and Time-Frequency Localization with Application to Organization of Convection over the Tropical Western Pacific**. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 51, No. 17, p. 2523-2541, 1994;

WHITE, W. B. , CAYAN, D. R. **Quasi-periodicity and global symmetries in interdecadal upper ocean temperature variability**. Journal of Geophysics Research, v. 103, p. 21.335-21.354, 1998;

WILKS, D. S., **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction**. Academic Press, 1995;

WOOD, E. F. **Heterogeneity and scaling land-atmospheric water and energy fluxes in climate systems**. In: Space and time scale variability and interdependencies in hydrological processes. Cambridge University Press, p. 3-19, 1995;

YANG, Y. J. **Redefine Water Infrastructure Adaptation to a Nonstationary Climate**. Journal of Water Resources Planning and Management. Editorial, p. 297-298, 2010;

ZHANG, Y. **An observation study of atmosphere-ocean interaction in the northern oceans on interannual and interdecadal time-scales**. Dissertação de Ph.D. University of Whashington, Seattle, WA, 1996;

9 ANEXOS

Os anexos digitais estão disponíveis através dos seguintes endereços <https://www.dropbox.com/sh/2bebnt02811baax/O_RyYZrvzj> e <<http://goo.gl/awJXT>> disponibilizados pelo autor. Os anexos digitais são:

- Anexo Digital I – Análise de Tendências
- Anexo Digital II – Análise da Transformada em Ondeletas
- Anexo Digital III – Avaliação de Extremos de Vazões
- Anexo Digital IV – Correlação das Vazões Naturalizadas com os Índices Climáticos.