

CLEBER ASSIS DOS SANTOS

**IMPACTOS DA PRECIPITAÇÃO E DO USO DO SOLO NAS TENDÊNCIAS
DAS VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Santos, Cleber Assis dos, 1987-
S237i Impactos da precipitação e do uso do solo nas tendências
2018 das vazões na bacia hidrográfica do Rio Grande / Cleber Assis
dos Santos. – Viçosa, MG, 2018.
 xiv, 101f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Roberto Avelino Cecilio.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.88-101.

1. Solo - Uso. 2. Medidores de fluxo. 3. Precipitação
(Meteorologia). 4. Bacias hidrográficas - Brasil. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola.
II. Título.

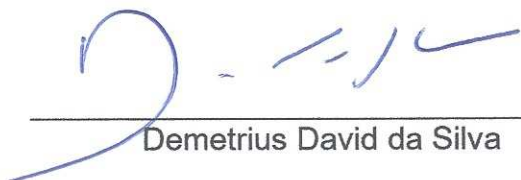
CDD 22 ed. 631.47

CLEBER ASSIS DOS SANTOS

**IMPACTOS DA PRECIPITAÇÃO E DO USO DO SOLO NAS TENDÊNCIAS
DAS VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 16 de fevereiro de 2018.



Demetrius David da Silva



Sidney Sára Zanetti



Roberto Avelino Cecílio
(Orientador)

À minha mãe Eliana Assis e ao meu pai Alfredo Santos (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Eliana Mendes de Assis, por não medir esforços para ajudar, investir e acreditar no meu futuro, sem ela, minha trajetória acadêmica seria extremamente difícil.

Ao professor Roberto Cecílio, pela orientação, parceria, ensinamentos e confiança no trabalho. Contribuindo no meu crescimento e amadurecimento acadêmico durante dois anos de grande aprendizado. Agradeço também a coorientação do professor Fernando Pruski, com ensinamentos fundamentais na elaboração deste trabalho.

Aos professores da UFV que contribuíram no conhecimento para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional, sempre com ótimos ensinamentos durante as disciplinas.

A Monique Farias, pela paciência desde o início da graduação, com incentivos, quando muitas vezes as dificuldades foram extremas.

Ao Marcel Abreu, Laura Thebit e David Teixeira, irmãos de ciência que conheci na UFV (Universidade Federal de Viçosa), por toda a parceria que tivemos e teremos.

Aos colegas, Uilson Aires, Álvaro Ávila, José Rui, Gabriela Regina, Vitor Hugo e Hugo Thaner, por compartilharem as dúvidas, momentos difíceis e o conhecimento durante as disciplinas cursadas. Também agradeço aos professores da UFPA (Universidade Federal do Pará), Aline Meiguins e José de Paulo pelo apoio e incentivo desde a época de graduação.

Aos colegas de república, Gustavo Castro e Luis Gustavo França, por todos os momentos de descontração, brincadeiras e parceria.

Aos funcionários da UFV, especialmente a Graça Freitas, no comando da secretaria da Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, sempre com grande responsabilidade e simpatia reconhecida por todos.

A Universidade Federal de Viçosa, por conceder através da infraestrutura e de excelentes professores a oportunidade de realizar o curso de Mestrado em Meteorologia Aplicada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

BIOGRAFIA

CLEBER ASSIS DOS SANTOS, filho de Eliana Mendes de Assis e Alfredo Manoel dos Santos, nasceu em 12 de janeiro de 1987, na cidade de Belém – PA.

Em março de 2012 iniciou o curso de graduação em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará – UFPA, concluindo em fevereiro de 2016. No mesmo ano, iniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Aplicada na Universidade Federal de Viçosa – UFV, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Bacia hidrográfica do rio Grande	3
2.1.1. Expansão da produção agrícola	4
2.1.2. Expansão da silvicultura	5
2.2. Principais modos de variabilidade climática e temporal atuantes sobre a bacia hidrográfica do rio Grande	6
2.2.1. Oscilação Decadal do Pacífico (PDO)	6
2.2.2. Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO)	8
2.2.3. El Niño-Oscilação Sul (ENOS).....	10
2.2.4. Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ)	12
2.2.5. Sistemas Frontais (Frente Fria)	14
2.2.6. Sistemas Convectivos	15
2.3. Tendência nas vazões	17
2.3.1. Tendência nas vazões associadas à precipitação	18
2.3.2. Tendência nas vazões, associadas ao uso e cobertura do solo	21
2.4. Modelo chuva-vazão.....	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1. Área de estudo.....	26
3.2. Base de dados	27
3.2.1. Dados fluviométricos	28
3.2.2. Dados pluviométricos	29
3.2.3. Dados topográficos.....	31
3.2.4. Dados de uso do solo	31
3.2.4.1. Densidade demográfica.....	31
3.2.4.2. Uso agropecuário	32
3.3. Evapotranspiração	32
3.4. Análises estatísticas.....	33
3.4.1. Coeficiente de correlação de Spearman rho	33
3.4.2. Teste de tendência	36

3.4.3. Ponto de mudança	37
3.4.4. Desagregação da influência da precipitação sobre a vazão	38
3.4.4.1. Cálculo do índice de precipitação antecedente (API)	39
3.4.4.2. Curva de regressão LOESS	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1. Regime pluviométrico	42
4.2. Densidade demográfica	48
4.3. Uso e cobertura do solo com atividades agropecuárias	49
4.4. Vazões	51
4.4.1. Vazões médias	52
4.4.1.1. Teste de Tendência	52
4.4.1.2. Identificação do ponto de mudança de tendência	56
4.4.1.3. Atribuições ao comportamento apresentado pelas vazões médias	59
4.4.2. Vazões mínimas	70
4.4.2.1. Teste de tendência	70
4.4.2.2. Identificação do ponto de mudança	72
4.4.2.3. Atribuições ao comportamento apresentado pelas vazões mínimas	74
5. CONCLUSÕES.....	87
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da BHRG e distribuição das cinco principais classes de uso do solo. Fonte: Adaptado de Borglin e Borglin (2013).	3
Figura 2 – ATSM (cores), pressão do nível do mar (contornos) e anomalia de ventos da superfície (setas) durante as fases quente e fria da PDO (a); índice PDO, com linha fina indicando índices não filtrados e a linha grossa representando a média móvel de 11 anos (b). Fonte: Adaptado de Kim, Yeh e Chang (2014); Laing e Evans (2011).	7
Figura 3 – ATSM (cores), durante as fases quente e fria da AMO (a); Índice AMO do Atlântico Norte, com barras coloridas indicando as ATSM e linha verde representando a média móvel de 10 anos (b). Fonte: Adaptado de Deser et al. (2010); Knight et al., (2005).	9
Figura 4 – ATSM (cores) no oceano Pacífico Equatorial, durante as fases quente e fria do ENSO e sua influência sobre a Célula de Walker (a); ATSM no Pacífico Equatorial, na região do Niño 3.4 (b). Fonte: Adaptado de CPC-NOAA (2017) e NOAA (2017).	11
Figura 5 – Imagem do Satélite GOES-R. Nebulosidade (infravermelho realçado) sobre a América do Sul, destacando (grade vermelha na diagonal, sentido noroeste-sudeste) o posicionamento da SACZ em 11/11/2017. Fonte: CPTEC/INPE (2017).	13
Figura 6 – Esquema da formação de uma frente fria e seu conjunto de nuvens associadas. Ac – Altocumulus; Cb – Cumulonimbus; Ci – Cirrus; Cu – Cumulus; Sc – Stratocumulus. Fonte: Varejão-Silva (2006).	15
Figura 7 – Imagem do Satélite GOES 13. Nebulosidade (infravermelho realçado) sobre a América do Sul, destacando os principais MCS em 01/01/2017. Fonte: CPTEC/INPE (2017).	16
Figura 8 – Infiltração e recarga de águas subterrâneas em função do tipo de cobertura vegetal do solo. As setas indicam a direção e intensidade do fluxo de água. Fonte: Adaptado de Ellison et al. (2017) e Ilstedt et al. (2016).	23
Figura 9 – Localização geográfica e altitude da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG).	26

Figura 10 – Localização das 12 áreas de drenagem das estações fluviométricas e das estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG). ..27	
Figura 11 – Exemplo da curva de regressão LOESS entre a vazão média do ano hidrológico e o API. Fonte: Adaptado de Asarian e Walker (2016).40	
Figura 12 – Precipitações médias mensais (1940-2010) em 12 áreas de drenagem da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG).....42	
Figura 13 – Tendência da precipitação (P_a) em cada área de drenagem da BHRG. Setas indicam a direção do sinal e as cores informam o nível de significância.44	
Figura 14 – Valores do teste de tendência de Mann-Kendall ($Z(MK)$) das precipitações mensais. Linhas tracejadas representam o nível de significância. Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam, respectivamente o limite superior e inferior dos níveis de significância para a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0).45	
Figura 15 – Média móvel de 10 anos das anomalias de precipitação do ano hidrológico nas áreas de drenagem estudadas da BHRG. Linhas tracejadas em azul mostram o período de atuação da PDO e em vermelho os eventos de AMO.47	
Figura 16 – Número de habitantes por km^2 ao longo do tempo nas áreas de drenagem da BHRG.48	
Figura 17 – Porcentagem do uso agropecuário ao longo do tempo nas áreas de drenagem da BHRG. Uso agrícola (linha azul), pastagem (linha verde) e agropecuário (agricultura + pastagem) (linha vermelha).50	
Figura 18 – Tendência das vazões médias anuais em cada área de drenagem estudada da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG). As setas indicam a direção do sinal e as cores informam o nível de significância.53	
Figura 19 – Valores do teste de tendência de Mann-Kendall ($Z(MK)$) das vazões médias mensais. Linhas tracejadas representam o nível de significância. Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam, respectivamente o limite superior e inferior dos níveis de significância para a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0).54	
Figura 20 – Divisão da série temporal de vazões médias, através do teste de Pettitt, para as estações Clube de Regatas (a) e Ibituruna (b). As linhas	

tracejadas em vermelho indicam o primeiro período (P1) e em azul o segundo período (P2).....	56
Figura 21 – Vazões médias mensais nos períodos 1 e 2 no Clube de Regatas (a) e Ibituruna (b). As linhas em vermelho indicam o primeiro período (P1) e em azul o segundo período (P2).	58
Figura 22 – Comparação entre a vazão média medida (linha azul) e vazão média estimada através do API (linha preta). O preenchimento em azul claro representa a subestimativa e em vermelho claro a superestimativa da vazão média estimada.	61
Figura 23 – Resultados para a estação fluviométrica do Clube de Regatas. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).	63
Figura 24 – Resultados para a estação fluviométrica do Ibituruna. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).	65
Figura 25 – Tendência das vazões mínimas anuais (Q_7) anuais em cada área de drenagem da BHRG. As setas apontam a direção da tendência e as cores informam o nível de significância.	71
Figura 26 – Divisão da série temporal de vazões mínimas (Q_7) através do teste de Pettitt para as estações Bom Sucesso (a), Clube de Regatas (b), Ibituruna (c), Santana do Jacaré (d), Três Corações (e). As linhas tracejadas em vermelho indicam o primeiro período (P1), em azul o segundo período (P2) e em verde o terceiro período (P3).	72
Figura 27 – Comparação entre a vazão mínima medida (linha azul) e vazão mínima estimada através do API (linha preta). O preenchimento em azul claro representa a subestimativa e em vermelho claro a superestimativa da vazão média estimada.	76

Figura 28 – Resultados para a estação fluviométrica de Bom Sucesso. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).
.....78

Figura 29 – Resultados para a estação fluviométrica do Clube de Regatas. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).
.....79

Figura 30 – Resultados para a estação fluviométrica do Ibituruna. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).
.....81

Figura 31 – Resultados para a estação fluviométrica de Santana do Jacaré. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).
.....82

Figura 32 – Resultados para a estação fluviométrica de Três Corações. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).
.....83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações das estações fluviométricas utilizadas no estudo, com o nome das estações e respectivos códigos, área de drenagem e período em que os dados estão disponíveis	28
Tabela 2 – Informações das estações pluviométricas utilizadas no interior e periferia da BHRG, com o nome das estações e respectivos códigos e período em que os dados estão disponíveis	29
Tabela 3 – Interpretação do coeficiente de correlação de Spearman rho.....	35
Tabela 4 – Valores do coeficiente de correlação de Spearman rho entre as precipitações e as vazões para cada área de drenagem	35
Tabela 5 – Média climatológica das precipitações médias anuais (P_a) em cada área de drenagem estudada, valores do teste de Mann-Kendall (Z (MK)) com p-valor associado e declinações das tendências.....	43
Tabela 6 – Vazões médias anuais em cada área de drenagem estudada da BHRG, bem como valores do teste de Mann-Kendall (Z (MK)) com p-valor associado e declinações das tendências	52
Tabela 7 – Médias de longo prazo das principais variáveis hidrológicas em períodos distintos (P1 e P2) nas áreas de drenagem do Clube de Regatas e Ibituruna.....	57
Tabela 8 – Valores do teste de tendência de Mann-Kendall (Z (MK)) para o API, vazão média estimada pela regressão de LOESS entre API e vazão média, vazão residual (valores do comportamento da vazão que a precipitação não é capaz de explicar) e vazões médias em cada área de drenagem da BHRG	60
Tabela 9 – Médias de longo prazo em períodos distintos (P1 e P2), da vazão residual e vazão média estimada através da correlação entre API e vazão média, nas áreas de drenagem do Clube de Regatas e Ibituruna.....	66
Tabela 10 – Valores percentuais médios em períodos distintos (P1 e P2) do uso e cobertura do solo referente a área agrícola, pastagens e uso agropecuário (agrícola + pastagens) nas áreas do Clube de Regatas e Ibituruna.....	67

Tabela 11 – Valores de correlação do teste de Spearman rho em períodos distintos (P1 e P2) entre a vazão média medida e vazão média estimada nas áreas de drenagem do Clube de Regatas e Ibituruna	68
Tabela 12 – Vazões mínimas anuais (Q_7) em cada área de drenagem estudada da BHRG, bem como valores do teste de Mann-Kendall (Z (MK)) com p-valor associado e declinações das tendências	70
Tabela 13 – Médias de longo prazo das variáveis hidrológicas em períodos distintos nas áreas de drenagem de Bom Sucesso, Clube de Regatas, Ibituruna, Santana do Jacaré e Três Corações	73
Tabela 14 – Valores do teste de tendência de Mann-Kendall (Z (MK)) para o API, vazão mínima estimada pela regressão de LOESS entre API e vazão mínima, vazão residual (valores do comportamento da vazão mínima que a precipitação não é capaz de explicar) e vazões mínimas em cada área de drenagem da BHRG	75
Tabela 15 – Valores percentuais médios em períodos distintos do uso e cobertura do solo referente a área agrícola, pastagens e uso agropecuário (agrícola + pastagens) nas áreas de Bom Sucesso, Clube de Regatas, Ibituruna, Santana do Jacaré e Três Corações	84
Tabela 16 – Valores de correlação do teste de Spearman rho em períodos distintos entre a vazão mínima medida (Q_7) e vazão mínima estimada nas áreas de Bom Sucesso, Clube de Regatas, Ibituruna, Santana do Jacaré e Três Corações	85

RESUMO

SANTOS, Cleber Assis dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Impactos da precipitação e do uso do solo nas tendências das vazões na bacia hidrográfica do rio Grande**. Orientador: Roberto Avelino Cecílio.

As mudanças no clima associadas à variabilidade da precipitação e às alterações no uso e cobertura do solo consistem em importantes condicionantes da disponibilidade dos recursos hídricos pelo mundo, em especial das tendências no regime de vazões das bacias hidrográficas. O Brasil possui várias bacias hidrográficas de relevante importância econômica e social, dentre as quais, destaca-se a bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG), afluente da margem esquerda do rio Paraná. Esta bacia localiza-se entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, uma região estratégica do país, em que as atividades socioeconômicas têm papel relevante sobre a economia brasileira. O objetivo geral do presente trabalho foi analisar e caracterizar os impactos da precipitação e alterações do uso e cobertura do solo sobre as tendências temporais das vazões médias e mínimas de 12 áreas de drenagem da BHRG. Utilizaram-se dados de precipitação e vazão na área da BHRG, disponibilizados pela ANA (Agência Nacional de Águas), correspondentes ao período entre 1940 a 2010. Os dados de uso do solo foram provenientes do Grupo de Pesquisa em Interação Atmosfera-Biosfera da UFV. Aplicaram-se, nas séries de dados hidrológicos de cada área de drenagem, os testes estatísticos de Mann-Kendall (identificação da tendência), Pettitt (identificação do ponto de mudança) e Spearman rho (identificação da força de correlação entre duas variáveis). Também foram isolados os efeitos da precipitação sobre a vazão, através de um modelo chuva-vazão, por intermédio da curva de regressão tipo LOESS (Suavização de Dispersão Localmente Ponderada) entre o Índice de Precipitação Antecedente (API) e a vazão. Os resultados indicaram que, na maior parte da BHRG, entre 1940 e 2010, as vazões médias e mínimas (Q_7) apresentaram tendência de crescimento e que o principal responsável para a tendência de aumento nas vazões é a variabilidade natural da precipitação. As alterações de uso do solo apresentaram menor influência sobre as vazões.

ABSTRACT

SANTOS, Cleber Assis dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Impacts of precipitation and land use in the flow trends in the Grande river hydrographic basin.** Adviser: Roberto Avelino Cecílio.

Climate change associated with precipitation variability and land use and land cover changes are important determinants of the water availability in the world, especially of the trends in river flow regime. Brazil has several hydrographic basins with economic and social importance, including the BHRG (Grande River Hydrographic Basin), a tributary of the left bank of the Paraná River. This basin is located between the states of Minas Gerais and São Paulo, a strategic region of the country, where socioeconomic activities have a significant role in the Brazilian economy. The general objective of this work was to analyze and characterize the impacts of precipitation and land use and land cover changes on the temporal trends of medium and minimum flows of 12 drainage areas in the Grande river hydrographic basin. Precipitation and flow data from the BHRG area were used, made available by the National Water Agency (ANA), corresponding to the period between 1940 and 2010. Soil use data come from the Research Group on Atmosphere-Biosphere Interaction from the UFV. The statistical tests of Mann-Kendall (trend identification), Pettitt (point of change identification) and Spearman rho (identification of the correlation force between two variables) were applied in the hydrological data series of each drainage area. The effects of precipitation on flow were also isolated through a rain-flow model, using the LOESS regression curve (Locally Weighted Dispersion Smoothing) between API (Antecedent Precipitation Index) and flow. The results indicated that, in most of the BHRG, between 1940 and 2010, the medium and minimum flows (Q_7) presented growth trend and that the main responsible for the increasing trend in the flows is the natural variability of precipitation. The land-use changes had lower influence on flow rates.

1. INTRODUÇÃO

Há alguns anos vem sendo observado que diversas bacias hidrográficas em todo o mundo estão sofrendo alterações expressivas em seu comportamento hidrológico. Tais alterações, em grande parte, ocorrem devido ao avanço das mudanças no clima, as quais alteram o regime pluviométrico; bem como às ações antrópicas, como alterações do uso e manejo do solo, construção de barragens e retirada de água para irrigação de grandes cultivos agrícolas (MILLY et al. 2008). No tocante às ações antrópicas, Vorosmarty et al. (2000) ressaltam que estas influenciam diretamente o ciclo hidrológico (vazão, precipitação, evapotranspiração), devido ao rápido crescimento populacional e à intensificação do desenvolvimento econômico.

Um dos componentes específicos do ciclo hidrológico em que existe expressivo potencial de mudança de comportamento ao longo do tempo é o regime de vazões. As vazões de bacias hidrográficas podem apresentar tendências de aumento ou redução expressiva, provocando impactos generalizados sobre os demais recursos naturais (GYAWALI; GREB; BLOCK, 2015; RICE et al., 2015; SOUZA-FILHO et al., 2016; WEI; CHANG; DAI, 2014; ZHANG et al., 2008; ZHANG; SCHILLING, 2006). Palmer et al. (2008) afirmam que a redução da resiliência dos rios pode criar sérios problemas, como a perda da biodiversidade nativa, riscos para os ecossistemas e para os seres humanos.

Milly et al. (2008) afirmam que, em muitas bacias, as séries históricas de vazão podem não apresentar comportamento estacionário, já que os processos hidrológicos estariam alterados ao longo dos anos. Em diversas oportunidades, ao se fixar em determinado local, grandes indústrias, propriedades rurais e a população em geral, assumem que a água estará à disposição de todos. De acordo com as pesquisas citadas anteriormente, é possível afirmar que as séries hidrológicas, em especial a vazão, não necessariamente se mantêm em condições normais para assegurar sua qualidade e quantidade.

Tendências de crescimento nas vazões podem ocorrer por diversos fatores, tais como o aumento da precipitação (GARBRECHT; VAN LIEW; BROWN, 2004; ZHANG; SCHILLING, 2006) ou desmatamento excessivo que acarreta em drástica redução da evapotranspiração (COE et al., 2011; COSTA;

BOTTA; CARDILLE, 2003). Em contrapartida a redução nas vazões pode ser impulsionada pela diminuição da precipitação (SUN et al., 2014) e reflorestamento inadequadamente planejado, o qual pode aumentar em demasia a evapotranspiração (ZHANG et al., 2008). A intensificação da irrigação e o aumento da população (TAO et al., 2011) também tem papel relevante sobre a redução das vazões. Além disso, alterações expressivas na cobertura do solo, podem gerar “feedbacks” atmosféricos, interferindo na variabilidade pluviométrica, tanto em escala local como regional (COE; COSTA; SOARES-FILHO, 2009; KHANNA et al., 2017; SPERA et al., 2016), afetando diretamente as vazões.

O Brasil, por ser um país de dimensões continentais, apresenta várias bacias hidrográficas com área superior a muitos países europeus. Uma das importantes bacias hidrográficas brasileiras é a bacia do rio Grande (BHRG), afluente da margem esquerda do rio Paraná. Esta bacia localiza-se entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, uma região estratégica do país, onde as atividades agropecuárias têm papel relevante sobre a economia nacional. Devido a sua grande área, a BHRG apresenta um mosaico, tanto na cobertura e uso do solo, com regiões de intensa atividade agrícola e/ou densamente florestadas, quanto na distribuição espacial da precipitação pluviométrica. Distinguir e analisar essas variações espaço-temporais dentro da bacia, através de análises estatísticas, é tarefa determinante para identificar possíveis tendências nas séries históricas de vazão dos rios da BHRG, visando o manejo e controle adequado dos usos múltiplos da água para os mais diversos fins, desde a dessedentação animal até o abastecimento populacional e industrial, além da própria manutenção do rio.

Nesse sentido, o objetivo geral do presente trabalho foi analisar e caracterizar os efeitos da precipitação e do uso e cobertura do solo sobre as tendências temporais das vazões médias e mínimas (Q_7) da BHRG. Os objetivos específicos foram: a) caracterizar o comportamento temporal das variáveis hidroclimáticas e de uso e cobertura do solo em diferentes áreas de drenagem da BHRG; e b) por meio de um modelo de regressão entre chuva e vazão, identificar em qual período a precipitação contribuiu de forma mais significativa para as tendências nas vazões médias e mínimas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Bacia hidrográfica do rio Grande

A Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) é uma das principais sub-bacias da margem esquerda da bacia hidrográfica do rio Paraná (Figura 1). Está localizada entre os estados do São Paulo e Minas Gerais, drenando 143.438 km², onde 59,4% pertence ao estado de Minas Gerais e 40,6% ao estado de São Paulo (OLIVEIRA, 2008).

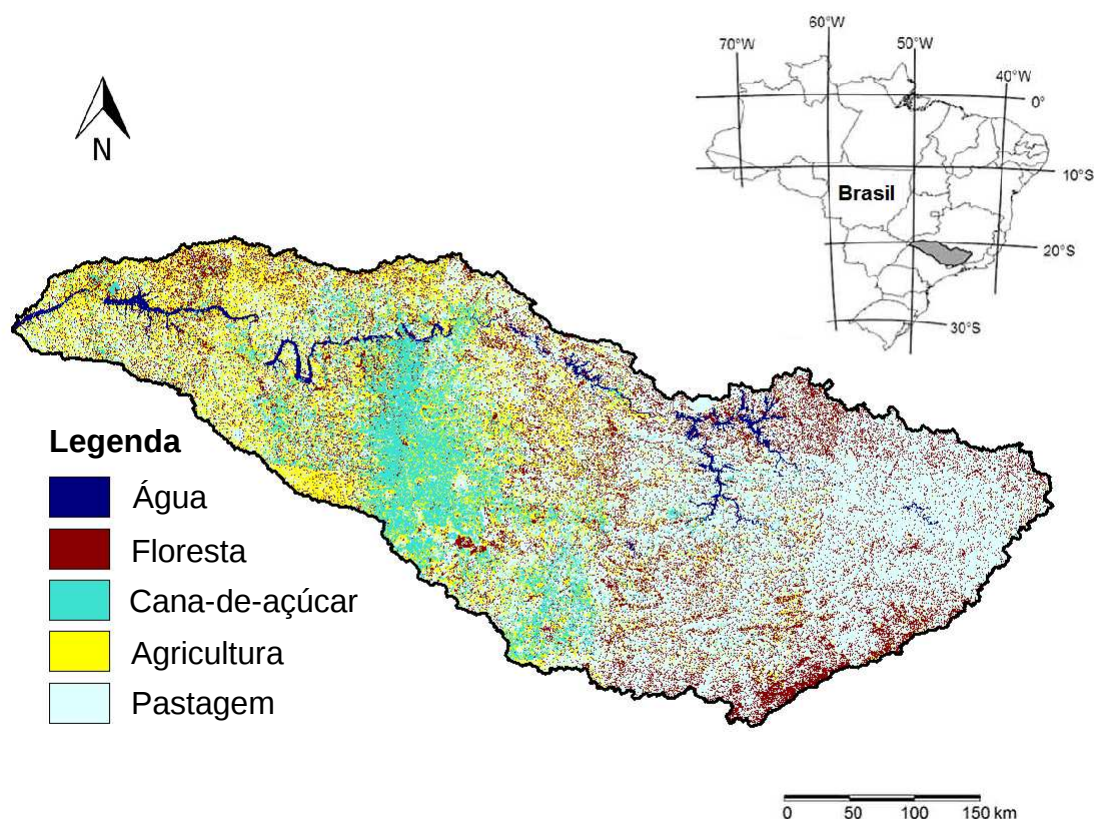


Figura 1 – Localização da BHRG e distribuição das cinco principais classes de uso do solo. Fonte: Adaptado de Borglin e Borglin (2013).

Segundo Borglin e Borglin (2013), a BHRG apresenta cinco principais classes de uso do solo (Figura 1): os recursos hídricos, florestas, cana-de-açúcar, agricultura (como soja e milho) e pastagem. Outros estudos apontam que o uso e cobertura do solo na BHRG constitui um mosaico de quatro categorias predominantes, compostas por agricultura, pastagens (naturais e

plantadas), cerrado e florestas (naturais e plantadas) (NÓBREGA et al., 2011; PEREIRA, 2013; RUHOFF et al., 2013). Destaca-se que a cobertura do solo por agricultura é mais acentuada na área pertencente ao estado de São Paulo, e grande parte da região localizada em Minas Gerais é formada por pastagens e florestas, principalmente nas áreas mais altas da bacia (cabeceira). De acordo com Loarie et al. (2011), as regiões de cerrado no médio e baixo rio Grande foram gradualmente substituídas por culturas agrícolas como de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e pastagem plantada.

A classificação do uso do solo elaborada por Ruhoff et al. (2013) mostra que existe o predomínio marcante de intensiva atividade agrícola e regiões urbanizadas no médio rio Grande. Já no baixo rio Grande há característica típica de cerrado e agricultura, enquanto que na região de cabeceira há uma mistura de florestas, pastagem e vegetação rasteira (VIOLA et al., 2014). Para Nóbrega et al. (2011), cerca de 70% da área da BHRG é constituída de uso agrícola e 20% de florestas naturais e plantadas. Oliveira et al. (2017) apresentam que, na cabeceira da BHRG, a pastagem (70,7%) é o uso predominante do solo na região, seguido de florestas (15,6%) e agricultura (10,3%). Complementarmente, Pereira (2013) ressalta que a agricultura representa uma grande parte da BHRG, destacando-se as culturas de cana-de-açúcar e grãos como a soja (*Glycine max*) (FEARNSIDE, 2001).

Devido a grandes incentivos fiscais a partir das décadas de 1960 e 1970, a BHRG configurou-se, em termos de uso e cobertura do solo, como duas regiões distintas: o médio e baixo rio Grande, com destaque na produção agrícola, e as cabeceiras, que paulatinamente substituíram suas áreas de pastagens pela silvicultura.

2.1.1. Expansão da produção agrícola

Com a criação do Programa Nacional de Álcool em 1975 (ProÁlcool) (ROSILLO-CALLE; CORTEZ, 1998), a região do médio rio Grande, pertencente em grande parte ao estado de São Paulo, tornou-se a principal produtora canavieira do Brasil (RUDORFF et al., 2010). Essa região passou por grandes transformações no uso e cobertura do solo, tanto nas práticas de manejo

agrícola como no grande fluxo de pessoas e indústrias que impulsionaram o crescimento urbano e, conseqüentemente, alteraram a infraestrutura local de maneira acelerada (MORAES et al., 1998). Na região do médio e baixo rio Grande, além da cana-de-açúcar, existe em menor proporção a cultura da soja, impulsionada pelo Programa de Desenvolvimento dos Cerrados (POLOCENTRO) entre 1975 e 1982, que transformaram as regiões de cerrado na principal zona de expansão agrícola (FEARNSIDE, 2001).

2.1.2. Expansão da silvicultura

Devido à criação do Fundo de Investimento Setorial (FISSET), um incentivo fiscal para o reflorestamento entre 1967 e 1986, iniciou-se o aumento da área plantada com espécies florestais exóticas como eucalipto (*Eucalyptus* spp.) e pinus (*Pinus* spp.), principalmente para abastecer as indústrias siderúrgicas e de papel e celulose (VIANA, 2004), já que essas espécies florestais possuem rápido crescimento (KRÖGER, 2012). Com o fim dos incentivos fiscais, as grandes empresas de papel e celulose mantiveram destaque nas atividades silvícolas a partir da década de 1990 até os dias atuais (KEGEN; GRAÇA, 1999). Além disso esse período é marcado pela valorização da pesquisa e desenvolvimento tecnológico visando a redução nos custos de produção e melhorias nos níveis de produtividade, proporcionando maior competitividade no mercado (ANTONANGELO; BACHA, 1998).

Historicamente, Minas Gerais é o estado brasileiro com amplo destaque no plantio de espécies florestais (VIANA, 2004). Em 2006, a área plantada de eucalipto (10.837,4 km²) e pinus (1.520,0 km²) em Minas Gerais representava 23,0% do total plantado no Brasil (PIKETTY et al., 2009) e 2,1% da área do estado. Conforme estudos de Viola et al. (2014), algumas sub-bacias hidrográficas na cabeceira da BHRG alteraram expressivamente o uso de pastagens para o cultivo de eucalipto, saltando de 52,4 km² em 2008 para 79,3 km² no ano de 2011, em uma área de 2.329 km². De acordo com os estudos apresentados, esta é uma tendência de alteração do uso do solo na região.

2.2. Principais modos de variabilidade climática e temporal atuantes sobre a bacia hidrográfica do rio Grande

As vazões têm forte dependência dos eventos de precipitação, que por sua vez sofrem influência direta da variabilidade do tempo e clima (GARCIA; VARGAS, 1998). É importante destacar que o clima é a característica de uma determinada região, associada à média de fenômenos meteorológicos com vários anos de duração, já o tempo é o comportamento atmosférico em curto prazo, dias ou semanas.

A BHGR está na rota de alguns fenômenos importantes de tempo e clima associados à precipitação, que modulam os eventos de vazão da região. Os principais modos de variabilidade que impulsionam o clima na região são a PDO (Oscilação Decadal do Pacífico), AMO (Oscilação Multidecadal do Atlântico) e ENSO (El Niño-Oscilação Sul) (ALEXANDER; KILBOURNE; NYE, 2014; ANDREOLI; KAYANO, 2005; KAYANO; CAPISTRANO, 2014; VÁSQUEZ P. et al., 2017). Já os fenômenos meteorológicos de menor duração são influenciados pela atuação da SACZ (Zona de Convergência do Atlântico Sul), dos Sistemas Frontais e dos Sistemas Convectivos de Mesoescala (QUADRO et al., 2012; REBOITA et al., 2010).

2.2.1. Oscilação Decadal do Pacífico (PDO)

A PDO é um padrão de variabilidade climática identificada através de Anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (ATSM) no Oceano Pacífico Norte e Central (NEWMAN et al., 2016), mudando suas fases em uma escala de tempo interdecadal, geralmente mais de 10 anos. Isso pode ser constatado no estudo de Biondi, Gershunov e Cayan (2001), ao exporem que uma fase da PDO pode durar de 17 a 28 anos. Essa oscilação de baixa frequência influencia os padrões climáticos em grande parte do planeta com o acoplamento oceano-atmosfera. Ao introduzir a PDO, Mantua et al. (1997) identificaram, por intermédio de médias históricas no período do verão austral (época mais ativa da PDO), que desde 1900 até 2000, a PDO havia passado por três mudanças de fase (1925, 1947 e 1977).

Mantua e Hare (2002) caracterizam que a PDO, durante a fase quente, está associada à ATSM positiva na Costa Oeste dos Estados Unidos e negativa no Pacífico Norte/Central. Durante sua fase fria, ocorrem ATSM negativas na Costa Oeste dos Estados Unidos e positivas no Pacífico Norte/Central (Figura 2a). Li et al. (2017), aplicando a média móvel de 11 anos aos índices da PDO durante o verão austral (Figura 2b), descreveram as fases quentes com anos em que o índice médio da PDO está acima de 0, o que ocorreu entre os períodos de 1900-1943 e 1978-1992. Já as fases frias da PDO, em que o índice médio estava abaixo de 0, ocorreram entre os anos de 1944-1977 e 1993-2010.

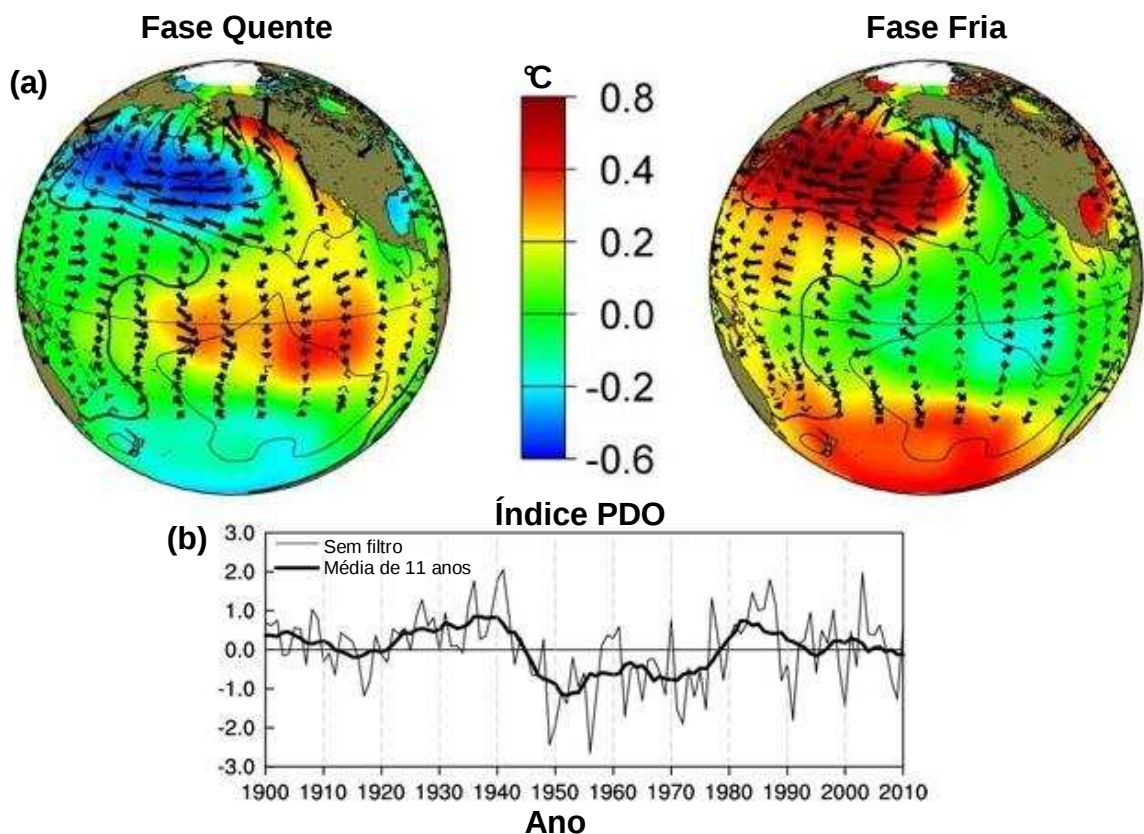


Figura 2 – ATSM (cores), pressão do nível do mar (contornos) e anomalia de ventos da superfície (setas) durante as fases quente e fria da PDO (a); índice PDO, com linha fina indicando índices não filtrados e a linha grossa representando a média móvel de 11 anos (b). Fonte: Adaptado de Kim, Yeh e Chang (2014); Laing e Evans (2011).

A PDO é responsável por modular as características climáticas pluviais em várias partes do mundo em escala interdecadal. Na América do Sul, tal como exposto por Garcia e Kayano (2008), a PDO altera os padrões de circulação da Célula de Walker, pois em sua fase quente entre 1977 e 1995, criou uma condição de redução do gradiente de TSM Leste-Oeste, atuando localmente para enfraquecer os centros de ação da circulação Walker. Já em sua fase fria, entre 1958 e 1976, atuou na intensificação da célula de Walker.

Em seu estudo para o clima brasileiro relacionado a PDO, Molion (2008) concluiu que na região Sudeste do Brasil, onde está situada a BHRG, as precipitações e, conseqüentemente, as vazões, receberam acréscimo na fase quente da PDO e redução em sua fase fria. Segundo o autor, uma possível causa para a redução de precipitação na fase fria da PDO é a diminuição do fluxo de convergência de umidade, provocando diminuição da precipitação para a região do sudeste brasileiro.

2.2.2. Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO)

A AMO é uma alteração periódica nos padrões da Temperatura de Superfície do Mar (TSM) do oceano Atlântico, levando cerca de 60 anos para completar um ciclo (KERR, 2000). Chiessi et al. (2009) descrevem o padrão de comportamento da AMO, em sua fase quente, com ocorrências de ATSM positiva no Atlântico Norte e negativas no Atlântico Sul. Posteriormente, após uma fase de transição, ocorre a mudança de sinal, com o Atlântico Norte apresentando ATSM negativas e o Atlântico Sul com anomalias positivas, caracterizando a fase fria da AMO (Figura 3a).

Em seu estudo sobre a variabilidade da TSM global, Deser et al. (2010) informam que desde 1900 ocorreram dois eventos quentes e dois eventos frios da AMO. Os eventos quentes ocorreram entre os finais das décadas de 1920 e 1960, e desde meados de 1990 até os dias atuais. Já os eventos frios ocorreram do início dos anos 1900 até meados da década de 1920, e entre o início da década de 1970 e meados da década de 1990 (Figura 3b).

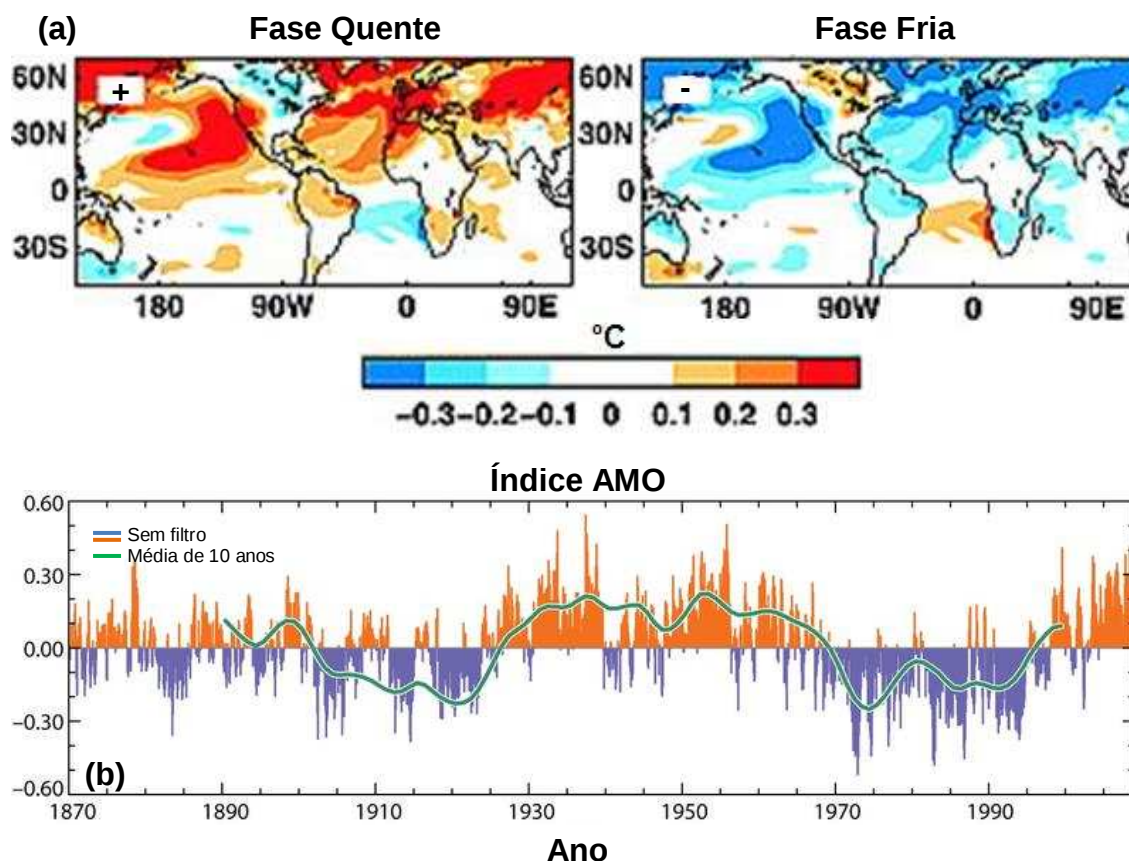


Figura 3 – ATSM (cores), durante as fases quente e fria da AMO (a); Índice AMO do Atlântico Norte, com barras coloridas indicando as ATSM e linha verde representando a média móvel de 10 anos (b). Fonte: Adaptado de Deser et al. (2010); Knight et al., (2005).

A modelagem elaborada por Ting et al. (2009) mostra que os impactos naturais da variabilidade da AMO causa efeitos generalizados sobre o comportamento climático da precipitação em escala global. Sobre a América do Sul, estes autores destacaram dois cenários para a fase quente da AMO, sendo um devido a ação forçada do aquecimento global, que provocaria aumento de precipitação sobre a costa Leste do Brasil, desde o Sudeste até aproximadamente o Uruguai, e o outro com a atuação da AMO sem forçante externa (variabilidade natural da AMO), favorecendo a redução da precipitação no Nordeste brasileiro e sobre a região da Bolívia.

Na região Sudeste brasileira, estudos apontam (ALEXANDER; KILBOURNE; NYE, 2014; VÁSQUEZ P. et al., 2017) que anomalias positivas de precipitação ocorrem para os períodos em que houveram fases frias da

AMO e durante os períodos de fase quente, quando os eventos de precipitação são reduzidos.

2.2.3. El Niño-Oscilação Sul (ENOS)

O ENOS é um fenômeno oscilatório de variabilidade climática interanual (baixa frequência) e seus efeitos podem ser sentidos por todo o globo (ANDREOLI; KAYANO, 2005; GRIMM; TEDESCHI, 2009; KAYANO; CAPISTRANO, 2014; KIM; YEH; CHANG, 2014; MINUZZI et al., 2007; TOOTLE; PIECHOTA, 2006; WEI; CHANG; DAI, 2014). Sua característica marcante é uma faixa de ATSM positiva em sua fase quente, e uma faixa de ATSM negativa em sua fase fria, na costa Oeste da América do Sul, sobre o Pacífico Equatorial, se estendendo até aproximadamente a Costa Leste de Papua-Nova Guiné (Figura 4a). Mayer et al. (2017) destacam que os eventos de ENSO são caracterizados por ATSM na região compreendida entre 170°W-120°W, 5°S-5°N, denominada de Niño 3.4, amplamente reconhecida pela comunidade científica.

Por sua vez, alterações na TSM do Pacífico Equatorial provocam mudanças expressivas na Célula de Walker, com deslocamento desta para a região central do Pacífico Equatorial na fase quente do ENSO, ocasionando a bipartição da Célula de Walker, através da convecção impulsionada pelas altas ATSM na região central do Pacífico Equatorial (Niño 3.4), gerando um ramo subsidente sobre a América do Sul, em especial na Amazônia e no Nordeste brasileiro, inibindo a formação de nuvens. A situação oposta ocorre na fase fria do ENSO, com a intensificação da Célula de Walker, promovendo maior quantidade de precipitação sobre a Amazônia e o Nordeste brasileiro, pois o ramo ascendente da Célula de Walker nessa região é fortalecido (Figura 4a).

Através das ATSM no Niño 3.4, são calculados os eventos de El Niño (fase quente ou positiva) e La Niña (fase fria ou negativa) (Figura 4b). Para um evento de ENSO receber a categoria de El Niño ou La Niña, a TSM deve exceder 0,5°C de anomalia (da média de 1981 a 2010) no Niño 3.4 para mais (El Niño) ou para menos (La Niña), esses limites devem ser excedidos por um período de pelo menos cinco temporadas consecutivas de três meses

sobrepostos, ou seja, a temperatura média da superfície do mar é calculada em cada mês, posteriormente realiza-se a média com valores do mês anterior e posterior, durante cinco temporadas. Caso a ATSM se mantenha na faixa entre $+0,5^{\circ}\text{C}$ e $-0,5^{\circ}\text{C}$, o período passa a ser considerado neutro (N OAA, 2013).

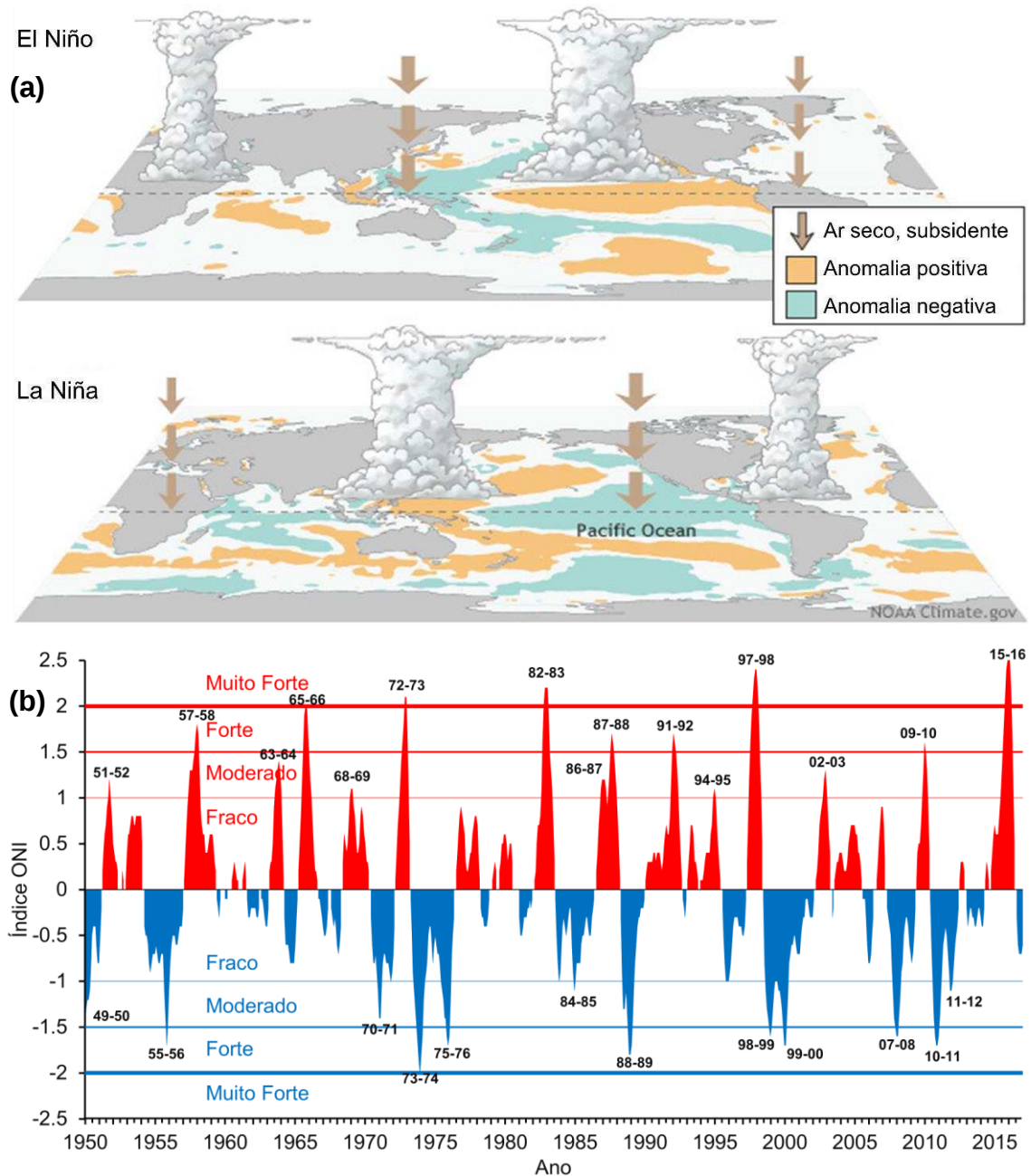


Figura 4 – ATSM (cores) no oceano Pacífico Equatorial, durante as fases quente e fria do ENSO e sua influência sobre a Célula de Walker (a); ATSM no Pacífico Equatorial, na região do Niño 3.4 (b). Fonte: Adaptado de CPC-NOAA (2017) e NOAA (2017).

Os efeitos do ENSO são marcantes na região Norte/Nordeste e Sul do Brasil, provocando estiagem ao Norte/Nordeste e aumento de precipitação ao Sul em épocas de El Niño, ocorrendo o oposto em período de La Niña ativo (COELHO; UVO; AMBRIZZI, 2002; GRIMM; TEDESCHI, 2009). Em contrapartida, a região Sudeste está no limiar dos eventos de ENSO, principalmente sobre a área de localização da BHRG (COELHO; UVO; AMBRIZZI, 2002), podendo fornecer sinais positivos ou negativos de precipitação em eventos de ENSO, dependendo da sua intensidade de atuação ou acoplamento com eventos climáticos de baixa frequência, como PDO e AMO (COELHO; UVO; AMBRIZZI, 2002; VÁSQUEZ P. et al., 2017).

Pesquisas descrevem os efeitos do ENSO acoplados a eventos climáticos de baixa frequência, como a PDO e AMO, mostrando que o ENSO podem intensificar ou reduzir os volumes precipitados sobre algumas regiões do Sudeste brasileiro (ALEXANDER; KILBOURNE; NYE, 2014; ANDREOLI; KAYANO, 2005; KAYANO; ANDREOLI, 2007; KAYANO; CAPISTRANO, 2014). Kayano; Capistrano (2014), abordam que os eventos de El Niño (La Niña) durante as fases frias (quentes) da AMO potencializam a precipitação sobre algumas regiões do Sudeste brasileiro, entre os meses de julho e janeiro. Sobre a PDO, Kayano e Andreoli (2007) destacam a diferença da força de atuação dos eventos de ENOS sobre a precipitação da América do Sul, podendo estar associado à fase em que se encontra a PDO, amplificando o sinal quando ENSO e PDO estão na mesma fase e diminuindo o sinal quando esses eventos estão com sinais opostos, além disso, para os autores, essa teleconexão atua conjuntamente para a força com que a Zona de Convergência do Atlântico Sul irá exercer sobre a precipitação.

2.2.4. Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ)

A SACZ é um dos importantes sistemas meteorológicos convectivos de grande escala atuantes na América do Sul, causando grande quantitativo de precipitação desde o final da primavera (novembro) até o verão austral (dezembro a fevereiro) (GRIMM, 2011; QUADRO et al., 2012; REBOITA et al., 2010). Carvalho, Jones e Liebmann (2004) caracterizam a SACZ como uma

região de alta variabilidade da atividade convectiva, se estendendo diagonalmente desde o centro da bacia amazônica até os Sudeste brasileiro, prosseguindo para o oceano Atlântico (Figura 5). Moura, Escobar e Andrade (2013) e Reboita et al. (2010) afirmam que a SACZ é uma importante fonte de precipitação para o Sudeste brasileiro.

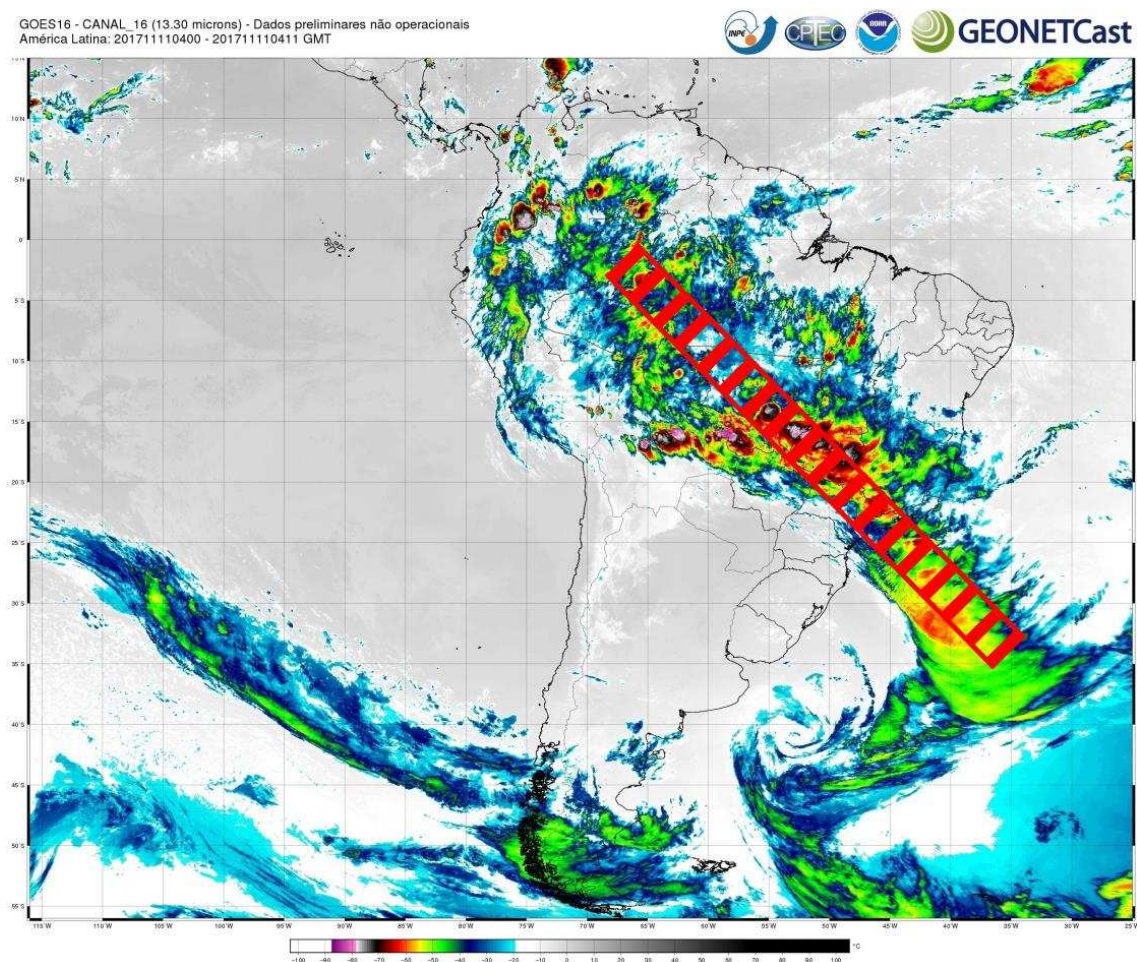


Figura 5 – Imagem do Satélite GOES-R. Nebulosidade (infravermelho realçado) sobre a América do Sul, destacando (grade vermelha na diagonal, sentido noroeste-sudeste) o posicionamento da SACZ em 11/11/2017. Fonte: CPTEC/INPE (2017).

Para a formação característica de um evento de SACZ é necessário respeitar os principais padrões meteorológicos de escala sinótica: em baixos níveis da atmosfera (850 hPa) a atuação de LLJ (Jatos de Baixos Níveis), fornecendo umidade da região amazônica para o Sudeste do Brasil; escoamento de Oeste da SASH (Alta Subtropical do Atlântico Sul) para o Sudeste brasileiro, e a passagem de um sistema frontal bloqueado sobre o

Sudeste, associada ao sistema de baixa pressão atmosférica no oceano Atlântico; em altos níveis (250 hPa), deve haver a formação da BH (Alta da Bolívia); e do CVNE (Vórtice Ciclônico de Altos Níveis) no litoral do Nordeste do Brasil. Com a persistência desse padrão atmosférico por quatro dias, está caracterizado um evento de SACZ (FERREIRA; CORREIA; RAMÍREZ, 2004; NETO, 2009; REBOITA et al., 2017).

Na região Sudeste do Brasil, especificamente ao Norte de São Paulo, Carvalho, Jones e Liebmann (2002) e Liebmann, Jones e Carvalho (2001) destacam a forte influência dos eventos de El Niño sobre a SACZ, modulando a climatologia desse sistema, com o deslocamento do padrão da SACZ para o Norte do estado de São Paulo, além de amplificar os eventos extremos com convecção intensa durante a fase quente do ENSO. Estudando as relações entre a TSM no Atlântico Sul e a variabilidade da SACZ, Chaves e Nobre (2004) mostram que as anomalias quentes de TSM no Atlântico Sul tendem a intensificar os eventos de SACZ e a move-los para o Norte. Esse padrão de comportamento é similar aos eventos de AMO em sua fase quente, propiciando anomalias de precipitação positivas sobre a região Sudeste do Brasil.

2.2.5. Sistemas Frontais (Frente Fria)

O sistema frontal é formado pelo encontro de duas massas de ar com características diferentes, uma massa de ar fria de origem polar (mais densa e seca) e outra quente de origem tropical (menos densa e úmida), que ao se unirem formam uma zona de transição com centenas de quilômetros de espessura e milhares de quilômetros de largura, chamada de frente, apresentando bastante nebulosidade devido à baixa pressão na região de transição, o que favorece a convecção (CAVALCANTI, 2017; VAREJÃO-SILVA, 2006).

A frente fria é caracterizada pela substituição da massa de ar quente por uma massa de ar fria, ou seja, a massa de ar mais frio se move contra a massa de ar quente, fazendo com que o ar quente seja forçado para cima, provocando convecção profunda, produzindo fortes eventos de precipitação (IAG/USP, 2010; VAREJÃO-SILVA, 2006) (Figura 6).

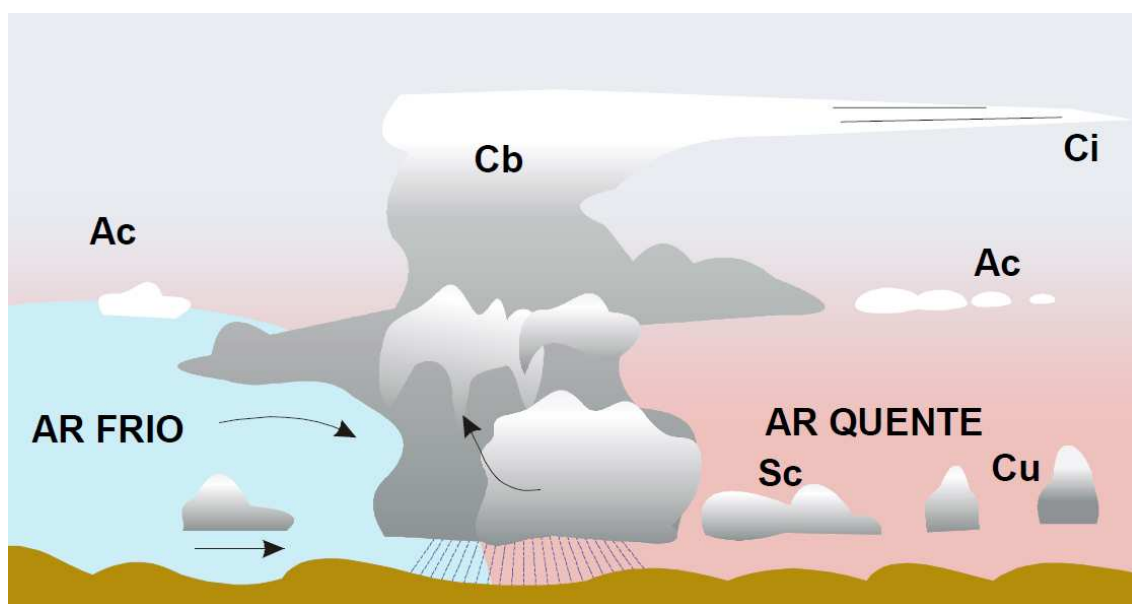


Figura 6 – Esquema da formação de uma frente fria e seu conjunto de nuvens associadas. Ac – Altocumulus; Cb – Cumulonimbus; Ci – Cirrus; Cu – Cumulus; Sc – Stratocumulus. Fonte: Varejão-Silva (2006).

A maioria das frentes frias que avançam pela costa do Brasil chegam na região Sudeste, posteriormente se deslocando para o oceano Atlântico. A climatologia de frentes frias sobre o Sudeste brasileiro, analisada por Moraes, Castro e Tundisi (2010), aponta que durante um mês ocorrem, aproximadamente, 3,1 passagens de sistemas frontais em um intervalo de tempo de 10 dias, e durante o ano a maior frequência está nos meses da Primavera Austral (setembro a novembro), com 3,4 passagem em um intervalo de 8 dias. Esse mesmo padrão de passagem de frentes frias também foi encontrado por Cardozo, Reboita e Garcia (2015) e Silva, Reboita e Rocha (2014). Entretanto, Silva, Reboita e Rocha (2014) esclarecem que, mesmo com a maior frequência de frentes frias durante a primavera, estas pouco contribuem para o acumulado de precipitação durante a estação, com maior contribuição de atividade convectiva local.

2.2.6. Sistemas Convectivos

As tempestades isoladas geralmente são classificadas em um dos três tipos básicos: células convectivas comuns, sistemas celulares múltiplos e

supercélulas. Entretanto, grupos de tempestades frequentemente se juntam a sistemas maiores, geralmente referidos como Sistemas Convectivos Mesoescala (MCS) (UCAR/THE COMET PROGRAM, 1999). Os Sistemas Convectivos de importância para a precipitação na região da BHRG são geralmente formados por aglomerados de nuvens convectivas do tipo cumulonimbus ou estratiformes, cobrindo uma grande área (HOUZE JR, 2004).

A literatura destaca alguns tipos de sistemas convectivos, as Linhas de Instabilidade, *Bow-Echoes* (sistemas em formato de arco), *Non-squall* (sistemas menos organizados) e MCC (Complexos Convectivos de Mesoescala) (BENDER, 2012; HOUZE JR, 2004) (Figura 7). De acordo com a definição proposta por Maddox (1980) e destacado por Laing e Fritsch (1997), os MCC não são característicos da região Sudeste do Brasil.

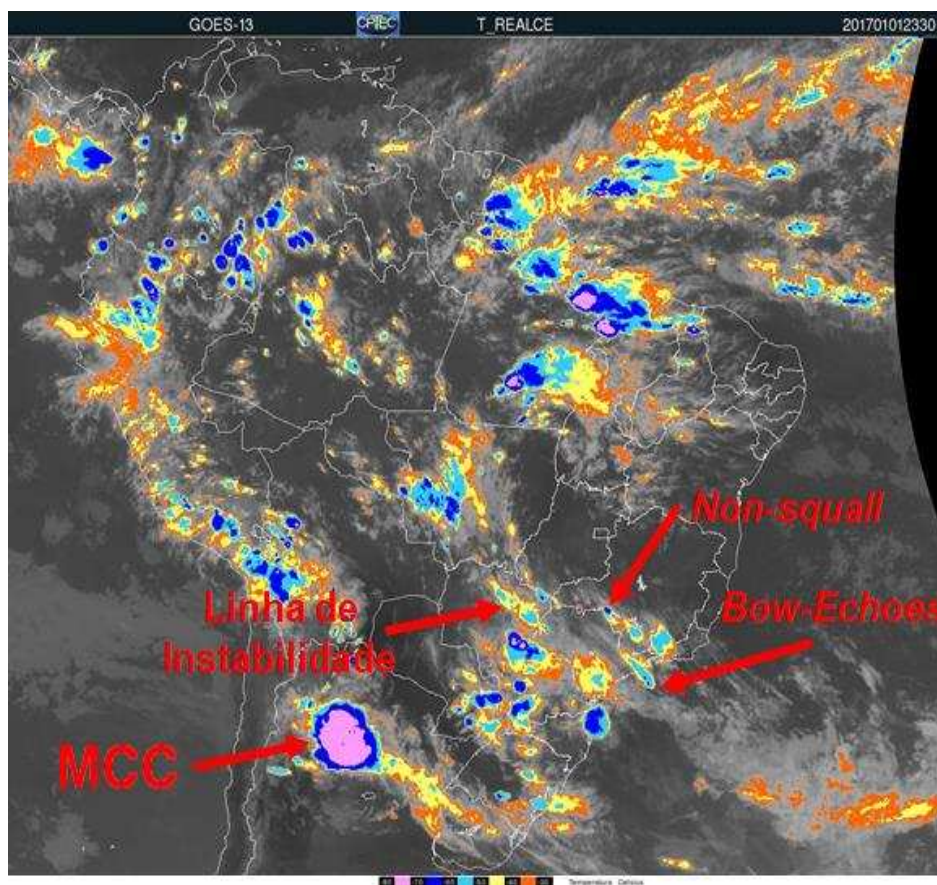


Figura 7 – Imagem do Satélite GOES 13. Nebulosidade (infravermelho realçado) sobre a América do Sul, destacando os principais MCS em 01/01/2017. Fonte: CPTEC/INPE (2017).

Siqueira et al. (2005) caracterizam as regiões convectivas com variação na escala espacial de aproximadamente 30 km, com fortes correntes ascendentes e precipitação intensa, já as regiões estratiformes estão em uma escala de centenas de quilômetros, com movimentos verticais relativamente fracos e maior homogeneidade horizontal, além de sua precipitação dificilmente ultrapassar 10 mm/h. Assim como descrito por Houze Jr (2004) e estudado por Bender (2012) e Siqueira et al. (2005), esses sistemas convectivos geralmente estão inseridos em sistemas maiores, como frentes frias ou SACZ no caso do Sudeste brasileiro (SIQUEIRA; MARQUES, 2016), ocorrendo principalmente na estação úmida (verão austral, outono e primavera) (SIQUEIRA et al., 2005), devido à convecção da umidade forçada pelo aquecimento diferencial da superfície.

Os comportamentos climatológicos de todos esses eventos de precipitação de alta frequência, nas mais diversas escalas espaço-temporais, devem ser considerados como respostas da oscilação de moduladores climáticos de baixa frequência, como PDO, AMO e ENSO, que ditam o comportamento hidrológico de longo prazo na região em estudo, podendo auxiliar em possíveis prognósticos para as tomadas de decisão. Outras pesquisas realizadas para a região Sudeste do Brasil (CAPOZZOLI; DE OLIVEIRA CARDOSO; FERRAZ, 2017; VÁSQUEZ P. et al., 2017) também destacam a importância da variabilidade de eventos climáticos de baixa frequência sobre as precipitações, associadas à estimativas de vazão para longos períodos, enfatizando o planejamento e melhor gerenciamento dos recursos hídricos.

2.3. Tendência nas vazões

A vazão de cursos d'água é composta pelo escoamento superficial e pelo escoamento das águas subterrâneas (fluxo de base). Durante a estação chuvosa, o escoamento superficial representa a maior parte da vazão. Já o escoamento subterrâneo é a principal fonte de água corrente durante os períodos secos, após as estações chuvosas. Ambos os escoamentos são diretamente afetados pelo clima, através dos eventos de precipitação e por

ações antrópicas, devido às modificações do uso e cobertura do solo (ZHANG; SCHILLING, 2006).

De maneira geral, as vazões respondem de forma direta aos eventos de precipitação, em que as tendências de aumento na precipitação refletem de forma direta no aumento nas vazões e vice-versa. Entretanto ações humanas, tanto em escala de bacia hidrográfica, com alterações de uso e cobertura do solo, quanto em escala global, através das mudanças climáticas, podem fazer com que as vazões não respondam da mesma forma às variações da precipitação, variando em função das interações combinadas entre a chuva e uso do solo, contribuindo para alterações distintas no regime hidrológico de bacias hidrográficas (AHIABLAME et al., 2017; ANIL; RAMESH, 2017).

Qiu et al. (2016), ao tentarem identificar os impactos causados pelas atividades antrópicas diretas e mudanças no clima sobre a bacia hidrográfica do rio Heihe, na China, destacaram que o acoplamento entre essas duas variáveis é de difícil separação, devido à complexidade dos processos individuais. Os processos condutores das mudanças observadas nas vazões são variados, incluindo alterações no clima, no uso e cobertura do solo, que interagem de maneira simultânea e dificultam a separação da influência de cada processo sobre o comportamento das vazões (SALMORAL et al., 2015). Logo, a necessidade de compreender os principais mecanismos que influenciam o comportamento das vazões, seja precipitação ou uso e cobertura do solo, é fundamental para avaliar medidas a serem adotadas para minimizar o grau de vulnerabilidade hídrica de uma bacia hidrográfica.

2.3.1. Tendência nas vazões associadas à precipitação

Naturalmente, a variabilidade climática através de grandes moduladores como a PDO, AMO e ENSO ditam o comportamento dos padrões de precipitação em todo o planeta. Entretanto, as mudanças climáticas podem acelerar ou atenuar os processos associados ao comportamento natural da hidroclimatologia terrestre (ALEXANDER; KILBOURNE; NYE, 2014; KIM; YEH; CHANG, 2014). Se a variabilidade climática tem papel preponderante sobre as tendências encontradas nas vazões, é essencial estudar o impacto do clima

sobre os recursos hídricos em diferentes cenários de mudanças climáticas, visando o melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos (BAO et al., 2012).

Com o início da era industrial, as emissões massivas de Gases de Efeito Estufa (GEE) impulsionaram as mudanças climáticas através do aquecimento global, acarretando nos atuais e futuros extremos da distribuição da precipitação em todo o planeta (IPCC, 2014), com regiões apresentando excesso e outras deficiência hídrica. Milly et al. (2008) destacam que a estacionariedade dos eventos hidroclimatológicos (precipitação, vazão, evapotranspiração) não existe mais, devido a distúrbios antrópicos tanto sobre as bacias hidrográficas, quanto sobre a atmosfera terrestre. Para a região Sudeste brasileira, Zilli et al. (2017) encontraram evidências de que a tendência de aumento das precipitações extremas estão associadas à mudança de posicionamento da SACZ em decorrência das mudanças climáticas.

Como a precipitação é a principal fonte responsável pelo comportamento da vazão (ASARIAN; WALKER, 2016; BAYER, 2014), alguns estudos apontam (CLARKE; TUCCI; COLLISCHONN, 2003; DOYLE; BARROS, 2011; GARBRECHT; VAN LIEW; BROWN, 2004; MOLION, 2008) que as tendências das precipitações impulsionam de maneira explícita as tendências nas vazões, estando essas duas variáveis hidrológicas diretamente ligadas à variabilidade climática natural ou agregada às mudanças climáticas.

Ao diagnosticar cenários climáticos atribuídos a grandes moduladores, como a PDO, Molion (2008) justificou a oscilação de longo prazo entre redução e aumento do nível do rio Paraguai, no Centro Sul do Pantanal, com a variabilidade da precipitação nas fases quente e fria da PDO, e enfatizou a importância do acompanhamento deste fenômeno para prognósticos que visem o planejamento das atividades humanas. Clarke, Tucci e Collischonn (2003) também chegaram à conclusão de que a mudança nos regimes de precipitação na região destacada por Molion (2008) foi o fator fundamental para as alterações no nível do rio.

Para a região Sul da bacia hidrográfica do rio da Prata (Médio rio Paraná e rio Uruguai), Doyle e Barros (2011) identificaram que o aumento nas vazões foi causado por tendências de crescimento da precipitação, com uma contribuição inexpressiva da mudança de uso do solo. Entretanto, os autores

encontraram baixa influência de moduladores climáticos, como eventos de El Niño, que foram mais frequentes na fase quente da PDO, atribuindo às mudanças climáticas o aumento da precipitação da região. Genta, Perez-Iribarren e Mechoso (1998), estudando a mesma região, também chegaram à conclusão que o aumento das vazões está diretamente ligado ao aumento da precipitação, entretanto, associaram o aumento da precipitação à variabilidade de moduladores climáticos como o ENSO. Mesmo assim, não descartaram a possibilidade da contribuição do aquecimento global.

Garbrecht, Van Liew e Brown (2004) estudaram os impactos da variação na precipitação sobre a vazão e ET (evapotranspiração) em 10 áreas de drenagem que sofreram pouca modificação, regulação e urbanização do uso do solo no último meio século nos estados de Nebraska, Kansas e Oklahoma, nos Estados Unidos, em um período superior a 50 anos (até 2001). Os autores alegaram que o aumento das vazões médias e da evapotranspiração ocorreram devido à relação de causa e efeito das variações decadais da precipitação, com um possível cenário de mudanças climáticas embutido. A média dos resultados mostraram que para um aumento de 12% nas precipitações anuais houve o aumento de 64% na vazão e 5% na evapotranspiração.

Montaldo e Sarigu (2017), investigando as perturbações da Oscilação do Atlântico Norte (NAO) sobre as tendências da precipitação no Mediterrâneo e seus impactos sobre as vazões em 10 áreas de drenagem, entre 1918 e 2010, identificaram que o principal motivo da redução das vazões em 40% na região da Sardenha foi o decréscimo da precipitação associada a uma fase positiva da NAO, entre 1974 e 2000. Os autores não destacaram nenhuma responsabilidade direta das mudanças climáticas, embora sugeriram considerá-las em planejamentos futuros de uso dos recursos hídricos.

De acordo com as pesquisas citadas, ao analisar as tendências de comportamento das vazões é importante associá-las a grandes moduladores climáticos da precipitação como PDO, AMO, ENSO entre outros, pois estes têm papel fundamental para explicar a variabilidade hidrológica em uma bacia hidrográfica. Além disso, as mudanças climáticas não devem ser deixadas de lado neste tipo de estudo, pois podem contribuir de maneira expressiva para a atenuação ou exacerbação de tendências das vazões.

2.3.2. Tendência nas vazões, associadas ao uso e cobertura do solo

Efeitos da cobertura e uso do solo exercem um papel de destaque no regime hidrológico, através das trocas solo-planta-atmosfera. Geralmente quando a cobertura vegetal do solo é eliminada, em especial árvores de raízes profundas, que facilitam a evapotranspiração, as vazões de uma bacia hidrográfica tendem a aumentar (BOSCH; HEWLETT, 1982; COE et al., 2011; COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003; SAHIN; HALL, 1996). Silva et al. (2015) destacam que a substituição do solo coberto por cerrado, no Sudeste brasileiro, pela cultura de cana-de-açúcar, provoca menor ET, devido à maior biomassa da vegetação acima do solo e sistema radicular mais raso.

Por outro lado, o processo de reflorestamento em uma bacia hidrográfica, além de proporcionar maior interceptação da água da chuva, o que facilita sua evaporação, principalmente pela maior área foliar, também colabora para a retirada de água do solo com maior eficiência devido ao sistema radicular mais profundo (ENGEL et al., 2005; FARLEY; JOBBAGY; JACKSON, 2005; YAO et al., 2015). Na região Andina, Ochoa-Tocachi et al. (2016) encontraram reduções nas vazões em função do intensivo reflorestamento de pinheiros sobre áreas de pastagens naturais.

Doyle e Barros (2011) atribuíram o aumento das vazões na região Nordeste da bacia hidrográfica do rio da Prata, entre 1960 a 1999, à redução da ET ligada ao desmatamento e uso agrícola. Além disso, essa região apresentava tendência negativa de precipitação, ou seja, mesmo com a redução da precipitação, houve uma compensação com a retirada da vegetação arbórea, colaborando para o aumento das vazões. O estudo de Souza-Filho et al. (2016) para a bacia hidrográfica do rio Itacaiunas, na Amazônia, mostrou que a drástica substituição da área de floresta (99% na década de 1970) por pastagem (50% em 2013), provocou aumento da descarga do rio de 85%, passando do valor médio de 310 m³/s (1973 a 1984) para 574 m³/s (2005 a 2013), mesmo com um pequeno sinal de redução da precipitação, beirando a estabilidade.

Em pesquisa realizada por Zhang e Schilling (2006), na bacia hidrográfica do rio Mississippi, durante cerca de 60 anos de dados (1940-2003), constatou-se que o aumento de 31 a 41% na vazão média foi explicado por um

efeito combinado entre o aumento da precipitação (<7,5%) e a conversão da vegetação perene por intensa prática agrícola, levando à diminuição da ET.

An e Hao (2017) avaliaram o comportamento das vazões médias em sete estações fluviométricas da bacia hidrográfica do rio Huaihe, na China, entre 1959 e 2009. Os autores encontraram para algumas regiões da bacia a redução das vazões ao longo dos anos, para um período em que ocorria o aumento das precipitações anuais, desde a década de 1980, chegando à conclusão de que fortes influências externas, como mudanças climáticas e/ou atividades humanas, contribuíram para o decréscimo nas vazões.

Bruijnzeel (2004) destaca que o solo nu está mais propício à compactação, aumentando sua impermeabilização pela urbanização, construção de estradas e assentamentos, contribuindo para a redução da infiltração, o que prejudica a recarga dos aquíferos e a manutenção do fluxo de base, acarretando redução da vazão na estação seca e aumento na estação chuvosa. Entretanto, de acordo com o autor, se as características físicas do solo após a remoção da cobertura vegetal da região forem mantidas, evitando a compactação e a impermeabilização, o suficientemente para permitir a infiltração da precipitação, isso pode contribuir com o aumento da vazão durante a estação seca, em função da redução da ET devido à remoção da vegetação.

Outras pesquisas sugerem que o reflorestamento ou plantação de árvores em campos agrícolas promovem maior capacidade de infiltração da água no solo, devido ao aumento da macroporosidade proporcionado pelas raízes, que criam caminhos preferenciais, facilitando a recarga do aquífero (ELLISON et al., 2017; ILSTEDT et al., 2007). Ilstedt et al. (2016) enfatizam a negligência em não se analisar a cobertura vegetal intermediária do solo. Nos trópicos, as pesquisas geralmente representam extremos, como estudos de desmatamento contra floresta densa, ou pastagens contra plantações (ILSTEDT et al., 2016). Os pesquisadores questionaram a teoria vigente sobre uso e cobertura do solo versus o rendimento de água, ou seja, a regra geral de que mais árvores representam menos água para a vazão em uma bacia hidrográfica (teoria de *trade-off*). Assim, Ilstedt et al. (2016) propõem uma “teoria ótima da cobertura de árvores” para a recarga subterrânea, esquematizada na Figura 8.

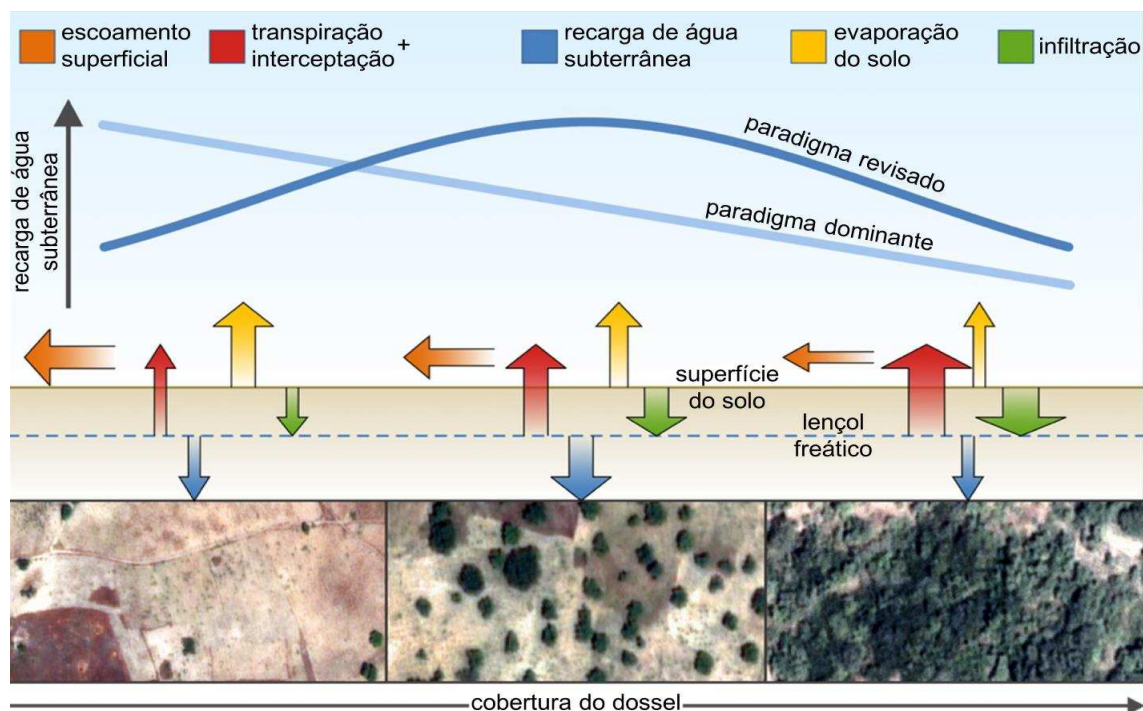


Figura 8 – Infiltração e recarga de águas subterrâneas em função do tipo de cobertura vegetal do solo. As setas indicam a direção e intensidade do fluxo de água. Fonte: Adaptado de Ellison et al. (2017) e Ilstedt et al. (2016).

De acordo com a pesquisa de campo de Ilstedt et al. (2016), realizada em uma região Tropical Seca (África Ocidental), a cobertura intermediária de árvores pode melhorar a capacidade de recarga do aquífero. Em uma área com pouca ou nenhuma densidade florestal, o escoamento e a evaporação do solo ocorrem de forma bastante elevada, dificultando a recarga do aquífero por infiltração. Por outro lado, em uma cobertura vegetal mais densa, transpiração e a interceptação são elevadas, dificultando novamente a recarga do aquífero. Para uma cobertura arbórea de baixas a intermediárias, medidas a 1,5 m de profundidade mostram que cada nova árvore pode melhorar as propriedades hidráulicas do solo entre 4,36 m e 36,8 m da borda do dossel (ILSTEDT et al., 2016). Assim, o aumento da recarga pode ser superior ao déficit proporcionado pelo aumento da ET (ELLISON et al., 2017).

Diante da ampla complexidade encontrada na literatura, sobre as várias formas de influência do clima associado à variabilidade da precipitação e do uso e cobertura do solo, é interessante compreender que as tendências nas vazões nada mais são que uma resposta integrada do mosaico apresentado

em cada bacia hidrográfica (WILK; ANDERSSON; PLERMKAMON, 2001), seja na distribuição irregular das chuvas, na irregularidade espacial do uso e cobertura do solo, com áreas densamente urbanizadas ou florestadas, ou ainda pouco exploradas. Os resultados apresentados sobre as tendências nas vazões representam uma aproximação da realidade, onde a força impulsionadora da tendência pode aparecer de forma mais evidente em casos extremos de tendência ou mascarada em casos mais complexos, levando ao aumento das incertezas.

2.4. Modelo chuva-vazão

Um modelo de chuva-vazão vem da necessidade de simular as vazões, com base nos eventos de precipitação. A utilização de modelos que possibilitem o uso apenas de dados de precipitação, como forma de explicar o comportamento das vazões podem indicar em qual período as vazões se comportam de maneira similar ou diferenciada aos eventos de precipitação.

Existe uma variedade de modelos que transformam chuva em vazão (NAYAK et al., 2013). Alguns desses modelos não exigem a complexidade de espacialização da precipitação ou a variação de uso e cobertura do solo no interior de uma bacia. Essas características menos complexas são encontradas em modelos do tipo concentrado (*lumped*), que necessitam de dados médios para toda a área de drenagem, ou seja, consideram todas essas variáveis de forma homogênea (TUCCI, 2005).

Como as vazões são respostas acumuladas dos eventos de precipitação (KAM; SHEFFIELD, 2016), uma alternativa para um modelo concentrado é a metodologia adotada por Asarian e Walker (2016), utilizando a correlação entre as vazões medidas e o Índice de Precipitação Antecedente (API), que é um índice de umidade da bacia frequentemente utilizado para estimar vazões através de eventos de precipitação (ALI; GHOSH; SINGH, 2010). La Torre Torres et al. (2011) informam que, dependendo da condição de umidade do solo na bacia as vazões são altamente influenciadas pelos eventos de precipitação, ou seja, uma precipitação de 10 mm em uma região, com persistência de dias secos refletirá numa resposta totalmente diferente sobre a vazão para os mesmos 10 mm em um período úmido.

Kam e Sheffield (2016) também utilizaram correlação entre a vazão e a precipitação antecedente como forma de quantificar sua influência sobre as vazões mínimas, chegando à conclusão que a tendência de aumento nas vazões mínimas estava associada ao aumento da precipitação antecedente. Thomas (2006) destaca que a utilização de meses anteriores para explicar o comportamento das vazões é mais eficiente que a utilização de apenas um mês. Reid e Lewis (2011) utilizaram a correlação entre API e as vazões em bacias experimentais de Caspar Creek na Califórnia (EUA), para avaliar os efeitos de cenários de mudanças climáticas.

Logo, correlacionar a vazão com a precipitação através do API, em uma análise de escala climatológica, pode ser capaz de explicar grande parte do comportamento das vazões, além de indicar períodos de interesse e verificar se a precipitação tem papel fundamental sobre as tendências observadas nas vazões médias e mínimas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A Figura 9 informa a localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG), destacando sua altitude.

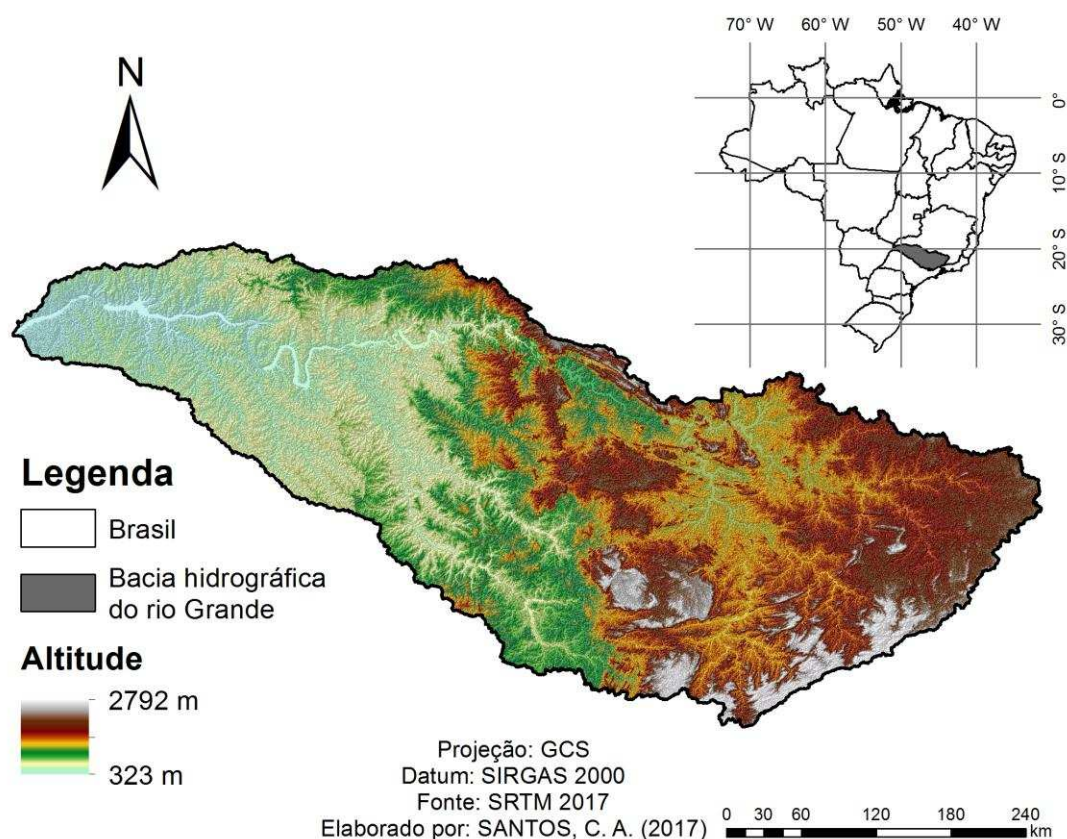


Figura 9 – Localização geográfica e altitude da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG).

De acordo com Oliveira et al. (2017), o clima nas regiões de cabeceira da BHRG é fortemente influenciado por superfícies montanhosas como a Serra da Mantiqueira. A precipitação anual total é de, aproximadamente, 1420 mm na região do médio rio Grande e 1510 mm nas regiões de cabeceira. O maior quantitativo de precipitação ocorre nos meses de verão austral, com a atuação de fenômenos meteorológicos de grande escala, como sistemas frontais (MORAIS; CASTRO; TUNDISI, 2010; PAMPUCH; AMBRIZZI, 2015) e SACZ (GRIMM, 2011; REBOITA et al., 2010), e de escala local, como sistemas

convectivos, impulsionados pelo aquecimento diferencial da superfície e disponibilidade de umidade (REBOITA et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2005).

3.2. Base de dados

A BHRG possui 362 estações fluviométricas, sendo 12 delas (3,3%) com registros históricos de aproximadamente 60 anos, as quais foram utilizadas no presente estudo. Além disso, o conjunto formado pelas 12 áreas de drenagem contam com 523 estações pluviométricas, no interior e na periferia, sendo que foram utilizadas 45 estações (8,6%), pois estas contemplam o período necessário de registros para relacionar aos dados de vazão. A distribuição espacial das estações fluviométricas e pluviométricas está ilustrada na Figura 10, bem como a área de drenagem de cada posto fluviométrico.

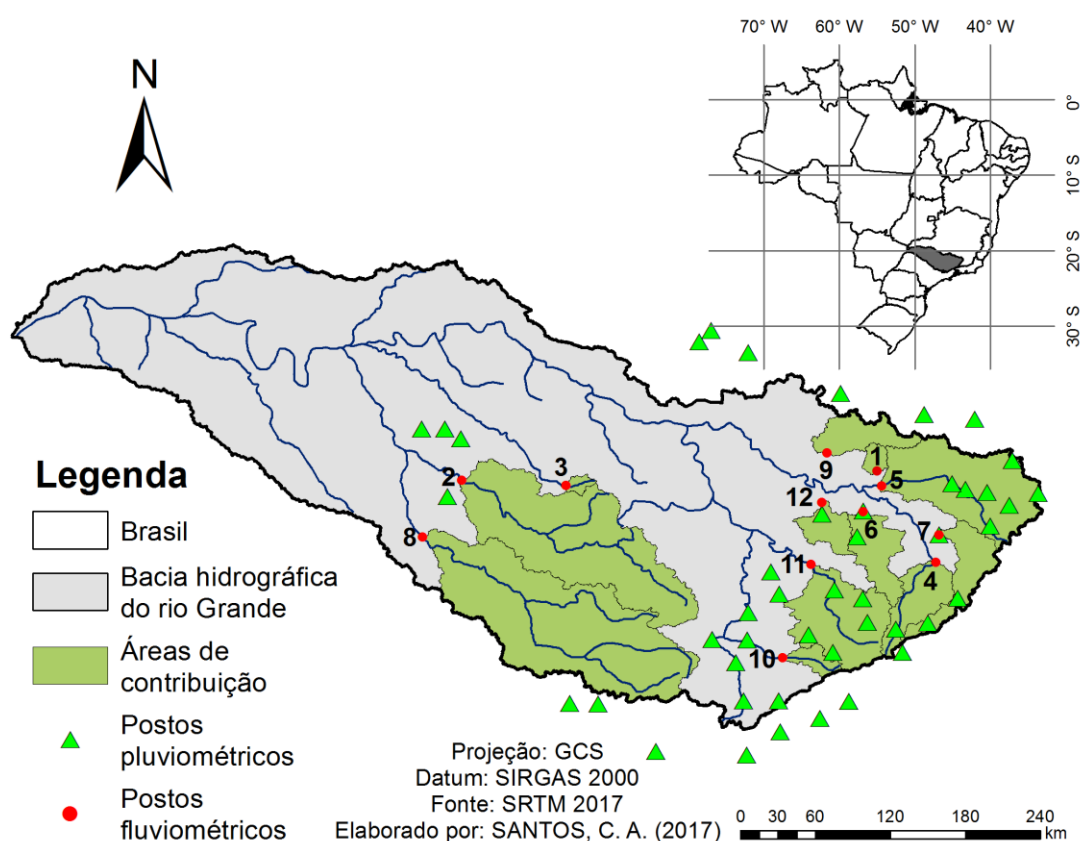


Figura 10 – Localização das 12 áreas de drenagem das estações fluviométricas e das estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG).

3.2.1. Dados fluviométricos

As principais informações de cada estação fluviométrica estão resumidas na Tabela 1. Seyam e Othman (2015) recomendam séries históricas de vazão com mais de 50 anos, uma vez que registros curtos em sistemas hidrológicos podem ter embutidos flutuações naturais do clima. Portanto, foram consideradas 12 estações fluviométricas, dentro da BHRG, com dados superiores a 60 anos (período-base: 1940-2010), entre brutos e consistidos.

Tabela 1 – Informações das estações fluviométricas utilizadas no estudo, com o nome das estações e respectivos códigos, área de drenagem e período em que os dados estão disponíveis

Nº	Estações	Código	Área (km ²)	Período
1	Bom Sucesso	61140000	351,5	1940-2010
2	Clube de Regatas	61834000	10.666,6	1941-2014
3	Fazenda Carvalhais	61770000	226,4	1946-2016
4	Fazenda Laranjeiras	61060000	1.906,7	1940-2010
5	Ibituruna	61135000	6.048,7	1926-2010
6	Itumirim	61078000	1.823,3	1935-2010
7	Madre de Deus de Minas	61012000	2.071,1	1934-2003
8	Ponte Guatapar	61912000	13.104,4	1937-2007
9	Santana do Jacaré	61202000	1.620,4	1935-2013
10	São João de Itajubá	61285000	555,0	1936-2010
11	Três Corações	61510000	4.166,2	1933-2010
12	Usina Nepomuceno	61175000	1.021,5	1941-2012

Os dados fluviométricos de vazão diária foram obtidos a partir das séries históricas do banco de dados disponibilizados pela ANA (Agência Nacional de águas), provenientes da plataforma HidroWeb (<http://hidroweb.ana.gov.br>) (ANA, 2016). Através do software Hidro 1.2 da ANA, os valores de vazão foram extraídos e exportados para uma planilha eletrônica para processar os cculos estatísticos. Para cada ano, o período base adotado foi o ano hidrológico, de

outubro a setembro. Os anos hidrológicos que apresentaram mais de 5% de falhas foram eliminados.

3.2.2. Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos diários (Tabela 2) também foram obtidos do banco de dados históricos da ANA, disponíveis na plataforma HidroWeb. Assim como no tratamento dos dados fluviométricos, esses dados foram extraídos com o auxílio do software Hidro 1.2 (ANA, 2016) e exportados para uma planilha eletrônica. Um total de 45 estações pluviométricas com período de dados correspondentes ao intervalo de 1940 a 2010 (período-base) foram utilizadas, dentro e ao redor de cada área de drenagem, possibilitando análises estatísticas em conjunto com o mesmo período encontrado nos dados de vazão.

Tabela 2 – Informações das estações pluviométricas utilizadas no interior e periferia da BHRG, com o nome das estações e respectivos códigos e período em que os dados estão disponíveis

Códigos	Nomes	Período
02346094	Piracaia	1942-2016
02247055	Jaguariúna	1942-2016
02244065	Alagoa	1942-2016
02044009	Fazenda Campo Grande	1942-2016
02245066	Conceição dos Ouros	1941-2016
02245080	Virgínia	1941-2016
02245077	Pouso Alegre	1941-2016
02245065	Cristina	1941-2016
02245074	Careaçú	1941-2016
02144004	Baependi	1941-2016
02145009	Usina do Chicão	1941-2016
02144006	Luminárias	1941-2016
02144007	Madre de Deus de Minas	1941-2016
02143008	Ibertioga	1941-2016
02145007	Usina Couro do Cervo	1941-2016

(continuação)

Códigos	Nomes	Período
02144005	Itumirim	1941-2016
02143005	Campolide	1941-2016
02143006	Barroso	1941-2016
02144009	Porto do Elvas	1941-2016
02143007	Vargem do Engenho	1941-2016
02043018	Carandaí	1941-2016
02044007	Entre Rios de Minas	1941-2016
02244039	Fazenda Agulhas Negras	1941-2016
02244057	Ponte do Costa	1941-2016
02045005	Lamounier	1941-2016
02046007	Fazenda Ajudas	1941-2016
02047027	Fazenda Conquista	1940-2015
02145001	Conceição Do Rio Verde	1941-2016
02145017	Monsenhor Paulo	1941-2016
02245010	Fazenda da Guarda (Parque)	1941-2016
02245011	São Bento do Sapucaí	1941-2016
02244054	Usina Congonhal	1941-2016
02144002	Porto Tiradentes	1941-2016
02144001	Bom Jardim de Minas	1941-2016
02045001	Bambuí	1941-2016
02245000	Santa Rita Do Sapucaí	1941-2016
02045002	Iguatama	1941-2016
02048023	Morro Agudo	1940-2014
02147006	Ribeirão Preto	1939-2014
02246023	Amparo	1939-2016
02345063	Caçapava	1929-2016
02245048	Pindamonhangaba	1932-2016
02245032	Guaratinguetá	1930-2013
02244010	Fazenda Santa Clara	1935-2016
02047025	Orlândia	1937-2014

A precipitação dentro de cada área de drenagem das estações fluviométricas foi calculada através da média ponderada das estações pluviométricas, obtida através da krigagem ordinária, método este bastante

robusto em interpolação de precipitações e recorrentemente utilizado (BOSTAN; HEUVELINK; AKYUREK, 2012), reduzindo a incerteza de utilizar apenas dados pontuais, pois a precipitação pode variar consideravelmente em uma bacia hidrográfica, dependendo do seu tamanho (GYAWALI; GREB; BLOCK, 2015). Determinaram-se os seguintes totais precipitados: precipitação total do ano hidrológico (P_a); precipitação do semestre mais seco (P_{ss}); precipitação do semestre mais chuvoso (P_{sc}); precipitação do inverno austral (P_{ia}); precipitação do verão austral (P_{va}); precipitação do mês mais seco (P_{ms}) e precipitação do mês mais chuvoso (P_{mc}).

3.2.3. Dados topográficos

Realizou-se a delimitação das áreas de drenagem de cada estação fluviométrica, utilizando-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (FARR et al., 2007), disponibilizado pelo USGS (*United States Geological Survey*), com resolução espacial de 30 metros, gerando um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) assim como proposto por Gopinath, Swetha e Ashitha (2014) e Karsauliya (2013).

Diante da localização geográfica das áreas de drenagem das 12 estações fluviométricas da BHRG, fez-se o agrupamento em três regiões: Região 1 (Clube de Regatas, Fazenda Carvalhais e Ponte Guatapará); Região 2 (Bom Sucesso, Ibituruna e Santana do Jacaré); e Região 3 (Fazenda Laranjeiras, Itumirim, Madre de Deus de Minas, São João de Itajubá, Três Corações e Usina Nepomuceno).

3.2.4. Dados de uso do solo

3.2.4.1. Densidade demográfica

Assim como destacado por Vorosmarty et al. (2000), o crescimento populacional tem papel fundamental sobre a demanda dos recursos hídricos.

Desta forma, foram utilizados os dados de número de habitantes dos municípios pertencentes a cada área de drenagem junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), compreendendo o período de 1940 a 2010, permitindo gerar a densidade demográfica das áreas de drenagem.

3.2.4.2. Uso agropecuário

Para a classificação de uso do solo em cada área de drenagem foram utilizados os dados elaborados por Dias et al. (2016), referentes ao período de 1940 a 2012. Estes dados representam a quantificação das áreas totais de cultivos e pastagens no Brasil, através da reconstrução histórica dos dados combinados dos censos agrícolas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e de imagens de sensoriamento remoto.

Foram utilizados dados referentes às pastagens, as quais incluem as pastagens naturais e plantadas; e os totais de solos cultivados, totalizando duas classes distintas e a soma das duas (uso total). Neste trabalho o conjunto dessas informações foi denominado de uso agropecuário. O período adotado foi de 1940 a 2010. A resolução espacial dos dados é de 30" (~1 km). Para cada ano, foram adotadas as diferentes classes (em porcentagem) em cada área de drenagem, identificando assim a evolução do uso agropecuário e posteriormente associando aos dados de vazão através de estatística descritiva.

3.3. Evapotranspiração

Utilizou-se a equação do balanço hídrico simples para o cálculo da evapotranspiração real (Equação 1) em cada área de drenagem. Está é uma metodologia comumente utilizada em estudos referentes a bacias hidrográficas (ÖZHAN et al., 2010), em que a evapotranspiração é obtida por intermédio de médias de grandes períodos (GAO et al., 2012).

$$ET=P - Q \pm \Delta S \quad (1)$$

em que: ET (mm) é a evapotranspiração real; P (mm) e Q (mm) são a precipitação e a vazão da área de drenagem, respectivamente; ΔS é a mudança no armazenamento de água do solo. Para longos períodos (~30 anos) a mudança de armazenamento tende a ser zero quando comparada com outros componentes do balanço hídrico (WANG, 2016).

3.4. Análises estatísticas

Foram utilizados o teste não paramétrico de Mann-Kendall, que identifica se os dados apresentam tendências crescentes ou decrescentes, e o teste não paramétrico de Pettitt, que informa em que período houve o ponto de mudança na série analisada (LI et al., 2016; MORAES et al., 1998; SALARIJAZI et al., 2012; SEYAM; OTHMAN, 2015; ZHANG et al., 2008).

Além disso, para as correlações realizadas ao longo do trabalho utilizou-se outro teste não paramétrico, amplamente utilizado na literatura, o teste de Spearman rho (ZAR, 1973) para aferir a força de correlação entre variáveis hidrometeorológicas (AHMAD et al., 2015; BASARIN et al., 2016; HOLMBERG; STOGNER; BRUCE, 2016).

No presente estudo, utilizou-se probabilidade de 5% (α) para os testes estatísticos realizados.

3.4.1. Coeficiente de correlação de Spearman rho

Diante das diferentes tipologias de precipitação, realizou-se a correlação entre os dados de vazão e precipitação para medir a força das associações entre as variáveis (BASARIN et al., 2016), através de coeficiente de correlação de Spearman rho. Essas associações tornam-se necessárias para identificar qual período de precipitação está influenciando de forma mais direta nas vazões (médias e mínimas). As precipitações que apresentaram maior influência sobre as vazões foram utilizadas na aplicação das análises estatísticas.

As precipitações associadas aos dados de vazão para cada ano hidrológico foram:

- Associação à vazão média anual: precipitação total para cada ano hidrológico (P_a). A precipitação acumulada durante o ano hidrológico e suas oscilações associadas, como em eventos de El Niño e La Niña (GRIMM; BARROS; DOYLE, 2000) ou ações antropogênicas locais (KHANNA et al., 2017), fornecem informações do que pode ocorrer sobre as possíveis tendências de vazão média anual.
- Associação à vazão mínima anual (Q_7): precipitação total para cada ano hidrológico (P_a); precipitação do semestre mais seco (P_{ss}); precipitação do semestre mais chuvoso (P_{sc}); precipitação do inverno austral (P_{ia}); precipitação do verão austral (P_{va}); precipitação do mês mais seco (P_{ms}). As associações aos períodos secos representam o período onde a lâmina precipitada é menor na área da BHRG (REBOITA et al., 2010), podendo representar significância estatística para as associações caso haja alterações no regime pluviométrico deste período, embora Mendes (2016) tenha encontrado que as precipitações acumuladas nos meses mais chuvosos apresentou maior impacto sobre as vazões mínimas.

O coeficiente de correlação de Spearman rho varia entre +1 e -1. Valores correlacionados que atingem o coeficiente de Spearman rho +1 ou -1 indicam uma perfeita correlação; entretanto, uma correlação próxima a zero significa que a correlação entre os valores é fraca ou inexistente (BASARIN et al., 2016).

Adotando a probabilidade (α) de 5%, calculou-se o coeficiente de Spearman rho através da Equação 2:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d^2}{(n^3 - n)} \quad (2)$$

em que: ρ é o coeficiente de correlação de Spearman rho; n é o número de medidas em cada uma das duas variáveis na correlação; d é a diferença classificada entre os postos das variáveis no nível i .

A forma utilizada para interpretação dos resultados do coeficiente de correlação de Spearman rho estão disponíveis na Tabela 3.

Tabela 3 – Interpretação do coeficiente de correlação de Spearman rho

Valor de Spearman rho (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação muito fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: Adaptado de Shimakura (2006).

Baseado na força das associações encontradas através do teste de Spearman rho (Tabela 4), as precipitações utilizadas neste estudo, tanto para as análises estatísticas quanto para explicar o comportamento das vazões, foi a precipitação do ano hidrológico, para explicar a variabilidade nas vazões médias e mínimas.

Tabela 4 – Valores do coeficiente de correlação de Spearman rho entre as precipitações e as vazões para cada área de drenagem

Área de drenagem	Vazão média anual	Vazão mínima anual (Q ₇)					
	P _a	P _a	P _{sc}	P _{va}	P _{ss}	P _{ia}	P _{ms}
Bom Sucesso	0,62	0,24	0,20	0,03	0,17	0,13	0,07
Clube de Regatas	0,67	0,47	0,25	0,21	0,45	0,30	0,14
Fazenda Carvalhais	0,47	0,45	0,25	0,09	0,43	0,44	0,30
Fazenda Laranjeiras	0,79	0,58	0,39	0,25	0,49	0,45	0,23
Ibituruna	0,71	0,57	0,47	0,35	0,40	0,24	0,13
Itumirim	0,71	0,57	0,31	0,17	0,54	0,46	0,40
Madre de Deus de Minas	0,69	0,73	0,60	0,44	0,38	0,23	0,26
Ponte Guatapar	0,59	0,40	0,19	0,16	0,45	0,26	0,11
Santana do Jacaré	0,60	0,27	0,28	0,31	0,01	0,03	0,16
São João de Itajubá	0,71	0,71	0,54	0,35	0,53	0,43	0,20
Três Corações	0,73	0,69	0,47	0,32	0,54	0,31	0,27
Usina Nepomuceno	0,77	0,69	0,54	0,41	0,29	0,23	0,12

3.4.2. Teste de tendência

De acordo com Wang, Van Gelder e Vrijling (2005), o teste de tendência para séries anuais informa de maneira global a mudança nos processos de vazão. Neste teste, a hipótese nula H_0 (sem tendência) pressupõe que a sucessão de valores $(X_1, \dots, X_n)$ são uma amostra de n variáveis ocorrendo de forma independente e ordenada aleatoriamente (YU; ZOU; WHITTEMORE, 1993). A hipótese alternativa H_1 (com tendência) de um teste de dois lados afirma que a distribuição de X_k e X_j não é idêntica para todos $k, j \leq n$ com $k \neq j$ (KAHYA; KALAYCI, 2004). O procedimento para o teste de tendência de Mann-Kendall (S) adotado neste estudo foi o seguinte (Equação 3):

Através da consideração da hipótese nula (H_0), tem-se o somatório de X_j e X_k que são as séries de observações temporais em ordem cronológica.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{ sinal}(X_j - X_k) \quad (3)$$

em que: n é o número de registros do conjunto de dados; X_j e X_k são os valores de dados sequenciais.

$$\text{ sinal}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{se } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

Para séries com grande quantidade de termos, normalmente quando $n \geq 10$ (TAO et al., 2011), parte-se da premissa que a hipótese H_0 seja verdadeira. Logo, é possível mostrar que S é normalmente distribuída usando a variância de S , com distribuição de S apresentando média zero (Equação 4):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

Logo, calcula-se a estatística $Z(MK)$ para testar a significância de S , para todos os casos em que n é maior que 10 (CHEN et al., 2016; SULAIMAN et al., 2015) (Equação 5):

$$Z(MK) = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

em que: $Z(MK)$ positivo indica uma tendência ascendente, enquanto um $Z(MK)$ negativo indica uma tendência descendente. A hipótese nula será aceita se $|Z(MK)| \leq Z(MK)\alpha/2$ no nível de significância α adotado (0,05), que indica a força da tendência (ZHANG et al., 2008).

A magnitude da tendência nos dados da amostra é estimada pela abordagem da Inclinação de Sen, proposta por Sen (1968), amplamente utilizada na literatura (CHEN et al., 2016; KAHYA; KALAYCI, 2004; SALARIJAZI et al., 2012; SOUZA-FILHO et al., 2016). A inclinação de todos os pares é estimada por (Equação 6):

$$\beta = \text{mediana} \left[\frac{X_j - X_k}{j - k} \right] \text{ para todo } k < j \quad (6)$$

em que: β é considerado como a mediana de todas as combinações possíveis dos pares do conjunto de dados; X_j e X_k , considerados valores de dados no tempo j e k ($j > k$), respectivamente.

3.4.3. Ponto de mudança

Neste estudo, foi utilizado o teste não paramétrico proposto por Pettitt et al. (1979) para detectar a ocorrência da mudança abrupta nas séries hidrológicas.

De acordo com Bates, Chandler e Bowman (2012), a hipótese nula para este teste (H_0) é que as observações são independentes e identicamente

distribuídas. Para a aplicação do teste, supõe-se que $R_1, \dots, R_t$ sejam as fileiras das t observações $Y_1, \dots, Y_t$ na amostra completa de n observações crescentes. Para um teste em que a hipótese alternativa não especifica a direção da mudança (BATES; CHANDLER; BOWMAN, 2012), a estatística não paramétrica é definida como (Equações 7 e 8):

$$K_T = \max_{1 \leq t \leq T} |U_{t,N}| \quad (7)$$

em que,

$$U_{t,T} = 2 \sum_{j=1}^t R_j - t(n+1), j=1, \dots, t \quad (8)$$

O ponto de mudança da série está localizado em K_T , desde que a estatística seja significativa. A probabilidade de significância de K_T é aproximada para $p \leq 0,05$ (LI et al., 2016), obtida através de (Equação 9):

$$p \cong 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (9)$$

em que: p é o nível de significância; K_T é o valor crítico; T é o número de anos da série histórica. Quando p é maior que o nível de significância específica neste estudo (5%), a hipótese nula é rejeitada.

3.4.4. Desagregação da influência da precipitação sobre a vazão

Para tal, é necessário utilizar a “vazão ajustada pela precipitação” (resíduos) (ASARIAN; WALKER, 2016; HELSEL; HIRSCH, 2002), aplicando os seguintes cálculos pretéritos: (1) API (Índice de Precipitação de Antecedente); (2) curva de regressão LOESS (Suavização de Dispersão Localmente Ponderada).

3.4.4.1. Cálculo do índice de precipitação antecedente (API)

O API originalmente é calculado com dados de precipitação diária; entretanto, neste trabalho foi calculado com a precipitação mensal, devido à limitação nos dados disponíveis, assim como realizado por Asarian e Walker (2016). Desta forma, utilizando o acumulado mensal de precipitação para cada área de drenagem, calculou-se o API combinando a precipitação do mês atual com uma soma ponderada de precipitação nos meses anteriores, de acordo com a Equação 10.

$$API_m = k * API_{m-1} + P_m \quad (10)$$

em que: API_m (mm) é índice de precipitação antecedente para o mês “m”; P_m é a precipitação para o mês “m”; k é um coeficiente de recessão adimensional, que varia de 0 a 1, específico para a calibração de características de bacias hidrográficas. O coeficiente de recessão k governa a forma como a precipitação anterior é descontada (ASARIAN, 2015), geralmente variando entre 0,80 e 0,98 (OUTRAM et al., 2014; SCHRÖTER et al., 2015). Para cada área de drenagem foram selecionados valores médios de k , através da correlação entre o API e a vazão, alterando o k para cada correlação, testando por iteratividade todas as combinações possíveis para encontrar o coeficiente de correlação de Spearman rho e de determinação mais elevado.

3.4.4.2. Curva de regressão LOESS

Utilizando uma função de peso tri-cubo e uma especificação do tamanho da vizinhança (distância euclidiana), a curva de regressão LOESS é calculada através da Equação 11 (CLEVELAND; DEVLIN, 1988):

$$w_i = \left\{ 1 - \left(\frac{|x - x_i|}{\Delta} \right)^3 \right\}^3 \quad (11)$$

em que: X define a posição em que a função deve ser avaliada; X_i define a posição do ponto de medição; e Δ é a distância euclidiana máxima entre um ponto de avaliação e o ponto de medição dentro da região de ajuste (CLEVELAND; DEVLIN, 1988).

Essa técnica foi utilizada devido à relação de não linearidade existente entre precipitação e vazão (THOMAS, 2006). Utilizando a curva de regressão LOESS foi feito um diagrama de dispersão entre vazão (variável dependente) e o API que irá descrever o melhor ajuste entre as duas variáveis (Figura 11).

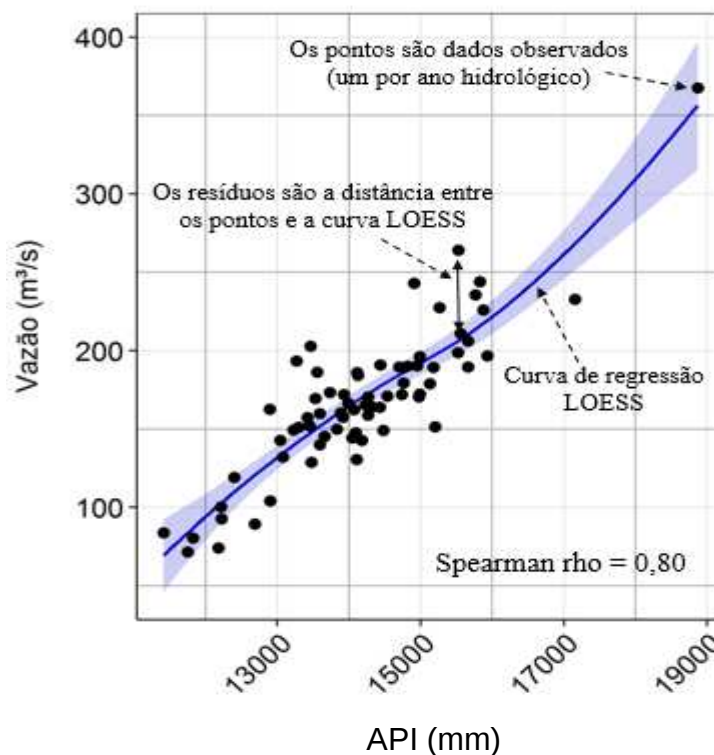


Figura 11 – Exemplo da curva de regressão LOESS entre a vazão média do ano hidrológico e o API. Fonte: Adaptado de Asarian e Walker (2016).

O resíduo (vazão medida menos a prevista), representa a vazão com remoção da variabilidade causada pela precipitação (THOMAS, 2006), isto é, o efeito líquido combinado de todos os fatores que afetam a vazão, com exceção da precipitação (HELSEL; HIRSCH, 2002). Seu valor negativo significa que o modelo (vazão prevista ou estimada com base no API) é superestimado e o valor positivo indica subestimativa (ASARIAN, 2015). Já o resíduo 0 indica que a vazão é exatamente o que seria esperado pelos eventos de precipitação

(HELSEL; HIRSCH, 2002), ou seja, quanto mais afastado do 0, menos os eventos de precipitação explicam a vazão e outros fatores colaboram para seu comportamento. As tendências nos resíduos são causadas por fatores diferentes da variação na precipitação (THOMAS, 2006). Neste trabalho, outras condições que impulsionam o comportamento na vazão, e não estão relacionados aos eventos de precipitação, foram relacionados às dinâmicas de uso e cobertura do solo.

Assim, separando a variação na vazão provocada pela variação na precipitação, a tendência restante na vazão pode ser atribuída a outros fatores que não sejam a precipitação (ASARIAN; WALKER, 2016). Além disso, através dessa relação, utilizando a curva de regressão LOESS, foi possível obter uma aproximação da contribuição efetiva da precipitação sobre a vazão, em que o coeficiente de Spearman rho indica se a precipitação está contribuindo de forma significativa ou não para as vazões em cada área de drenagem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Regime pluviométrico

O comportamento climatológico mensal médio da precipitação (1940-2010) nas áreas de drenagem da BHRG está exposto na Figura 12. O período compreendido entre os meses de outubro a março apresentam o maior quantitativo precipitado (~1245 mm) devido aos fenômenos meteorológicos típicos dessa época do ano, como SACZ, sistemas convectivos e passagem de sistemas frontais (REBOITA et al., 2010). Neste período o volume precipitado equivale a 83,9% da precipitação total do ano hidrológico.

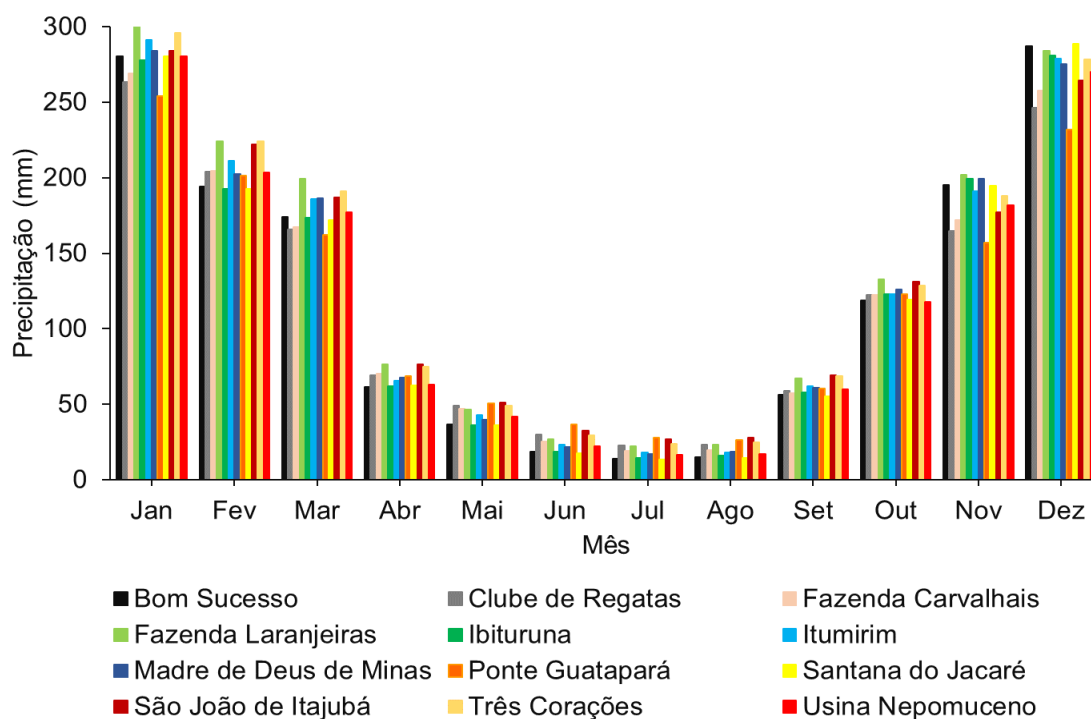


Figura 12 – Precipitações médias mensais (1940-2010) em 12 áreas de drenagem da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG).

Entre os meses de abril e setembro a lâmina precipitada é menor (~238,5 mm) devido ao desenvolvimento da massa de ar seca característica desse período do ano na região, principalmente nos meses de inverno austral (junho a agosto), impulsionada pela atuação da SASH (Alta Subtropical do Atlântico Sul) que avança seu posicionamento para Oeste, atingindo o Sudeste do Brasil (REBOITA et al., 2010; SUN; COOK; VIZY, 2017) e inibindo a

formação de nuvens através da alta pressão. O volume precipitado é bastante reduzido, representando 16,1% do quantitativo precipitado durante o ano hidrológico.

As informações pluviométricas apresentadas na Tabela 5 para cada área de drenagem da BHRG são as médias de longo prazo da precipitação total do ano hidrológico (P_a) e as tendências associadas.

Tabela 5 – Média climatológica das precipitações médias anuais (P_a) em cada área de drenagem estudada, valores do teste de Mann-Kendall (Z (MK)) com p-valor associado e declinações das tendências

Nº	Estação	P_a (mm)	Tendência		
			Z(MK)	p-valor	Declinação de Sen (mm ano ⁻¹)
1	Bom Sucesso	1449	1,104	0,311	1,3
2	Clube de Regatas	1420	1,420	0,156	1,6
3	Fazenda Carvalhais	1433	1,480	0,139	1,5
4	Fazenda Laranjeiras	1606	2,596	0,009	3,5
5	Ibituruna	1449	1,389	0,165	1,6
6	Itumirim	1510	1,815	0,070	2,2
7	Madre de Deus de Minas	1497	2,139	0,032	2,5
8	Ponte Guatapar	1401	1,125	0,260	1,2
9	Santana do Jacaré	1444	0,852	0,394	1,1
10	São João de Itajubá	1551	2,221	0,026	3,4
11	Três Corações	1577	2,616	0,009	3,9
12	Usina Nepomuceno	1449	1,734	0,083	2,0

Evidenciam-se tendências significativas de crescimento da precipitação na Região 3 da BHRG, podendo ir de 2,6 mm ano⁻¹ (p-valor de 0,032) na área de drenagem 7, de Madre de Deus de Minas, até 3,9 mm ano⁻¹ (p-valor de 0,009), na área de drenagem 11, de Três Corações. Estas áreas de drenagem pertencentes a Região 3 são as que apresentam o maior total precipitado durante o ano hidrológico, com média de 1532 mm. Tal valor, mais elevado, assim como destacado por Zandonadi et al. (2016), pode ser explicado pela ocorrência do efeito orográfico, devido  altitude que pode chegar a 2700 m (interação clima-paisagem), com a direção predominante do vento de Noroeste

(850 hPa) nos períodos de verão austral, em que a SACZ tem atuação mais significativa (JUNQUAS et al., 2016).

A Figura 13 ilustra o padrão espacial de comportamento da tendência das precipitações em cada área de drenagem. Na Região 3, as áreas de drenagem da Fazenda Laranjeiras, Madre de Deus de Minas, São João de Itajubá e Três Corações, apresentaram precipitação com tendência de crescimento ao nível de significância de 5%.

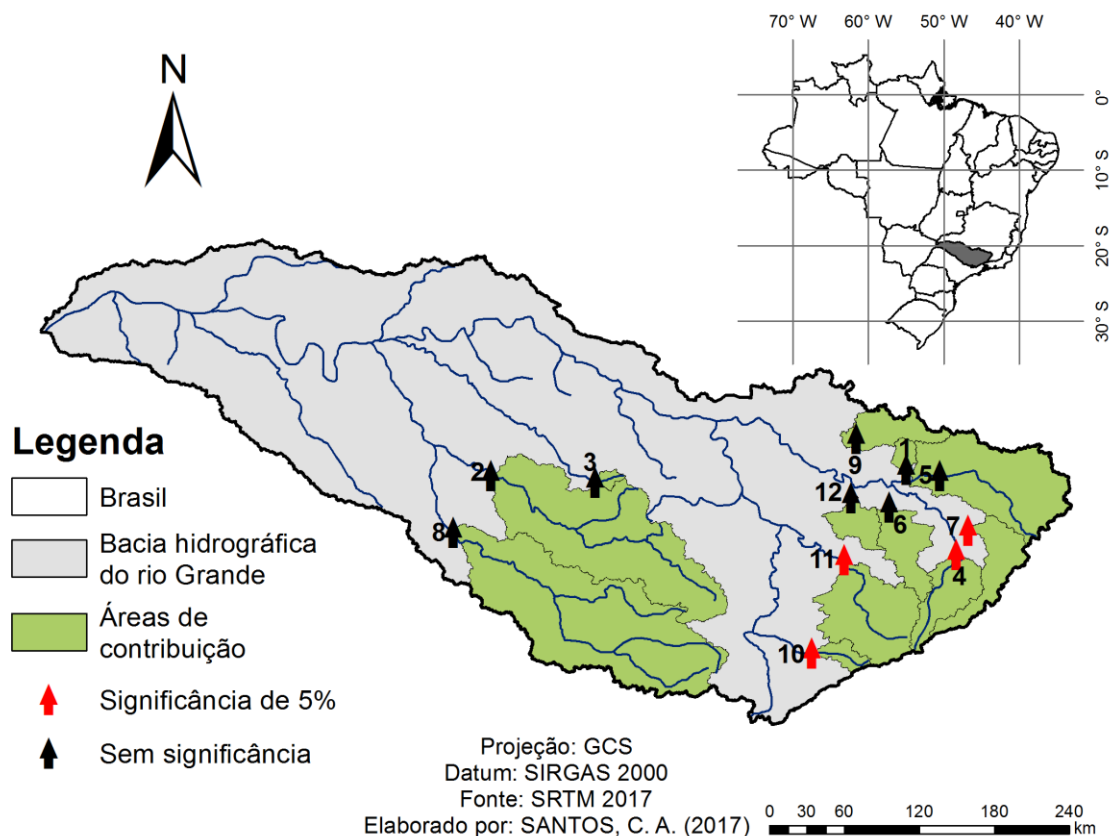


Figura 13 – Tendência da precipitação (P_a) em cada área de drenagem da BHRG. Setas indicam a direção do sinal e as cores informam o nível de significância.

A Região 1 (áreas de drenagem do Clube de Regatas, Fazenda Carvalhais e Ponte Guatapar) e Região 2 (Bom Sucesso, Ibituruna e Santana do Jacaré) não apresentaram tendência significativa de crescimento ou redução das precipitações (p -valor $>0,05$). A média de precipitação (P_a) nessas regies chega a 1440 mm.

Um importante diagnóstico sobre as precipitações na região da BHRG é o seu indicativo de aumento em todas as áreas de drenagem, mesmo em algumas sem significância estatística. Tal comportamento está de acordo com Gonzalez et al. (2014) e Zilli et al. (2017), que identificaram aumento das precipitações para a região a partir da década de 1960, principalmente nos meses de verão austral.

As tendências mensais das precipitações em cada área de drenagem (Figura 14) possibilitam informar em qual período do ano a tendência na precipitação apresenta maior intensidade. Alguns meses, como fevereiro, março, junho e outubro, indicam sinal de redução nas precipitações, entretanto sem significância estatística com de 5% probabilidade.

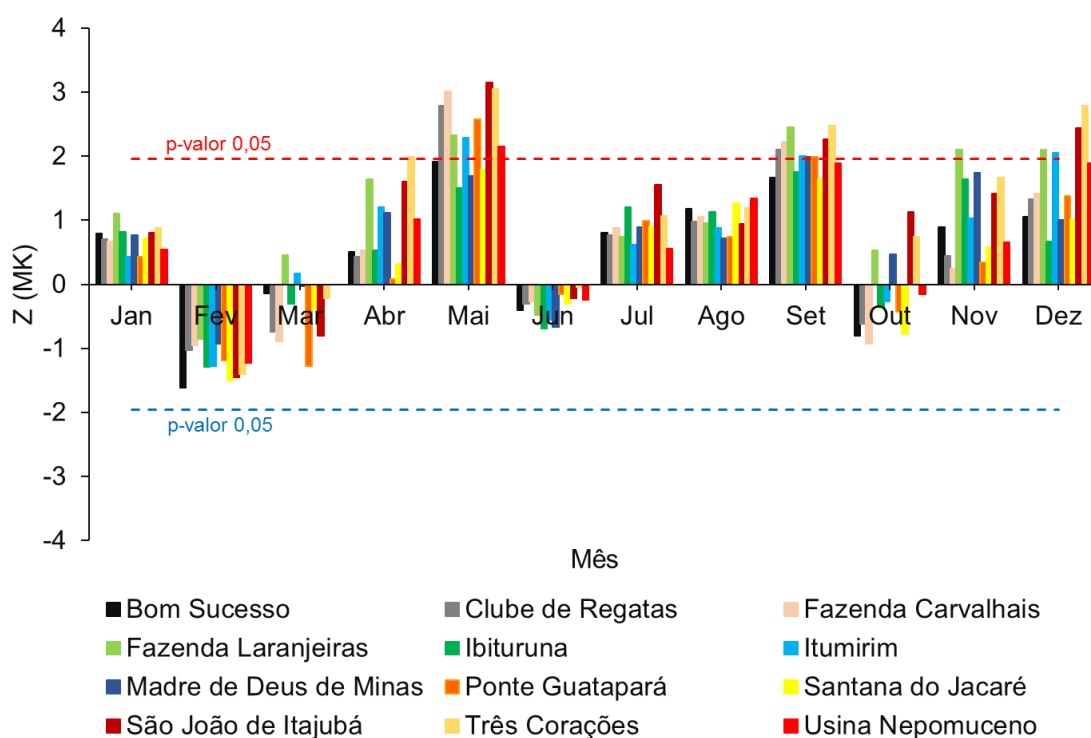


Figura 14 – Valores do teste de tendência de Mann-Kendall ($Z(MK)$) das precipitações mensais. Linhas tracejadas representam o nível de significância. Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam, respectivamente o limite superior e inferior dos níveis de significância para a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0).

Verifica-se na Figura 14 que os meses de abril (Três Coraçōes), maio (Clube de Regatas, Fazenda Carvalhais, Fazenda Laranjeiras, Itumirim, Ponte Guataparά, São João de Itajubá, Três Coraçōes, Usina Nepomuceno),

setembro (Clube de Regatas, Fazenda Carvalhais, Fazenda Laranjeiras, Itumirim, Madre de Deus de Minas, Ponte Guatapar, São João de Itajubá, Três Corações), novembro (Fazenda Laranjeiras) e dezembro (Fazenda Laranjeiras, Itumirim, São João de Itajubá, Três Corações) apresentaram forte tendência de aumento na precipitação, com 5% de significância. Embora os meses de abril a setembro (exceto junho) indiquem sinal de aumento das precipitações, seu quantitativo durante o ano representa apenas 16,1% do total, fazendo com que esse aumento não provoque grandes contribuies para o incremento da precipitação anual (P_a).

Associando as tendências de precipitaes mensais com as tendências de precipitao do ano hidrológico, em cada área de drenagem, observa-se que os meses de novembro e dezembro foram os maiores contribuintes, de forma significativa, para a tendência crescente de precipitao do ano hidrológico, ao nível de 5% de significância. As áreas de drenagem em que não houve tendência de aumento da precipitao nesses meses não apresentaram tendência para a precipitao do ano hidrológico, ou seja, os eventos de chuva do início do verão austral ditaram a tendência de comportamento da precipitao no ano hidrológico por serem os meses com maior quantitativo de precipitao. Esses resultados indicam similaridade com os encontrados por Gonzalez et al. (2014), que identificaram tendência de aumento da precipitao para o Sudeste brasileiro durante o verão austral.

A Figura 15 informa as anomalias temporais de precipitao do ano hidrológico nas 12 áreas da BHRG, destacando as fases quentes e frias dos moduladores climáticos PDO e AMO.

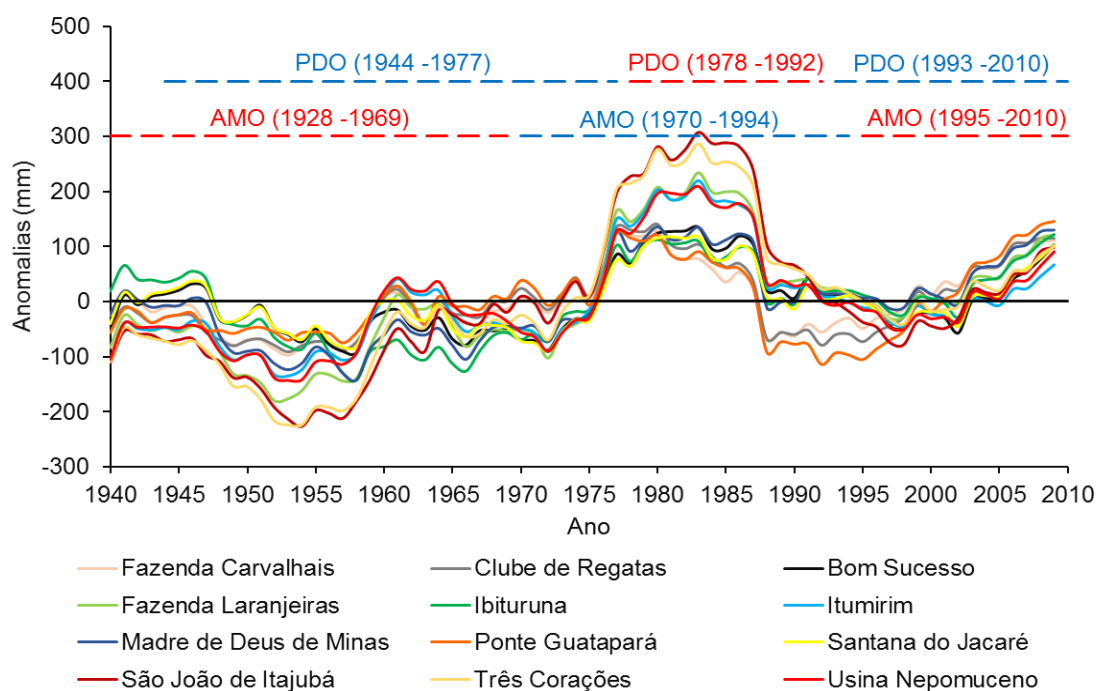


Figura 15 – Média móvel de 10 anos das anomalias de precipitação do ano hidrológico nas áreas de drenagem estudadas da BHRG. Linhas tracejadas em azul mostram o período de atuação da PDO e em vermelho os eventos de AMO.

Observando as anomalias de precipitação, destacam-se padrões de anomalias positivas de precipitação, coincidindo com os eventos de PDO e AMO nas fases quente e fria, respectivamente, corroborando com estudos anteriores (ALEXANDER; KILBOURNE; NYE, 2014; MOLION, 2008; TING et al., 2009; VÁSQUEZ P. et al., 2017). Além disso, houve predominância de eventos de El Niño na fase quente da PDO e de La Niña em sua fase fria (KIM; YEH; CHANG, 2014; WANG; LIU, 2016), sugerindo que os eventos de ENSO amplificam os sinais das anomalias de precipitação (positivas e negativas) na região estudada neste trabalho. Exemplo deste acoplamento entre PDO e ENSO pode ser identificado no El Niño de 1982-1983 e La Niña de 1955-1956 (Figura 4) amplificando, respectivamente, as anomalias positivas e negativas de precipitação. A amplificação das anomalias positivas de precipitação a partir de 2000 pode estar associada a um pequeno período de fase quente da PDO, assim como em 1940 a 1946 e 1960 (KIM; YEH; CHANG, 2014).

4.2. Densidade demográfica

Na Figura 16 é apresentada a evolução temporal da densidade demográfica por área de drenagem da BHRG, representando a tipologia de uso e cobertura do solo na forma de urbanização. As áreas de drenagem que apresentaram maior crescimento na densidade populacional foram a Ponte Guatapar, Clube de Regatas e Três Corações, crescendo rapidamente a partir de meados da década de 1970. Além disso, essas áreas apresentam as maiores densidades com, respectivamente, 90, 65 e 52 habitantes por km² em 2010. Nessas regiões, um aumento na demanda de água como resultado do crescimento da população,  inevitável (YIGZAW; HOSSAIN, 2016).

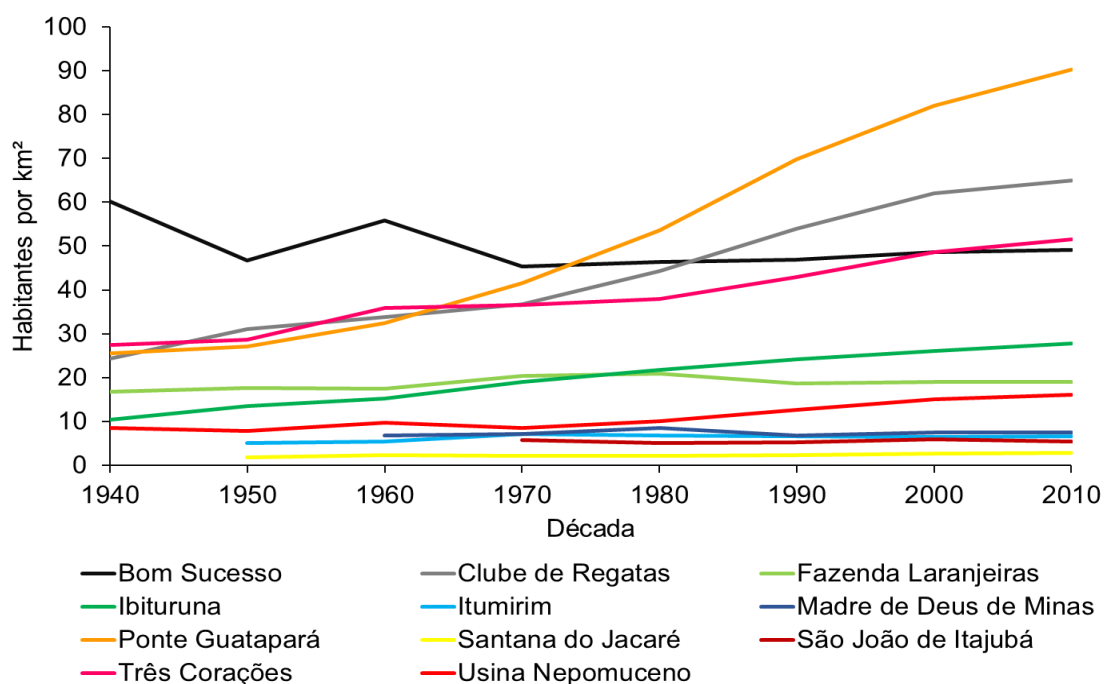


Figura 16 – Número de habitantes por km² ao longo do tempo nas áreas de drenagem da BHRG.

Vorosmarty et al. (2000), chegaram à conclusão, em um nível global, que as mudanças iminentes no desenvolvimento econmico e populacional nos próximos 25 anos irão determinar o futuro da demanda de água em maior grau que as influenciadas por mudanças no clima médio.

Nas áreas de drenagem de Ibituruna, Fazenda Laranjeiras e Usina Nepomuceno têm houve crescimento, entretanto, em menor proporção se

comparado com as áreas anteriormente mencionadas. Em 2010, essas áreas contaram, respectivamente, com 28, 19 e 16 habitantes por km². A área de Bom Sucesso, de 1940 a 1970, apresentou decréscimo de densidade populacional, mas a partir de 1970 a 2010 o crescimento manteve-se estável com 49 habitantes por km².

As áreas de Madre de Deus de Minas, Itumirim, São João de Itajubá e Santana do Jacaré contam com a menor densidade populacional, dentre as áreas deste estudo, além de apresentarem estabilidade em sua evolução temporal, possuindo até 2010, respectivamente, 8, 7, 5, e 3 habitantes por km². Apenas a área da Fazenda Carvalhais não apresenta sede municipal em seu interior ou próximo a sua periferia.

4.3. Uso e cobertura do solo com atividades agropecuárias

A partir de meados da década de 1970, houve mudanças expressivas nas práticas agropecuárias da BHRG, provocadas pela substituição das áreas de pastagens por outras atividades ou por atividades agrícolas (Figura 17). As regiões do Clube de Regatas, Fazenda Carvalhais e Ponte Guatapará, paulatinamente substituíram suas áreas de pastagens por agricultura, porém as áreas do Clube de Regatas e Ponte Guatapará mostraram crescimento mais expressivo das atividades agrícolas, principalmente através de culturas como a cana-de-açúcar, impulsionada por incentivos fiscais como o pró-álcool (ROSILLO-CALLE; CORTEZ, 1998).

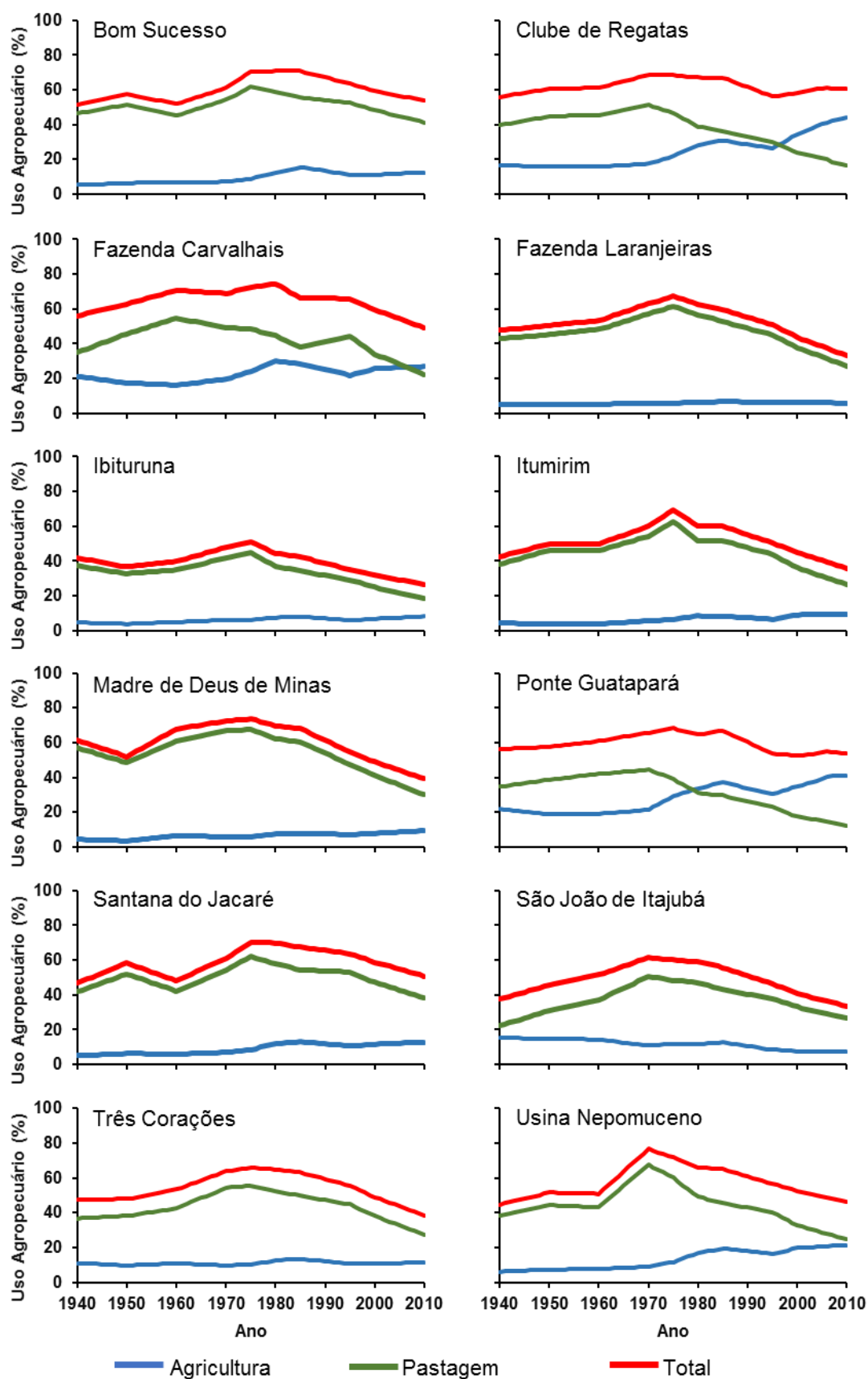


Figura 17 – Porcentagem do uso agropecuário ao longo do tempo nas áreas de drenagem da BHRG. Uso agrícola (linha azul), pastagem (linha verde) e agropecuário (agricultura + pastagem) (linha vermelha).

As áreas de drenagem da Região 2 e Região 3, têm baixo percentual de áreas agrícolas, se comparado com a Região 1, coincidindo com estudos anteriores sobre a cobertura do solo na região (ABELEN et al., 2015; BORGLIN; BORGLIN, 2013; RUHOFF et al., 2013). A área de drenagem da Usina Nepomuceno apresentou leve crescimento em sua área de uso agrícola, entretanto com um percentual baixo, se comparado com a área do Clube de Regatas e Ponte Guatapará. A área de Ibituruna apresenta comportamento similar à Região 2 e Região 3, embora seu percentual de cobertura agropecuária seja baixo, atingindo o máximo de 51% em 1975 e caindo para 27% em 2010.

De maneira geral, a Região 1 apresenta uso agrícola bastante elevado, em substituição às áreas de pastagens. A Região 2 e Região 3 substituíram as pastagens por outras atividades ou simplesmente abandonaram (DIAS et al., 2016) a partir da década de 1970; entretanto, não utilizaram a área para uso agrícola (essas outras atividades não são informadas pelos dados elaborados por Dias et al. (2016) entre 1940 e 2010).

4.4. Vazões

Neste item são caracterizadas as vazões médias e mínimas (Q_7) e apresentados os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall para as vazões. Posteriormente, onde o teste de tendência apontou resultados estatisticamente significativos de crescimento ou decréscimo nas vazões aplicou-se o teste de Pettitt para identificar em qual ano ocorreu a mudança de comportamento nas vazões, dividindo a série hidrológica em períodos distintos.

Em cada período distinto foram aplicadas análises estatísticas descritivas para aferir o nível de variação das mudanças nas vazões, bem como relacionou-se tais mudanças com outros fatores, tais como a variabilidade da precipitação e o uso e cobertura do solo. Finalmente, utilizando um modelo chuva-vazão, foi estimada a influência da precipitação e de outros fatores sobre a tendência nas vazões, utilizando a vazão ajustada pela precipitação.

4.4.1. Vazões médias

4.4.1.1. Teste de Tendência

A Tabela 6 apresenta as médias de longo prazo das vazões médias de cada ano hidrológico nas áreas de drenagem da BHRG analisadas neste estudo, bem como as tendências associadas. Apenas as áreas do Clube de Regatas (p-valor de 0,001 e Z (MK) de 3,206), na Região 1, e Ibituruna (p-valor de 0,009 e Z (MK) de 2,622), na Região 2, obtiveram significância estatística para o aumento das vazões médias, com 5% de probabilidade. O restante das áreas de drenagem não apresentou tendência.

Tabela 6 – Vazões médias anuais em cada área de drenagem estudada da BHRG, bem como valores do teste de Mann-Kendall (Z (MK)) com p-valor associado e declinações das tendências

Nº	Estação	Q _{méd} (m³/s)	Tendência		
			Z(MK)	p-valor	Declinação de Sen (m³/s . ano)
1	Bom Sucesso	6,0	-0,498	0,627	-0,007
2	Clube de Regatas	168,5	3,206	0,001	0,734
3	Fazenda Carvalhais	4,2	-0,305	0,770	-0,003
4	Fazenda Laranjeiras	47,2	1,338	0,181	0,119
5	Ibituruna	119,9	2,622	0,009	0,511
6	Itumirim	33,3	1,372	0,170	0,086
7	Madre de Deus de Minas	48,2	0,471	0,638	0,022
8	Ponte Guatapar	208,7	1,625	0,104	0,603
9	Santana do Jacaré	27,9	-0,285	0,784	-0,009
10	São João de Itajubá	12,8	1,537	0,124	0,036
11	Três Corações	91,9	0,973	0,331	0,177
12	Usina Nepomuceno	16,2	0,813	0,416	0,030

Como destacado na Figura 18, observa-se que as áreas do Clube de Regatas e Ibituruna não apresentaram dependência espacial para as tendências de crescimento das vazões médias. Entretanto, as áreas na Região 3 destacam tal dependência espacial para as vazões médias, por

compartilharem similaridade no comportamento da precipitação (Figura 13), na densidade populacional (Figura 16), e na dinâmica agropecuária de uso e cobertura do solo (Figura 17), justificando o mesmo sinal de tendência das vazões médias.

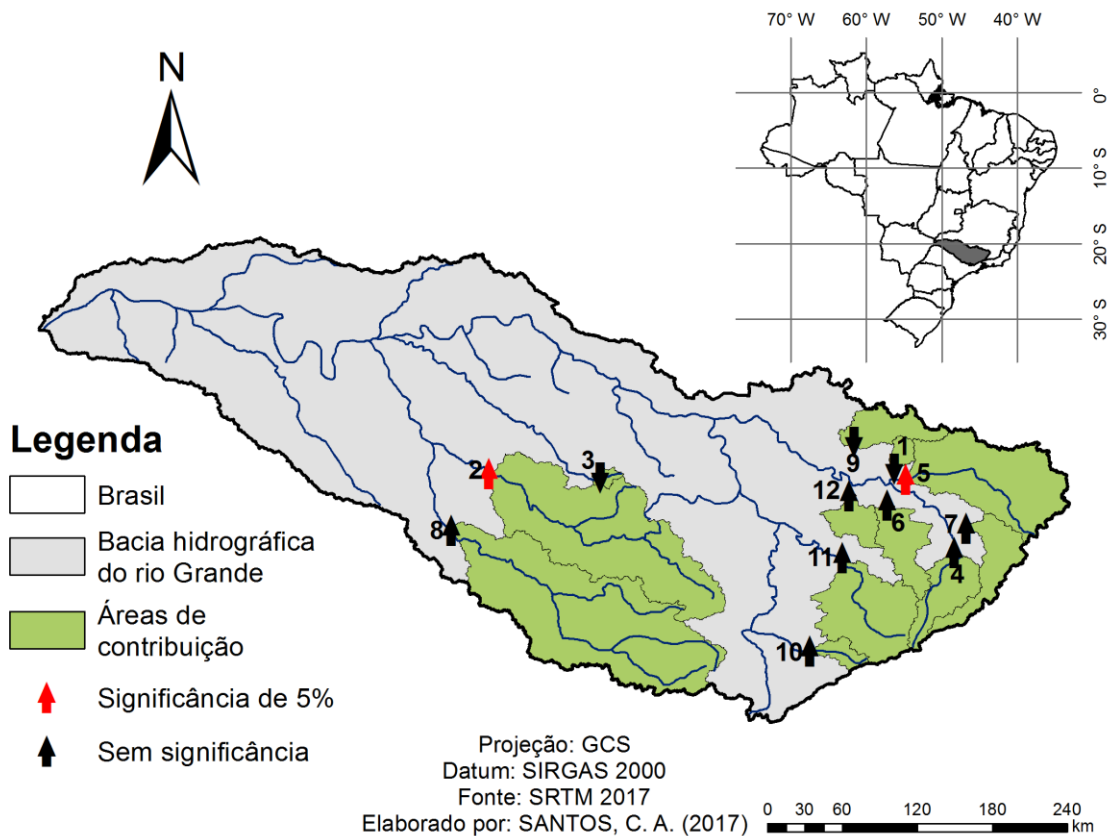


Figura 18 – Tendência das vazões médias anuais em cada área de drenagem estudada da bacia hidrográfica do rio Grande (BHRG). As setas indicam a direção do sinal e as cores informam o nível de significância.

Destaca-se que as tendências significativas de crescimento da precipitação, que ocorreram na Região 3, não refletiram sobre as vazões médias desta região, sugerindo a possibilidade de que fatores não ligados diretamente à precipitação podem estar suprimindo o aumento significativo das vazões médias. Tais fatores podem estar relacionados ao aumento da vegetação florestal (PIKETTY et al., 2009; VIANA, 2004; VIOLA et al., 2014) em substituição às áreas de pastagens a partir de meados da década de 1970 (Figura 17), contribuindo para o aumento da evapotranspiração (ET) (BOSCH; HEWLETT, 1982; ENGEL et al., 2005; OCHOA-TOCACHI et al., 2016).

Thomas (2006) destaca que os principais fatores que podem contribuir para as tendências de crescimento ou decréscimo nas vazões são a variabilidade da precipitação e mudanças nas características das bacias hidrográficas, tanto naturais quanto induzidas pelo homem, como alterações na cobertura vegetal ou na morfologia. Desta forma, os resultados obtidos mostram que outros fatores, além da precipitação, podem estar atuando de forma conjunta para impulsionar a tendência de crescimento das vazões médias nas áreas do Clube de Regatas e Ibituruna, bem como mantendo a estabilidade nas áreas da Região 3, nas quais a vazão média poderia estar aumentando de forma intensa, devido ao aumento significativo da precipitação, conforme demonstrado no item 4.1 (Tabela 5 e Figura 13).

As tendências das vazões médias mensais nas 12 áreas de drenagem da BHRG são informadas na Figura 19, possibilitando identificar qual o período do ano contribui de forma expressiva para as tendências encontradas.

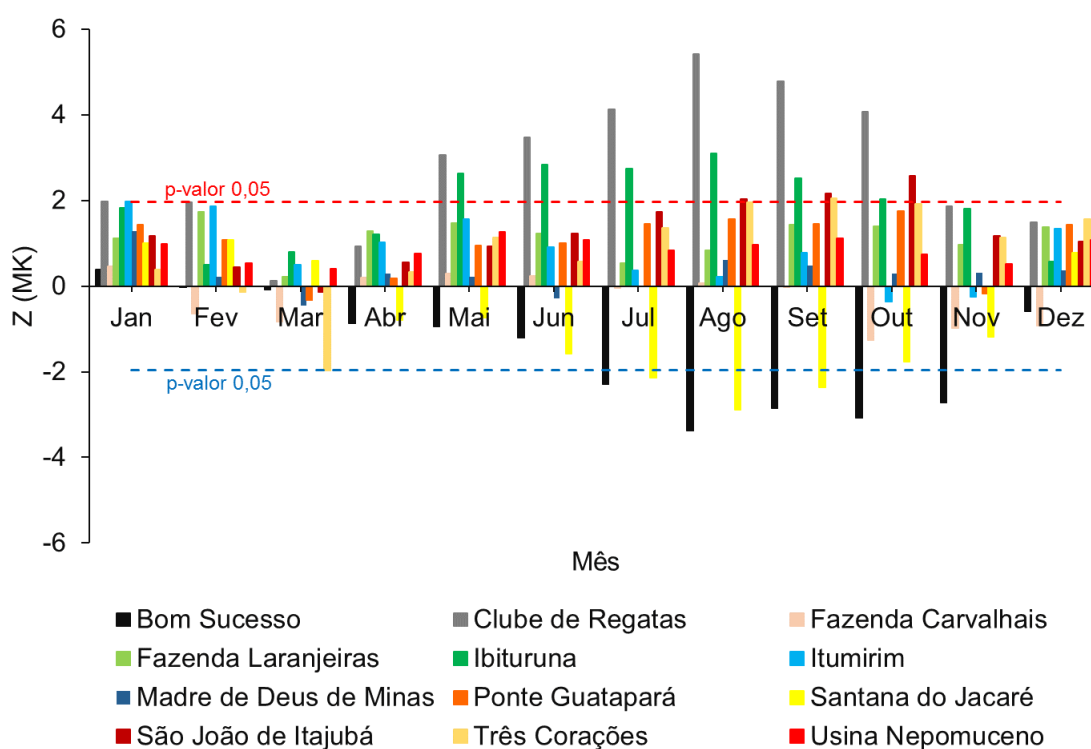


Figura 19 – Valores do teste de tendência de Mann-Kendall (Z(MK)) das vazões médias mensais. Linhas tracejadas representam o nível de significância. Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam, respectivamente o limite superior e inferior dos níveis de significância para a aceitação ou rejeição da hipótese nula (H_0).

As áreas do Clube de Regatas (janeiro, fevereiro, maio a outubro), Ibituruna (maio a outubro), Itumirim (janeiro), São João de Itajubá (agosto a outubro) e Três Corações (setembro) apresentaram meses com tendência significativa de crescimento nas vazões, com 5% de probabilidade. As áreas do Clube de Regatas (8 meses) e Ibituruna (6 meses) apontaram maior número de meses com tendência de crescimento nas vazões, seguidas pelas áreas de São João de Itajubá (3 meses), Itumirim (1 mês) e Três Corações (1 mês). Os resultados das tendências nas vazões médias mensais destacam que as áreas de drenagem que mantiveram período igual ou superior a 6 meses de tendência acima do nível de significância de 5%, somado com o sinal superior ao nível de 10% de significância no período de maior vazão, como em janeiro no Clube de Regatas e Ibituruna, apresentaram tendência para a vazão média anual.

As áreas de drenagem de Bom Sucesso (julho a novembro), Santana do Jacaré (julho a setembro) e Três Corações (março) apresentaram meses com tendência de redução nas vazões ao nível de significância de 5%. Entretanto, o período onde ocorrem os meses com decréscimo nas vazões não foram suficientes para mostrar tendência significativa de redução nas vazões médias, pois além de representarem o período em que o valor das vazões é menor, outros meses informam sinal contrário, balanceando o resultado e fazendo com que as tendências de redução nas vazões médias do ano hidrológico não ocorram ou não sejam detectadas.

Este resultado evidencia a relevância da análise de vazões em períodos isolados, como os mensais, por exemplo, possibilitando detectar qual época do ano é responsável pelas tendências apresentadas, ou se existe um período isolado com forte tendência. Exemplo disso é a área de drenagem de Bom Sucesso, em que não houve tendência significativa para as vazões médias, entretanto o período onde a demanda hídrica é mais acentuada (agosto a outubro), as vazões reduziram drasticamente. Essa informação é de extrema importância principalmente em outorgas de uso da água, visando seu uso mais racional e no subsídio de tomadas de decisão.

4.4.1.2. Identificação do ponto de mudança de tendência

Utilizando apenas as vazões médias das áreas de drenagem que apresentaram tendência significativa, aplicou-se o teste não paramétrico de Pettitt para identificar em qual ano houve a mudança de tendência na série hidrológica (Figura 20).

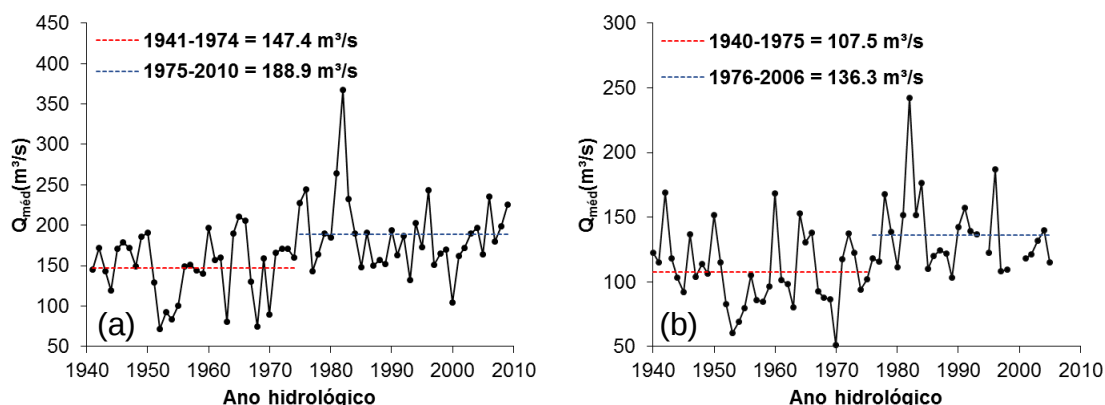


Figura 20 – Divisão da série temporal de vazões médias, através do teste de Pettitt, para as estações Clube de Regatas (a) e Ibituruna (b). As linhas tracejadas em vermelho indicam o primeiro período (P1) e em azul o segundo período (P2).

As respostas para o ano de mudança de tendência nas vazões médias foram similares. No Clube de Regatas o ponto de mudança ocorreu em 1974, caracterizando o primeiro período de 1941 a 1974 e o segundo período de 1975 a 2010. Em Ibituruna houve mudança significativa nos padrões médios da vazão a partir de 1975, caracterizando o primeiro período de 1940 a 1975 e o segundo período de 1976 a 2006. De posse dessas informações, a série hidrológica foi separada em dois períodos distintos, sendo P1 representando a fase pretérita às mudanças significativas, e P2 representando a fase em que houve mudança nas vazões médias.

A Tabela 7 apresenta as médias de longo prazo das principais componentes hidrológicas (vazão média, precipitação e evapotranspiração real) nos períodos distintos apontados pelo teste de Pettitt.

Tabela 7 – Médias de longo prazo das principais variáveis hidrológicas em períodos distintos (P1 e P2) nas áreas de drenagem do Clube de Regatas e Ibituruna

Estações	Vazão média (m ³ /s)		Precipitação (mm)		ET (mm)	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Clube de Regatas	147,4	188,9	1377,5	1462,7	941,6	904,1
Ibituruna	107,5	136,3	1400,2	1506,1	839,6	796,3

Para a área de drenagem do Clube de Regatas o aumento da vazão média do P1 para P2 foi de 28,2% (41,5 m³/s) e para Ibituruna houve aumento de 26,8% (28,8 m³/s). A média da precipitação do ano hidrológico aumentou em 6,2% (85,2 mm) na área do Clube de Regatas e em 7,6% (105,9 mm) na região de Ibituruna. A ET reduziu em 4,0% (37,5 mm) no Clube de Regatas e 5,2% (43,3 mm) em Ibituruna. O aumento da precipitação, bem como redução da ET, provavelmente contribuiu para a tendência de aumento das vazões médias no Clube de Regatas e Ibituruna. Segundo Costa, Botta e Cardille (2003), como a ET média anual acompanha o aumento da precipitação, a redução da ET pode estar ligada a um mecanismo diferente da variabilidade climática, como alterações na cobertura do solo. As duas regiões passaram por grandes mudanças no uso e cobertura do solo a partir de meados de 1970, como informado pelos dados de Dias et al. (2016) e expostos na Figura 17, substituindo as áreas de pastagens por outras atividades, possibilitando, juntamente com o aumento da precipitação, contribuir para o aumento das vazões médias nessas duas regiões.

Utilizando a média de longo prazo das vazões médias mensais foi possível observar o crescimento do P1 para P2 (Figura 21), no Clube de Regatas e Ibituruna, ao longo dos meses, destaca-se o aumento observado nos meses em que o volume escoado é menor (junho a setembro), principalmente na estação do Clube de Regatas (~52%). O aumento da vazão média durante a estação seca, de acordo com Bruijnzeel (2004), pode estar ligado a um “efeito esponja”, desde que após as alterações da cobertura e uso do solo, com a remoção da vegetação natural, sejam mantidas as

características físicas do solo, o suficiente para permitir a infiltração da água precipitada, que aliada a uma ET reduzida, contribui para o aumento da vazão durante a estação seca. Ilstedt et al. (2016) destacam que uma cobertura vegetal intermediária facilitaria o processo de recarga subterrânea, devido ao aumento da macroporosidade proporcionado pelas raízes. A manutenção das características do solo após a remoção da vegetação, aliado a uma cobertura vegetal intermediária, além do aumento da precipitação (P_a), reforçam a explicação para o aumento das vazões durante a estação menos chuvosa.

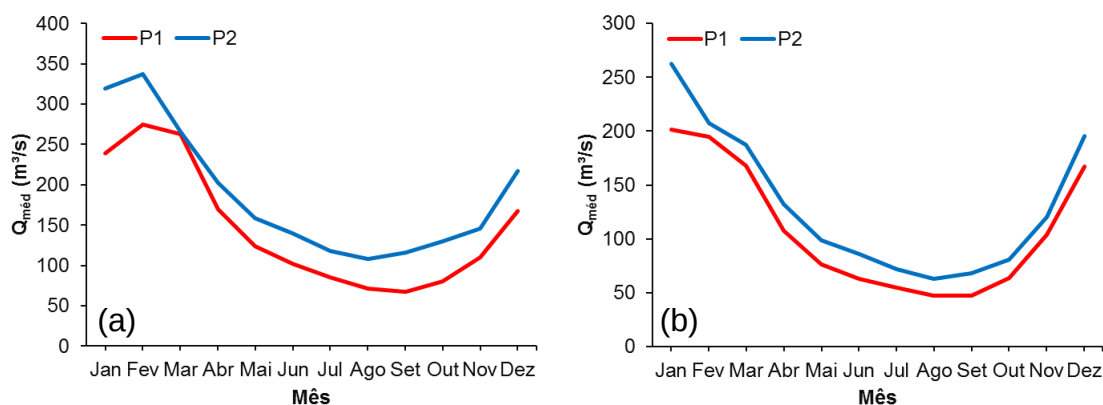


Figura 21 – Vazões médias mensais nos períodos 1 e 2 no Clube de Regatas (a) e Ibituruna (b). As linhas em vermelho indicam o primeiro período (P1) e em azul o segundo período (P2).

Durante o período chuvoso houve aumento expressivo na vazão média do mês de janeiro para as duas regiões, 33,5% para o Clube de Regatas (80,2 m³/s) e 30,0% para Ibituruna (60,5 m³/s). O aumento das vazões no mês de janeiro está diretamente ligado ao sinal de aumento nas precipitações durante os meses pretéritos (novembro e dezembro), apresentados através do teste de Mann-Kendall. Entretanto, de acordo com Costa, Botta e Cardille (2003), o aumento da vazão durante a estação chuvosa pode estar associado, principalmente, à infiltração reduzida após as mudanças na cobertura do solo, o que facilita o escoamento superficial.

No P2 os meses após o pico de vazão, fevereiro no Clube de Regatas e janeiro em Ibituruna, apresentaram queda mais acentuada em sua passagem para o mês seguinte, quando comparada ao P1. No Clube de Regatas a queda na vazão de fevereiro para março foi de 4,7% (12,9 m³/s) no P1, passando para

uma queda abrupta de 21,1% (71,3 m³/s) no P2. Em Ibituruna, a queda na vazão de janeiro para fevereiro representou 3,4% (6,9 m³/s) no P1, passando para 20,9% (54,8 m³/s). Esses resultados sugerem que o declínio abrupto após as vazões de pico está ligado a uma resposta conjunta da redução da precipitação no mês de fevereiro (sem tendência) com a alteração do uso e cobertura do solo, como exposto no item 4.3, que podem ter contribuído para o aumento do coeficiente de escoamento (COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003).

Com o aumento das vazões outra importante informação apresentada pelo resultado exposto na Figura 22 é a antecipação do mês onde ocorrem, em média, os menores valores de vazão, nas duas áreas de drenagem, passando de setembro no P1 para agosto no P2. Essa alteração pode estar ligada a atuação conjunta entre o sinal de crescimento das precipitações (sem tendência) e a redução da evapotranspiração do P1 para o P2 (Tabela 7).

4.4.1.3. Atribuições ao comportamento apresentado pelas vazões médias

A Região 1 e Região 2 não apresentaram crescimento da precipitação com significância estatística ao nível de 5%, ao passo que na Região 3 da BHRG apresentou tendência de crescimento na maioria das áreas de drenagem. Todavia, este crescimento não foi suficiente para o aumento significativo das vazões médias nas áreas de drenagem da Região 3.

Visando quantificar a influência efetiva da variabilidade da precipitação sobre as vazões médias das áreas de drenagem, foi adotado um modelo baseado na correlação API-vazão (ASARIAN, 2015; ASARIAN; WALKER, 2016; REID; LEWIS, 2011) para apontar quanto da precipitação responde pelo comportamento da vazão média do ano hidrológico. Por meio dos resultados derivados desse modelo aplicou-se o teste de Mann-Kendall, possibilitando identificar se as tendências apresentadas estão interagindo conjuntamente de forma construtiva ou destrutiva sobre o comportamento das vazões médias.

A Tabela 8 mostra os valores Z do teste de tendência de Mann-Kendall sobre os produtos derivados do modelo chuva-vazão correlacionados, através da regressão de LOESS entre API e vazão média.

Tabela 8 – Valores do teste de tendência de Mann-Kendall (Z (MK)) para o API, vazão média estimada pela regressão de LOESS entre API e vazão média, vazão residual (valores do comportamento da vazão que a precipitação não é capaz de explicar) e vazões médias em cada área de drenagem da BHRG

Nº	Estação	API	Vazão estimada	Resíduo	Vazão média
1	Bom Sucesso	1,17	1,30	-2,02	-0,498
2	Clube de Regatas	1,71	1,66	2,20	3,206
3	Fazenda Carvalhais	1,20	1,37	-1,76	-0,305
4	Fazenda Laranjeiras	2,10	2,06	-0,45	1,338
5	Ibituruna	1,32	1,29	3,00	2,622
6	Itumirim	1,84	1,89	-0,56	1,372
7	Madre de Deus de Minas	2,12	2,35	-2,86	0,471
8	Ponte Guatapar	1,34	1,31	0,48	1,625
9	Santana do Jacaré	1,69	2,03	-2,73	-0,285
10	São João de Itajubá	1,81	1,90	-0,71	1,537
11	Três Corações	2,06	2,12	-2,21	0,973
12	Usina Nepomuceno	1,86	1,87	-2,02	0,813

Nas áreas de drenagem como Fazenda Laranjeiras, Madre de Deus de Minas e Três Corações, as tendências nos sistemas precipitantes que explicam a vazão (API) expressam crescimento significativo ($Z (MK) > 2,06$). Todavia, as vazões médias não acompanharam a tendência, indicando que outros fatores impulsionaram sua estabilidade estatística, como mostrado pela vazão residual com tendência oposta ($Z (MK) < -0,45$). Acredita-se que nessas regiões, além do fato de não apresentarem características de uso para agricultura intensiva (DIAS et al., 2016), o que poderia levar a um aumento das vazões médias (DOYLE; BARROS, 2011) em função da redução da ET, o abandono das áreas de pastagens ou a substituição de tais áreas, a partir de meados da década de 1970, por outras atividades como a silvicultura (VIOLA et al., 2014), pode ter contribuído para que a vazão não acompanhasse a tendência de crescimento da precipitação, devido do aumento da evapotranspiração (ENGEL et al., 2005; OCHOA-TOCACHI et al., 2016).

Nas áreas de drenagem do Clube de Regatas e Ibituruna, embora os produtos derivados da precipitação (API e vazão estimada) tenham

apresentado crescimento, sua tendência não foi estatisticamente significativa ao nível de 5%. Entretanto, devido ao reforço de outros fatores informados pela tendência vazão residual ($Z \text{ (MK)} > 2,20$) em sentido análogo, as vazões médias nessas duas regiões apresentaram tendência de crescimento, informando uma interação construtiva entre a precipitação e outros fatores, para impulsionar a tendência de crescimento nas vazões médias dessas duas áreas de drenagem.

A Figura 22 compara, por média móvel de 10 anos, o comportamento da vazão média medida e estimada de precipitação nas áreas de drenagem do Clube de Regatas e Ibituruna, destacando o período em que a precipitação contribui de forma mais expressiva para o comportamento da vazão média e os períodos onde a variabilidade da precipitação não é respeitada pela vazão média. O esquema de cores sugere que no período preenchido em vermelho houve aumento da ET e em azul redução da ET.

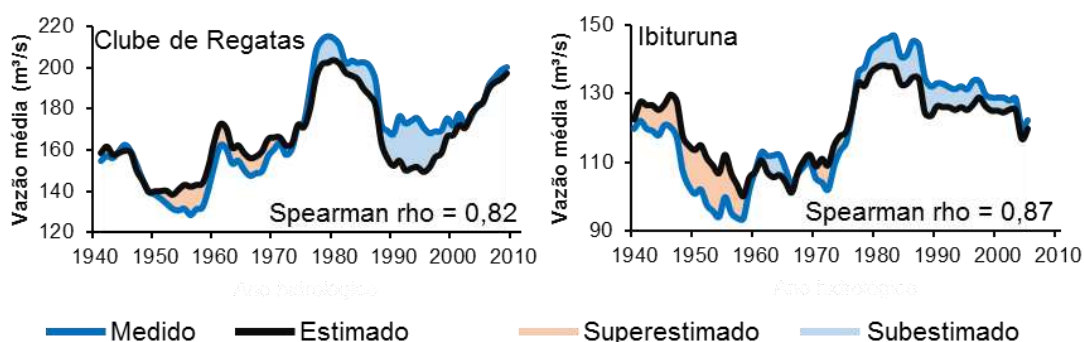


Figura 22 – Comparação entre a vazão média medida (linha azul) e vazão média estimada através do API (linha preta). O preenchimento em azul claro representa a subestimativa e em vermelho claro a superestimativa da vazão média estimada.

Além das vazões médias medidas acompanharem o padrão apresentado pelas estimativas, as vazões estimadas passaram a subestimar as medidas. Tal fato ocorreu a partir de meados da década de 1970 (coincidindo com o ponto de mudança), sugerindo que fatores distintos à precipitação, como uso e cobertura do solo, impulsionaram o aumento das vazões médias neste período, bem como as superestimativas do modelo indicam que outros fatores

contribuíram para a redução das vazões médias nas outras áreas de drenagem.

Outro importante resultado encontrado sobre a climatologia exposta na Figura 23 é o comportamento senoidal apresentado pela maioria das áreas de drenagem, em uma escala de aproximadamente 25 anos, evidente principalmente nas áreas de drenagem da Região 3 da BHRG. Esse comportamento corrobora com a influência de grandes moduladores climáticos como a PDO, AMO e ENSO (ALEXANDER; KILBOURNE; NYE, 2014; VÁSQUEZ P. et al., 2017). Além disso, em menores períodos (< 20 anos), o comportamento na maioria das áreas de drenagem se assemelha às anomalias de precipitação, expostas anteriormente na Figura 15.

A Figura 23 apresenta, para a área do Clube de Regatas, o comportamento das séries temporais do API, vazão residual (contribuição de outros fatores para a tendência), vazão média e vazão estimada pelo método da curva de LOESS, entre API e vazão média. Observa-se uma forte correlação positiva entre API e vazão média (coeficiente de Spearman rho igual a 0,82, na Figura 23b), indicando que o modelo API é capaz de explicar uma grande porcentagem da variabilidade da vazão média.

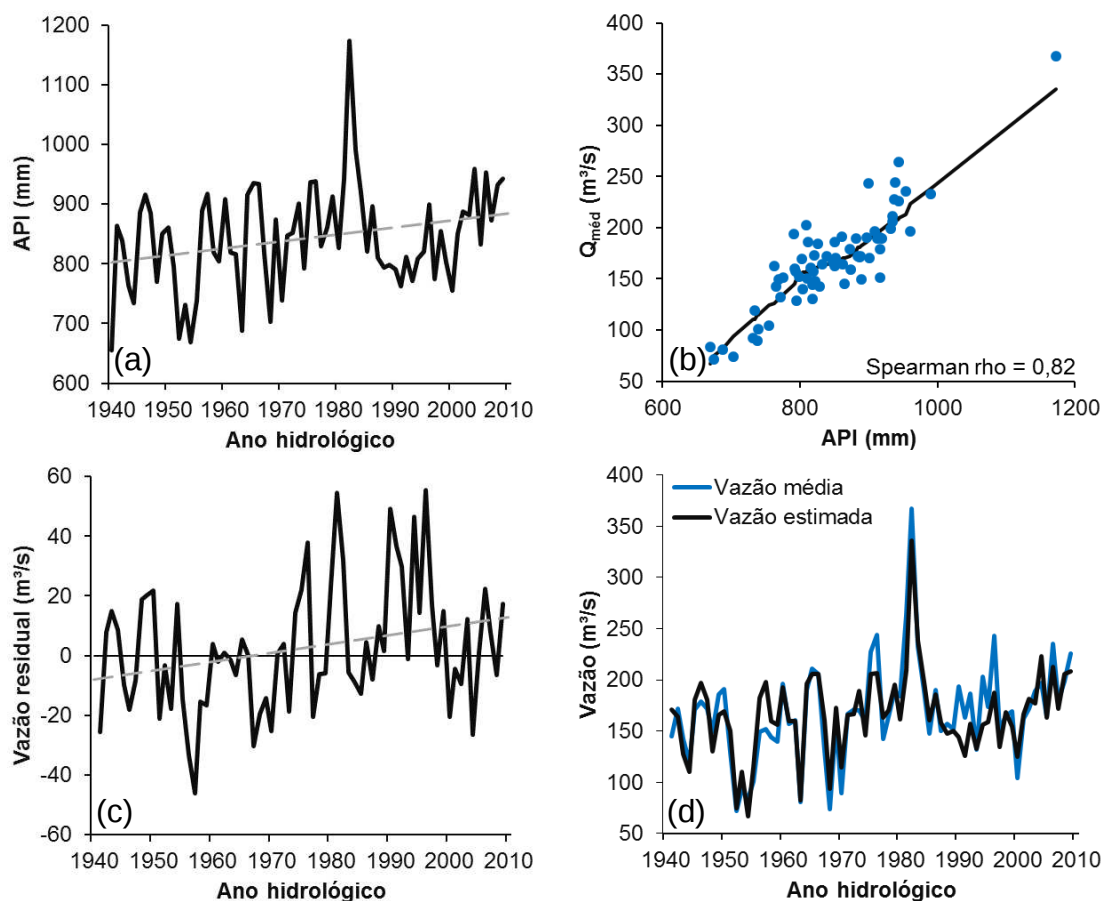


Figura 23 – Resultados para a estação fluviométrica do Clube de Regatas. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).

O sinal de crescimento evidenciada pelo API (Figura 23a) e vazão estimada (Figura 23d), sem tendência significativa (Z (MK) de 1,71 e 1,66 respectivamente), mostram que a precipitação de forma isolada não é suficiente para contribuir com o aumento significativo da vazão média. As análises estatísticas também fornecem evidências de que outros fatores contribuíram para o aumento das vazões médias do ano hidrológico, como pode ser observado por intermédio do aumento significativo da vazão residual (Z (MK) de 2,20) (Figura 23c). Os outros fatores podem estar ligados à alteração no uso e cobertura do solo a partir de meados da década de 1970 com o aumento da área agrícola. Ressalta-se que, de 1990 a 1998, as

precipitações apresentaram um período de queda. As estimativas para esse período indicaram que a vazão média deveria ser de 151,8 m³/s, entretanto seu valor médio medido foi 17,9% acima do esperado, correspondendo a 179,0 m³/s. Esse período coincide com a superação das áreas destinadas à agricultura em relação ao uso destinado para pastagens, o que poderia ter provocado grande redução da ET, através da intensificação do plantio de culturas como a cana-de-açúcar (SILVA et al., 2015).

A Figura 24 apresenta, para a área de Ibituruna, o comportamento das séries temporais do API, vazão residual (contribuição de outros fatores para a tendência), vazão média e vazão estimada pelo método da curva de LOESS entre API e vazão média. Observa-se também uma forte correlação positiva entre API e vazão média (coeficiente de Spearman rho igual a 0,87, na Figura 24b), indicando que o modelo do API é capaz de explicar uma grande porcentagem da variabilidade da vazão média.

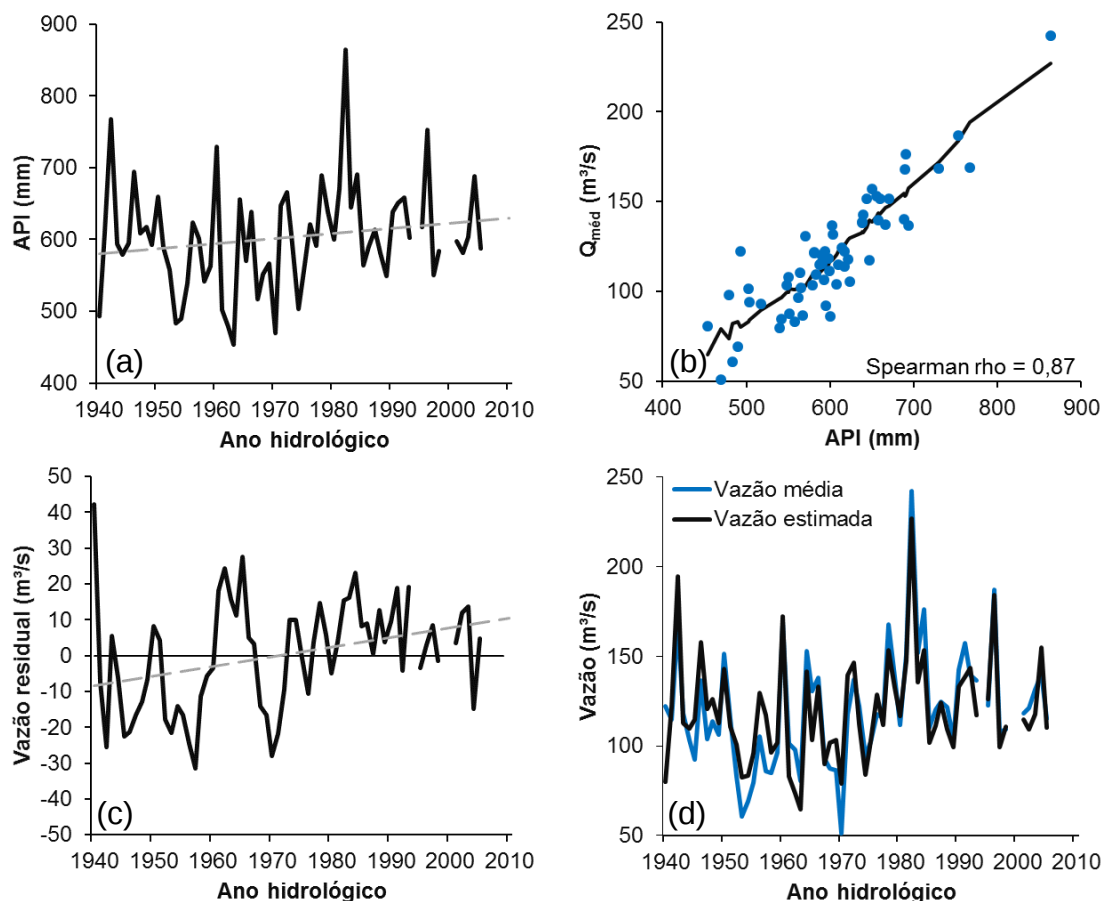


Figura 24 – Resultados para a estação fluviométrica do Ibituruna. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).

Assim como na área do Clube de Regatas, o sinal de crescimento no API (Figura 24a) e na vazão estimada (Figura 24d), sem tendência significativa (Z (MK) de 1,32 e 1,29 respectivamente) mostra que a precipitação isoladamente não é suficiente para contribuir com o aumento significativo da vazão média. Como observado pelo aumento significativo da vazão residual (Z (MK) de 3,00) (Figura 24c), fatores ligados às alterações do uso e cobertura do solo, com a substituição das áreas de pastagens por outras atividades (exposto no item 4.2), ou neste caso o possível abandono das áreas de pastagens, podem ter contribuído para o aumento das vazões médias do ano hidrológico após meados da década de 1970.

Tanto na área do Clube de Regatas quanto em Ibituruna, é possível distinguir que ocorreram efeitos diferenciados sobre a vazão média, antes e após o ponto de mudança, em meados de 1970. Tais efeitos, estão ligados em maior grau ao aumento da precipitação associada a grandes moduladores climáticos (MOLION, 2008; VÁSQUEZ P. et al., 2017), e em menor grau, devido a alterações no uso, cobertura e manejo do solo.

A mudança de sinal indicada pela vazão residual, do P1 para P2, passando respectivamente da média de -6,1 m³/s para 10,6 m³/s no Clube de Regatas e de -4,7 m³/s para 6,3 m³/s em Ibituruna (Tabela 9) mostra que a vazão média medida estava menor que o esperado pelos eventos de precipitação antes do ponto de mudança, confirmando que a ET era maior no P1, para uma cobertura vegetal menos alterada (BRUIJNZEEL, 2004; COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003) para as regiões em estudo (DIAS et al., 2016). Após o ponto de mudança, o processo se inverteu, fazendo com que as vazões médias fossem maiores que o explicado pela precipitação, sugerindo que as alterações nos processos de uso e manejo do solo, nas duas regiões, contribuíram para o aumento nas vazões médias, através da redução da ET e aumento da precipitação.

Tabela 9 – Médias de longo prazo em períodos distintos (P1 e P2), da vazão residual e vazão média estimada através da correlação entre API e vazão média, nas áreas de drenagem do Clube de Regatas e Ibituruna

Estação	Vazão residual (m ³ /s)		Vazão estimada (m ³ /s)	
	P1	P2	P1	P2
Clube de Regatas	-6,1	10,6	153,6	178,4
Ibituruna	-4,7	6,3	112,3	130,0

O aumento da vazão média estimada em 16,1% (24,8 m³/s) no Clube de Regatas e 15,8% (17,7 m³/s) em Ibituruna mostra que os eventos de precipitação, isoladamente, já aumentariam a vazão média; entretanto, sem tendência. Logo, ao longo da série hidrológica, existe outro sistema que incrementa a vazão, pois a proporção de aumento da vazão média medida foi maior para as duas regiões.

Ao analisar os resultados das vazões médias medidas do Clube de Regatas e Ibituruna, com as alterações do uso do e cobertura do solo (Tabela 10) atuando conjuntamente com o aumento da precipitação, constata-se que antes e após o ponto de mudança as alterações de uso do solo, principalmente referentes à redução das áreas de pastagens por outras atividades como a agricultura ou o abandono (DIAS et al., 2016), contribuíram para o crescimento das vazões médias.

Tabela 10 – Valores percentuais médios em períodos distintos (P1 e P2) do uso e cobertura do solo referente a área agrícola, pastagens e uso agropecuário (agrícola + pastagens) nas áreas do Clube de Regatas e Ibituruna

Estação	Agricultura (%)		Pastagem (%)		Uso Agropecuário (%)	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Clube de Regatas	16,5	31,7	45,6	30,5	62,1	62,2
Ibituruna	4,9	7,2	36,9	29,7	41,9	36,9

Esses resultados sugerem, para a área do Clube de Regatas, que o intenso uso do solo por práticas agrícolas, além da urbanização acelerada e do grande fluxo de pessoas (Figura 16), impulsionadas pelo desenvolvimento econômico da região, propiciaram grandes alterações no uso do solo no P2, contribuindo conjuntamente com o crescimento da precipitação do ano hidrológico para a tendência de aumento das vazões médias. Bruijnzeel (2004) afirma que as áreas compactadas através da construção de estradas e aumento da urbanização, além de contribuírem para o aumento das vazões, reduzem a evapotranspiração e aumentam o coeficiente de escoamento.

Em Ibituruna houve tendência significativa de aumento das vazões médias, embora o processo de alteração no uso e cobertura do solo seja distinto do apresentado na área do Clube de Regatas, não havendo uma dinâmica intensiva de uso do solo para manejo agrícola, nem um grande fluxo de pessoas, caracterizado pela menor densidade populacional ao longo do tempo. Entretanto, é evidente que as áreas de pastagens foram reduzidas e alteradas por outras atividades que os dados de Dias et al. (2016) não

informam, sendo que tal dinâmica pode ter contribuído para a tendência de aumento das vazões médias. Destaca-se que o uso agropecuário em Ibituruna é o menor, se comparado com as outras áreas de drenagem, apresentando seu máximo em 1975, com 50,9% da área utilizada para este fim, coincidindo com o mesmo período do ponto de mudança encontrado através do teste de Pettitt.

Ao correlacionar as vazões médias estimadas e medidas por intermédio do teste de Spearman rho (Tabela 11) identificou-se o período em que a precipitação apresentou maior efetividade para explicar o comportamento das vazões médias. Consequentemente, valores baixos de Spearman representam menor contribuição da precipitação para o comportamento das vazões médias durante o ano hidrológico.

Tabela 11 – Valores de correlação do teste de Spearman rho em períodos distintos (P1 e P2) entre a vazão média medida e vazão média estimada nas áreas de drenagem do Clube de Regatas e Ibituruna

Estação	Spearman rho	
	P1	P2
Clube de Regatas	0,84	0,78
Ibituruna	0,75	0,90

De acordo com o teste de Spearman, a precipitação é capaz de explicar cerca de 84% da vazão média na área do Clube de Regatas no P1, sendo que no P2 essa porcentagem cai para 78%, ou seja, no segundo período os eventos de vazão receberam maior contribuição de outros fatores para essa tendência de crescimento. Na área de Ibituruna ocorreu o inverso, em que a precipitação foi capaz de explicar 75% da vazão média em P1 e 90% em P2. Isso mostra que a redução das áreas de pastagem no P2, em Ibituruna fez com que a precipitação fosse ainda mais determinante da vazão média anual.

Em contraste aos impactos do aumento da precipitação, a mudança do uso do solo teve menor impacto sobre o aumento da vazão média no Clube de Regatas e Ibituruna. Logo, as precipitações representam a principal força para

impulsionar o comportamento das vazões médias, enquanto as mudanças no uso e cobertura do solo contribuíram, em menor escala, para que o comportamento das vazões médias apresentasse tendência de crescimento. Em relação às áreas de drenagem da Região 3, a precipitação também dita o comportamento das vazões médias associadas a moduladores climáticos como a PDO, AMO e ENSO (MOLION, 2008; VÁSQUEZ P. et al., 2017). Entretanto, a dinâmica do uso e cobertura do solo, a partir da década de 1990, contribuíram para a atenuação do crescimento das vazões médias, possivelmente pelo aumento da ET.

4.4.2. Vazões mínimas

4.4.2.1. Teste de tendência

A Tabela 12 apresenta as médias de longo prazo das vazões mínimas com 7 dias de duração (Q_7), de cada ano hidrológico nas áreas de drenagem da BHRG analisadas neste estudo, bem como as tendências associadas. As vazões mínimas mostraram maior sensibilidade às mudanças combinadas na precipitação e uso e cobertura do solo, com sete áreas de drenagem apresentando tendência de crescimento e/ou redução.

Tabela 12 – Vazões mínimas anuais (Q_7) em cada área de drenagem estudada da BHRG, bem como valores do teste de Mann-Kendall (Z (MK)) com p-valor associado e declinações das tendências

Nº	Estação	Q_7 (m³/s)	Tendência		
			Z(MK)	p-valor	Declinação de Sen (m³/s ano)
1	Bom Sucesso	1,6	-4,09	< 0,001	-0,022
2	Clube de Regatas	67,1	5,44	< 0,001	0,596
3	Fazenda Carvalhais	1,1	-0,32	0,747	-0,001
4	Fazenda Laranjeiras	19,9	0,80	0,423	0,027
5	Ibituruna	44,6	4,03	< 0,001	0,292
6	Itumirim	12,1	0,42	0,676	0,007
7	Madre de Deus de Minas	18,3	0,31	0,753	0,009
8	Ponte Guatapar	84,5	1,83	0,068	0,342
9	Santana do Jacaré	10,2	-4,43	< 0,001	-0,099
10	São João de Itajubá	5,0	1,90	0,057	0,021
11	Três Corações	35,3	2,26	0,024	0,128
12	Usina Nepomuceno	6,3	1,24	0,214	0,014

As áreas de drenagem do Clube de Regatas (p-valor de <0,001 e Z (MK) de 5,44), Ibituruna (p-valor de <0,001 e Z (MK) de 4,03) e Três Corações (p-valor de 0,024 e Z (MK) de 2,26) apresentaram tendência estatisticamente significativa de aumento da vazão mínima ao nível de 5%, e as áreas de Bom Sucesso (p-valor de <0,001 e Z (MK) de -4,09) e Santana do Jacaré (p-valor de

$<0,001$ e Z (MK) de $-4,43$), ambas na Região 2, apresentaram tendência de redução da Q_7 .

Como destacado na Figura 25, a Região 3 manteve dependência espacial para as tendências da Q_7 em função da similaridade na tendência de crescimento da precipitação e do uso e cobertura do solo. Nessa região, as áreas que não apresentaram tendência de crescimento da Q_7 podem ter sido compensadas com o aumento da ET (KAM; SHEFFIELD, 2016). Na Região 2, os sinais das tendências foram amplificados, bem como na Região 1 (exceto Fazenda Carvalhais).

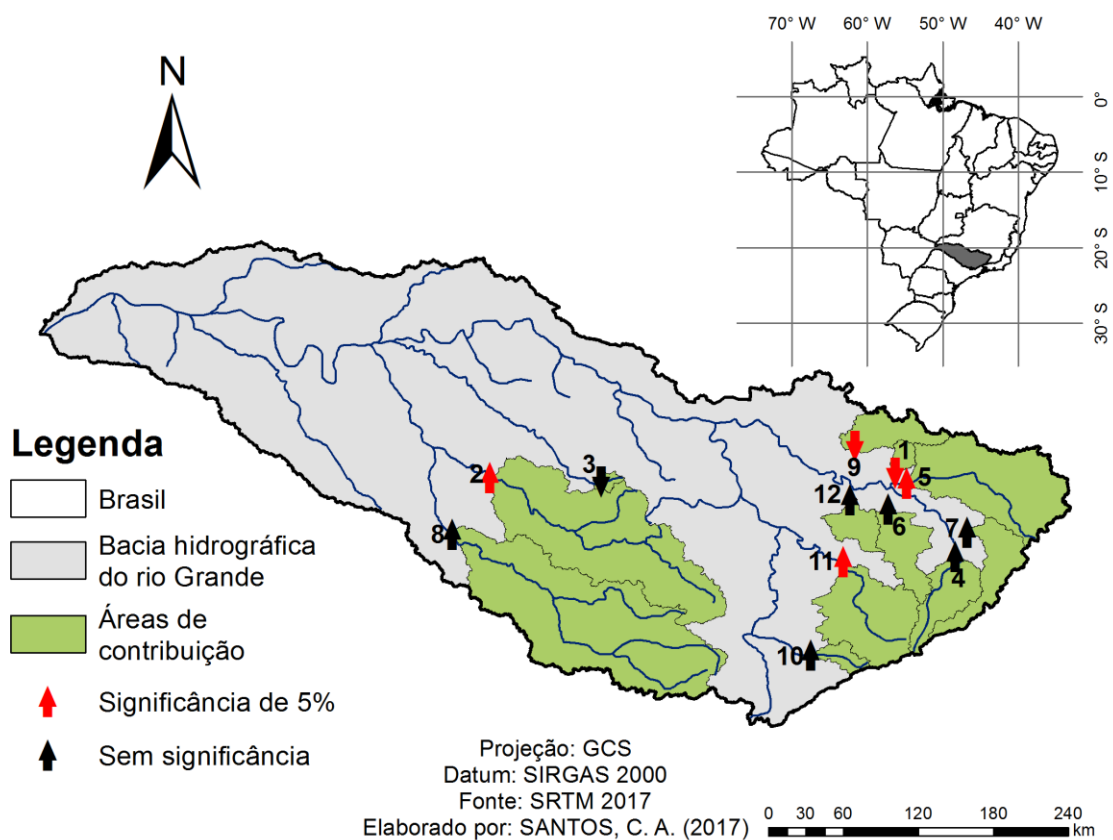


Figura 25 – Tendência das vazões mínimas anuais (Q_7) anuais em cada área de drenagem da BHRG. As setas apontam a direção da tendência e as cores informam o nível de significância.

4.4.2.2. Identificação do ponto de mudança

Aplicou-se o teste de Pettitt para encontrar o ano de mudança nas vazões mínimas que apresentaram tendência (Figura 26). Diferentemente dos pontos de mudança encontrados nas vazões médias, algumas áreas de drenagem apresentaram dois pontos de mudança nas vazões mínimas.

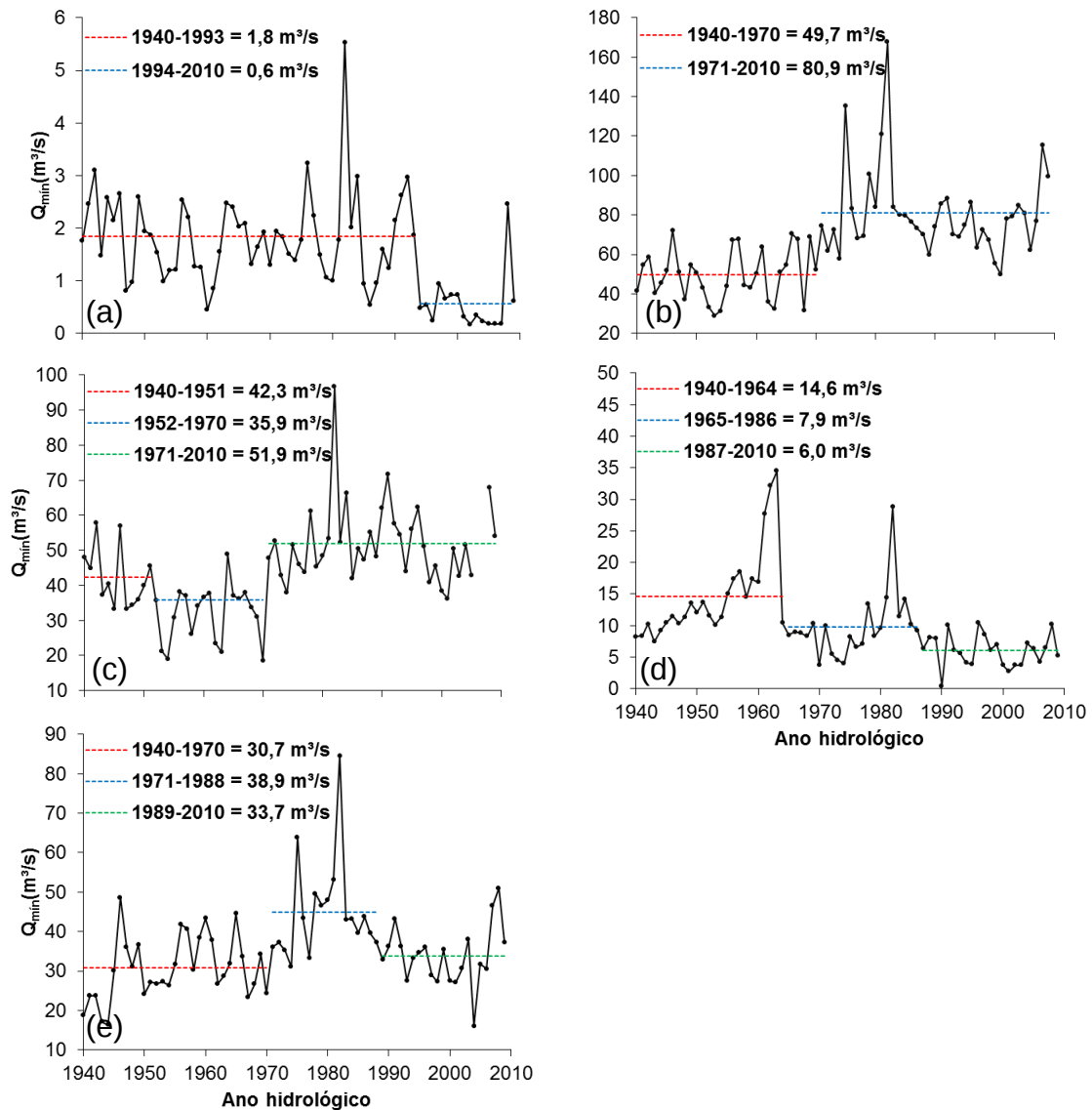


Figura 26 – Divisão da série temporal de vazões mínimas (Q_7) através do teste de Pettitt para as estações Bom Sucesso (a), Clube de Regatas (b), Ibituruna (c), Santana do Jacaré (d), Três Corações (e). As linhas tracejadas em vermelho indicam o primeiro período (P1), em azul o segundo período (P2) e em verde o terceiro período (P3).

Apenas em Bom Sucesso e no Clube de Regatas houve um único ponto de mudança, em 1993 e 1970, respectivamente, sendo que nas demais áreas houve dois pontos. Na área de Ibituruna houve mudança nos padrões médios das vazões mínimas em 1951 e 1970, em Santana do Jacaré ocorreu em 1964 e 1986, e em Três Corações as mudanças ocorreram nos anos de 1970 e 1988. O comportamento apresentado pelos pontos de mudança, destaca a importância da utilização de séries hidrológicas superiores a 50 anos de dados (SEYAM; OTHMAN, 2015), pois a detecção da influência de efeitos de grandes moduladores climáticos sobre as vazões podem ser negligenciados em caso de utilização de séries menores.

A Tabela 13 apresenta as médias de longo prazo das principais variáveis hidrológicas (vazão mínima, precipitação e evapotranspiração) em diferentes períodos apontados pelo teste de Pettitt.

Tabela 13 – Médias de longo prazo das variáveis hidrológicas em períodos distintos nas áreas de drenagem de Bom Sucesso, Clube de Regatas, Ibituruna, Santana do Jacaré e Três Corações

Estações	Vazão Q_7 (m ³ /s)			Precipitação (mm)			ET (mm)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Bom Sucesso	1,8	0,6	-	1446,7	1456,6	-	889,8	1018,3	-
Clube de Regatas	49,7	80,9	-	1373,0	1457,6	-	944,6	905,7	-
Ibituruna	42,3	35,9	51,9	1489,5	1328,2	1498,8	861,2	820,1	805,7
Santana do Jacaré	14,6	7,9	6,0	1421,2	1470,1	1446,8	798,4	863,8	938,5
Três Corações	30,7	38,9	33,7	1465,9	1748,7	1577,9	809,3	921,3	965,1

Para a área de drenagem de Bom Sucesso houve redução de 66,6% (1,2 m³/s) na média da vazão mínima do P1 para P2, enquanto no Clube de Regatas houve aumento de 62,8% (31,2 m³/s). Para as áreas com dois pontos de mudança, ocorreram as seguintes variações: Ibituruna reduzindo 15,1% (6,4 m³/s) do P1 para o P2 e crescendo 44,6% (16,0 m³/s) do P2 para o P3; Santana do Jacaré caindo 46,9% (6,7 m³/s) do P1 para o P2 e decrescendo 24,0% (1,9 m³/s) do P2 para o P3; Três Corações subindo 26,7% (8,2 m³/s) do P1 para o P2 e decrescendo 13,4% (5,2 m³/s) do P2 para o P3.

Em algumas áreas de drenagem, como em Bom Sucesso e Santana do Jacaré, as médias de longo prazo das vazões mínimas não apresentaram o

comportamento esperado pelos eventos de precipitações médias (P_a) ocorridos, exibindo períodos em que as precipitações aumentaram seu valor médio e as vazões mínimas reduziram. Por exemplo, na área de drenagem de Bom sucesso no P2 houve queda de 66,6% na vazão mínima e aumento inexpressivo de 0,7% na precipitação média anual, entretanto houve aumento significativo da ET em 14,4%. Em Santana do Jacaré, também houve diminuição da Q_7 para o período em que a precipitação aumentou.

Nas áreas do Clube de Regatas, Ibituruna, São João de Itajubá e Três Corações, as vazões mínimas de cada período separado pelo teste de Pettitt estavam coerentes com os eventos de precipitação encontrados, ou seja, com o aumento das precipitações do ano hidrológico, as vazões mínimas também aumentaram, e com a redução das precipitações, as médias das vazões mínimas reduziram. Entretanto, a força com que os aumentos/reduções ocorreram podem estar vinculados com outros eventos como uso e cobertura do solo.

4.4.2.3. Atribuições ao comportamento apresentado pelas vazões mínimas

Utilizou-se, assim como realizado na vazão média, a metodologia proposta por Asarian e Walker (2016) para isolar os efeitos da precipitação sobre a vazão mínima. As tendências dos efeitos da precipitação sobre as vazões mínimas estão expostas na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores do teste de tendência de Mann-Kendall (Z (MK)) para o API, vazão mínima estimada pela regressão de LOESS entre API e vazão mínima, vazão residual (valores do comportamento da vazão mínima que a precipitação não é capaz de explicar) e vazões mínimas em cada área de drenagem da BHRG

Estação	API	Vazão estimada	Resíduo	Vazão mínima
Bom Sucesso	1,16	2,07	-4,45	-4,09
Clube de Regatas	2,03	1,64	4,94	5,44
Fazenda Carvalhais	1,20	1,19	-1,32	-0,32
Fazenda Laranjeiras	2,36	2,42	-0,54	0,80
Ibituruna	1,37	1,26	4,24	4,03
Itumirim	1,94	1,89	-0,32	0,42
Madre de Deus de Minas	1,86	1,93	-1,50	0,31
Ponte Guatapar	1,56	1,16	1,12	1,83
Santana do Jacaré	1,85	2,75	-4,78	-4,43
São João de Itajubá	1,77	1,68	1,20	1,90
Três Corações	1,86	1,78	0,91	2,26
Usina Nepomuceno	1,85	1,92	-0,21	1,24

Nas áreas localizadas na Região 3 da BHRG, como Fazenda Laranjeiras, Itumirim, Madre de Deus de Minas, São João de Itajubá e Usina Nepomuceno, em que não ocorreram tendências significativas de aumento da Q_7 (Z (MK) < 1,96), provavelmente receberam atenuação associadas ao aumento da ET (KAM; SHEFFIELD, 2016), como exposto por tendências negativas da vazão residual, pois os efeitos inerentes à precipitação, indicam tendência de aumento.

Nas áreas de drenagem de Bom Sucesso (p-valor de <0,001 e Z (MK) de -4,45) e Santana do Jacaré (p-valor de <0,001 e Z (MK) de -4,78), a vazão residual indica que houve maior contribuição antrópica, como alterações no uso e cobertura do solo, levando redução drástica das vazões mínimas. Nessas regiões, os eventos de precipitação indicam que as vazões mínimas deveriam apresentar sinal positivo, aumentando ou não apresentando tendência. Ressalta-se que em Santana do Jacaré, os períodos 2 e 3 estão coerentes com os eventos de precipitação.

Na área de Três Corações (p-valor de 0,064 e de Z (MK) de 1,86), apenas os efeitos da precipitação já explicam grande parte da tendência de aumento das vazões mínimas. Na área do Clube de Regatas (p-valor de <0,001 e de Z (MK) de 4,94) e Ibituruna (p-valor de <0,001 e de Z (MK) de 4,24), houve a contribuição expressiva de outros fatores como a redução da ET e possivelmente a manutenção das principais características físicas do solo para facilitar a infiltração da precipitação (BRUIJNZEEL, 2004), além da precipitação, para que as vazões mínimas apresentassem tendência de crescimento.

A Figura 27 compara, por média móvel de 10 anos, o comportamento da vazão mínima medida e estimada pela precipitação, evidenciando o período em que a precipitação contribui de forma mais eficiente para o comportamento da vazão mínima e os períodos em que a variabilidade da precipitação não é respeitada pela vazão mínima.

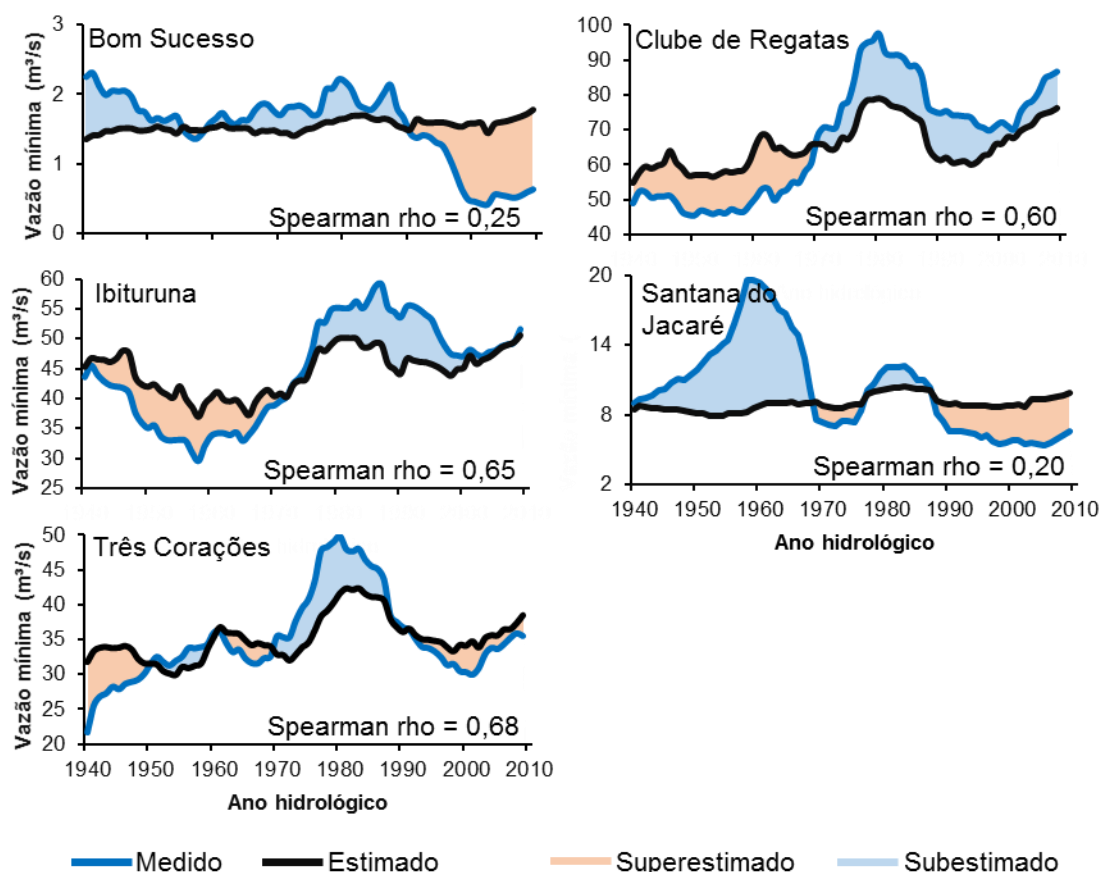


Figura 27 – Comparação entre a vazão mínima medida (linha azul) e vazão mínima estimada através do API (linha preta). O preenchimento em azul claro representa a subestimativa e em vermelho claro a superestimativa da vazão média estimada.

A vazão mínima medida, a partir da década de 1990, não seguiu o padrão de comportamento apresentado pela precipitação na área de Bom Sucesso e em Santana do Jacaré entre 1940 e 1970. O esperado seria as vazões mínimas medidas acompanharem o sinal apresentado pela estimativa, obtida em função da precipitação, através do modelo chuva-vazão.

Nas áreas de drenagem do Clube de Regatas, Ibituruna, Santana do Jacaré (a partir de 1970) e Três Corações, a precipitação ainda é a principal força para impulsionar o padrão de comportamento das vazões mínimas, justificado pelos coeficientes de correlação de Spearman rho superiores a 0,50. Por outro lado, a área de Bom Sucesso, que apresentou valor de Spearman rho muito inferior a 0,50, indica a existência de influências externas a precipitação, como uso e cobertura do solo pelo aumento de práticas silvícolas na área de Bom Sucesso (VIOLA et al., 2014), aumentando a ET.

Na maioria das áreas de drenagem, principalmente na Região 3, assim como na Região 1, as vazões mínimas também respondem às variabilidades interanuais das precipitações, que por sua vez estão ligadas às anomalias proporcionadas por moduladores climáticos como PDO, AMO e ENSO (MOLION, 2008; VÁSQUEZ P. et al., 2017). Constatou-se um padrão de comportamento senoidal de aproximadamente 25 anos, ligado a eventos de anomalias de precipitação modulados pelo acoplamento com fenômenos climáticos de grande escala. Entretanto, a área de Bom Sucesso, principalmente a partir da década de 1990, apresenta alto grau de antropização, assim como em Santana do Jacaré no período anterior à década de 1970 em Santana do Jacaré, pois a Q_7 não está em concordância com a precipitação.

A Figura 28 exibe, para a área de Bom Sucesso, o comportamento das séries temporais do API, vazão residual (contribuição de outros fatores para a tendência), vazão mínima e vazão estimada pelo método da curva de LOESS entre API e vazão mínima. Observa-se a fraca correlação positiva (Spearman rho de 0,25) entre API e vazão mínima (Figura 28b), indicando que o modelo do API não foi capaz de explicar uma grande porcentagem da variabilidade da vazão mínima. Isso sugere que ações de cunho antrópico estejam afetando de maneira expressiva a tendência de redução das vazões mínimas nessa área de drenagem.

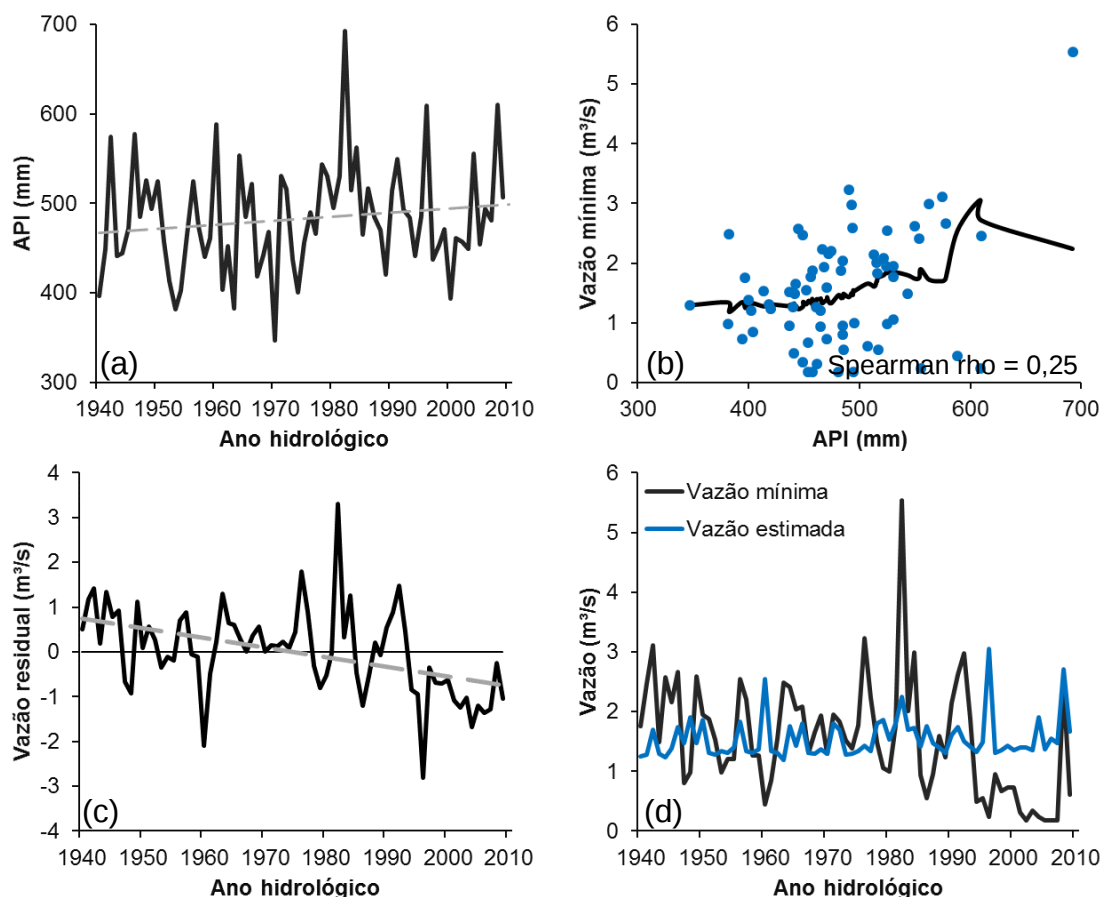


Figura 28 – Resultados para a estação fluviométrica de Bom Sucesso. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).

O aumento no API (Figura 28a), sem tendência (Z (MK) de 1,16), e na vazão estimada (Figura 28d), com significância estatística ao nível de 5% (Z (MK) de 2,07), mostram que a precipitação isoladamente impulsionou o aumento da vazão mínima. Entretanto, na área de drenagem de Bom Sucesso, o processo ocorreu de forma contrária a partir de meados da década de 1990, como observado pela redução significativa da vazão residual (Z (MK) de -4,45) (Figura 28c). Fatores ligados à alteração do uso e cobertura do solo podem ter contribuído para a redução da vazão mínima. Essa redução pode ser explicada através do uso florestal da região, especificamente para a produção de eucalipto na propriedade da GERDAU S.A, na fazenda Zeringota em Bom

Sucesso (SANTANA et al., 2012), aumentando a ET (OCHOA-TOCACHI et al., 2016).

A Figura 29 exibe, para a área do Clube de Regatas, o comportamento das séries temporais do API, vazão residual (contribuição de outros fatores para a tendência), vazão mínima e vazão estimada pelo método da curva de LOESS entre API e vazão mínima. Observa-se a correlação moderada positiva (Spearman rho de 0,60) entre API e vazão mínima (Figura 29b), indicando que o modelo do API explica de forma razoável a porcentagem da variabilidade da vazão mínima, em que a precipitação ainda comanda grande parte da variabilidade da vazão mínima nessa área de drenagem.

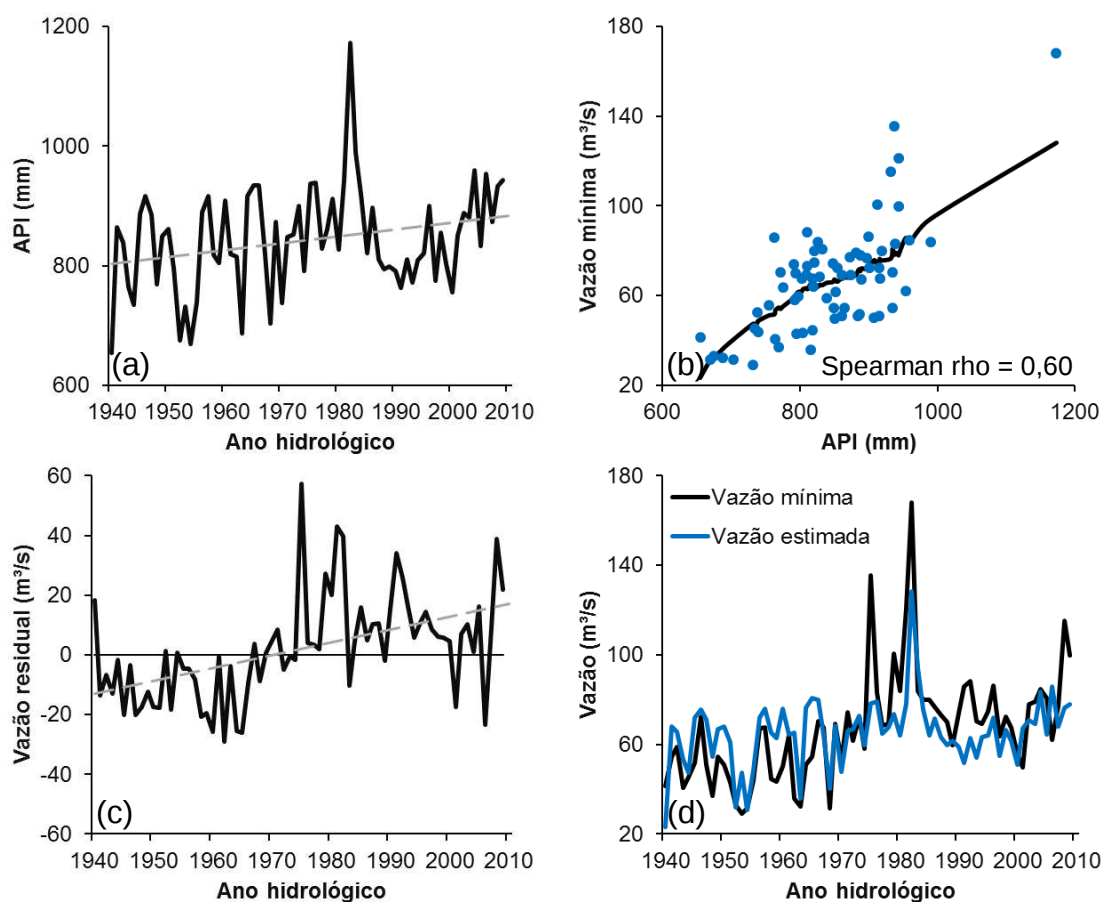


Figura 29 – Resultados para a estação fluviométrica do Clube de Regatas. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).

A tendência de aumento no API (Figura 29a) com significância estatística ao nível de 5% (Z (MK) de 2,03) e na vazão estimada (Figura 29d) sem tendência (Z (MK) de 1,64), mostram que a precipitação isoladamente impulsionou o aumento da vazão mínima, fato este que ocorreu de forma acentuada a partir da década de 1970, como observado pelo aumento significativo da vazão residual (Z (MK) de 4,94) (Figura 29c).

A Figura 30 mostra, para a área de Ibituruna, o comportamento das séries temporais do API, vazão residual (contribuição de outros fatores para a tendência), vazão mínima e vazão estimada pelo método da curva de LOESS entre API e vazão mínima. Observa-se a correlação moderada positiva (Spearman rho de 0,65) entre API e vazão mínima (Figura 30b), indicando que o modelo do API explica de forma razoável a porcentagem da variabilidade da vazão mínima, em que a precipitação ainda exerce forte influência sobre a variabilidade da vazão mínima nessa área de drenagem.

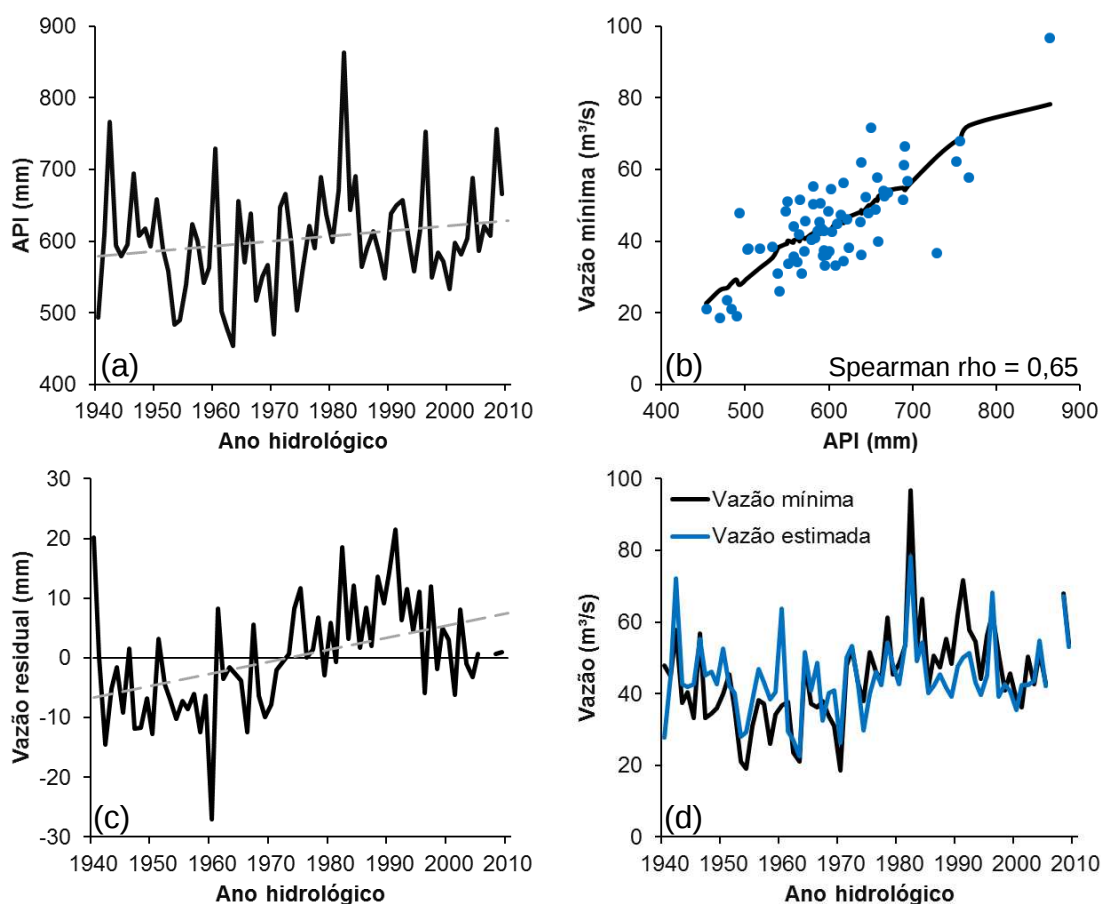


Figura 30 – Resultados para a estação fluviométrica do Ibituruna. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).

A tendência de aumento no API (Figura 30a) e na vazão estimada (Figura 30d), ambos sem significância estatística ao nível de 5% (Z (MK) de 1,37 e 1,26 respectivamente), destacam que a precipitação levaria a um aumento da vazão mínima. Entretanto, a contribuição de outros fatores, como a alteração no uso e cobertura do solo, referente ao abandono das áreas de pastagens (Figura 17), incrementaram de forma expressiva o aumento da Q_7 a partir da década de 1970, como observado pelo aumento significativo da vazão residual (Z (MK) de 4,24) (Figura 30c).

A Figura 31 mostra, para a área de Santana do Jacaré, o comportamento das séries temporais do API, vazão residual (contribuição de

outros fatores para a tendência), vazão mínima e vazão estimada pelo método da curva de LOESS entre API e vazão mínima. Observa-se a fraca correlação positiva (Spearman rho de 0,20) entre API e vazão mínima (Figura 31b), indicando que o modelo do API não foi capaz de explicar a variabilidade da vazão mínima.

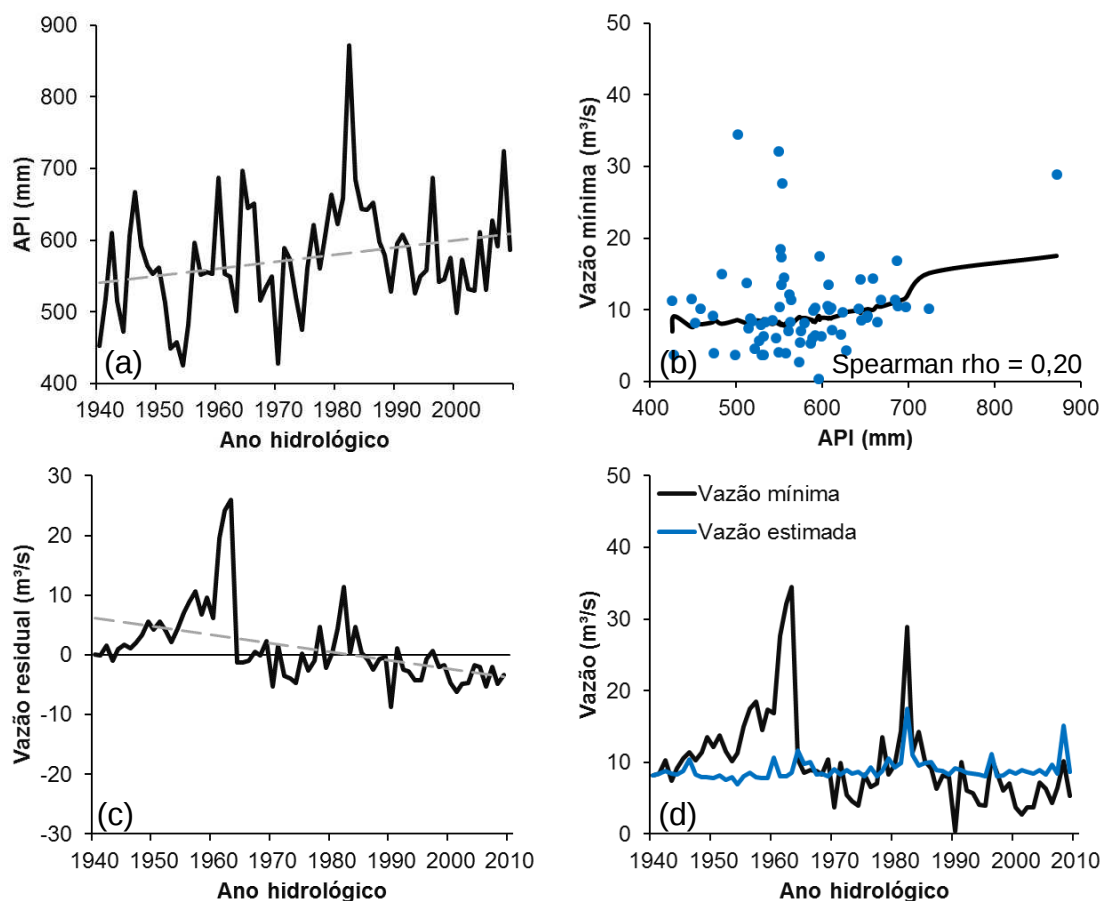


Figura 31 – Resultados para a estação fluviométrica de Santana do Jacaré. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).

O aumento no API (Figura 31a), sem tendência (Z (MK) de 1,85) e na vazão estimada (Figura 31d), com significância estatística ao nível de 5% (Z (MK) de 2,75), mostram que a precipitação levaria a um aumento da vazão mínima; entretanto, os dados duvidosos entre as décadas de 1950 e meados de 1960, muito acima da média, podem ter contribuído para a tendência de

redução da vazão mínima, segundo o Teste de Mann-Kendall (Z (MK) de -4,43) e conforme também mostrado pela vazão residual (Figura 31c). A partir de meados de 1960 a vazão mínima se comporta coerentemente com o esperado para a região, baseado no comportamento da precipitação.

A Figura 32 mostra, para a área de Três Corações, o comportamento das séries temporais do API, vazão residual (contribuição de outros fatores para a tendência), vazão mínima e vazão estimada pelo método da curva de LOESS entre API e vazão mínima. Observa-se a correlação moderada positiva (Spearman rho de 0,68) entre API e vazão mínima (Figura 32b), indicando que o modelo do API explica de maneira satisfatória grande porcentagem da variabilidade da vazão mínima.

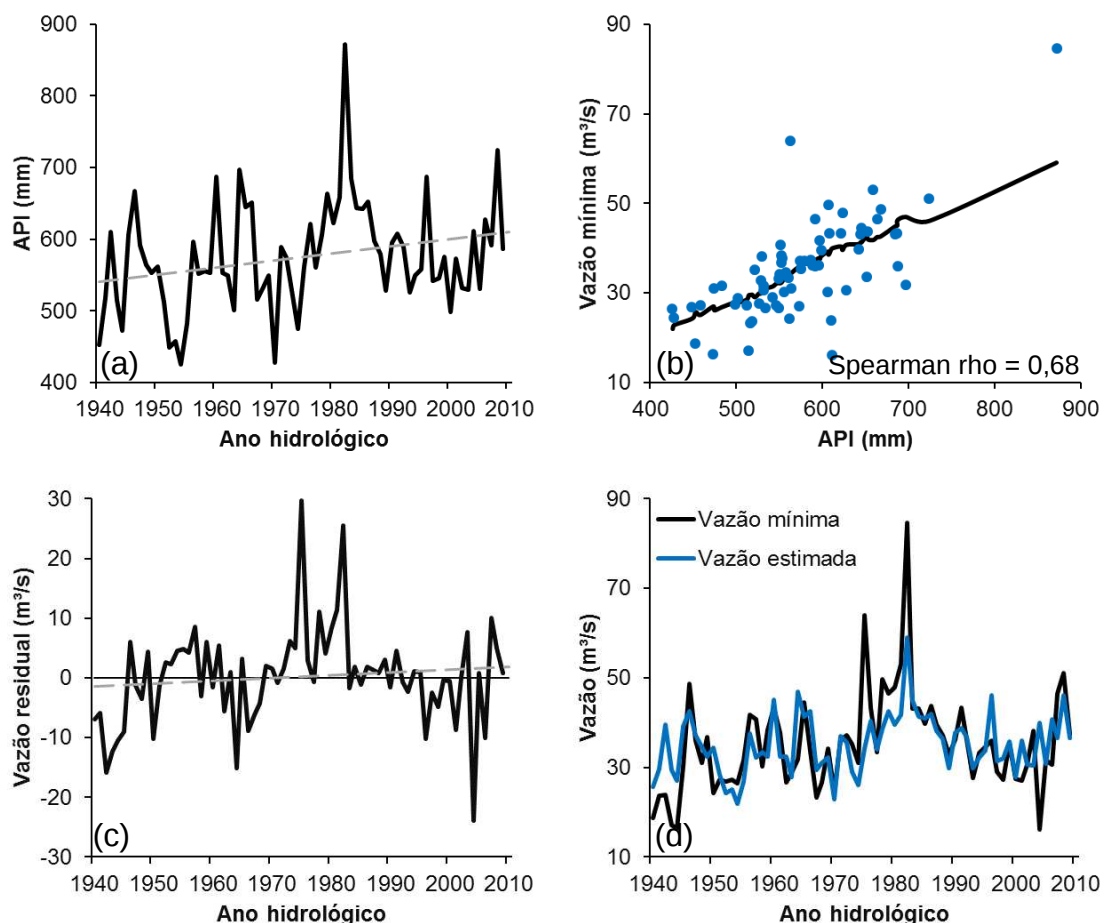


Figura 32 – Resultados para a estação fluviométrica de Três Corações. Comportamento temporal do API (a); curva de regressão LOESS entre vazão média e API (b); comportamento temporal da vazão residual (observado menos modelado) do modelo de API-vazão (c); e comparação do comportamento temporal entre a vazão média medida e estimada na estação fluviométrica (d).

O aumento no API (Figura 32a) e na vazão estimada (Figura 32d), ambos sem tendência (Z (MK) de 1,86 e 1,78, respectivamente), mostram que a precipitação levaria a um aumento da vazão mínima. Contudo, a contribuição de outros fatores, como mostrado na vazão residual (Z (MK) de 0,91) (Figura 32c), foram responsáveis por uma pequena parcela no crescimento da vazão mínima.

As médias de comportamento nos períodos distintos das Q_7 estimadas através da precipitação do ano hidrológico, mostram coerência com as Q_7 medidas na maioria das áreas de drenagem, exceto em Bom Sucesso (no P2 após 1994) e Santana do Jacaré (no P1 antes de 1965), em que o comportamento médio da Q_7 estimada não apresentou similaridade com a Q_7 medida nesses períodos isolados.

O uso e cobertura do solo, associado a cada período isolado de vazão mínima (Tabela 15), mostra que na área do Clube de Regatas, o crescimento da Q_7 poder estar vinculado ao aumento das áreas agrícolas no P2 e da precipitação (Tabela 13), além da redução da ET e manutenção da capacidade de infiltração do solo (BRUIJNZEEL, 2004).

Tabela 15 – Valores percentuais médios em períodos distintos do uso e cobertura do solo referente a área agrícola, pastagens e uso agropecuário (agrícola + pastagens) nas áreas de Bom Sucesso, Clube de Regatas, Ibituruna, Santana do Jacaré e Três Corações

Estação	Agricultura (%)			Pastagem (%)			Uso Agropecuário (%)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Bom Sucesso	8,7	11,5	-	52,3	47,0	-	61,0	58,4	-
Clube de Regatas	16,1	30,5	-	45,2	32,4	-	61,3	62,8	-
Ibituruna	4,2	5,1	7,0	35,0	36,5	31,4	39,1	41,5	38,5
Santana do Jacaré	5,9	9,4	11,8	46,5	56,1	48,0	52,4	65,5	59,8
Três Corações	10,3	11,6	11,0	42,2	49,8	33,3	52,4	61,4	44,3

Nas áreas de Bom Sucesso e Santana do Jacaré, os dados de cobertura do solo de Dias et al. (2016) não elucidam o comportamento da Q_7 em P2 e P1,

respectivamente; entretanto a redução da Q_7 junto com o aumento da ET no P2 da área de Bom Sucesso podem estar atrelados à exploração madeireira de grandes empresas como a GERDAU S.A, além do próprio aumento histórico das florestas plantadas da região (PIKETTY et al., 2009; VIANA, 2004; VIOLA et al., 2014). Na área de Três Corações a redução das áreas de pastagens, substituídas por outras atividades, como reflorestamento por exemplo (VIOLA et al., 2014), aparenta ter contribuído no P3 para a redução da Q_7 com o aumento da ET (KAM; SHEFFIELD, 2016). Além disso, não há uso agrícola significativo, em contraste com a Região 1 em que a área do Clube de Regatas chega a um terço de uso destinado para este fim. Esse padrão de comportamento no uso e cobertura do solo é encontrado nas outras regiões à montante da BHRG. Em Ibiturina o P1 e P2 não diferem muito no uso do solo referente a pastagens; entretanto, sua redução a partir da década de 1970 pode ter impulsionado o aumento da vazão mínima no P3.

O nível de drenagem das precipitações do ano hidrológico, para a vazão mínima em períodos distintos pode ser constatado na Tabela 16 ao correlacionar, com o teste de Spearman, a vazão mínima medida com a estimada pela precipitação.

Tabela 16 – Valores de correlação do teste de Spearman rho em períodos distintos entre a vazão mínima medida (Q_7) e vazão mínima estimada nas áreas de Bom Sucesso, Clube de Regatas, Ibituruna, Santana do Jacaré e Três Corações

Estação	Spearman rho		
	P1	P2	P3
Bom Sucesso	0,11	-0,19	-
Clube de Regatas	0,74	0,54	-
Ibituruna	0,13	0,71	0,67
Santana do Jacaré	-0,07	0,57	0,25
Três Corações	0,48	0,65	0,37

Observa-se que, em Bom Sucesso e Santana do Jacaré, o sistema hidrológico está em desequilíbrio, existindo correlação negativa em P2

(Spearman de -0,19) e P1 (Spearman de -0,07), respectivamente. No Clube de Regatas, a precipitação no P1 representava de maneira mais eficiente a Q_7 (Spearman de 0,74), quando comparada ao P2 (Spearman de 0,54), mostrando que o uso agrícola nesse período pode ser o fator determinante para o aumento da Q_7 , além do aumento da precipitação. Em Ibituruna, a vazão mínima foi melhor representada nos períodos P2 (Spearman de 0,71) e P3 (Spearman de 0,67), apresentando uma correlação expressiva. Em Três Corações houve melhor representatividade da precipitação sobre a Q_7 no P2 (Spearman de 0,65).

Ao observar o comportamento das vazões mínimas, não só nas áreas de drenagem que apresentaram tendência, mas em todas as áreas, em longas escalas (>60 anos), pode-se constatar que a precipitação da região tende a aumentar, contribuindo para o aumento das vazões mínimas. Entretanto, em escalas menores (~30 anos), eventos climáticos sazonais de grande escala (ALEXANDER; KILBOURNE; NYE, 2014; ANDREOLI; KAYANO, 2005; KAYANO; CAPISTRANO, 2014; MOLION, 2008; VÁSQUEZ P. et al., 2017) atuam para o aumento e/ou redução dos eventos de precipitação e, conseqüentemente, exercem influência sobre as vazões, em especial a mínima, que demonstrou ser mais sensível a mudanças.

Após as análises geradas, observou-se que as tendências no comportamento das vazões mínimas estão diretamente associadas à variabilidade natural da precipitação como nas áreas do Clube de Regatas, Ibituruna, Santana do Jacaré (a partir de meados de 1960) e Três Corações, exceto para a área de Bom Sucesso, que apresentam comportamento totalmente distinto dos eventos de precipitação a partir da década de 1990, sugerindo que ações antrópicas propiciaram o comportamento diferenciado da realidade. Logo, as precipitações representam a principal força para impulsionar o comportamento das vazões mínimas. Já as mudanças no uso e cobertura do solo, através da redução das pastagens em substituição por práticas florestais (PIKETTY et al., 2009; VIOLA et al., 2014), contribuíram para o aumento da ET na Região 3, a partir da década de 1990, fazendo com que as vazões mínimas não apresentassem tendência na maioria das áreas de drenagem.

5. CONCLUSÕES

- O aumento das precipitações (algumas sem tendência) é determinante, em maior grau, para o padrão de comportamento tanto das vazões médias quanto das mínimas, na maioria das áreas de drenagem estudadas da BHRG.
- A dinâmica de uso e cobertura do solo, substituindo as áreas de pastagens por outras atividades a partir de meados de 1970, embora tenha apresentado influência, dependendo do grau de mudança, muitas vezes não foi capaz de alterar significativamente as vazões nas áreas de drenagem estudadas da BHRG.
- O modelo chuva-vazão possibilitou, em uma escala climatológica, identificar que as precipitações contribuem de maneira mais expressiva, para o comportamento das vazões na maioria das áreas de drenagem. Entretanto, a partir da década de 1990, houve perturbações no sistema com o aumento na ET, em função da dinâmica das alterações ocorridas nos tipos de uso e cobertura do solo da região.
- Para o prognóstico de comportamento das vazões, deve-se considerar o acoplamento de grandes moduladores climáticos atuantes na região, servindo de subsídio para o planejamento hídrico e para as tomadas de decisão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELEN, S. et al. Droughts and Floods in the La Plata Basin in Soil Moisture Data and GRACE. **Remote Sensing**, v. 7, n. 6, p. 7324–7349, 3 jun. 2015.

AHIABLAME, L. et al. Annual baseflow variations as influenced by climate variability and agricultural land use change in the Missouri River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 551, p. 188–202, 2017.

AHMAD, I. et al. Precipitation Trends over Time Using Mann-Kendall and Spearman's rho Tests in Swat River Basin, Pakistan. **Advances in Meteorology**, v. 2015, p. 1–15, 2015.

ALEXANDER, M. A.; KILBOURNE, H. K.; NYE, J. A. Climate variability during warm and cold phases of the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) 1871-2008. **Journal of Marine Systems**, v. 133, p. 14–26, 2014.

ALI, S.; GHOSH, N. C.; SINGH, R. Rainfall-runoff simulation using a normalized antecedent precipitation index. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 2, p. 266–274, 2010.

AN, G.; HAO, Z. Variation of Precipitation and Streamflow in the Upper and Middle Huaihe River Basin, China, from 1959–2009. **Journal of Coastal Research**, v. 80, n. Special, p. 69–79, 2017.

ANA. **Séries Históricas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 1 set. 2016.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 15, p. 2017–2030, 2005.

ANIL, A. P.; RAMESH, H. Analysis of climate trend and effect of land use land cover change on Harangi streamflow, South India: a case study. **Sustainable Water Resources Management**, v. 3, n. 3, p. 257–267, 2 set. 2017.

ANTONANGELO, A.; BACHA, C. J. C. As Fases da Silvicultura no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, v. 52, n. 1, p. 207–238, 1998.

ASARIAN, J. E. Long-Term Streamflow and Precipitation Trends in the Eel River Basin. In: **Streamflow Analyses**. Arcata, CA: October, 2015. p. 30.

ASARIAN, J. E.; WALKER, J. D. Long-Term Trends in Streamflow and Precipitation in Northwest California and Southwest Oregon, 1953-2012. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 52, n. 1, p. 241–261, 2016.

BAO, Z. et al. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: Climate variability or human activities? **Journal of Hydrology**, v. 460–461, p. 117–129, 2012.

BASARIN, B. et al. Trends and multi-annual variability of water temperatures in the river Danube, Serbia. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 18, p. 3315–3329, 2016.

BATES, B. C.; CHANDLER, R. E.; BOWMAN, A. W. Trend estimation and change point detection in individual climatic series using flexible regression methods. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 117, n. 16, p. 1–9, 2012.

BAYER, D. M. **Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala**. 2014. 156 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BENDER, A. **Eventos de tempo severo associados às linhas de instabilidade sobre o estado de São Paulo**. 2012, 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências: Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2012.

BIONDI, F.; GERSHUNOV, A.; CAYAN, D. R. North Pacific Decadal Climate Variability since 1661. **Journal of Climate**, v. 14, n. 1, p. 5–10, 2001.

BORGLIN, C.; BORGLIN, S. **The effects of sugarcane expansion on the hydrology of the Rio Grande Basin, Brazil**. 2013. 66f. Dissertation (Master Water Resources Engineering, 2013) - Department of Building and Environmental Technology, LundDepartment of Building and Environmental Technology, 2013.

BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, n. 1–4, p. 3–23, fev. 1982.

BOSTAN, P. A.; HEUVELINK, G. B. M.; AKYUREK, S. Z. Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 19, n. 1, p. 115–126, 2012.

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, n. 1, p. 185–228, set. 2004.

CAPOZZOLI, C. R.; DE OLIVEIRA CARDOSO, A.; FERRAZ, S. E. T. Padrões de variabilidade de vazão de rios nas principais bacias Brasileiras e associação com índices climáticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 243–254, 2017.

CARDOZO, A. B.; REBOITA, M. S.; GARCIA, S. R. Climatologia de frentes frias na América do Sul e sua relação com o modo anular Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, n. 11, p. 9–26, 2015.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004.

CAVALCANTI, I. A. F. **Sistemas Frontais**. Disponível em: <<http://www.masterantiga.iag.usp.br/historico/labsisfron.html>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, 2004.

CHEN, Y. et al. Investigating Trends in Streamflow and Precipitation in Huangfuchuan Basin with Wavelet Analysis and the Mann-Kendall Test. **Water**, v. 8, n. 3, p. 77, 2016.

CHIESSI, C. M. et al. Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 21, p. 1–5, 2009.

CLARKE, R. T.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. Variabilidade temporal no regime hidrológico da bacia do rio Paraguai. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 51, p. 201–211, 2003.

CLEVELAND, W. S.; DEVLIN, S. J. Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. **Journal of the American Statistical Association**, v. 83, n. 403, p. 596, 1988.

COE, M. T. et al. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1, p. 119–131, 2011.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River - Land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, v. 369, n. 1–2, p. 165–174, 2009.

COELHO, C. A. S.; UVO, C. B.; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, n. 3–4, p. 185–197, 2002.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1–4, p. 206–217, 2003.

CPC-NOAA. **Cold y Warm Episodes by Season**. Disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml>. Acesso em: 9 nov. 2017.

CPTEC/INPE. **Primeira Zona de Convergência do Atlântico Sul desta Primavera**. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/129590>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

DESER, C. et al. Sea Surface Temperature Variability: Patterns and Mechanisms. **Annual Review of Marine Science**, v. 2, p. 115–143, 2010.

DIAS, L. C. P. et al. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global Change Biology**, v. 22, n. 8, p. 2887–2903, 2016.

DOYLE, M. E.; BARROS, V. R. Attribution of the river flow growth in the Plata Basin. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 15, p. 2234–2248, 2011.

ELLISON, D. et al. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. **Global Environmental Change**, v. 43, p. 51–61, mar. 2017.

ENGEL, V. et al. Hydrological consequences of Eucalyptus afforestation in the Argentine Pampas. **Water Resources Research**, v. 41, n. 10, p. 1–14, out. 2005.

FARLEY, K. A.; JOBBAGY, E. G.; JACKSON, R. B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. **Global Change Biology**, v. 11, n. 10, p. 1565–1576, out. 2005.

FARR, T. et al. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1–33, 2007.

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, n. 1, p. 23–38, 2001.

FERREIRA, N. J.; CORREIA, A. A.; RAMÍREZ, M. C. V. Synoptic scale features of the tropospheric circulation over tropical South America during the WETAMC TRMM/LBA experiment. **Atmosfera**, v. 17, n. 1, p. 13–30, 2004.

GAO, G. et al. Spatial and temporal characteristics of actual evapotranspiration over Haihe River basin in China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 26, n. 5, p. 655–669, 2012.

GARBRECHT, J.; VAN LIEW, M.; BROWN, G. O. Trends in Precipitation, Streamflow, and Evapotranspiration in the Great Plains of the United States. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 9, n. 5, p. 360–367, 2004.

GARCIA, N. O.; VARGAS, W. M. The Temporal Climatic Variability in the “Río De La Plata” Basin Displayed by the River Discharges. **Climatic Change**, v. 38, n. 3, p. 359–379, 1998.

GARCIA, S. R.; KAYANO, M. T. Climatological aspects of Hadley, Walker and monsoon circulations in two phases of the Pacific Decadal Oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 91, n. 1–4, p. 117–127, 2008.

GENTA, J.; PEREZ-IRIBARREN, G.; MECHOSO, C. R. A Recent Increasing Trend in the Streamflow of Rivers in Southeastern South America. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2858–2862, nov. 1998.

GONZALEZ, P. L. M. et al. Stratospheric ozone depletion: a key driver of recent precipitation trends in South Eastern South America. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 7–8, p. 1775–1792, 5 abr. 2014.

GOPINATH, G.; SWETHA, T. V.; ASHITHA, M. K. Automated extraction of watershed boundary and drainage network from SRTM and comparison with Survey of India toposheet. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n. 7, p. 2625–2632, 2014.

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, p. 537–554, 2011.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35–58, 2000.

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. ENSO and extreme rainfall events in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 7, p. 1589–1609, 2009.

GYAWALI, R.; GREB, S.; BLOCK, P. Temporal Changes in Streamflow and Attribution of Changes to Climate and Landuse in Wisconsin Watersheds. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 4, p. 1138–1152, 2015.

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. Statistical Methods in Water Resources. In: **Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey**. U.S. Geological Survey: September, 2002. v. 4p. 522.

HOLMBERG, M. J.; STOGNER, R. W.; BRUCE, J. F. Characterization and relation of precipitation, streamflow, and water-quality data at the U.S. Army Garrison Fort Carson and Piñon Canyon Maneuver Site, Colorado, water years 2013–14. **U.S. Geological Survey**, v. VIII, n. 5145, p. 58, 2016.

HOUZE JR, R. A. Mesoscale Convective Systems. **Reviews of Geophysics**, v. 42, p. 1–43, 2004.

IAG/USP. **Frentes e frontogêneses**. Disponível em: <<http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula09/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

ILSTEDT, U. et al. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1–2, p. 45–51, 2007.

ILSTEDT, U. et al. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 21930, 24 abr. 2016.

IPCC. **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

JUNQUAS, C. et al. Influence of South America orography on summertime precipitation in Southeastern South America. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11–12, p. 3941–3963, 5 jun. 2016.

KAHYA, E.; KALAYCI, S. Trend analysis of streamflow in Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 289, n. 1–4, p. 128–144, 2004.

KAM, J.; SHEFFIELD, J. Changes in the low flow regime over the eastern United States (1962–2011): variability, trends, and attributions. **Climatic Change**, v. 135, n. 3–4, p. 639–653, 2016.

KARSAULIYA, S. Application of Remote Sensing and GIS in Solid Waste Management: A Case Study of Surroundings of River Yamuna, India. **International Journal of Environmental Engineering and Management**, v. 4, n. 6, p. 2231–1319, 2013.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 4, p. 531–540, 30 mar. 2007.

KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162–178, 2014.

KEGEN, S.; GRAÇA, R. **World Forests, Society and Environment**. Dordrecht: Springer Netherlands, v. 1, 1999.

KERR, R. A. A North Atlantic Climate Pacemaker for the Centuries. **Science**, v. 288, n. 5473, p. 1984–1985, 2000.

KHANNA, J. et al. Regional dry-season climate changes due to three decades of Amazonian deforestation. **Nature Climate Change**, v. 7, n. February, p. 200–204, 2017.

KIM, J. W.; YEH, S. W.; CHANG, E. C. Combined effect of El Niño-Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation on the East Asian winter monsoon. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 3–4, p. 957–971, 2014.

KNIGHT, J. R. et al. A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 20, p. 1–4, 2005.

KRÖGER, M. The Expansion of Industrial Tree Plantations and Dispossession in Brazil. **Development and Change**, v. 43, n. 4, p. 947–973, 2012.

LA TORRE TORRES, I. B. et al. Seasonal rainfall-runoff relationships in a lowland forested watershed in the southeastern USA. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 13, p. 2032–2045, 30 jun. 2011.

LAING, A.; EVANS, J. L. **Introduction to Tropical Meteorology**. 2. ed. [s.l.] COMET Program, 2011.

LAING, A. G.; FRITSCH, M. The global population of mesoscale convective complexes. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 123, n. January 1996, p. 389–405, 1997.

LI, G. et al. Modulation of Pacific Decadal Oscillation on the relationship of El Niño with southern China rainfall during early boreal winter. **Atmospheric Science Letters**, v. 18, n. 8, p. 336–341, 2017.

LI, Y. et al. Contributions of Climate Variability and Human Activities to Runoff Changes in the Upper Catchment of the Red River Basin, China. **Water**, v. 8, n. 9, p. 414, 2016.

LIEBMANN, B.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. DE. Interannual variability of daily extreme precipitation events in the state of São Paulo, Brazil. **Journal of Climate**, v. 14, n. 2, p. 208–18, 2001.

LOARIE, S. R. et al. Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105–109, 2011.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 61, n. 11, p. 1374–1387, 1980

MANTUA, N. J. et al. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069–1079, 1997.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R. The Pacific decadal oscillation. **Journal of oceanography**, v. 58, n. 1, p. 35-44, 2002.

MAYER, M. et al. ENSO-driven energy budget perturbations in observations and CMIP models. **Climate Dynamics**, v. 48, n. 3–4, p. 1399–1400, 2017.

MENDES, N. G. S. **Estudo das vazões na bacia hidrográfica do rio Itapemirim**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2016.

MILLY, P. C. D. et al. Climate change. Stationarity is dead: whither water management? **Science (New York, N.Y.)**, v. 319, n. 5863, p. 573–574, 2008.

MINUZZI, R. B. et al. Influência da La Niña na estação chuvosa da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 345–353, 2007.

MOLION, C. B. Perspectivas climáticas para os próximos 20 anos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, n. 2008, p. 12, 2008.

MONTALDO, N.; SARIGU, A. Potential links between the North Atlantic Oscillation and decreasing precipitation and runoff on a Mediterranean area. **Journal of Hydrology**, v. 553, p. 419–437, out. 2017.

MORAES, J. M. et al. Trends in Hydrological Parameters of a Southern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. **Water Resources Management**, v. 12, n. 4, p. 295–311, 1998.

MORAIS, M. A. DE; CASTRO, W. A. C. DE; TUNDISI, J. G. Climatologia de frentes frias sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e sua influência na limnologia dos reservatórios de abastecimento de água. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 205–217, 2010.

MOURA, C. R. W.; ESCOBAR, G. C. J.; ANDRADE, K. M. Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 267–280, 2013.

NAYAK, P. C. et al. Rainfall-runoff modeling using conceptual, data driven, and wavelet based computing approach. **Journal of Hydrology**, v. 493, p. 57–67, jun. 2013.

NETO, O. B. S. **Chuvas anômalas provocadas por um evento de Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) no Nordeste brasileiro no mês de outubro de 2009**. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/~rupload/arquivo/ZCOU_OUT2009.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2017.

NEWMAN, M. et al. The Pacific decadal oscillation, revisited. **Journal of Climate**, v. 29, n. 12, p. 4399–4427, 2016.

NOAA. **What is El Niño and La Niña?** Disponível em: <http://www.nws.noaa.gov/om/csd/graphics/content/outreach/brochures/FactSheet_ElNino-LaNina.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2017.

NOAA. **El Niño and La Niña (El Niño-Southern Oscillation)**. Disponível em: <<https://www.climate.gov/enso>>. Acesso em: 9 nov. 2017.

NÓBREGA, M. T. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 2, p. 585–595, 2011.

OCHOA-TOCACHI, B. F. et al. Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 22, p. 4074–4089, 2016.

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do Rio Grande**. 2008. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

OLIVEIRA, V. A. et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, 2017.

OUTRAM, F. N. et al. High-frequency monitoring of nitrogen and phosphorus response in three rural catchments to the end of the 2011-2012 drought in England. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 9, p. 3429–3448, 2014.

ÖZHAN, S. et al. Evapotranspiration from a mixed deciduous forest ecosystem. **Water Resources Management**, v. 24, n. 10, p. 2353–2363, 2010.

PALMER, M. A. et al. Climate change and the world's river basins: Anticipating management options. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 6, n. 2, p. 81–89, 2008.

PAMPUCH, L. A.; AMBRIZZI, T. Sistemas Frontais sobre a América do Sul Parte I: Climatologia e intervalo de passagem em dados da Reanálise I do NCEP/NCAR. Anais do IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. **Anais...Santa Maria - RS: 2015**

PEREIRA, F. **The interplay between atmosphere, hydrology and land use by environmental modelling**. 2013. 211f. Thesis (Doctoral Thesis, Water Resources Engineering, 2013) - Department of Water Resources Engineering, SundDepartment of Water Resources Engineering, 2013.

PETTITT, A. A. N. et al. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. **Applied statistics**, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.

PIKETTY, M. G. et al. Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 2, p. 180–190, 2009.

QIU, L. et al. Identification of the impacts of climate changes and human activities on runoff in the upper and middle reaches of the Heihe River basin, China. **Journal of Water and Climate Change**, v. 7, n. 1, 2015.

QUADRO, M. F. L. DE et al. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 152–162, 2012.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

REBOITA, M. S. et al. Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, n. 13, p. 20–37, 2017.

REID, L.; LEWIS, J. Evaluating cumulative effects of logging and potential climate change on dry-season flow in a coast redwood forest. Proceedings of the Fourth Interagency Conference on Research in the Watersheds: Observing, studying, and managing for change. **Anais...US Geological Survey**, 2011.

RICE, J. S. et al. Continental U.S. streamflow trends from 1940 to 2009 and their relationships with watershed spatial characteristics. **Water Resources Research**, p. 6262–6275, 2015.

ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L. A. B. Towards proalcohol II-A review of the Brazilian bioethanol programme. **Biomass and Bioenergy**, v. 14, n. 2, p. 115–124, 1998.

RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057–1076, 9 abr. 2010.

RUHOFF, A. L. et al. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 8, p. 1658–1676, 2013.

SAHIN, V.; HALL, M. J. The effects of afforestation and deforestation on water yields. **Journal of Hydrology**, v. 178, n. 1–4, p. 293–309, 1996.

SALARIJAZI, M. et al. Trend and change-point detection for the annual streamflow series of the Karun River at the Ahvaz hydrometric station. **African Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 32, p. 4540–4552, 2012.

SALMORAL, G. et al. Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia basin, Spain. **Science of The Total Environment**, v. 503–504, p. 258–268, jan. 2015.

SANTANA, W. M. S. et al. Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal Eucalyptus. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 1–8, 2012.

SCHRÖTER, K. et al. What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 309–327, 2015.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379, 1968.

SEYAM, M.; OTHMAN, F. Long-term variation analysis of a tropical river's annual streamflow regime over a 50-year period. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 121, n. 1–2, p. 71–85, 2015.

SHIMAKURA, S. E. **Interpretação do coeficiente de correlação**. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html>>. Acesso em: 28 dez. 2017.

SILVA, L. J.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. Relação da passagem de frentes frias na região Sul de Minas Gerais (RSMG) com a precipitação e eventos de geada. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, n. 10, p. 229–246, 2014.

SILVA, B. B. DA et al. Changes to the energy budget and evapotranspiration following conversion of tropical savannas to agricultural lands in São Paulo State, Brazil. **Ecohydrology**, v. 8, n. 7, p. 1272–1283, 2015.

SIQUEIRA, J. R. et al. Structural characteristics of convective systems over South America related to cold-frontal incursions. **Monthly Weather Review**, v. 133, n. 5, p. 1045–1064, 2005.

SIQUEIRA, J. R.; MARQUES, S. Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de Janeiro de 2013 no Estado do Rio de Janeiro: Características Estruturais e Termodinâmicas. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 39, n. 2, p. 57–76, 2016.

SOUZA-FILHO, P. W. M. et al. Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 175–184, 2016.

SPERA, S. A. et al. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3405–3413, 2016.

SULAIMAN, N. H. et al. Trend analysis of Pahang river using non-parametric analysis: Mann kendall's trend test | Analisis corak sungai Pahang menggunakan kaedah bukan parametrik: Ujian corak Mann Kendall. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**, v. 19, n. 6, p. 1327–1334, 2015.

SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. The South Atlantic Subtropical High: Climatology and Interannual Variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279–3296, maio 2017.

SUN, Y. et al. Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catchment properties to streamflow decrease in a mesoscale basin by three different methods. **Journal of Hydrology**, v. 508, n. January 2014, p. 170–180, 2014.

TAO, H. et al. Trends of streamflow in the Tarim River Basin during the past 50years: Human impact or climate change? **Journal of Hydrology**, v. 400, n. 1–2, p. 1–9, 2011.

THOMAS, B. E. Trends in streamflow of the San Pedro River, southeastern Arizona, and regional trends in precipitation and streamflow in southeastern Arizona and southwestern New Mexico. **US Geological Survey Professional Paper**, n. 1712, p. 1–79, 2006.

TING, M. et al. Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic. **Journal of Climate**, v. 22, n. 6, p. 1469–1481, 2009.

TOOTLE, G. A.; PIECHOTA, T. C. Relationships between Pacific and Atlantic ocean sea surface temperatures and U.S. streamflow variability. **Water Resources Research**, v. 42, n. 7, p. 1–14, 2006.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**/Carlos E.M. Tucci; colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. —2.ed. —Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

UCAR/THE COMET PROGRAM. **Severe Convection : Mesoscale Convective Systems**. Disponível em: <http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/severe2/print.php#page_2-1-0>. Acesso em: 16 nov. 2017.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife - PE: Online, 2006.

VÁSQUEZ P., I. L. et al. Historical analysis of interannual rainfall variability and trends in southeastern Brazil based on observational and remotely sensed data. **Climate Dynamics**, v. 0, n. 0, p. 1–24, 2017.

VIANA, M. B. **O eucalipto e os efeitos ambientais do seu plantio em escala**. 1. ed. Brasília: Biblioteca da Câmara dos Deputados, 2004.

VIOLA, M. R. et al. Impacts of Land-use Changes on the Hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. **Water Resources Management**, v. 28, n. 13, p. 4537–4550, 2014.

VOROSMARTY, C. J. et al. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. **Science**, v. 289, n. JULY, p. 284–288, 2000.

WANG, D. Comment on “Climate and agricultural land use change impacts on streamflow in the upper midwestern United States” by Satish C. Gupta et al. **Water Resources Research**, v. 52, n. 5, p. 4193–4194, 2016.

WANG, W.; VAN GELDER, P. H. A. J. M.; VRIJLING, J. K. Trend and Stationarity Analysis for Streamflow Processes of Rivers in Western Europe in the 20Th Century. In: **Proceedings: IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance**. Rethymno, Greece: july, 2005. p. 8–10.

WANG, X.; LIU, H. PDO modulation of ENSO effect on tropical cyclone rapid intensification in the western North Pacific. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 1–2, p. 15–28, 2016.

WEI, W.; CHANG, Y.; DAI, Z. Streamflow changes of the Changjiang (Yangtze) River in the recent 60 years: Impacts of the East Asian summer monsoon, ENSO, and human activities. **Quaternary International**, v. 336, p. 98–107, 2014.

WILK, J.; ANDERSSON, L.; PLERMKAMON, V. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in Northeast Thailand. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 14, p. 2729–2748, 2001.

YAO, Y. et al. Effect of reforestation on annual water yield in a large watershed in northeast China. **Journal of Forestry Research**, v. 26, n. 3, p. 697–702, 18 set. 2015.

YIGZAW, W.; HOSSAIN, F. Water sustainability of large cities in the United States from the perspectives of population increase, anthropogenic activities, and climate change. **Earths Future**, v. 4, n. 12, p. 603–617, 2016.

YU, Y. S.; ZOU, S.; WHITTEMORE, D. Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 1, p. 61–80, 1993.

ZANDONADI, L. et al. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 123, n. 3–4, p. 741–756, 2016.

ZAR, J. Significance testing of the Spearman Rank Correlation Coefficient. **J. Amer. Statist. Assoc.**, v. 67, n. 339, p. 578–580, 1973.

ZHANG, X. et al. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China. **Water Resources Research**, v. 44, n. 7, p. 1–12, 2008.

ZHANG, Y. K.; SCHILLING, K. E. Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940 s: Effect of land use change. **Journal of Hydrology**, v. 324, n. 1–4, p. 412–422, 2006.

ZHENG, H. et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin. **Water Resources Research**, v. 45, n. 7, p. 1–9, 2009.

ZILLI, M. T. et al. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017.