



MARJORIE MENDES GUARENGHI

Avaliação dos impactos sobre a quantidade e qualidade das águas devido ao crescimento da atividade canavieira

30/2014

**CAMPINAS
2014**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

MARJORIE MENDES GUARENGHI

Avaliação dos impactos sobre a quantidade e qualidade das águas devido ao crescimento da atividade canavieira

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestra em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELA ALUNA MARJORIE
MENDES GUARENGHI, E ORIENTADA
PELO PROF. DR. ARNALDO CESAR DA
SILVA WALTER.



ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2014**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

G931a Guarenghi, Marjorie Mendes, 1988-
Avaliação dos impactos sobre a quantidade e qualidade das águas devido ao crescimento da atividade canavieira / Marjorie Mendes Guarenghi. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Arnaldo Cesar da Silva Walter.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Etanol. 2. Sustentabilidade. 3. Recursos hídricos. 4. Solo - Uso. 5. Análise de séries temporais. I. Walter, Arnaldo Cesar da Silva, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Impacts assessment on water quantity and quality due to the expansion of sugarcane cropping

Palavras-chave em inglês:

Ethanol

Sustainability

Water resources

Land use

Time-series analysis

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Titulação: Mestra em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora:

Arnaldo Cesar da Silva Walter [Orientador]

Jorge Marcos de Moraes

Vânia Rosa Pereira

Fábio Vale Scarpere

Data de defesa: 26-02-2014

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Avaliação dos impactos sobre a quantidade e
qualidade das águas devido ao crescimento da
atividade canavieira**

Autor: Marjorie Mendes Guarengi

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



**Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter, Presidente
FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Jorge Marcos de Moraes
CENA-USP**



**Dra. Vânia Rosa Pereira
CEPAGRI/UNICAMP**



**Dr. Fabio Vale Scarpere
CTBE**

Campinas, 26 de fevereiro de 2014.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida, por guiar meus caminhos e cuidar de mim de uma forma tão especial.

Ao meu orientador, Arnaldo Walter. Além de excelente profissional, um grande amigo que quero levar sempre comigo. Agradeço imensamente por seu apoio, dedicação, amizade, bom humor, por me fazer enxergar saídas quando eu nem sempre conseguia ver. Admiro-o muito, e me sinto honrada em poder trabalhar com você. Muitíssimo obrigada por tudo!

À minha família, em especial aos meus pais Rosemaria e Atílio, e aos meus irmãos Juliano e Vinícius pelo apoio incondicional, pela educação que me proporcionaram, pelas conversas, conselhos, pela confiança, pelo amor...

Aos meus amigos e colegas do Programa de Sustentabilidade do CTBE. As experiências e o tempo compartilhado com vocês fez desse período de mestrado um momento muito agradável. Em especial, obrigada Arnaldo Walter e Manoel Regis Lima Verde Leal por tornarem isso possível, por todo o apoio, e por serem tão acolhedores.

A todos meus amigos que de alguma forma estiveram sempre presentes, e em especial a Simone Pereira de Souza, Bruna Loiola, Luciana Jarduli, João Libardi, Thayse Hernandez, Michelle Picoli, Rafael Defavari, Alexandre Curi e Gustavo Santana.

Agradeço aos demais membros da banca Dra. Vânia, Dr. Jorge e Dr. Fábio pelas sugestões na etapa de qualificação que foram de grande valia para a conclusão deste trabalho.

Aos professores e funcionários do programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Ao CTBE (Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol) pela infraestrutura, à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal e Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

*Por mais longa que seja a caminhada,
o mais importante é dar o primeiro passo.
(Vinícius de Moraes)*

Resumo

O incentivo à produção e consumo de biocombustíveis no Brasil, principalmente representado pelo etanol, é impulsionado pela busca de fontes alternativas que contribuam para a diversificação da matriz energética nacional, e apresentem baixos impactos sobre a sustentabilidade de sua cadeia produtiva. O objetivo desta dissertação foi avaliar se, com os dados de monitoramento dos cursos d'água disponibilizados para o estado de São Paulo, é possível observar impactos sobre a qualidade e quantidade dos recursos hídricos em locais onde a atividade canavieira se intensificou ao longo dos anos. Foram utilizadas as bases de dados de estações pluviométricas, fluviométricas, e de qualidade disponibilizadas pela Agência Nacional das Águas, pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica, e pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. As regiões de Jaú, Pontal e Ribeirão Preto foram selecionadas para análise, sendo que a falta de estações de qualidade em Jaú impossibilitou a avaliação qualitativa nessa região. Os parâmetros de qualidade analisados foram: potássio, fósforo total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, NKT, sólidos totais, oxigênio dissolvido, demanda química e bioquímica de oxigênio e pH. As séries temporais de vazão, de chuva e das variáveis de qualidade das águas foram submetidas a análises gráficas e a testes estatísticos não paramétricos de tendências e detecção de mudanças bruscas nas séries hidrológicas. Os principais testes estatísticos adotados foram os testes de Mann-Kendall, Mann-Kendall sequencial, Mann-Kendall Sazonal, estimador Sen's Slope e Pettitt. O coeficiente de recessão do fluxo base foi utilizado para verificar se o crescimento da atividade canavieira pôde ser refletido nas vazões dos períodos de estiagem. Segundo os resultados obtidos, não foram observadas alterações nas vazões dos rios que pudessem ser atribuídas ao crescimento da cana-de-açúcar, mas sim à variação da precipitação. Em geral, a análise dos parâmetros de qualidade das águas indicou tendências positivas significativas para as séries de nitratos, nitritos e nitrogênio amoniacal. Essas séries apresentaram correlações tanto com a expansão da cultura canavieira, quanto com o crescimento populacional das regiões analisadas. Tendências crescentes foram observadas para o fósforo apenas na estação de Ribeirão Preto, porém os dados somente apresentaram correlação significativa com a população. O aumento da concentração desses parâmetros pode estar relacionado à lixiviação do

nitrogênio devido à aplicação de fertilizantes nitrogenados, como também ao tratamento inadequado de esgotos sanitários e efluentes industriais lançados nos cursos d'água. Os procedimentos estatísticos utilizados foram adequados, porém as bacias avaliadas são de larga escala nas quais muitos são os fatores de impacto sobre os recursos hídricos, e os resultados não foram conclusivos. A disponibilidade de dados, em termos de extensão das séries históricas e frequência de monitoramento em locais com intenso crescimento da cana, restringiu os estudos principalmente com relação à concentração de poluentes relacionados à atividade canavieira. A principal conclusão deste trabalho foi que, baseado nos dados disponíveis, não se pode afirmar rigorosamente que a produção em larga escala da cana-de-açúcar tem sido responsável pela redução do fluxo dos rios e pela deterioração da qualidade das águas.

Palavras chave: etanol, sustentabilidade, recursos hídricos, solo-uso, análise de séries temporais.

Abstract

The production and consumption of biofuels in Brazil, mainly represented by ethanol, has been focused on diversifying the national energy matrix and, more recently, efforts have been put on enhancing the sustainability of the production chain. Using available data for the state of São Paulo, the objective of this dissertation was defined on evaluating – if it is possible – the impacts of large-scale sugarcane production on the quality and quantity of water resources in areas where this crop was intensified over the years. For this, database of the Brazilian Water Agency (ANA), Department of Water and Energy (DAEE) and Brazilian Commission for the Environment (CONAMA) were used. The study areas were selected according to the data availability of stream flows and water quality in sites characterized by increasing sugarcane cropping. The regions of Jaú, Pontal and Ribeirão Preto were selected for the assessment, but it was not possible to evaluate the water quality in the region of Jáu. Regarding quality, the parameters analyzed were potassium, total phosphorus, nitrate, nitrite, ammonium, total Kjeldahl nitrogen, total solids, dissolved oxygen, biochemical and chemical oxygen demand and pH. The discharge, precipitation and water quality parameters series were evaluated with non-parametric tests, detection of trends and changes. The main tests used were Mann-Kendall, sequential Mann-Kendall, Seasonal Mann-Kendall, Sen's estimator of slope and Pettitt. The base flow recession coefficient was used to evaluate the possible impact of sugarcane growth on the stream flow during the dry season. The results of the exploratory analysis and the various statics tests did not show changes in water flow that could be explained by sugarcane cropping. On the other hand, the time series for nitrate, nitrite, and ammonium have significant increasing trends. However, for the nitrogen time series the best correlations are with the population growth rather than with sugarcane cropping. The concentration of total phosphorus has positive trends in the monitoring station of Ribeirão Preto, and for this parameter the correlation is only significant with population. The growth of pollutants concentration can be both explained by leaching of nitrogen due to fertilization and to the higher discharge of sewage and industrial effluents without appropriated treatment. The statistic procedures used in this dissertation are adequate but as basins studied are large and many factors impact water resources, the results achieved were not conclusive. Another constrain is data availability (extension and regularity of registers), mainly

regarding the concentration of pollutants on water bodies. A main conclusion is that based on data availability it is not possible to rigorously stress that sugarcane cropping in large-scale has been responsible for reducing water flows and reducing water quality.

Keywords: ethanol, sustainability, water resources, land use, time-series analysis.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1. Componentes do ciclo hidrológico.	3
Figura 1.2. Hipóteses, objetivos específicos da dissertação, metodologias utilizadas e seções.....	5
Figura 2.1. Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil e no estado de São Paulo. Porcentagem da produção de São Paulo com relação ao total nacional.	7
Figura 2.2. Evolução da área colhida de cana-de-açúcar no Brasil e no estado de São Paulo. Porcentagem de área de cana colhida no estado de São Paulo.....	8
Figura 2.3. Zoneamento Agroambiental: disponibilidade de águas superficiais e vulnerabilidade das águas subterrâneas.....	9
Figura 2.4. Composição do fluxo total ao longo do tempo.	23
Figura 3.1. Municípios com vazões monitoradas e selecionados para análise.....	28
Figura 3.2. Municípios, localização de usinas sucroalcooleiras, rede de drenagem da região de Jaú e sub-bacia do Rio Jaú.....	29
Figura 3.3. Municípios, localização de usinas sucroalcooleiras e regiões consideradas na URGHI Pardo.....	32
Figura 3.4. Rede de drenagem e estações analisadas na sub-bacia do Rio Jaú.	37
Figura 3.5. Rede de drenagem e estações analisadas nas regiões de Pontal e Ribeirão Preto, na UGRHI Pardo.	37
Figura 3.6. Rede de drenagem e estações de qualidade e vazão nas regiões de Pontal e Ribeirão Preto, na UGRHI Pardo.	41
Figura 3.7. Fluxograma dos testes aplicados sobre os dados de precipitação e vazão, e softwares utilizados.....	43
Figura 3.8. Determinação da reta de recessão pelo método de Barnes para médias mensais.	48
Figura 3.9. Coeficientes de recessão a partir dos modelos de Maillet e Boussinesq, e respectivas linhas de tendência.....	48
Figura 3.10. Linhas de tendência após a retirada dos coeficientes incertos.	49
Figura 3.11. Fluxograma dos testes aplicados sobre os respectivos dados dos parâmetros de qualidade, e softwares utilizados.....	52
Figura 4.1. Relação entre a área de cana colhida em 1980 por área do município.	59
Figura 4.2. Relação entre a área de cana colhida em 1993 por área do município.	59

Figura 4.3. Relação entre a área de cana colhida em 2000 por área do município.	60
Figura 4.4. Relação entre a área de cana colhida em 2010 por área do município.	60
Figura 4.5. Municípios com vazões monitoradas selecionadas para análise.....	61
Figura 4.6. Vazão média, precipitação total anual média na bacia do Rio Jaú, e respectivas retas de regressão.	62
Figura 4.7. Normalização e média móvel de quatro anos da vazão média e precipitação total média anual na bacia do Rio Jaú.	63
Figura 4.8 (a) e (b). Estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ de MKseq para a série de vazões mensais anuais do Rio Jaú, e precipitação total média anual na bacia.	65
Figura 4.9. Estimador de Sen's Slope para a vazão média mensal e precipitação média mensal na bacia do Rio Jaú.....	66
Figura 4.10. Comportamento do coeficiente de recessão (α) para o Rio Jaú ao longo dos anos.	67
Figura 4.11. Vazão média e precipitação total anual das estações da região de Pontal.	68
Figura 4.12. Normalização das precipitações totais de cada estação da região de Pontal.	68
Figura 4.13. Normalização e média móvel de quatro anos da vazão média e precipitação total anual da estação 2048033.....	69
Figura 4.14 (a), (b), (c), (d). Estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ de MKseq para as séries de vazões mensais anuais e precipitação (2048033) de 1974 a 2011, e de 1984 a 2011 em Pontal.	71
Figura 4.15. Estimador de Sen's Slope para a vazão média mensal e precipitações totais mensais na região de Pontal.	72
Figura 4.16. Comportamento do coeficiente de recessão para o Rio Pardo, em Pontal.....	73
Figura 4.17. Vazão média e precipitação total anual das estações da região de Ribeirão Preto...73	
Figura 4.18. Normalização e média móvel de quatro anos da vazão média anual em Ribeirão Preto.....	74
Figura 4.19. Normalização dos registros das precipitações totais no ano das estações da região de Ribeirão Preto.	74
Figuras 4.20 (a), (b) e (c). Estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ de MKseq para as séries de vazão mensal anual e precipitações totais mensais entre 1974 e 2011 em Ribeirão Preto, Rio Pardo.	76
Figura 4.21. Estimador de Sen's Slope para a vazão média mensal e precipitações totais mensais das estações da região de Ribeirão Preto.....	77

Figura 4.22. Comportamento do coeficiente de recessão para o Rio Pardo, em Ribeirão Preto..	77
Figura 4.23. Histórico do uso da terra na área total dos três municípios da Região de Jaú.	78
Figura 4.24. Área colhida de cana total nos três municípios da região de Jaú, e vazão média anual do Rio Jaú.	79
Figura 4.25. Histórico do uso da terra na área total dos municípios da região de Pontal.	81
Figura 4.26. Histórico do uso da terra na área total dos municípios da região de Ribeirão Preto.	81
Figura 4.27. Área colhida de cana apenas na região de Pontal, nos municípios da região de Pontal e Ribeirão Preto, e vazão média anual do Rio Pardo na estação fluviométrica de Pontal.	83
Figura 4.28. Área colhida de cana-de-açúcar apenas na região de Ribeirão Preto, e vazão média anual do Rio Pardo na estação fluviométrica de Ribeirão Preto.	83
Figura 4.29. Evolução do crescimento populacional nas regiões de estudo.	93
Figura 4.30. Usinas, estações de monitoramento de vazão e qualidade e áreas urbanas.	96
Figura 4.31. Valor das concentrações da série original do nitrito da estação 61851000, sem “outliers”, e expansão canavieira na região de Pontal.....	97
Figura A1. Hidrograma diário, diferentes retas de representação da curva de recessão e respectivos coeficientes α	118
Figura A2. Coeficientes de recessão distintos para cada segmento de recessão.	118
Figura A3. Determinação da reta de recessão pelo método de Barnes para médias mensais. ...	119
Figura C1. Concentrações de N_{amon} e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.	124
Figura C2. Concentrações de NO_3 e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.	124
Figura C3. Concentrações de NO_2 e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.	125
Figura C4. Concentrações de Sol. Tot. e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.	125
Figura C5. Concentrações de DBO e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.....	125
Figura C6. Concentrações de N_{amm} e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto.	126
Figura C7. Concentrações de NO_3 e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto...	126
Figura C8. Concentrações de NO_2 e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto. .	126
Figura C9. Concentrações de OD e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto. .	127
Figura C10. Concentrações de DBO e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto.....	127

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Captação, consumo e lançamento de água na indústria canavieira (m^3/tc).	11
Tabela 3.1. Informações hidrometeorológicas.....	30
Tabela 3.2. Histórico do uso da terra na região de Jaú (% em relação à área total).	31
Tabela 3.3. Informações sobre os municípios da região de Jaú em 2010.....	31
Tabela 3.4. Informações hidrometeorológicas.....	33
Tabela 3.5. Histórico do uso da terra na região de Pontal e região de Ribeirão Preto (%).	34
Tabela 3.6. Informações sobre os municípios da região de Pontal e Ribeirão Preto em 2010.....	35
Tabela 3.7. Estações Fluviométricas.	36
Tabela 3.8. Estações Pluviométricas.	36
Tabela 3.9. Estações de Qualidade.	41
Tabela 4.1. Denominação das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos.	58
Tabela 4.2. Valores da estatística Z do teste de MK para as estações da região de Jaú.....	64
Tabela 4.3. Resultados dos testes de MKseq e Pettitt para as séries hidrológicas em escala anual entre 1982 e 1999, na região de Jaú.....	65
Tabela 4.4. Valores da estatística Z do teste de MK para as estações da região de Pontal.	70
Tabela 4.5. Resultados dos testes de MKseq e Pettitt para as séries hidrológicas em escala anual entre 1974 e 2011, e 1984 e 2011, na região de Pontal.	70
Tabela 4.6. Valores da estatística Z do teste de MK para as estações da região de Ribeirão Preto.	75
Tabela 4.7. Resultados dos testes de MKseq e Pettitt para as séries hidrológicas em escala anual entre 1974 e 2011, e 1984 e 2011, na região de Ribeirão Preto.	76
Tabela 4.8. Coeficiente de correlação de Kendall τ entre as vazões médias anuais e área colhida de cana-de-açúcar anual entre 1974 e 2010.....	84
Tabela 4.9. Informações gerais sobre os parâmetros de qualidade e vazão analisados.....	86
Tabela 4.10. Testes de Shapiro-Wilk e de correlação de Kendall τ entre vazão e cada parâmetro das estações de qualidade de Pontal e Ribeirão Preto, e entre a vazão e o tempo.....	87
Tabela 4.11. Resultados dos testes de sazonalidade para as séries sem retirada da dependência da vazão (sem PAV) e com retirada da dependência da vazão (PAV).	88

Tabela 4.12. Resultados dos testes de sazonalidade (KW), autocorrelação (Run), tendência (MK e MKS) e magnitude (Sen) dos parâmetros de qualidade e vazão da estação de Pontal.....	89
Tabela 4.13. Resultados dos testes de sazonalidade (KW), autocorrelação (Run), tendência (MK e MKS), e magnitude (Sen) dos parâmetros de qualidade e vazão da estação de Ribeirão Preto.	89
Tabela 4.14. Resultados do teste de Pettitt dos parâmetros de qualidade e vazão das estações de Pontal e Ribeirão Preto	90
Tabela 4.15. Correlação entre o total populacional dos municípios e a média anual dos parâmetros, considerando as séries originais e séries finais utilizadas nos testes de MK.....	94
Tabela 4.16. Correlação entre a área colhida de cana nos municípios e a média anual dos parâmetros, considerando as séries originais e séries finais utilizadas nos testes de MK.....	94
Tabela 4.17. Informações sobre as usinas das regiões de Pontal e Ribeirão Preto.....	99
Tabela 4.18. Resumo dos testes estatísticos para avaliação da qualidade da água do Rio Pardo.....	100

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Gregas

α	coeficiente de recessão do fluxo base
α_0	nível de significância
τ	estatística do teste de correlação de Kendall

Abreviações

$DBO_{5,20}$	demanda bioquímica de oxigênio
DJF	dezembro, janeiro e fevereiro
DQO	demanda química de oxigênio
ETP	evapotranspiração
H_1	hipótese alternativa
H_o	hipótese nula
IC	Intervalo de confiança
JJA	junho, julho e agosto
K	potássio total
$k(t)$	estatística do teste de Pettitt
KW	teste de Kruskal-Wallis
$LOESS$	Locally Weighted Regression Smooth
MAM	março, abril e maio
MB	mudança brusca
MK	teste de Mann-Kendall
MKS	teste Sazonal de Mann-Kendall
$MKseq$	teste de Mann-Kendall sequencial
N_{amon}	nitrogênio amoniacal

<i>nd</i>	não disponível
<i>NKT</i>	nitrogênio total Kjeldhal
<i>NO₂</i>	nitrito
<i>NO₃</i>	nitrato
<i>ns</i>	não significativo
<i>OD</i>	oxigênio dissolvido
<i>p</i>	significância do teste estatístico
<i>PAV</i>	parâmetro ajustado à vazão
<i>PCJ</i>	Piracicaba-Capivari-Jundiaí
<i>PG</i>	perdas ou contribuições de outras bacias
<i>pH</i>	potencial hidrogeniônico
<i>P_t</i>	precipitação no instante t
<i>Q_t</i>	vazão no instante t
<i>Q₀</i>	vazão no início da recessão
<i>Reg.</i>	região
<i>RLWRS</i>	Robust Locally Weighted Regression Smooth
<i>RP</i>	Ribeirão Preto
<i>S</i>	estatística associada ao teste de Mann-Kendall
<i>S'</i>	estatística associada ao teste de Mann-Kendall Sazonal
<i>SG</i>	Sapucai/Grande
<i>sMK</i>	séries finais de qualidade utilizadas nos testes de MK/MKS
<i>Sol. Tot.</i>	sólidos totais
<i>SON</i>	setembro, outubro e novembro
<i>S_t</i>	armazenamento de água superficial e subterrânea
<i>T</i>	tendência
<i>tc</i>	tonelada de cana
<i>u(t_n), u*(t_n)</i>	estatísticas do teste de Mann-Kendall sequencial
<i>UGRHI</i>	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

$U_{i,T}$	estatística do teste de Pettitt
Var	variância
VST	vazão sem tendência
Z	estatística do teste de Mann-Kendall

Siglas

<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas
<i>CBH</i>	Comitês de Bacias Hidrográficas
<i>CETESB</i>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<i>CTC</i>	Centro de Tecnologia Canavieira
<i>DAEE</i>	Departamento de Águas e Energia Elétrica
<i>EMBRAPA</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
<i>Hidroweb</i>	Sistemas de Informações Hidrológicas
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>SIGRH</i>	Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo
<i>SNIRH</i>	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
<i>UGRHI</i>	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
<i>UNICA</i>	União da Indústria de cana-de-açúcar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 Água no setor sucroalcooleiro	7
2.1.1 Introdução	7
2.1.2. Uso da água no setor sucroalcooleiro.	10
2.1.3. Potenciais poluidores: efluentes industriais e agroquímicos	12
2.1.4 Estudos sobre o impacto da atividade canavieira sobre os recursos hídricos.....	14
2.2 Avaliação quantitativa dos recursos hídricos e dos impactos das mudanças de uso da terra..	16
2.2.1 Séries históricas de chuva e vazão como indicadores de impactos de conversão do uso da terra.....	18
2.2.2 Análise do coeficiente de recessão do fluxo base.....	21
2.3 Avaliação da qualidade dos recursos hídricos	23
2.3.1 Séries históricas de parâmetros da qualidade	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Seleção das áreas de estudo	27
3.1.1 Caracterização das áreas de estudos	28
3.1.1.1 Região de Jaú.....	29
3.1.1.2 Regiões de Pontal e Ribeirão Preto	32
3.2 Dados hidrológicos	36
3.3 Dados de qualidade.....	39
3.4 Avaliação quantitativa dos recursos hídricos	42
3.4.1 Análise exploratória e estatística dos dados de chuva e vazão.....	42
3.4.1.1 Testes de tendência.....	43
3.4.1.2 Teste de ruptura	46
3.4.1.3 Teste de magnitude (Sen's Slope estimator)	46
3.4.2 Obtenção do coeficiente de recessão (α)	47

3.4.3	Análise de correlação	50
3.5	Avaliação da qualidade dos recursos hídricos	50
3.5.1	Análise exploratória e estatística dos dados de qualidade	51
3.5.1.1	Detecção de tendências	52
3.5.1.1.1	Tratamento preliminar dos dados	52
3.5.1.1.2	Retirada da tendência da vazão	54
3.5.1.1.3	Teste de dependência entre a vazão e o parâmetro	55
3.5.1.1.4	Teste de sazonalidade	55
3.5.1.1.5	Teste de tendência	56
3.5.1.2	Estimativa da magnitude da tendência	57
3.5.1.3	Teste de ruptura das séries	57
3.5.2	Análise de correlação	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	Áreas selecionadas para o estudo	58
4.2	Avaliação das séries de vazão e precipitação	62
4.2.1	Região de Jaú	62
4.2.2	Região de Pontal	67
4.2.3	Região de Ribeirão Preto	73
4.3	Atividade canavieira e impactos sobre a vazão	78
4.3.1	Região de Jaú	78
4.3.2	Regiões de Pontal e Ribeirão Preto	80
4.4	Avaliação das séries dos parâmetros de qualidade das águas	85
4.5	Qualidade das águas e fatores de influência	92
5	CONCLUSÕES	102
5.1.	Considerações gerais	102
5.2	Conclusões	102
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	105
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

APÊNDICE A - Obtenção do coeficiente de recessão (α)	116
APÊNDICE B - Parâmetros de qualidade da Água.....	120
B1. Oxigênio Dissolvido (OD).....	120
B2. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	120
B3. Demanda Química de Oxigênio (DQO)	121
B4. Potencial Hidrogeniônico (pH).....	121
B5. Série de sólidos	121
B6. Séries de nitrogênio	122
B7. Fósforo e potássio	123
APÊNDICE C - Concentração dos parâmetros de qualidade e crescimento da cana-de-açúcar	124

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico é fortemente dependente da disponibilidade de energia e de água. A importância em se diversificar a matriz energética de maneira a reduzir a dependência da importação de combustíveis fósseis, e a incentivar a utilização de fontes alternativas de energia que também auxiliem na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, faz com que os biocombustíveis recebam destaque.

A produção de biocombustíveis está relacionada com a produção de biomassa, e consequentemente, com a demanda de água requerida durante o crescimento das culturas e processamento das matérias-primas para a fabricação dos combustíveis (UNEP, 2011).

No Brasil, o biocombustível de maior importância e representatividade é o etanol, produzido a partir da cana-de-açúcar. Desde a década de 1970, a produção da cana-de-açúcar se expandiu motivada pelo estímulo ao consumo de etanol, concentrando-se a produção no estado de São Paulo, e avançando, recentemente, sobre outros estados, principalmente da região Centro-Sul.

O estado de São Paulo é o principal produtor não só da matéria-prima, cana-de-açúcar, como também do combustível etanol. Em 1980, o estado foi responsável por 50% das 154 milhões de toneladas de cana produzidas em todo o Brasil, e atualmente ainda é o principal produtor, sendo responsável, em 2010, por 59% da produção nacional de cana-de-açúcar (IBGE, 2013). A safra nacional de 1980/1981 gerou 3,7 bilhões de m³ de etanol, sendo 70% produzidos no estado de São Paulo. Com o crescimento da participação de outros estados, como Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, a parcela correspondente ao estado paulista reduziu, mas ainda representa a maioria nacional, sendo responsável por 51% da produção brasileira de etanol na safra de 2012/2013 (UNICA, 2013).

Após anos de crescimento, desde 2008-2009 o setor sucroenergético enfrenta dificuldades em aumentar a produção de etanol (WALTER et al., 2013). A redução de investimentos na cadeia produtiva do setor, aliado a problemas climáticos ocorridos em 2009 e 2010, restringiram a

quantidade de matéria-prima disponível. A produtividade da safra 2011/2012 foi afetada pela falta de renovação dos canaviais e diminuição dos tratos culturais, e a expansão de novas áreas de plantio sofreu redução (BRASIL, 2012).

As projeções feitas para o decênio de 2011-2021 indicam crescimento na demanda de 15,6% ao ano para o etanol hidratado, e 1,3% ao ano para o etanol anidro, considerando que as demandas de etanol em 2021 atingirão 9,6 bilhões de litros de etanol anidro e 52 bilhões de litros de etanol hidratado. Em 2010, cerca de 43% das 145,5 milhões de toneladas de bagaço da cana foram destinados à produção de etanol (como combustível dos sistemas de cogeração, e não como matéria-prima), e a tendência é que nos próximos anos essa porcentagem cresça, já que o mercado de açúcar possui menor dinâmica que o mercado de combustíveis líquidos (BRASIL, 2012).

O estímulo à produção de bioenergia pode aumentar a competição e pressão sobre os recursos hídricos. Os impactos sobre os recursos hídricos devido à produção de biocombustíveis podem incluir a redução do fluxo natural dos cursos d'água, como também a redução da qualidade das águas próximas às indústrias e áreas agrícolas (UNEP, 2011).

Durante o cultivo da cana-de-açúcar para a produção do bioetanol, a água necessária para o crescimento da cultura provém das águas das chuvas e, em alguns casos, dos processos de irrigação, principalmente nos primeiros ciclos da cana. Parte da água é perdida pelas plantas pelo processo de evapotranspiração.

A vegetação exerce papel fundamental sobre o fluxo d'água (TUCCI e CLARKE, 1997). Em um ciclo hidrológico, parte do volume precipitado é retida pela vegetação e pode retornar à atmosfera pelos processos de evaporação e evapotranspiração. A parcela da precipitação que atinge o solo pode infiltrar, contribuindo com o fluxo subterrâneo, ou pode escoar superficialmente, como mostra a Figura 1.1 (TUCCI, 2000).

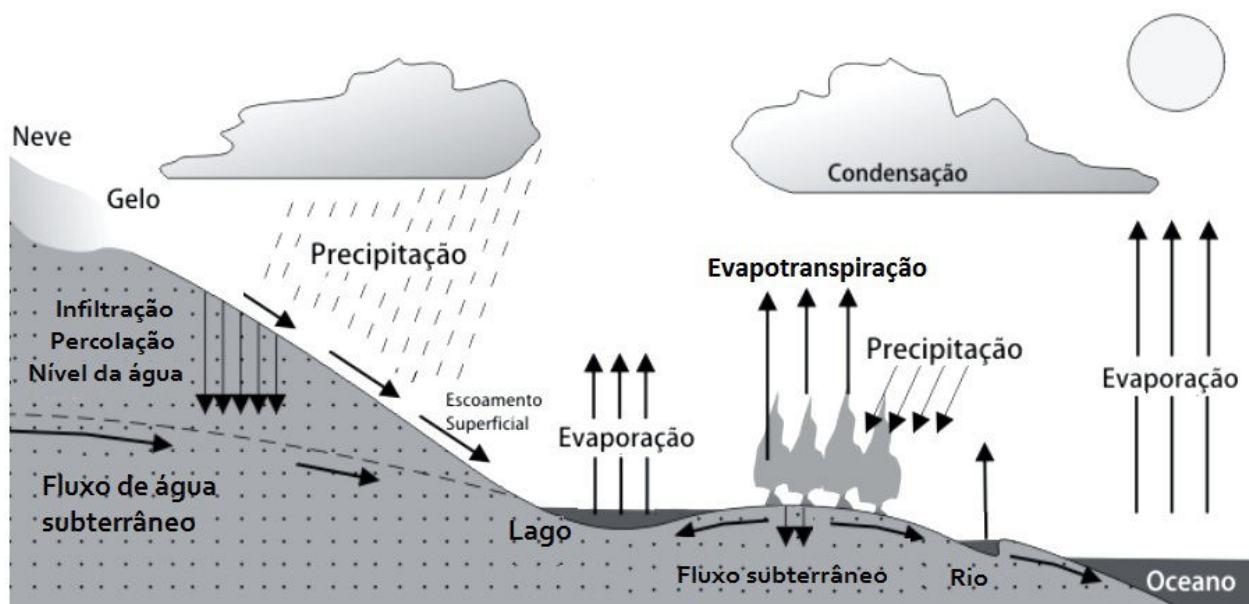


Figura 1.1. Componentes do ciclo hidrológico. Fonte: Tucci (2000).

Os processos de escoamento nas bacias podem ser impactados pelas mudanças de manejo e uso da terra. Em culturas anuais como a cana-de-açúcar, a cobertura da terra é alterada ao longo de cada ciclo e, caso o plantio não seja feito com conservação adequada do solo, este pode sofrer processos de erosão. Além disso, estudos realizados em bacias experimentais com menos de 1 km² mostram que em áreas desmatadas para o cultivo de culturas anuais há aumento do escoamento dos rios. Para bacias maiores, a literatura não apresenta resultados consistentes sobre os impactos nas vazões (TUCCI e CLARKE, 1997).

A utilização dos recursos hídricos pelo setor sucroalcooleiro tem sido feita de forma cada vez mais racional, com o reuso agrícola da vinhaça e resíduos industriais que são aplicados durante o processo de fertirrigação, como também com a menor captação de água devido aos ciclos fechados e mudança de alguns processos industriais (ELIA NETO et al., 2010).

No entanto, poluentes orgânicos resultantes da produção de cana-de-açúcar e etanol, e a aplicação de agroquímicos sobre as plantações, podem contribuir para a poluição dos cursos d'água. A vinhaça, efluente industrial produzido em grande quantidade, rica em potássio, nitrogênio e fósforo, juntamente com a aplicação de fertilizantes, pesticidas, e demais

agroquímicos, são os principais potenciais poluidores dos recursos hídricos devido à atividade sucroalcooleira (GOLDEMBERG et al., 2008).

Tendo em vista a importância do setor sucroenergético no país e seu intenso crescimento ao longo dos anos, as perspectivas de aumento da demanda de etanol nacional e internacionalmente, a preocupação relacionada à utilização de biocombustíveis produzidos de forma sustentável e à pressão que o setor exerce sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos, o objetivo geral deste trabalho consiste em:

-Verificar se, com os dados de monitoramento dos cursos hídricos do estado de São Paulo, impactos sobre a quantidade (vazão dos rios) e qualidade de água podem ser observados em bacias hidrográficas devido ao crescimento da atividade canavieira.

Para atingir o objetivo geral, foram criados três objetivos específicos partindo de duas hipóteses. A primeira hipótese é que a expansão da atividade canavieira pode causar impactos sobre a quantidade dos recursos hídricos. Para tanto, foram analisadas séries históricas de vazão e precipitação, além das vazões nos períodos de estiagem. Já para a segunda hipótese, considera-se que a presença da atividade canavieira, e também sua expansão, podem causar impactos sobre a qualidade dos recursos hídricos. Nesse caso, foram avaliadas séries temporais de parâmetros de qualidade relacionados com a produção sucroalcooleira.

A Figura 1.2 apresenta as hipóteses, os objetivos específicos, assim como as metodologias utilizadas para atender cada objetivo, e as respectivas seções da dissertação em que são abordadas.

Hipótese	Objetivos específicos	Metodologia	Seção
A expansão da atividade canavieira pode causar impactos sobre a quantidade dos recursos hídricos	<p>Analisar o comportamento dos principais parâmetros hidrológicos a fim de verificar alterações em suas séries históricas, que possam ter sido influenciadas pela expansão da atividade canavieira.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Análise exploratória gráfica - Aplicação de testes estatísticos sobre séries de vazão e precipitação: <ul style="list-style-type: none"> → Detecção de tendências → Mudança brusca na série → Magnitude das tendências - Correlação dos dados de vazão com: <ul style="list-style-type: none"> → área colhida de cana-de-açúcar 	<p>3.4.1 3.4.3 4.2 4.3</p>
	<p>Verificar se há impactos sobre as vazões disponíveis nos períodos de estiagem devido ao crescimento da atividade canavieira.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo e análise do coeficiente de recessão do fluxo base (α) ao longo dos anos 	<p>3.4.2 4.2 Ap. A</p>
A presença da atividade canavieira, assim como sua expansão, podem causar impactos sobre a qualidade dos recursos hídricos	<p>Analisar séries históricas de parâmetros da qualidade dos cursos d'água, cujas concentrações possam ser influenciadas pela atividade canavieira.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Análise exploratória gráfica - Aplicação de testes estatísticos sobre as concentrações de parâmetros de qualidade: <ul style="list-style-type: none"> → Detecção de tendências → Mudança brusca na série → Magnitude das tendências - Correlação das concentrações dos parâmetros com: <ul style="list-style-type: none"> → área colhida de cana-de-açúcar → crescimento populacional 	<p>3.5 4.4 4.5 Ap. C</p>

Figura 1.2. Hipóteses, objetivos específicos da dissertação, metodologias utilizadas e seções.

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma: revisão da literatura; metodologias utilizadas; apresentação dos resultados; análises e discussões; e, por fim, são citadas as principais conclusões do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura sobre a utilização da água no setor sucroalcooleiro e seus potenciais impactos sobre os recursos hídricos. São mencionados trabalhos que avaliaram os impactos das atividades antrópicas, tanto sobre a quantidade quanto sobre a qualidade dos recursos hídricos.

No Capítulo 3 é mostrada a metodologia de seleção das áreas de estudo, assim como uma breve caracterização de cada região abordada. São citadas as estações de monitoramento avaliadas, e é feita uma descrição sucinta dos principais métodos estatísticos e metodologias de análise utilizadas.

O Capítulo 4 contém os resultados dos testes estatísticos aplicados sobre as séries históricas de vazão, precipitação, e parâmetros de qualidade d'água nas regiões de estudo. Para a discussão dos resultados sobre os impactos na quantidade dos recursos hídricos, estes foram comparados com os dados relacionados à expansão da atividade canavieira em cada região abordada. Já para a análise dos resultados sobre os impactos nos parâmetros de qualidade de água, além da atividade canavieira, também foram utilizados dados sobre crescimento populacional.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões deste estudo relacionadas aos impactos sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos nas regiões canavieiras analisadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Água no setor sucroalcooleiro

2.1.1 Introdução

O estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar e etanol do Brasil. Em 1975, ano de início do programa Proálcool, a produção de cana no estado foi de 38,3 milhões de toneladas, correspondendo a 40% da produção nacional. A área colhida em São Paulo, equivalente a 0,7 milhão de hectares, representava 32% de toda a área colhida no Brasil. Ao longo dos anos, São Paulo manteve sua hegemonia sobre os demais estados brasileiros em termos de produção e área colhida de cana-de-açúcar, como mostram as Figuras 2.1 e 2.2. Em 2010, a produção paulista atingiu 426 milhões de toneladas, crescimento de 11,1 vezes em relação a 1975, sendo que 55% de toda a área colhida da cultura estavam localizadas no estado de São Paulo.

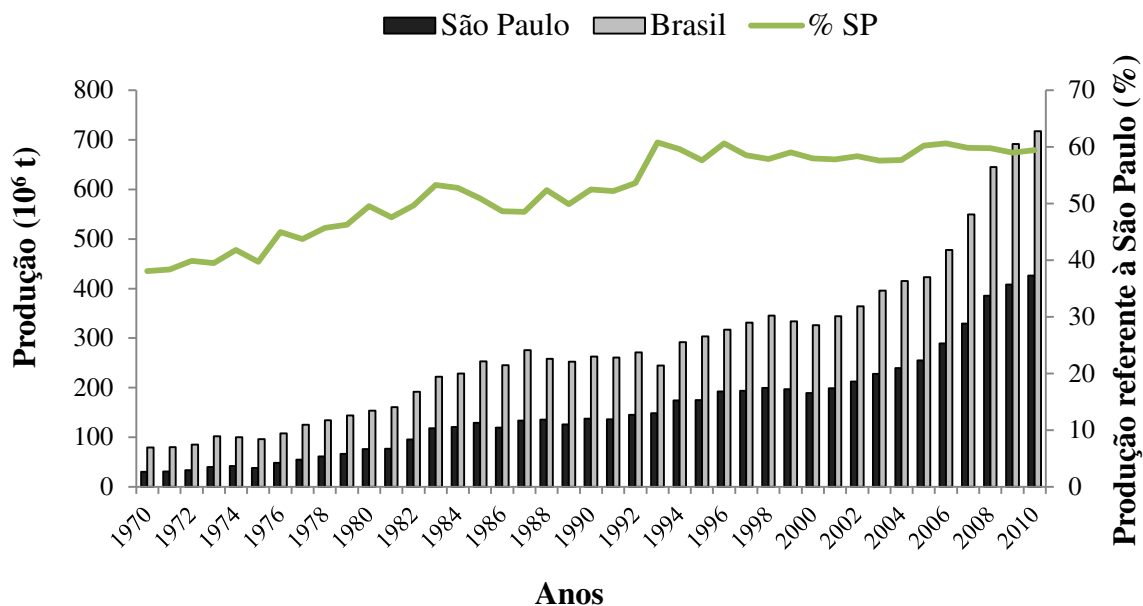


Figura 2.1. Evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil e no estado de São Paulo. Porcentagem da produção de São Paulo com relação ao total nacional. Fonte: IBGE (2013).

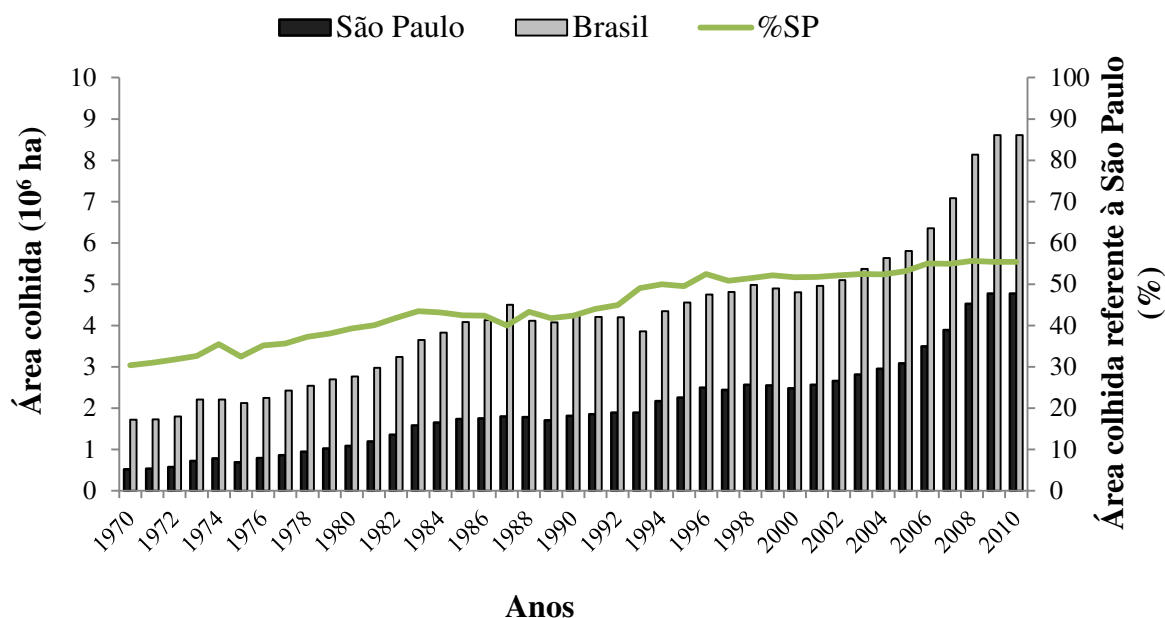


Figura 2.2. Evolução da área colhida de cana-de-açúcar no Brasil e no estado de São Paulo. Porcentagem de área de cana colhida no estado de São Paulo. Fonte: IBGE (2013).

Segundo o Anuário da Cana (2013), das 422 usinas e destilarias já instaladas no Brasil, 173 estão localizadas no estado de São Paulo. As condições adequadas, incluindo a proximidade com os grandes centros consumidores, faz com que o estado paulista continue a atrair novas instalações industriais sucroalcooleiras.

Em setembro de 2008 foi publicado o Zoneamento Agroambiental para o setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo, elaborado pelas Secretarias do Meio Ambiente e da Agricultura e Abastecimento do estado de São Paulo. Com o objetivo de organizar a expansão do setor, auxiliar na elaboração de políticas públicas relacionadas às atividades sucroenergéticas, e promover o planejamento e gestão dos recursos naturais, um mapa foi criado classificando as regiões do estado de São Paulo em diferentes graus de aptidão agroambiental. Os resultados foram obtidos considerando bases de dados sobre as condições climáticas, qualidade do ar, relevo, solo, disponibilidade e qualidade de águas, áreas de proteção ambiental e unidades de conservação existentes e indicadas, e fragmentos de manutenção da conectividade (SÃO PAULO, 2008b).

O Zoneamento Agroambiental define regiões onde a cana-de-açúcar pode ser cultivada, assim como onde as agroindústrias podem ser instaladas. O Zoneamento Agroambiental serviu como base para a Resolução SMA-88, de dezembro de 2008, na qual foram estabelecidas diretrizes técnicas para o licenciamento ambiental do setor sucroalcooleiro no estado (SÃO PAULO, 2008a).

A composição dos mapas do Zoneamento Agroambiental relacionada à disponibilidade de águas superficiais e à vulnerabilidade das águas subterrâneas é apresentada na Figura 2.3. Cabe ressaltar, porém, que o volume de água usado para a irrigação da cana, que tem aumentado em áreas de expansão da cultura, não foi considerado pelo Zoneamento, e discussões sobre como incorporar essa questão ao procedimento de avaliação das áreas aptas ainda são incipientes (CGEE, 2012).

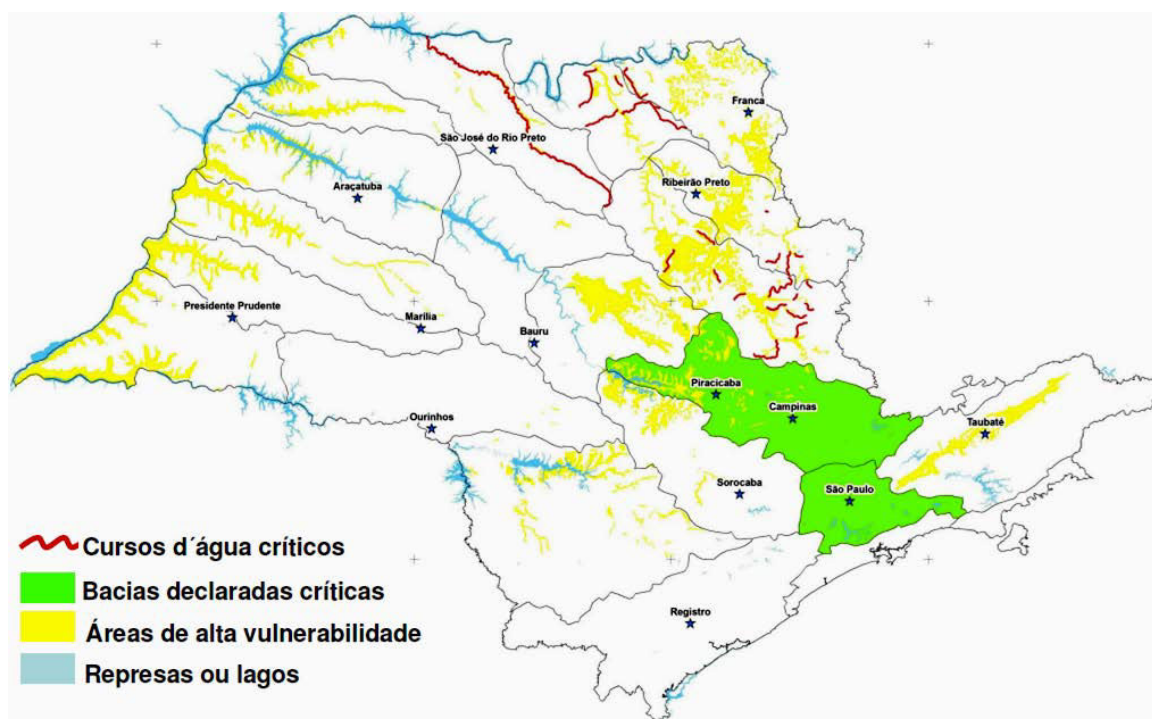


Figura 2.3. Zoneamento Agroambiental: disponibilidade de águas superficiais e vulnerabilidade das águas subterrâneas. Fonte: São Paulo (2008b).

A partir da Figura 2.3, observa-se que os cursos d'água considerados críticos concentram-se nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) do Turvo/Grande, Baixo Pardo/Grande, Mogi Guaçu e Pardo. As áreas de alta vulnerabilidade na porção central e nordeste

do estado de São Paulo estão localizadas em regiões com tradição canavieira, enquanto as áreas vulneráveis à oeste do estado coincidem com as zonas de expansão da cana-de-açúcar. O mapa destaca a UGRHI do Piracicaba-Capivari-Jundiaí declarada como crítica. Nessa sub-bacia, a atividade canavieira sofreu redução nas últimas décadas, porém o crescimento urbano e desenvolvimento agroindustrial, sem gerenciamento adequado dos recursos hídricos, além da operação do Sistema Cantareira, têm causado impactos sobre a disponibilidade e qualidade das águas nessa região.

2.1.2. Uso da água no setor sucroalcooleiro.

A água é utilizada no setor sucroalcooleiro durante a produção da cana-de-açúcar, e durante a fase industrial para a produção de açúcar e etanol.

Durante a fase agrícola, o consumo de água pela cana é maior durante os primeiros ciclos de germinação, perfilhamento, e estabelecimento. No período de crescimento vegetativo, a demanda de água diminui, chegando a ser quase insignificante durante a maturação (LEAL et al., 2013). A necessidade hídrica da cana, dependendo do clima, é estimada em 1500 a 2500 mm, distribuídos uniformemente ao longo de todo o ciclo da cultura. A evapotranspiração, que corresponde à quantidade de água perdida pela planta através da transpiração de suas folhas, é representada pela relação de 8 a 12 mm por tonelada de cana produzida (GOLDEMBERG et al., 2008).

A cultura da cana tradicionalmente não utiliza irrigação no Brasil. O uso da irrigação durante a produção de cana-de-açúcar ocorre em baixa escala, e é mais frequente na região Nordeste na forma de irrigação complementar¹. Sua aplicação tem aumentado no Centro-Oeste e em regiões do Sudeste, como no oeste de São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo, sendo utilizada a irrigação de salvamento² nesses locais (SOUSA, 2005).

¹Irrigação complementar: realizada em épocas críticas do desenvolvimento da planta, a fim de amenizar déficits hídricos (SOUZA, 2005).

²Irrigação de salvamento, ou salvação: realizada após o plantio da cana a fim de garantir a brotação quando há longos períodos de escassez de chuva (SOUZA, 2005).

No estado de São Paulo a cana-de-açúcar não é normalmente irrigada, pois a média pluviométrica anual do estado excede 1300 mm (WALTER et al., 2013). De acordo com dados do Censo Agropecuário de 2006, disponibilizados pelo IBGE, a área colhida de cana-de-açúcar irrigada no estado de São Paulo foi de 473.126 hectares, equivalente a 15% de toda a área colhida dessa cultura no estado paulista. A pouca utilização de irrigação na cultura da cana-de-açúcar contribui para reduzir os impactos sobre os recursos hídricos, não só pela necessidade de menor captação de água, como também pela redução do arraste de nutrientes, resíduos de defensivos agrícolas, e possíveis perdas de solo (ELIA NETO, 2005).

Nas usinas o aporte de água ocorre com a captação para uso nas etapas industriais e com a cana (aproximadamente 70% do peso dos colmos). Após o consumo, durante o processo de fabricação do açúcar e etanol, parte da água é tratada e retorna para os cursos d'água, e parte é aplicada na lavoura (como vinhaça) durante a fertirrigação (ELIA NETO, 2005).

O consumo de água pela indústria canavieira varia de acordo com o tipo de usina (se produz apenas açúcar, apenas etanol, ou se é mista). As usinas que possuem como único produto o açúcar, consomem maior volume de água por tonelada de cana quando comparadas às usinas que apenas produzem etanol, ou tem produção mista de açúcar e etanol. Considerando a produção de 50% de açúcar e 50% de etanol, o uso médio de água na usina é estimado em 22 m³/tc, sendo grande parte utilizada na lavagem da cana, em condensadores e resfriamento de equipamentos. No entanto, com o fechamento de circuitos, o índice de reuso da água chega a 95%, o que resulta em captação muito inferior aos 22 m³ por tonelada de cana moída (ELIA NETO et al., 2009). A captação d'água e o lançamento de resíduos vêm diminuindo ao longo dos anos com a racionalização do consumo, reutilização da água em ciclos fechados, e mudanças em alguns processos como a redução da lavagem dos colmos. A Tabela 2.1 apresenta a tendência de redução da captação de água pela indústria canavieira.

Tabela 2.1. Captação, consumo e lançamento de água na indústria canavieira (m³/tc).

	1970 ¹	1990 ¹	1997 ¹	2004 ¹	2008 ²
Captação	15 a 20	5,6	5,07	1,85	1,53
Consumo	-	1,8	0,92	-	-
Lançamento	-	3,8	4,15	-	-

Fonte: ¹ Elia Neto et al. (2009) e ² Martinelli et al. (2013).

Há cerca de quatro décadas, a captação de água pelas usinas era de 15 a 20 m³ por tonelada de cana moída. Em 1990, uma estimativa feita pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos - 1994/95 a partir da demanda de água do setor canavieiro no estado de São Paulo apresentou valores de retirada de água de 5,6 m³/tc. Um levantamento do CTC, realizado em 1997 com a participação de 34 usinas do grupo Copersucar, obteve captação média de 5,07 m³/tc. Em 2005, outro levantamento feito pela UNICA/CTC observou redução para 1,85 m³ por tonelada de cana, no qual a maioria das usinas consultadas estava concentrada no estado de São Paulo (ELIA NETO et al., 2009). Considerando o total de cana colhida na safra 2007/2008 no estado de São Paulo, e o volume total de água captada por todas as usinas paulistas licenciadas e em operação (140 usinas) em 2008, Martinelli et al. (2013) estimaram o valor de retirada de água de 1,53 m³/tc.

A partir da Resolução n. 88 de 2008 da SMA, a captação máxima de água autorizada para novos empreendimentos sucroalcooleiros e projetos de expansão foi limitada a 1 m³ por tonelada de cana moída em área classificadas como Adequadas e Adequadas Com Limitações Ambientais, segundo o Zoneamento Agroambiental. Nas áreas Adequadas Com Restrições Ambientais o limite máximo foi limitado a 0,7 m³/tc (SÃO PAULO, 2008a).

2.1.3. Potenciais poluidores: efluentes industriais e agroquímicos

Apesar da redução dos índices de captação de água para o uso industrial, as águas residuais dos processos de produção de açúcar e etanol ainda não são devidamente tratadas antes de retornarem aos cursos d'água. A água da lavagem da cana, por exemplo, com alta concentração de sólidos e índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de 200 a 500 mg/L, é um dos principais efluentes da indústria sucroalcooleira. Este efluente deve ser previamente tratado antes de retornar aos cursos d'água, ou de ser misturado com a vinhaça para o processo de fertirrigação. No entanto, na maior parte dos casos, o tratamento apenas consiste na decantação e deposição da matéria orgânica em lagoas de estabilização. Outra forma de poluição é dada pelas águas utilizadas no resfriamento de equipamentos industriais que são misturadas a outros efluentes e lançadas a altas temperaturas (aproximadamente 50 °C) diretamente nas águas superficiais, sem antes serem devidamente resfriadas (MARTINELLI et al., 2013).

Porém, os poluentes mais impactantes decorrentes da produção de cana e etanol são os resíduos orgânicos (vinhaça e torta de filtro) e agroquímicos utilizados como fertilizantes e defensivos agrícolas (CGEE, 2009).

A vinhaça, principal efluente industrial da produção de etanol, é produzida em grande quantidade (11 a 13L de vinhaça por litro de etanol). Rica em nitrogênio, potássio e fósforo, é aplicada nas áreas de lavoura próximas à usina juntamente com as águas residuais durante o processo de fertirrigação. Desta forma, a necessidade de captação de água para irrigação, assim como a aplicação de fertilizantes minerais é reduzida (GOLDEMBERG et al., 2008). Sua dosagem depende das necessidades da planta, da concentração de potássio do solo e do grau de saturação que se pretende manter no solo em relação à troca catiônica (ELIA NETO et al., 2009).

No entanto, sua utilização como fertilizante precisa ser controlada, pois a lixiviação dos elementos que a compõe pode causar a salinização e contaminação dos lençóis freáticos, nitrificação dos solos e eutrofização dos recursos hídricos (CGEE, 2009). O elevado poder poluente da vinhaça consiste em ser rica em matéria orgânica, possuir baixo pH, alto poder corrosivo, elevados índices de demanda bioquímica de oxigênio (20.000 a 35.000 mg/L) e, ao sair dos destiladores, encontrar-se em elevada temperatura (85 a 90 °C). Altas concentrações de fósforo devido ao uso inadequado da vinhaça podem prejudicar a qualidade das águas superficiais, enquanto as águas subterrâneas podem ser mais afetadas principalmente pelo nitrato. A aplicação da vinhaça ao longo dos anos pode aumentar a concentração de sais no solo e provocar sua salinização, dependendo da taxa de absorção de potássio pela planta e da concentração desse elemento na vinhaça (SILVA et al., 2007).

A preocupação com o potencial poluidor da vinhaça e dos demais efluentes industriais não é recente. Em 1978, a Portaria nº 323 proibiu, no Brasil, o lançamento da vinhaça pelas destilarias de etanol em corpos d'água, estabeleceu prazos para a apresentação de projetos de implantação de sistemas adequados de tratamento e utilização da vinhaça, além de exigir o controle efetivo da poluição causada pelo lançamento de águas residuais (BRASIL, 1978). Mais recentemente, em 2006, a Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CETESB) estabeleceu critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça nas lavouras

paulistas, firmando a preocupação com as contaminações que podem ocorrer com a utilização inadequada desse efluente (CETESB, 2006).

A utilização de agroquímicos como herbicidas, inseticidas, fungicidas também é regulamentada por leis federais e estaduais, como o Decreto Federal 4074/02, a Lei Federal 7082/89, e Lei Estadual de São Paulo 4002/84. A aplicação de pesticidas por área nas lavouras de cana é menor que em outras culturas como café, citros, algodão e soja. Além disso, pesquisas genéticas e o desenvolvimento de diversas variedades de cana mais resistentes têm reduzido a necessidade de aplicação de agroquímicos na cultura canavieira (GOLDEMBERG et al., 2008).

De forma geral, uma avaliação realizada em 2004 pela EMBRAPA classificou os impactos da cultura da cana sobre a qualidade da água em nível 1 (nenhum impacto) com relação aos problemas ambientais relacionados com a irrigação - lixiviação de nutrientes, defensivos, e erosão (ELIA NETO, 2005).

2.1.4 Estudos sobre o impacto da atividade canavieira sobre os recursos hídricos

Dada à importância nacional do setor sucroenergético, aliada à demanda crescente da água pelos setores urbano, rural e industrial, estudos continuam sendo feitos para avaliar os impactos da atividade canavieira sobre os recursos hídricos.

Souza e Tundisi (2003) analisaram a qualidade da água na Bacia do Rio Jaboatão, em Pernambuco, a partir de amostras mensais em vários pontos durante o período de um ano. A bacia, de 413 km², onde também está localizada a área metropolitana de Recife, tinha aproximadamente 58% de sua área ocupada pela cultura da cana-de-açúcar. As principais fontes de poluição da região eram representadas por uma usina sucroalcooleira e outra de papel e celulose, além da falta de tratamento de esgoto da região.

Com dois pontos de monitoramento da água, um a jusante e outro a montante da usina sucroalcooleira, observou-se um aumento da temperatura e das concentrações de nitrato e fósforo total, além de baixos níveis de oxigênio dissolvido (OD) durante o verão, correspondendo ao

período de operação da usina. A água captada pela usina reduziu a capacidade de diluição do rio. A estação a jusante apresentou elevados índices de pH, condutividade, alcalinidade, e concentração de sólidos totais, indicando a influência da área industrial a montante.

Elia Neto et al. (2010) estimaram a demanda de água para o setor industrial sucroenergético nas bacias do estado de São Paulo para três cenários de captação distintos: $2\text{m}^3/\text{tc}$, $1\text{m}^3/\text{tc}$, e $0,5\text{m}^3/\text{tc}$. Considerando dados da safra 2008/2009, a demanda média de captação de água para a indústria canavieira foi comparada com a demanda e oferta de água de todos os setores (industrial, urbano e rural) das bacias. Dentre as áreas com cultivo de cana, as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Piracicaba-Capivari-Jundiaí (PCJ) e Sapucaí/Grande (SG) foram as bacias com situação mais crítica quanto à demanda global e oferta de água. Para o ano de 2007, a demanda do setor canavieiro nessas bacias foi relativamente baixa para o pior cenário de demanda industrial canavieira, de $2\text{m}^3/\text{tc}$, correspondendo a 4% no PCJ e 7,6% na SG. Nesse mesmo cenário, as bacias do Tietê/Jacaré, Turvo/Grande e Baixo Tietê, apresentaram mais de 1/10 da demanda total de água destinada à captação para a indústria canavieira (12,4%, 15,3%, e 13,7%, respectivamente).

O uso de água no processo industrial do setor sucroalcooleiro, e as potenciais ameaças dos efluentes industriais (vinhaça) sobre os recursos hídricos do estado de São Paulo, também foram temas de estudo em Martinelli et al. (2013). Estimativas para o uso de água na indústria canavieira do estado de São Paulo na safra 2007/2008, considerando 140 usinas, indicaram um volume total de 800 milhões de m^3 de água captada no estado. Desse total, o consumo efetivo pelas usinas correspondeu a 440 milhões de m^3 de água, equivalente a 15% da demanda do setor industrial paulista, e 4% da demanda de água de todos os setores do estado em 2008. As bacias com maiores índices de captação para a indústria canavieira foram representadas pela bacia Mogi-Guaçu e Turvo/Grande, responsáveis por captar 15% da água em cada bacia. Para o volume total de etanol decorrente dessa safra, estimou-se uma produção de cerca de 120 milhões m^3 de vinhaça. Segundo Martinelli et al. (2013), o volume desse efluente deve ser reduzido por ser potencial poluidor do ecossistema aquático, solo, e águas subterrâneas.

2.2 Avaliação quantitativa dos recursos hídricos e dos impactos das mudanças de uso da terra

O ciclo hidrológico pode ser quantificado por meio do balanço hídrico de uma bacia (PAIVA e PAIVA, 2003). Como mostrado na Figura 1.1 do capítulo Introdução, os principais processos envolvidos no ciclo hidrológico são representados pela precipitação - principalmente na forma de chuva; interceptação - que acarreta a retenção de parte do volume precipitado através da vegetação; infiltração da água no solo; escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo; evaporação do volume de água de superfícies líquidas, além da evapotranspiração, processo pelo qual a água retorna à atmosfera pela transpiração das plantas e evaporação da água do solo.

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica pode ser dado por:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - Q_t - ETP_t \pm PG \quad (2.1)$$

em que S_{t+1} e S_t correspondem aos armazenamentos de água superficial e subterrânea na bacia no final e início do intervalo de tempo; P_t , Q_t e ETP_t são, respectivamente, a precipitação, a vazão e a evapotranspiração no período; e PG as perdas ou contribuições para outras bacias ou armazenamentos sem saída.

Em períodos longos, a diferença entre S_{t+1} e S_t , assim como o termo PG , tendem a ficar desprezíveis em comparação com os demais termos da equação, e a equação resultante rearranjada é dada por:

$$P_t = Q_t + ETP_t \quad (2.2)$$

Desta forma, o balanço hídrico simplificado de uma bacia hidrográfica tem como principal entrada a precipitação, enquanto o escoamento dos rios e a evapotranspiração constituem as principais saídas da bacia (do volume de controle) (PAIVA e PAIVA, 2003).

A variação da vazão média diária da água dos rios ao longo dos meses e anos serve como referência da disponibilidade hídrica de uma região. As principais alterações observadas na vazão média diária podem ser em decorrência de mudanças no sistema de fluxo da bacia, feitas por

meio da construção de reservatórios ou pela alteração na drenagem da bacia, como também pela modificação do uso da terra (PAIVA e PAIVA, 2003).

Os impactos das mudanças do uso da terra sobre os processos de escoamento na bacia dependem do tipo de mudança da superfície (por exemplo, se a região foi desmatada, reflorestada ou impermeabilizada); do uso da superfície (por exemplo, urbanização, reflorestamento para exploração sistemática, desmatamento para extração de madeiras, de culturas anuais, permanentes e de subsistência, etc.); da forma como foi feita a conversão da terra (com queima, manualmente ou com maquinários); e da proporção de conversão da terra (TUCCI e CLARKE, 1997).

Como mencionado em Costa et al. (2003), a maioria dos experimentos encontrados na literatura para avaliar as alterações no comportamento da vazão devido à conversão do uso da terra concentram-se em bacias de pequena escala ($<1\text{km}^2$), onde as condições experimentais são mais facilmente controladas. Em geral, esses estudos são feitos em bacias pareadas, ou seja, duas bacias com características similares como extensão, geologia, morfologia, condições climáticas, e mudanças do uso da terra. A análise de bacias de média e grande escala, superiores a 100km^2 , é dificultada pela grande variabilidade climática, pelos diversos usos da terra, e pela presença de vegetações em diferentes estágios de regeneração. Há poucos estudos realizados em bacias de média e larga escala que, em geral, não chegam a conclusões consistentes.

Em geral, os estudos avaliam o comportamento das bacias em respostas aos efeitos do desmatamento de florestas, ou ao reflorestamento das áreas (COSTA et al., 2003). Estudos em bacias experimentais de pequena escala mostram que o desmatamento para o cultivo de lavouras anuais causa o aumento na vazão dos rios, em virtude da redução da evapotranspiração. A retirada de florestas também pode causar mudanças no escoamento superficial devido à redução da infiltração. Em solos com superfície desprotegida e que sofreram compactação, a capacidade de infiltração dos solos pode diminuir e ocasionar aumento no escoamento superficial. Porém as conclusões de estudos para pequenas bacias não podem ser extrapolados para bacias maiores, devido aos efeitos de escala do comportamento hidrológico de bacias de diferentes dimensões, e diferentes localizações (TUCCI e CLARKE, 1997).

Estudos que objetivam verificar o impacto das intervenções da atividade humana na disponibilidade dos recursos hídricos por meio da análise de séries temporais de dados hidrológicos se tornam mais frequentes (MORAES et al, 1998; COSTA et al, 2003; MARENGO e ALVES, 2005; GROppo et al., 2005; YANG e TIAN, 2009; FURLAN, 2009; KARPOUZOS et al., 2010; e PEREIRA, 2012). As abordagens adotadas incluem tanto simulações computacionais com modelos chuva-deflúvio, quanto análises estatísticas de séries históricas de chuva e vazão. O enfoque deste trabalho consiste na abordagem estatística das séries temporais.

2.2.1 Séries históricas de chuva e vazão como indicadores de impactos de conversão do uso da terra

O uso de métodos estatísticos para avaliar séries temporais de vazão e precipitações é uma das principais ferramentas utilizadas para diagnosticar possíveis mudanças no comportamento hidrológico.

No Brasil, a bacia do Rio Piracicaba é o foco em diversos trabalhos, tais como Moraes et al. (1997) e Mortatti et al. (2004). A região caracterizada por intensas alterações do uso da terra, além do crescimento urbano e agroindustrial, tem sofrido impactos negativos sobre seus rios, tanto quantitativamente quanto qualitativamente. A metodologia utilizada por Moraes et al. (1997) consistiu na avaliação do comportamento da vazão e chuva por meio de testes de tendência e de ruptura das séries. Tendências negativas e estatisticamente significativas foram observadas no regime das vazões em anos próximos ao de construção e início de operação do Sistema Cantareira, enquanto se observou um ligeiro aumento da precipitação nesse período. A redução das vazões foi atribuída, então, às atividades antrópicas.

A mesma metodologia foi utilizada por Groppo et al. (2005) em diversas bacias do estado de São Paulo a fim de analisar o comportamento das séries históricas sob diferentes graus de intervenção da atividade humana. No período de 1947 a 1997, foram observadas tendências positivas na precipitação na maior parte das bacias. Nas bacias menos impactadas, a vazão

também apresentou tendências positivas. No entanto, tendências negativas foram observadas nas vazões dos rios afetados pela operação do Sistema Cantareira.

Costa et al. (2003) analisaram o comportamento da vazão do Rio Tocantins, em uma bacia de larga escala, com 175.360 km². Foi verificado um aumento de 24% nas vazões médias anuais, em um período marcado pela intensa expansão da agricultura e da pecuária, tendo esses usos passado de 30% (em 1960) para 49% (em 1995) da área de drenagem da bacia, ao mesmo tempo em que a precipitação não apresentou mudanças significativas. As alterações na vazão foram atribuídas à redução da evapotranspiração e da infiltração durante os períodos chuvosos, devido às mudanças do uso da terra.

Marengo e Alves (2005) examinaram registros hidrometeorológicos a fim de detectar tendências em dados de vazão e verificar uma possível associação com alterações de causa natural, ou antrópica, desde a década de 1930, na bacia do rio Paraíba do Sul, localizada entre os estados do Rio de Janeiro e São Paulo. Foram observadas tendências negativas nas vazões, não relacionadas com as alterações do comportamento pluviométrico da região, mas que podem ser atribuídas aos efeitos da atividade humana decorrentes do gerenciamento dos recursos hídricos, geração de energia, crescimento populacional e irrigação.

Pereira (2012) analisou séries temporais de chuva e vazão a fim de verificar possíveis impactos das mudanças de uso da terra sobre o regime hídrico das bacias do Atibainha e do Cachoeira, que são sub-bacias do Rio Piracicaba, entre os anos de 1985 e 2005. Durante este período, menos de 20% da área foi convertida gradativamente de Mata Atlântica secundária para silvicultura. A metodologia utilizada incluiu estudos estatísticos sobre as chuvas e vazões que serviram como indicadores de alteração dos componentes hidrológicos da bacia. Um modelo computacional de simulação foi utilizado para investigar a influência de diferentes tipos de cobertura do solo sobre mudanças no regime hidrológico da bacia. A análise estatística identificou tendências decrescentes para as chuvas e vazões, e os resultados da simulação indicaram que as conversões de uso da terra não seriam suficientes para alterar os totais de vazão. Segundo Pereira (2012), apesar de não ser evidenciada a influência direta da mudança do uso da terra sobre o regime hídrico, esses resultados podem ser inconclusivos. A principal influência sobre a vazão foi atribuída à chuva, e posteriormente ao uso da terra.

Furlan (2009) analisou a influência do desmatamento sobre o regime hídrico e pluviométrico no estado de Rondônia, identificando tendências de mudanças na evapotranspiração, déficit e excedente hídrico por meio do balanço hídrico sequencial com séries de 1977 a 2006. Os resultados das análises identificaram tendências de aumento nos valores de evapotranspiração real e potencial. No entanto, não foi possível identificar mudanças climáticas significativas relacionadas com a intensificação do desmatamento no período em que as séries históricas estavam disponíveis. As tendências observadas foram atribuídas à variabilidade climática natural, como causa mais provável.

O efeito da atividade humana sobre o escoamento superficial do rio Haihe, na China, cujas vazões se mostram cada vez mais reduzidas, foi tema de estudo de Yang e Tian (2009). Nesse trabalho, chegou-se à conclusão que a principal causa da mudança brusca verificada na vazão entre 1978 e 1985, com diminuição do escoamento, foi a atividade humana local, principalmente relacionada ao intenso uso de água pelos agricultores no início da reforma agrária chinesa.

O primeiro passo para se avaliar as séries históricas consiste em realizar uma análise exploratória dos dados. Os valores brutos são examinados com o intuito de se observar possíveis problemas com os dados, além de identificar padrões temporais, como tendências, sazonalidade ou mudanças abruptas. Os métodos utilizados incluem técnicas numéricas e análises gráficas, como traçar os valores ao longo do tempo, histogramas e gráficos de correlações, cuja observação auxilia na obtenção de informações sobre o comportamento das variáveis (KUNDZEWICZ e ROBSON, 2004).

Após a etapa exploratória, as séries são submetidas a uma análise que verifique com rigor estatístico a presença ou ausência de certos padrões nos dados, através de testes paramétricos e não paramétricos (McLEOD, 1991). São aplicados métodos que auxiliem na identificação de mudanças nas séries, tanto mudanças graduais, representadas pelos testes de tendência, como mudanças bruscas, verificadas por meio de testes de ruptura.

Geralmente, os dados hidrológicos não possuem distribuição normal, fazendo com que a utilização de testes não paramétricos seja mais adequada. A presença de autocorrelação (ou correlação serial) é frequente nas séries hidrológicas, o que pode fazer com que alguns testes que

assumem independência dos dados não possam ser utilizados. Portanto, a presença de autocorrelação deve ser verificada a priori nesses casos (KUNDZEWICZ e ROBSON, 2004).

Alguns dos testes de tendência para séries hidrológicas mais utilizados na literatura são representados pelos testes de Mann-Kendall (KAHYA e KALAYCL, 2004; BIRSAN et al., 2005; MARENGO e ALVES, 2005; YANG e TIAN, 2009) e pela versão sequencial de Mann-Kendall (MORAES et al., 1998; MORTATTI et al., 2004; GROppo et al., 2005; MA et al., 2008; KARPOUZOS et al., 2010).

Ambos são testes não paramétricos em que os dados são ordenados de acordo com o tamanho relativo de suas medidas e consistem em determinar se os valores aumentam ou diminuem com o tempo. A versão sequencial de Mann-Kendall, além de verificar a existência de tendências significativas, também indica o ponto aproximado de mudança brusca de tendência se ele ocorrer dentro do intervalo de confiança considerado.

O ponto de mudança brusca pode ser identificado com maior precisão por meio dos testes de ruptura, como o teste de Pettitt (PETTITT, 1979; MORAES et al., 1998; MORTATTI et al., 2004; GROppo et al., 2005; MA et al., 2008). Consiste em um teste não paramétrico robusto que detecta uma mudança na mediana dos valores da série (KUNDZEWICZ e ROBSON, 2004).

A análise de séries temporais de intervalos de tempo curtos pode levar a conclusões erradas sobre o comportamento do fluxo de um curso d'água ao longo dos anos. A Organização Meteorológica Mundial sugere a utilização de séries de 30 anos consecutivos ou mais para quantificar de modo confiável as mudanças em qualquer variável hidrológica (WMO, 2008).

2.2.2 Análise do coeficiente de recessão do fluxo base

A análise do hidrograma possibilita avaliar a interação entre o fluxo superficial e a recarga do rio a partir do fluxo subterrâneo. É caracterizado por um período de aumento da vazão influenciado pelos eventos de chuva, seguido por uma estação com pouca ou nenhuma

precipitação no qual o fluxo total é abastecido, teoricamente, apenas pelo fluxo de base, ou seja, pela água proveniente do aquífero (COSTA e BACELLAR, 2010).

Informações sobre o comportamento do fluxo de base contribuem para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos durante o período de estiagem. Suas características auxiliam a verificar a possibilidade de exploração dos recursos a fim de suprir as demandas urbanas, rurais e industriais, além de ser útil para determinar o impacto de contaminação em áreas à jusante da descarga de águas residuais (DEWANDEL et al., 2003; TALLAKSEN, 1995).

O período caracterizado pela redução gradual da vazão em épocas com pouca ou nenhuma precipitação é denominado curva de recessão. O comportamento da curva é influenciado pelas propriedades hidrodinâmicas do aquífero (condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento, gradiente hidráulico), pelas características do solo e geologia, como também pelo clima e vegetação distribuída ao longo da bacia hidrográfica (DEWANDEL et al., 2003). As influências climáticas sobre a taxa de recessão ocorrem pela precipitação no período de recarga, e pelas perdas de água através da evapotranspiração. Em vários trabalhos os autores reconheceram a variação no comportamento da recessão devido a mudanças na evapotranspiração, principalmente nas estações mais quentes (TALLAKSEN, 1995).

A Figura 2.4 mostra um hidrograma e a composição do escoamento total formado pelas parcelas superficial e subterrânea. Após o pico na cheia, a recessão é inicialmente influenciada pela precipitação e infiltração da água no solo, até atingir o ponto em que há o predomínio da descarga do aquífero.

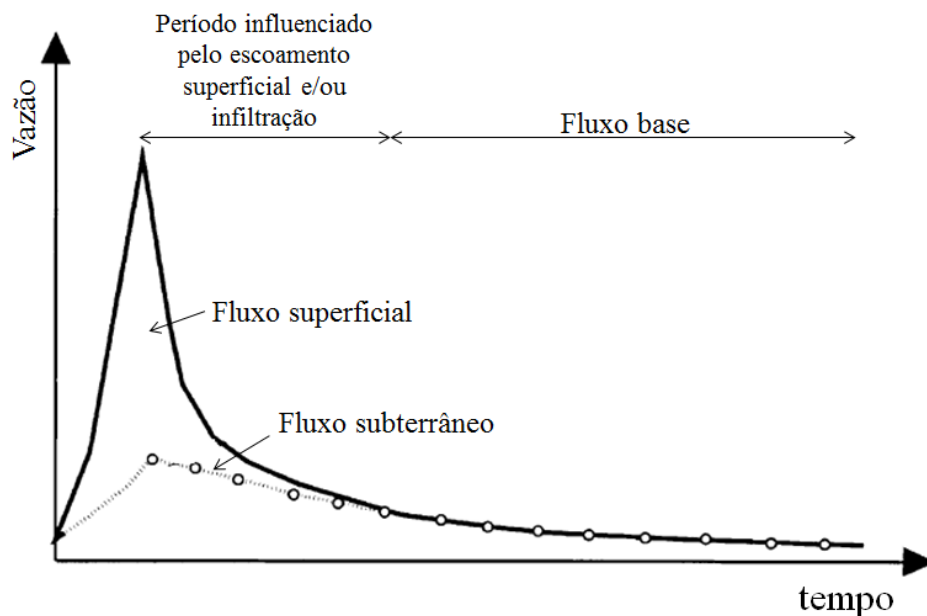


Figura 2.4. Composição do fluxo total ao longo do tempo. Adaptado de Dewandel et al. (2003).

A taxa de redução da vazão no período em que o fluxo total é abastecido apenas pelo fluxo base é representada por um coeficiente de recessão (α). A análise deste coeficiente pode refletir a influência da evapotranspiração sobre o escoamento analisado. Tallaksen (1995) cita estudos de sua autoria em 68 bacias da Noruega em que a variabilidade do coeficiente pôde ser parcialmente explicada pela variação na evapotranspiração, já que não foi possível associar as mudanças de α a qualquer outro fluxo, captação ou aspectos climáticos. Pereira (2012) avaliou a tendência do coeficiente de recessão ao longo do tempo para as bacias do Cachoeira e Atibainha, a fim de verificar uma possível influência das mudanças de uso da terra nas condições de infiltração e evapotranspiração.

2.3 Avaliação da qualidade dos recursos hídricos

O aumento da urbanização, o crescimento da população, e a expansão e manejo de culturas agrícola estão entre as principais causas de problemas ambientais no Brasil (LORZ et al., 2012). O impacto desses fatores se dá não só sobre a quantidade, como também sobre a qualidade dos recursos hídricos.

Dentre as principais fontes poluidoras dos corpos d'água encontram-se: os esgotos sanitários e efluentes industriais que são lançados sem tratamento devido, ou sem qualquer tratamento prévio; a disposição inadequada de resíduos sólidos domésticos e industriais que podem contaminar os solos, águas superficiais e subterrâneas; além das práticas agrícolas relacionadas à aplicação de fertilizantes e utilização de defensivos agrícolas sobre as culturas (CETESB, 2013).

A CETESB, agência também responsável pelo monitoramento das águas do estado de São Paulo, iniciou em 1974 a operação de uma rede de monitoramento de águas superficiais doces. Dentre os principais objetivos dessa rede estão: avaliar a evolução da qualidade das águas dos rios e reservatórios do estado, identificar áreas prioritárias ao controle da poluição, e subsidiar o diagnóstico da qualidade das águas doces utilizadas para abastecimento. Com o passar dos anos, a rede foi ampliada, e algumas adequações quanto à frequência de coletas e inclusão de novas variáveis foram feitas (CETESB, 2013).

No entanto, nem todos os parâmetros são monitorados continuamente, o que dificulta estudos de tendência dos dados de qualidade de água. De forma geral, as estações de qualidade controladas pela CETESB monitoram, a cada dois meses, as quantidades de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), oxigênio dissolvido (OD), pH, temperaturas das amostras, sólidos totais, e coliformes fecais. Outros parâmetros, como nitrogênio total, nitratos, nitritos, fósforo total, e potássio também são monitorados, mas não chegam a ser comuns a todas as estações.

Segundo Groppo et al. (2006), o banco de dados da CETESB é mais utilizado para avaliações instantâneas de qualidade, ou para a aplicação de sanções aos poluidores, mas é pouco explorado a fim de se avaliar a variabilidade dos parâmetros ao longo do tempo, bem como dos impactos que mudanças regionais podem acarretar sobre a qualidade da água.

O conhecimento sobre a qualidade dos cursos d'água é de fundamental importância para o direcionamento de políticas de gerenciamento que visem minimizar os impactos negativos sobre recursos hídricos. A avaliação de séries históricas de parâmetros de qualidade das águas permite

observar a variabilidade de suas concentrações ao longo do tempo, auxiliando a identificar os principais fatores de impacto e potenciais poluidores das regiões analisadas.

2.3.1 Séries históricas de parâmetros da qualidade

Em geral, as séries temporais de variáveis de qualidade da água não seguem uma distribuição normal, possuem sazonalidade, são dependentes do fluxo dos rios, além de as observações serem coletadas em períodos irregularmente espaçados. Por apresentarem essas características, a análise das séries históricas de qualidade requer uma metodologia específica que envolve estudos gráficos e testes de tendência (McLEOD, 1991).

As principais análises gráficas dos dados consistem em registrá-los ao longo do tempo e obter curvas de regressão, como a RLWRS (Robust Locally Weighted Regression Smooth), que auxiliam a verificar a presença ou ausência de tendência nos dados. Outra ferramenta comum são os gráficos Box-Plot, utilizados para observar a existência ou não de sazonalidade dos dados.

Além da avaliação gráfica, as séries temporais de qualidade são submetidas a testes estatísticos de normalidade, de correlação entre as variáveis de qualidade e vazão, de sazonalidade dos dados, de tendência, assim como da magnitude dessas tendências.

Yu et al. (1993) utilizaram alguns testes não-paramétricos, como o de Mann-Kendall, Mann-Kendall Sazonal, estimador de Sen's Slope, e o teste de homogeneidade de Van Belle e Hughes, para avaliar diversas variáveis de qualidade em estações localizadas no estado do Kansas, EUA, com séries mensais de 14 anos. Na análise preliminar, a normalidade e a presença de autocorrelação dos dados foram verificadas, e o teste Kuskall-Wallis, assim como gráficos Box-Plot, foram utilizados para detectar mudanças sazonais na distribuição dos dados. Os resultados dos testes indicaram, de forma geral, redução da concentração de íons, nutrientes, e sólidos suspensos e dissolvidos. A diminuição dessas variáveis foi atribuída à redução das fontes de poluição na região e ao aumento da descarga dos rios.

A tendência de diversos parâmetros de qualidade na bacia do rio Ebro, Espanha, foi avaliada em Bouza-Deaño et al. (2008). A região sofre impactos tanto das atividades antrópicas, quanto da sazonalidade. Grande parte de toda a demanda de água do rio é destinada à agricultura e pecuária (89,3%), sendo o restante destinado ao consumo doméstico (7,2%) e industrial (3,5%). O teste de correlação de Spearman (ρ) foi utilizado para avaliar a relação dos valores dos parâmetros com os meses do ano (sazonalidade). A partir dos testes de Mann-Kendall e Sen's Slope, observaram-se tendências significativas de redução, na maioria das estações, nos índices de fosfato, que foram atribuídas à diminuição da quantidade de fosfato na base dos fertilizantes utilizados na região.

Várias bacias do estado de São Paulo foram estudadas por Groppo et al. (2008). Dados das estações de monitoramento da CETESB foram utilizados para avaliar a qualidade de sete grandes rios, de 1979 a 2001, com diferentes graus de intervenção antrópica. De forma geral, os resultados dos testes de Mann-Kendall e Mann-Kendall Sazonal mostraram degradação qualitativa dos cursos d'água com tendências positivas para os índices de DBO, nitrogênio, fósforo total, cloreto, e coliformes, e negativas para o OD. O teste de Sen's Slope indicou maiores variações nas magnitudes das tendências para a bacia do Rio Piracicaba.

A mesma metodologia foi utilizada por Krusche et al. (1997) para investigar a variabilidade temporal e espacial de alguns parâmetros na bacia do Rio Piracicaba, entre 1978 e 1996. Também foi constatado aumento da degradação dos cursos d'água da região, com tendências de diminuição dos índices de OD e elevação das concentrações de DBO, nitratos e coliformes totais em decorrência da descarga de resíduos industriais e domésticos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Seleção das áreas de estudo

A seleção das regiões analisadas foi feita considerando-se as estações de monitoramento fluviométrico com séries históricas maiores que 15 anos, a partir de 1973, com menos de 10% de falhas de forma a não comprometer a análise dos dados, e localizadas em regiões cujo crescimento da área colhida de cana ao longo dos anos mostrou-se significativo. Estações próximas a usinas hidrelétricas foram evitadas, a fim de que os dados de vazão analisados não refletissem a possível mudança do fluxo causado por essas usinas.

Os dados fluviométricos coletados pelas estações de monitoramento das águas superficiais foram obtidos por meio da base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), e complementados pelas medições disponibilizadas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE).

Com a utilização do software ArcGIS 10.1, foram feitos mapas relacionando a área colhida de cana-de-açúcar com a área de cada município produtor nos anos de 1980, 1993², 2000 e 2010 para avaliar o perfil de crescimento da cultura em escala municipal e regional. Optou-se pela utilização dos dados de área colhida, pois as informações sobre área plantada de cana em escala municipal apenas são fornecidas após 1990. Os dados foram obtidos pelo IBGE, sendo os de área colhida disponibilizados para o período 1973 a 2010, e os de área municipal a partir de 1980.

Além de considerar a tendência de crescimento da produção canavieira ao longo dos anos em um período coincidente com a disponibilidade de dados hidrológicos com séries históricas maiores que 15 anos, a escolha das áreas de análise também levou em conta o tamanho da área drenada pela bacia de cada estação, buscando selecionar bacias com a menor área possível. Segundo Paiva e Paiva (2003), a instalação e coleta de dados no Brasil foram motivadas pelo setor de geração de energia elétrica; dessa forma, a rede de monitoramento é escassa em bacias com tamanho inferior a 500 km².

² O ano de 1993 foi selecionado por corresponder ao ano de instalação de diversos municípios criados em 1990.

A partir dos mapas da expansão da atividade canavieira nos municípios do estado de São Paulo elaborados e mostrados no Capítulo 4, seção 4.1, três áreas foram selecionadas para a análise: a região de Jaú, cujos efeitos das atividades antrópicas se dão sobre o Rio Jaú, e as regiões dos municípios de Pontal e Ribeirão Preto, cujo impacto se dá sobre o Rio Pardo. A Figura 3.1 apresenta os três municípios onde estão localizados os pontos de monitoramento de vazão analisados.

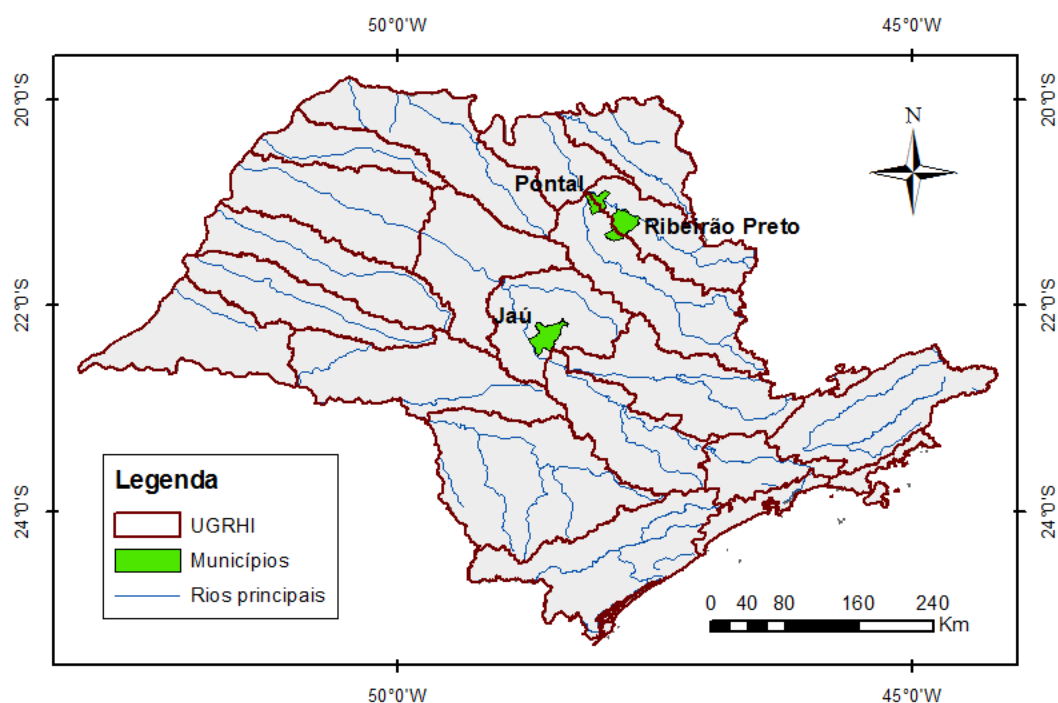


Figura 3.1. Municípios com vazões monitoradas e selecionados para análise.

3.1.1 Caracterização das áreas de estudos

Em 2000, todas as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do estado de São Paulo apresentaram o chamado “Relatório Zero”, contendo o diagnóstico da situação dos recursos hídricos de cada unidade que serviu como base para estabelecer diretrizes técnicas para a elaboração dos Planos das Bacias Hidrográficas paulistas. Além de apresentar a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos, o Relatório Zero disponibiliza informações sobre o histórico das regiões, caracterização física, socioeconômica e de biodiversidade das UGRHIs como um todo.

Informações hídricas mais atuais sobre as bacias podem ser conferidas nos Relatórios de Situação dos Recursos Hídricos produzidos anualmente pelos Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH) do estado de São Paulo, com o propósito de avaliar a eficiência do Plano de Bacia Hidrográfica e do Plano Estadual de Recursos Hídricos, e mostrar a situação dos recursos hídricos da bacia, dando subsídios à administração adequada dos recursos. Em geral, os relatórios contêm informações sobre o balanço entre disponibilidade e demanda; avaliação da qualidade das águas; avaliação do cumprimento dos programas previstos, e sugestões para prováveis ajustes nos programas.

As informações apresentadas a seguir foram obtidas baseadas nas informações contidas nos Relatórios Zero e nos Relatórios de Situação do CBH-Tietê/Jacaré e CBH-Pardo, disponibilizados no site do Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH).

3.1.1.1 Região de Jaú

A região de Jaú, considerada nesta dissertação, está localizada no centro do estado de São Paulo e é representada pelos municípios de Dois Córregos, Jaú e Mineiros do Tietê, com sede administrativa pertencente à UGRHI Tietê-Jacaré. A área drenada pela estação de monitoramento da vazão do Rio Jaú é de 417 km² e engloba uma parcela de cada município, como mostra a Figura 3.2. Nessa região está localizada a parte aflorante do Aquífero Serra Geral.

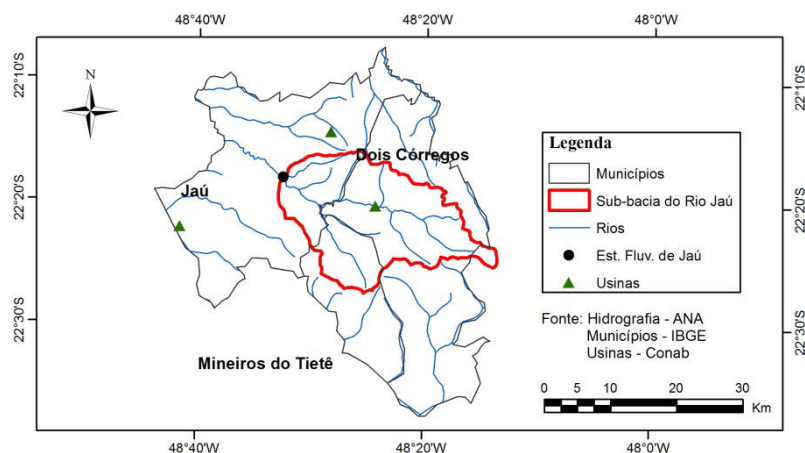


Figura 3.2. Municípios, localização de usinas sucroalcooleiras, rede de drenagem da região de Jaú e sub-bacia do Rio Jaú.

O clima da região, Cwa, é caracterizado pelo clima tropical, com períodos mais secos de abril a setembro (principalmente entre junho e agosto) e úmidos de outubro a março (principalmente entre dezembro e fevereiro). Segundo a classificação Köppen, essa classe climática apresenta totais de chuvas inferiores a 30 mm no mês mais seco. No mês mais quente as temperaturas médias são superiores a 22 °C, e inferiores a 18 °C no mês mais frio. A Tabela 3.1 apresenta as principais informações hidrometeorológicas dessa região.

Tabela 3.1. Informações hidrometeorológicas.

Parâmetro	Valor
Temperatura média anual ¹	22,7 °C
Precipitação média anual ²	1484,1 mm
Vazão média anual do Rio Jaú ²	6,54 m ³ /s

Fonte: ¹Elaborado a partir de dados do CEPAGRI (2014). ²Elaborado a partir de dados da ANA e do DAEE (de 1982 a 1999).

Os tipos de solo predominantes nos três municípios são o Latossolo Roxo eutrófico e distrófico, com textura argilosa e muito argilosa, Latossolo Vermelho-Escuro álico, com textura média, argilosa e muito argilosa, e o Latossolo Vermelho-Amarelo álico, distrófico, com textura média e argilosa.

O crescimento demográfico e econômico da região teve início com a atividade cafeeira no fim do século XIX. Após a crise de 1929, o café foi substituído pelas culturas de subsistência, algodão e cana-de-açúcar. Atualmente, toda a UGRHI Tietê-Jacaré é caracterizada pela intensa atividade sucroalcooleira, com a presença de diversas usinas de açúcar e álcool. Dentro da Sub-Bacia do Rio Jaú pode-se citar a usina Raízen - Dois Córregos, fundada em 2002. No município de Jaú estão localizadas outras duas usinas fundadas em 1945 e 1990, demonstrando a importância deste setor na economia local desde meados do séc. XX. O setor agroindustrial também é marcado pela produção e processamento de cítricos, principalmente laranja, além das indústrias de papel, bebidas e calçados. No setor agrícola, a cultura da cana é predominante. De forma geral, os setores industriais e de serviços são os principais responsáveis pelo PIB dos municípios na região.

A Tabela 3.2 apresenta o histórico da mudança do uso da terra ao longo dos anos na área total dos três municípios (1.533 km²). A porcentagem da área total ocupada por pastagens teve redução de 48% para 11% entre 1950 e 2006. Em contra partida, no mesmo período as lavouras se expandiram e passaram a ser maioria no território a partir de 1980, ano em que a cana-de-açúcar ocupou cerca de 25% da área dos três municípios. Em 1975, a cana-de-açúcar representava 35% de toda a área de lavoura, chegando a 96% em 1995. Nos últimos anos, a área com cana permaneceu estável na região, com pequeno crescimento em 2010.

Dentre os três municípios, Jaú é o mais populoso tendo, em 2010, população de 130.870 habitantes. Segundo dados de 2010 apresentados na Tabela 3.3, 77% da demanda total de água de Jaú foram destinados ao consumo industrial. Para o município de Dois Córregos, as principais demandas correspondem à utilização rural e industrial. Todo o efluente doméstico gerado por Jaú e Mineiros do Tietê é tratado antes de ser lançado aos cursos d'água, mas Dois Córregos trata apenas 6% de seu esgoto doméstico.

Tabela 3.2. Histórico do uso da terra na região de Jaú (% em relação à área total).

Uso da Terra	1950	1960	1970	1975	1980	1985	1995	2006	2010
Lavoura ¹	29	35	32	38	46	59	58	63	63
Cana-de-açúcar	nd	nd	nd	13	24	37	56	53	59
Matas e florestas ²	7	8	8	9	7	5	4	11	nd
Pastagem ³	48	46	43	40	30	21	14	11	nd

¹ Lavouras permanentes e temporárias, incluindo cana-de-açúcar. ² Matas e florestas naturais e plantadas, e terras produtivas não utilizadas. ³ Pastagem natural e plantada. nd: não disponível. Fonte: IBGE.

Tabela 3.3. Informações sobre os municípios da região de Jaú em 2010.

Município	População (hab.)	Demanda de água				Captações		Efluente doméstico tratado (%)
		Total (m ³ /s)	Urb. (%)	Ind. (%)	Rur. (%)	Sup. (%)	Sub. (%)	
Dois Córregos	24.741	0,05	7	39	54	26	74	6
Jaú	130.870	1,41	15	77	7	36	64	100
Mineiros do Tietê	12.033	nd	nd	nd	nd	nd	nd	100

nd: não disponível.

Fonte: SIGRH/CBH-MOGI. Ano base 2010.

3.1.1.2 Regiões de Pontal e Ribeirão Preto

As regiões de Pontal e Ribeirão Preto estão inseridas na UGRHI do Rio Pardo (UGRHI-4), localizada na porção nordeste do estado de São Paulo. O Rio Pardo tem sua nascente no sul de Minas Gerais e dirige-se para o estado de São Paulo acompanhando o relevo. Na porção noroeste do município de Pontal recebe as águas de seu maior afluente, o Rio Mogi-Guaçu, e segue até desaguar no Rio Grande, que é um dos formadores do Rio Paraná. A área drenada por toda a UGRHI-4 é de 8.818 km², sendo o Rio Pardo o principal curso d'água dessa Unidade de Gerenciamento. A porção inicial do Rio Pardo no estado de São Paulo, no sudeste da UGRHI, é marcada pelo considerável potencial hidrelétrico, na qual estão localizadas as usinas hidrelétricas de Caconde (80 MW), Euclides da Cunha (109 MW) e Armando de Salles Oliveira (32 MW), próximas às cidades de Caconde e São José do Rio Pardo, distantes de Pontal e Ribeirão Preto.

A Figura 3.3 apresenta toda a UGRHI Pardo, assim como as áreas priorizadas para análise.

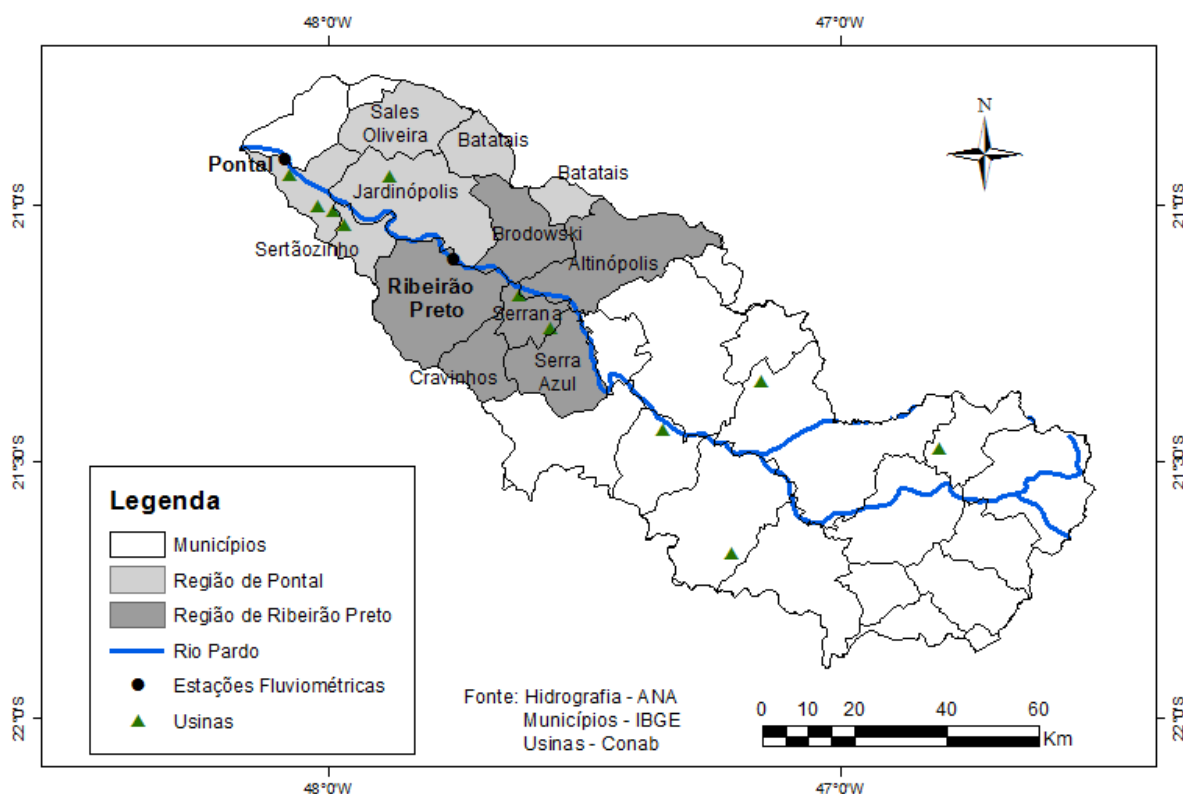


Figura 3.3. Municípios, localização de usinas sucroalcooleiras e regiões consideradas na URGHI Pardo.

A região de Pontal, localizada entre as duas estações fluviométricas indicadas na Figura 3.3, é formada por cinco municípios. A área total de Jardinópolis e Sales Oliveira está inserida na URGHI-4, porém Batatais, Pontal e Sertãozinho possuem parte de suas áreas na UGRHI-4 e sede em outras unidades, nas quais estão localizadas suas áreas urbanas. Na região de Ribeirão Preto, todos os municípios possuem sede na unidade de gerenciamento do Rio Pardo. Brodowski, Serrana e Serra Azul estão completamente localizados na UGRHI-4, enquanto Altinópolis, Cravinhos e Ribeirão Preto possuem parte do município em outras unidades.

Segundo a classificação climática de Köppen, as regiões de Pontal e Ribeirão Preto são marcadas pelo tipo Aw (tropical úmido com inverno seco). Em geral, o total de chuvas é inferior a 30 mm no período seco e a temperatura média no mês mais quente é superior a 22 °C. No mês mais frio, as temperaturas ultrapassam 18 °C.

A região de Pontal está localizada sobre a parte aflorante do Aquífero Serra Geral. O Aquífero Guarani, sobreposto pelo Serra Geral, aflora em Ribeirão Preto. Outras informações hidrometeorológicas são mostradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Informações hidrometeorológicas.

Parâmetro	Região de Pontal	Região de Ribeirão Preto
Temperatura média anual (°C) ¹	22,2	21,7
Precipitação média anual (mm) ²	1433,2	1665,8
Vazão média anual do Rio Pardo (m ³ /s) ²	213,4	188

Fonte: ¹Elaborado a partir de dados do CEPAGRI, 2014. ²Elaborado a partir de dados da ANA e do DAEE (1974 a 2011).

Os tipos de solo característicos dessas áreas são o Latossolo Roxo distrófico e eutrófico, com textura argilosa e muito argilosa principalmente nos municípios da região de Pontal, e Latossolo Vermelho-Escuro álico, distrófico com textura média e argilosa.

O desenvolvimento econômico de ambas as regiões teve início no século XVIII com a criação de gado e produção de cana-de-açúcar. No século XIX, a cultura do café exerceu grande influência sobre o crescimento populacional e econômico, e sua expansão resultou na intensa derrubada da cobertura vegetal natural. O município de Ribeirão Preto desde então já concentrava

grande parte da população regional, além de exercer importante influência econômica sobre os demais municípios. Com a decadência do café, a pecuária, o cultivo de algodão e cana-de-açúcar foi intensificado. Nos anos 1970, a região se destacava como a principal produtora agropecuária do estado, com destaque para as culturas de soja e cana-de-açúcar. O parque agroindustrial é caracterizado pela produção de açúcar e etanol, com grande concentração de usinas e destilarias, pelo complexo de papel, celulose e reflorestamento, além de outros ramos industriais como metalúrgico, mecânico, de produção alimentar, entre outros.

Dos arredores de Ribeirão Preto para as porções centro, leste e sudeste da UGRH Pardo, o cultivo da cana-de-açúcar decresce, embora a indústria sucroalcooleira esteja presente nessas áreas. O uso predominante da terra é destinado às pastagens e outras culturas como café, laranja e milho. Os municípios de maior influência econômica são Mococa e São José do Rio Pardo, que também se destacam pela produção de alimentos, laticínios, metalurgia e mineração.

Tabela 3.5. Histórico do uso da terra na região de Pontal e região de Ribeirão Preto (%).

	Uso da Terra	1950	1960	1970	1975	1980	1985	1995	2006	2010
Região Pontal (2.416 km ²)	Lavoura ¹	32	37	46	50	55	62	61	68	71
	Cana-de-açúcar	nd	nd	nd	17	27	35	50	58	64
	Matas e florestas ²	10	14	8	6	5	4	4	10	nd
	Pastagem ³	51	40	36	33	28	23	10	7	nd
Região Ribeirão Preto (2.580 km ²)	Lavoura ¹	21	22	26	29	41	48	45	47	53
	Cana-de-açúcar	nd	nd	nd	8	17	25	35	37	47
	Matas e florestas ²	19	17	13	17	13	12	11	18	nd
	Pastagem ³	55	49	45	36	27	22	16	11	nd

¹ Lavouras permanentes e temporárias, incluindo cana-de-açúcar. ² Matas e florestas naturais e plantadas, e terras produtivas não utilizadas. ³ Pastagem natural e plantada. nd: não disponível.

Fonte: IBGE.

A Tabela 3.5 mostra o histórico do uso da terra das áreas analisadas. Em ambas as regiões, houve redução das áreas de pastagens em relação à área total dos municípios, alinhada ao crescimento das lavouras, principalmente a partir de 1975. Embora a área total dos cinco municípios da região de Pontal seja menor que a área total das seis cidades que compõem a região de Ribeirão Preto, a atividade canavieira é mais tradicional e intensa na região de Pontal. Em 1975, a cultura já ocupava 17% do território, passando para 64% em 2010. No período de

1975 a 2010 o crescimento de cana nos municípios da região de Ribeirão Preto também foi expressivo, passando de 20.800 (8%) para 121.200 hectares (47%).

Dentre os municípios pertencentes à região de Pontal com área urbana localizada dentro da UGRHI Pardo, Jardinópolis apresenta a maior população, assim como a maior demanda total de água, cujo principal destino é o setor industrial, segundo dados disponibilizados pelo SIGRH para 2010. As informações sobre demanda e captações apresentados na Tabela 3.6 referem-se apenas ao volume de água requerido pelos municípios da UGRHI Pardo, tendo em vista que alguns deles, como Pontal e Sertãozinho, também captam água de outra bacia.

Tabela 3.6. Informações sobre os municípios da região de Pontal e Ribeirão Preto em 2010.

Tabela 3.3: Informações sobre os municípios da Região de Pontal e Ribeirão Preto em 2010.									
	Município	População (hab.)	Demanda de água			Captações		Efluente doméstico tratado (%)	
			Total (m³/s)	Urb. (%)	Ind. (%)	Rur. (%)	Sup. (%)	Sub. (%)	
Região Pontal	Batatais¹	56.429	0,03	11	0	88	63	37	0
	Jardinópolis	37.597	0,58	1	77	22	50	50	0
	Pontal¹	40.142	0,07	0	100	0	50	50	0
	Sales Oliveira	10.557	0,04	10	1	89	31	69	100
	Sertãozinho¹	109.936	0,37	28	72	0	30	70	0
Reg. Ribeirão Preto	Altinópolis¹	15.606	0,18	68	0	32	69	31	100
	Brodowski	21.070	0,11	72	0	27	60	40	100
	Cravinhos	31.662	0,03	3	19	76	35	65	0
	Ribeirão Preto	603.774	4,49	87	10	3	11	89	97
	Serra Azul	11.217	0,25	7	0	88	64	36	96
	Serrana	38.821	0,14	10	90	1	0	100	0

¹ Demanda e captações do município referente apenas à UGRHI Pardo.

Fonte: SIGRH/CBH-MOGI. Ano base 2010.

A cidade de Ribeirão Preto se destaca como grande polo regional, marcado pelo intenso crescimento econômico, demográfico e processo de urbanização. Dentre os municípios considerados, é o que possui maior população e demanda de água, principalmente destinada ao abastecimento urbano. Com exceção de Ribeirão Preto, os demais municípios com população maior que 22.000 habitantes não realizam tratamento dos efluentes domésticos gerados. Na região de Pontal, apenas Sales Oliveira, que tem a menor população na região, trata seus efluentes domésticos. Já na região de Ribeirão Preto, apenas Cravinhos e Serrana não realizam qualquer tratamento.

3.2 Dados hidrológicos

Não só as informações fluviométricas, mas também os dados pluviométricos utilizados para análise foram obtidos por meio da base de dados da ANA, pelos portais Sistemas de Informações Hidrológicas (Hidroweb) e Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), assim como pela base de dados do DAEE.

Para investigar o comportamento dos dados hidrológicos nas áreas de estudo, foram selecionadas as estações de chuva localizadas dentro das bacias e próximas aos pontos de monitoramento de vazão, para as quais o período dos dados disponibilizados fosse coincidente ao máximo com as séries de vazão. As principais informações sobre os postos de monitoramento fluviométrico e pluviométrico são apresentadas nas Tabelas 3.7 e 3.8, respectivamente.

Tabela 3.7. Estações Fluviométricas.

Nome do posto (Prefixo ANA/DAEE)	Latitude	Longitude	Período (anos)	A _{dren} (km ²)	Rio	Município	UGRHI
Jaú (62742000/5D-029)	-22°18'	-48°32'	1982 - 1999	417	Jaú	Jaú	Tietê-Jacaré
Fazenda Bela Vista (61855000/5B-011)	-20°54'	-48°05'	1974 - 2011	12.445	Pardo	Pontal	Pardo
Clube de Regatas (61834000/4C-001)	-21°06'	-47°45'	1974 - 2011	10.679	Pardo	Ribeirão Preto	Pardo

Fonte: DAEE, ANA.

Tabela 3.8. Estações Pluviométricas.

Nome do posto (Prefixo ANA/DAEE)	Lat.	Long.	Período (anos)	Município	UGRHI
Jaú - IA (2248036/ -)	-22°17'	-48°34'	1982 - 1985	Jaú	Tietê-Jacaré
Jaú – CPEF (2248012/D5-007)	-22°18'	-48°32'	1985 - 1999	Jaú	Tietê-Jacaré
Mineiros do Tietê (2248079/ D5-022)	-22°25'	-48°27'	1985 - 1999	Mineiros do Tietê	Tietê-Jacaré
Dois Córregos (2248016/ D5-008)	-22°22'	-48°23'	1982 - 1999	Dois Córregos	Tietê-Jacaré
Cândia (2047079/ B4-060)	-20°54'	-47°59'	1974-2000	Pontal	Pardo
Fazenda Bela Vista (2048101/ -)	-20°56'	-48°04'	1983-2011	Pontal	Pardo
Desengano (2048033/ -)	-20°60'	-48°01'	1974-2011	Pontal	Pardo
Clube de Regatas (2147004/C4-075)	-21°06'	-47°45'	1974-2004	Ribeirão Preto	Pardo
Jardinópolis (2147092/C4-054)	-21°01'	-47°46'	1974-2011	Jardinópolis	Pardo
Faz. Ponta da Serra (2147077/C4-086)	-21°05'	-47°39'	1974-2011	Brodowski	Pardo

Fonte: DAEE, ANA.

As Figuras 3.4 e 3.5 mostram a localização georreferenciada das estações fluviométricas e pluviométricas analisadas na sub-bacia do Rio Jaú, e na UGRHI Pardo, respectivamente.

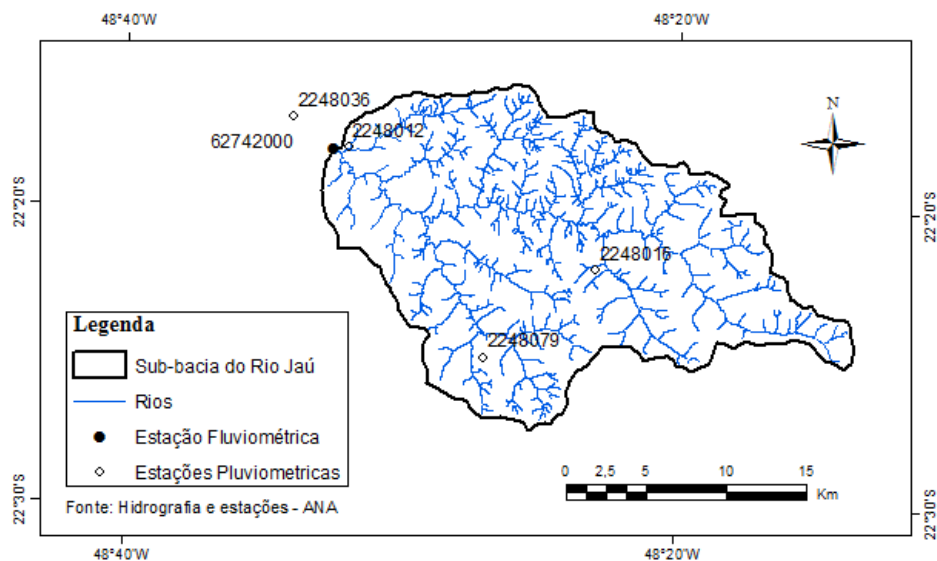


Figura 3.4. Rede de drenagem e estações analisadas na sub-bacia do Rio Jaú.

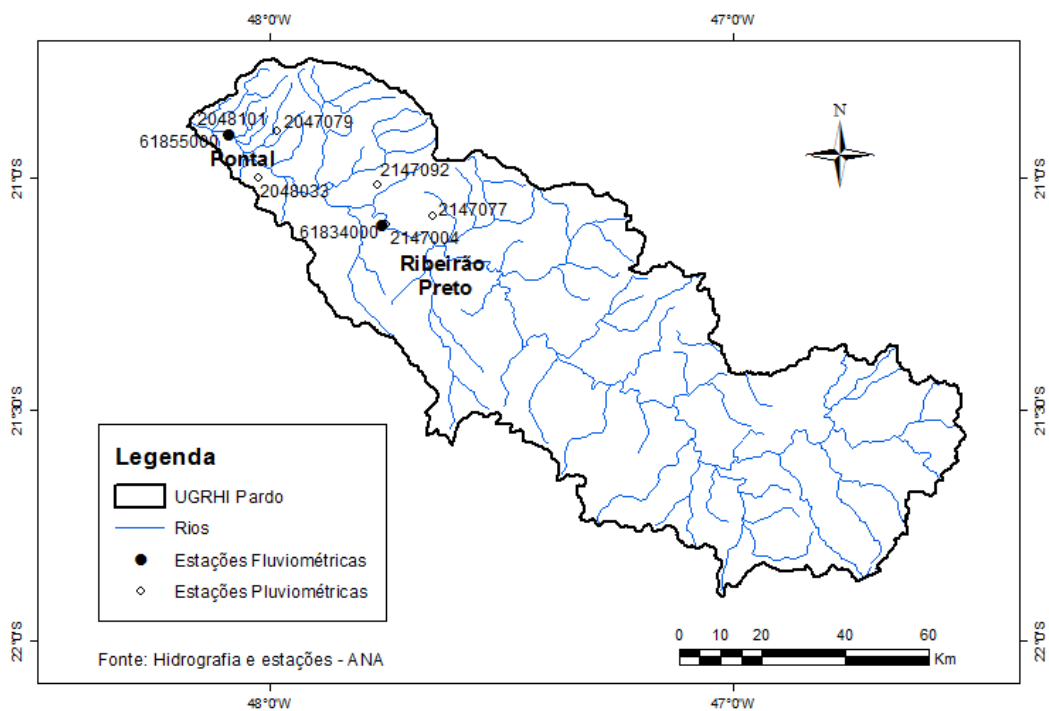


Figura 3.5. Rede de drenagem e estações analisadas nas regiões de Pontal e Ribeirão Preto, na UGRHI Pardo.

Na Figura 3.5, observa-se que o posto de monitoramento de vazão do Rio Pardo, 61834000, em Ribeirão Preto, localiza-se a montante do posto 61855000 no município de Pontal. A região compreendida entre essas duas estações é densamente ocupada pelas atividades do setor sucroalcooleiro.

A aplicação de alguns tratamentos estatísticos aos dados requer que as séries temporais não apresentem lacunas. Alguns métodos são indicados para se realizar o preenchimento adequado desses dados, tanto para séries de precipitação quanto vazão.

O preenchimento de falhas de vazão pode ser feito por regressão linear simples ou dupla, com outras estações de vazão e também de chuva. No entanto, a relação de vazões médias entre duas estações fluviométricas é mais bem definida se comparada com a relação entre uma estação de vazão e outra de chuva (TUCCI, 2000). As séries de vazão utilizadas não apresentaram lacunas, com exceção da estação de Jaú, com pequenas falhas. Por não haver uma estação fluviométrica próxima para corrigir a vazão por regressão linear, e pelas falhas serem menores que 10 dias em um mês, optou-se por preenchê-las por interpolação entre os dias anteriores e posteriores às lacunas, levando em consideração os registros de chuva nos postos pluviométricos da bacia no mesmo período. Em todas as regiões, gráficos de vazão e precipitação diárias foram traçados simultaneamente ao longo do tempo a fim de verificar a existência de possíveis erros grosseiros.

Já o preenchimento de falhas na precipitação foi feito por regressão linear múltipla e pelo método de médias ponderadas com as estações vizinhas (TUCCI, 2000; MORAES et al., 1998; GROPPPO et al., 2005). Por fim, aplicou-se o método da dupla massa para analisar a consistência das séries em nível anual a fim de verificar a homogeneidade dos dados de um posto com relação aos postos vizinhos (TUCCI, 2000; SEARCY e HARDISON, 1960).

Os testes estatísticos de avaliação do comportamento das séries de chuva podem ser aplicados sobre as precipitações média/total na bacia, como em Moraes et al. (1997), Yang e Tian (2009) e Pereira (2012). Em outros trabalhos foi realizada uma análise pontual da chuva na qual os dados de diversos postos pluviométricos localizados dentro da bacia são submetidos aos testes,

sem a necessidade do cálculo da precipitação média/total na região de estudo, como em Kahya e Kalayci (2004), Marengo e Alves (2005), Groppo et al. (2005) e Ma et al. (2008).

As precipitações das regiões de Pontal e Ribeirão Preto foram analisadas pontualmente por se tratar de uma região com extensa área de drenagem, cuja estimativa da precipitação média/total em toda a área considerada se torna mais trabalhosa.

Na região de Jaú, aplicou-se a metodologia tanto nos dados das estações de precipitação individualmente quanto no valor da precipitação na bacia. Para tanto, a delimitação da bacia considerada foi feita com o auxílio do software ArcGis 10.1, a partir das Cartas Topográficas Vetoriais de Mapeamento Sistemático do IBGE de Jaú (1973), Dois Córregos (1974) e Brotas (1974), na escala 1:50.000. A delimitação da bacia mapeada é apresentada na Figura 3.4.

Assim, os valores de chuva total mensal e anual em toda a região da bacia foram obtidos com o uso do ArcGis, por meio do método de interpolação espacial do inverso do quadrado da distância entre as estações mais próximas da área da bacia, selecionadas considerando-se a ação de possíveis efeitos orográficos. Por fim, calcularam-se as precipitações totais médias na bacia, para o período mensal e anual, por meio de ferramentas estatísticas do software. O procedimento de cálculo de chuva na bacia foi feito para todos os meses de cada ano, assim como para o total precipitado em cada ano, o que torna esse procedimento de cálculo trabalhoso para séries históricas longas.

Para examinar o comportamento das séries hidrológicas através dos testes estatísticos, os dados de vazão foram organizados em médias mensais, anuais e sazonais (dezembro a fevereiro - DJF, março a maio - MAM, junho a agosto - JJA, setembro a novembro - SON), e as precipitações dispostas em totais mensais, anuais e sazonais.

3.3 Dados de qualidade

Os dados de qualidade dos corpos d'água, monitorados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), foram obtidos através da ANA, pelo portal Hidroweb, e

complementados com as informações dos relatórios de qualidade das águas superficiais da CETESB, disponibilizados anualmente a partir de 2000 em formato digital.

Para a escolha das estações de qualidade a serem analisadas, foram selecionadas as estações com séries mais longas, com menos de 10% de falhas, localizadas em áreas produtoras de cana-de-açúcar, próximas às estações de vazão, e que realizassem o monitoramento de parâmetros relacionados com a atividade canavieira.

A avaliação qualitativa da água dos rios através das séries históricas monitorados pela CETESB foi limitada não só pelo período de disponibilidade dos dados, como também pelas variáveis controladas em cada estação. Dentre os postos de qualidade identificados nas áreas do estado de São Paulo com presença da atividade canavieira, cerca de 80 postos foram pré-selecionados por disponibilizarem os dados dos parâmetros por mais de seis anos, ainda assim contendo algumas falhas. Dentre as 80 estações, menos de 10 monitoravam a concentração de potássio, e aproximadamente 25 monitoraram as séries de nitrogênio apenas entre 2004 e 2009. Tanto o potássio quanto as séries de nitrogênio são parâmetros importantes a serem verificados em regiões produtoras de cana-de-açúcar. O início do monitoramento do potássio foi em 2001 nas estações citadas, sendo todas localizadas nas UGRHIs Pardo, Mogi Guaçu e Turvo/Grande.

Além dos parâmetros monitorados e do período de disponibilidade desses dados, a escolha das estações da CETESB foi limitada às regiões com monitoramento fluviométrico realizado próximo às estações de qualidade, pois a metodologia de análise de tendências das séries históricas, apresentada na seção 3.5.1.1, requer a verificação de uma possível dependência entre os valores de vazão e os parâmetros de qualidade medidos em períodos simultâneos.

Dessa forma, duas estações de qualidade localizadas no Rio Pardo, próximas às estações fluviométricas analisadas em Pontal e Ribeirão Preto (61855000 e 61834000, respectivamente) foram selecionadas. Na Tabela 3.9 são fornecidas as principais informações das estações de qualidade, cujas localizações georreferenciadas são mostradas na Figura 3.6.

Tabela 3.9. Estações de Qualidade.

Posto (Prefixo ANA/CETESB)	Latitude	Longitude	Intervalo (anos)	Curso d'água	Município	UGRHI
(61851000/PARD02600)	-20°57'	-48°01'	1989-2011	Rio Pardo	Pontal	Pardo
(61835000/PARD02500)	-21°06'	-47°45'	1989-2011	Rio Pardo	Ribeirão Preto	Pardo

Fonte: ANA, CETESB.

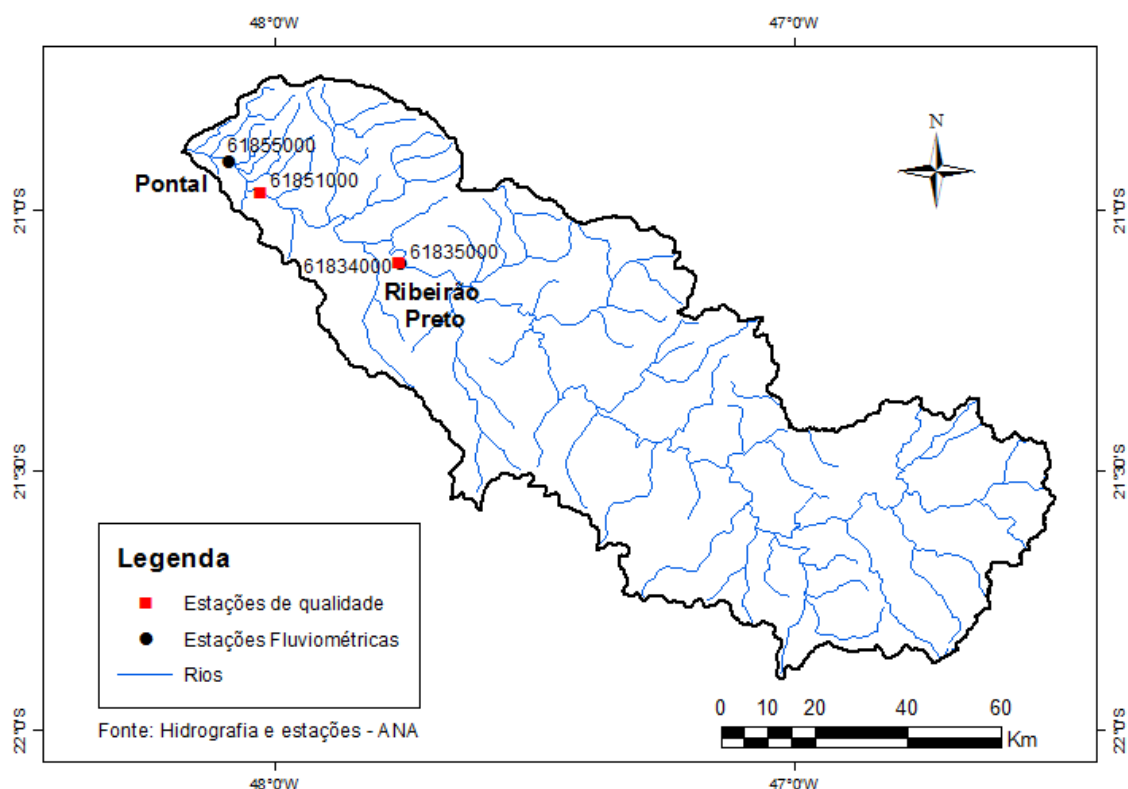


Figura 3.6. Rede de drenagem e estações de qualidade e vazão das regiões de Pontal e Ribeirão Preto, na UGRHI Pardo.

Neste trabalho, foram analisadas as concentrações de oxigênio dissolvido (OD), demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO_{5,20}), nitrogênio total Kjeldhal (NKT), nitrato (NO₃), nitrito (NO₂), nitrogênio amoniacal (N_{amon}), fósforo total (P), potássio total (K), sólidos totais (Sol. Tot.) e potencial hidrogeniônico (pH). No Apêndice B é apresentado o significado ambiental desses parâmetros físico-químicos.

3.4 Avaliação quantitativa dos recursos hídricos

A metodologia utilizada para investigar a presença de alterações na quantidade dos recursos hídricos nas regiões selecionadas consistiu em observar o comportamento das séries históricas de vazão e precipitação. Para tanto, os dados foram explorados graficamente e por meio de testes estatísticos não paramétricos de detecção de tendências, magnitude de tendências e mudanças bruscas nas séries temporais. O comportamento das vazões de estiagem ao longo dos anos foi explorado por meio do cálculo do coeficiente de recessão do fluxo base. Por fim, os dados de vazão foram correlacionados com informações relativas ao uso das terras a fim de examinar a influência da atividade canavieira sobre a quantidade dos recursos hídricos.

A descrição detalhada da metodologia utilizada é apresentada nas seções 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3. Os procedimentos de avaliação foram escolhidos mediante a análise de diversos trabalhos, também citados nos tópicos a seguir, que buscaram analisar os impactos de intervenções antrópicas, incluindo a mudança do uso da terra, sobre séries temporais hidrológicas.

3.4.1 Análise exploratória e estatística dos dados de chuva e vazão

Primeiramente, realizou-se a análise exploratória dos dados estatísticos de chuva e vazão, na qual foram calculados os valores médios ao longo dos anos, assim como a normalização Z-score e média móvel anuais de quatro anos das séries históricas. Após a etapa exploratória, as séries foram submetidas aos testes de tendência de Mann-Kendall e Mann-Kendall sequencial, teste de ruptura de Pettitt e ao teste de magnitude de Sen's Slope.

O esquema apresentado na Figura 3.7 sintetiza quais foram os principais testes estatísticos aplicados sobre as séries temporais de vazão e precipitação, além de mostrar quais os dados e softwares utilizados para a execução dos testes descritos nesta seção.

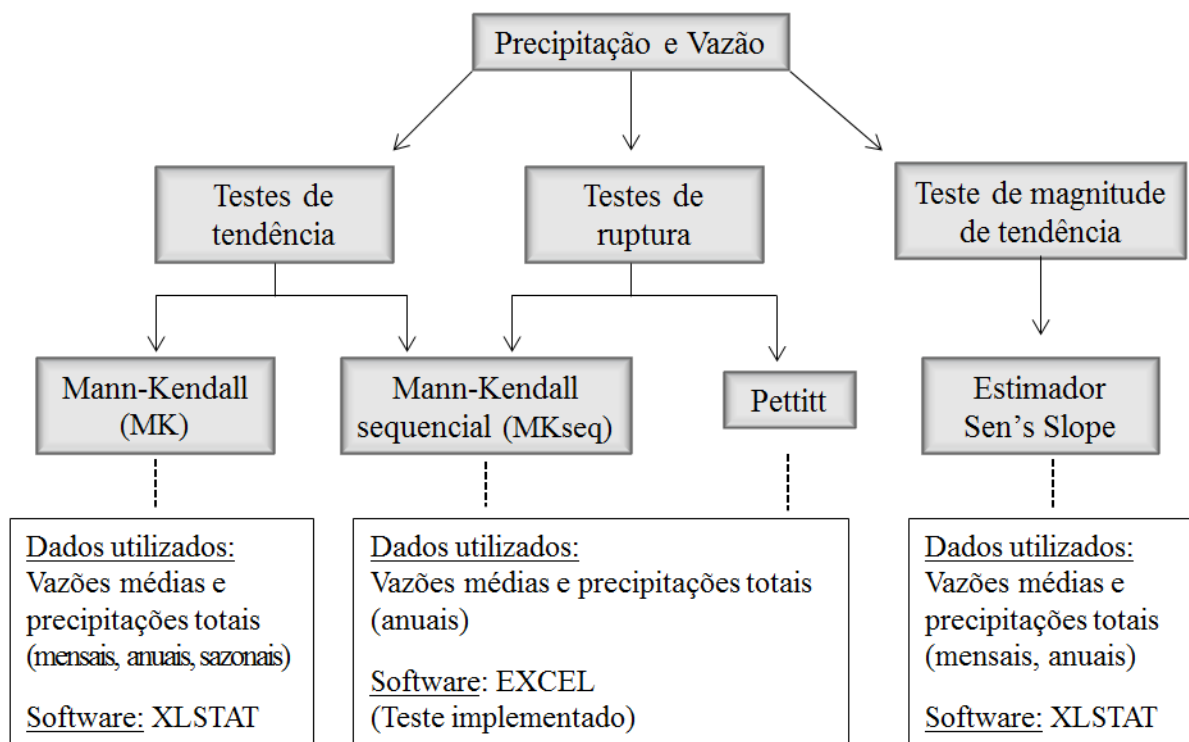


Figura 3.7. Fluxograma dos testes aplicados sobre os dados de precipitação e vazão, e softwares utilizados.

3.4.1.1 Testes de tendência

O teste estatístico de Mann-Kendall (MK), descrito em Hirsch e Slack (1984), é um teste não paramétrico de tendências baseado na hierarquização dos dados, amplamente utilizado em estudos de tendências hidrológicas como em Kahya e Kalayci (2004), Birsan et al. (2005), Marengo e Alves (2005) e Yang e Tian (2009).

Para uma série temporal x_1, \dots, x_n , a hipótese nula H_0 considera a série de n termos independentes e identicamente distribuídos. Os dados são listados em ordem temporal, e a estatística S , com média nula e variância $\text{Var}(S)$, é calculada. A existência ou não de tendência é verificada pela estatística Z , dada por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & se \ S > 0 \\ 0, & se \ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & se \ S < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Em um teste bilateral, H_0 não é rejeitada se $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$, no qual α corresponde ao nível de confiança. Para um nível de significância de 5%, comumente assumido para o teste de Mann-Kendall sobre séries hidrológicas, a hipótese nula de ausência de tendência (H_0) não é rejeitada quando a estatística apresentar valores dentro do intervalo de confiança $-1,96 < Z < 1,96$. Caso contrário, para valores fora deste intervalo, é constatada a presença de uma tendência significativa. Valores positivos de S indicam aumento dos valores ao longo do tempo, ou seja, uma tendência positiva; já valores negativos de S indicam tendência de redução.

O teste de Mann-Kendall parte do pressuposto de que os dados sejam independentes. Se os dados apresentarem correlação serial significativa, o teste pode resultar rejeição de H_0 com maior frequência (BIRSAN et al., 2005). Para esses casos, Hamed e Rao (1998) e Yue e Wang (2004) sugerem modificações a fim de eliminar a influência da autocorrelação no teste de Mann-Kendall. A modificação sugerida por Hamed e Rao (1998) requer que, caso seja detectada a presença de autocorrelação entre os dados, sua influência seja previamente removida. No entanto, ao se retirar o efeito da autocorrelação, parte de uma tendência existente pode ser removida erroneamente, reduzindo-se as chances de se aceitar a hipótese alternativa de presença de tendência significativa nas séries analisadas (YUE e WANG, 2004). Já para utilizar a modificação proposta por Yue e Wang, não há a necessidade de remover a correlação serial a priori, se ela existir.

Portanto, antes da aplicação de Mann-Kendall, os dados foram submetidos ao teste não paramétrico de Run, descrito em Sneyers (1990), para verificar a presença ou não de autocorrelação nos dados. Caso detectada a autocorrelação, Mann-Kendall foi feito com a modificação sugerida por Yue e Wang (2004).

Os testes de MK foram realizados sobre as vazões (médias mensais, anuais, e sazonais) e precipitações (totais mensais, anuais, e sazonais) utilizando-se o XLSTAT, software estatístico e de análise de dados disponível no Microsoft Excel. Os níveis de significância de 5% e 10% foram adotados.

Outro método estatístico de análise de tendências muito utilizado em estudos hidrológicos é a versão sequencial de Mann-Kendall (MKseq), proposta em Sneyers (1990). É um teste não paramétrico capaz de detectar e localizar o ponto inicial de tendências em séries temporais, baseado na hierarquização (rank) dos dados ao longo do tempo. Este método foi utilizado em estudos hidrológicos como o de Moraes et al. (1998), Mortatti et al. (2004), Groppo et al. (2005) e Ma et al. (2008).

O procedimento do teste de Mann-Kendall Sequencial, detalhado em Moraes et al. (1998), consiste no cálculo das estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$. A estatística $u(t_n)$ é obtida pela aplicação do teste no sentido cronológico da série, representando sua evolução no tempo. Já $u^*(t_n)$ resulta da aplicação do teste no sentido inverso da série, e é utilizada para localizar, aproximadamente, o início de mudança brusca ao longo do tempo.

O valor da probabilidade α_1 é calculado através de uma tabela da normal reduzida, tal que:

$$\alpha_1 = \text{prob} (|u| > |u(t_n)|) \quad (3.2)$$

Para o nível de significância $\alpha_0 = 0.05$, a hipótese nula H_0 de ausência de tendência é aceita se $\alpha_1 > \alpha_0$. Se $\alpha_1 < \alpha_0$, H_0 é rejeitada e uma tendência significativa é detectada. Valores positivos de $u(t_n)$ indicam a presença de uma tendência positiva significativa, e valores negativos de $u(t_n)$ uma tendência negativa significativa.

O ponto aproximado de início da mudança pode ser detectado por meio da intersecção das curvas das estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$, se essa ocorre dentro do intervalo de confiança $-1,96 < u(t_n) < 1,96$ para $\alpha_0 = 0.05$ (MORAES et al., 1998).

Os testes foram realizados para um nível de confiança de 5%. A versão sequencial de Mann-Kendall foi implementada no EXCEL e aplicada sobre as séries anuais de vazão e

precipitação com períodos simultâneos, a fim de facilitar a comparação entre o comportamento das chuvas e vazões. Por exemplo, na região de Ribeirão Preto, na qual os dados de vazão estão compreendidos entre 1974 a 2011, as únicas estações pluviométricas avaliadas foram a 2147077 e 2147092, cujos dados estão disponíveis nesse mesmo período. Já a estação 2147004, com série entre 1974 a 2004, não foi avaliada.

3.4.1.2 Teste de ruptura

Os testes de ruptura indicam com maior precisão do que o teste de MKseq o ponto de mudança brusca das séries temporais, sendo um dos mais utilizados o Teste de Pettitt (Pettitt, (1979), Moraes et al. (1998), Mortatti et al (2004), Groppo et al. (2005) e Ma et al. (2008)).

O teste de Pettitt verifica se duas amostras X_1, \dots, X_t e X_{t+1}, \dots, X_T são da mesma população por meio da estatística $U_{t,T}$, que faz uma contagem de quantas vezes um membro da primeira amostra é maior que o membro da segunda. A estatística $k(t)$, dada pelo máximo valor absoluto de $U_{t,T}$, localiza o ponto em que houve uma mudança brusca na média de uma série temporal. A significância do teste pode ser calculada, aproximadamente, por:

$$p \cong 2 \exp \left\{ -6k(t)^2 / (T^3 + T^2) \right\} \quad (3.3)$$

O teste de ruptura de Pettitt foi implementado no EXCEL e aplicado sobre as séries anuais de vazão e precipitação com períodos simultâneos, como na versão sequencial de Mann-Kendall, possibilitando a comparação entre os resultados dos dois métodos.

3.4.1.3 Teste de magnitude (Sen's Slope estimator)

A magnitude das tendências foi calculada através do estimador “Sen's Slope”. O teste não paramétrico estima um coeficiente angular (slope) médio para uma série de valores. Para cada par de pontos ordenados no tempo é calculada uma dada inclinação e a média dessas inclinações

resulta no estimador Sen's Slope. Além de não exigir a normalidade dos dados, apresenta a vantagem, sobre o coeficiente angular da regressão linear, de ser robusto a "outliers" (EPA, 2000). Nesta dissertação, os testes de magnitude foram realizados sobre as séries das vazões (médias mensais, anuais) e precipitações (totais mensais, anuais) por meio do software XLSTAT.

3.4.2 Obtenção do coeficiente de recessão (α)

A curva de recessão pode ser representada por diversos modelos, sendo dois dos mais utilizados o modelo exponencial, conhecido como fórmula de Maillet, e o modelo quadrático de Boussinesq, válidos para aquíferos não confinados. No Apêndice A são apresentados os detalhes relacionados a esses modelos e aos métodos de obtenção do coeficiente de recessão, a partir da curva de recessão, utilizados neste trabalho.

O coeficiente de recessão foi calculado primeiramente a partir dos dados da estação fluviométrica 61855000 em Pontal. Nessa região está localizada parte da área confinada do Aquífero Guarani, sobreposto por parte da área aflorante do aquífero fraturado Serra Geral (ROCHA, 2005). Pelo fato de o Aquífero Serra Geral não ser confinado nessa região de estudo, os modelos exponencial e quadrático de escoamento podem ser aplicados.

Os modelos de Maillet e Boussinesq, frequentemente utilizados e de fácil aplicação, foram adotados para o cálculo do coeficiente de recessão (α) de cada ano da série histórica de vazão. Os efeitos das chuvas sobre a avaliação gráfica do hidrograma durante os períodos mais secos foram reduzidos ao utilizar hidrogramas traçados a partir das vazões médias mensais, como realizado em Costa e Bacellar (2010) e Silva (2009).

A obtenção do coeficiente de recessão α para o modelo exponencial de Maillet foi feita a partir do método gráfico de Barnes, aplicado aos dados de vazão média mensal em escala logarítmica. Já o coeficiente resultante do modelo quadrático de Boussinesq foi obtido a partir do hidrograma de vazões médias mensais em escala linear. Os períodos finais da recessão foram considerados para se obter a reta cuja inclinação resulta nos valores dos coeficientes de recessão para o modelo exponencial, como exemplificado pela Figura 3.8.

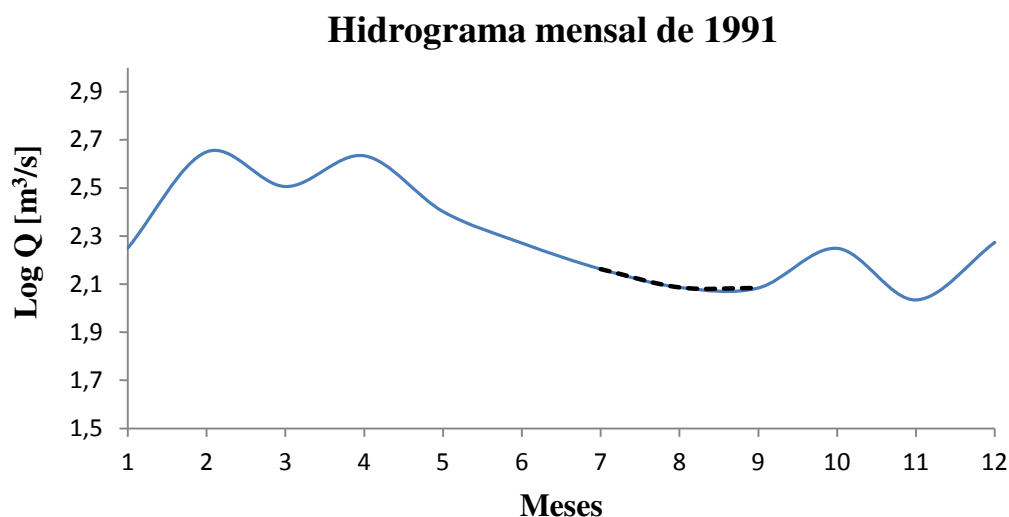


Figura 3.8. Determinação da reta de recessão pelo método de Barnes para médias mensais.

A Figura 3.9 mostra os valores dos coeficientes de recessão calculados de 1974 a 2011 a partir das vazões da estação 61855000 em Pontal, segundo os dois modelos de aquífero. O modelo quadrático de Boussinesq estimou, em geral, valores menores e com menor variação na amplitude que o exponencial de Maillet. No entanto, a tendência representada pela inclinação das retas de regressão linear para ambos os modelos foi praticamente a mesma ao longo dos anos.

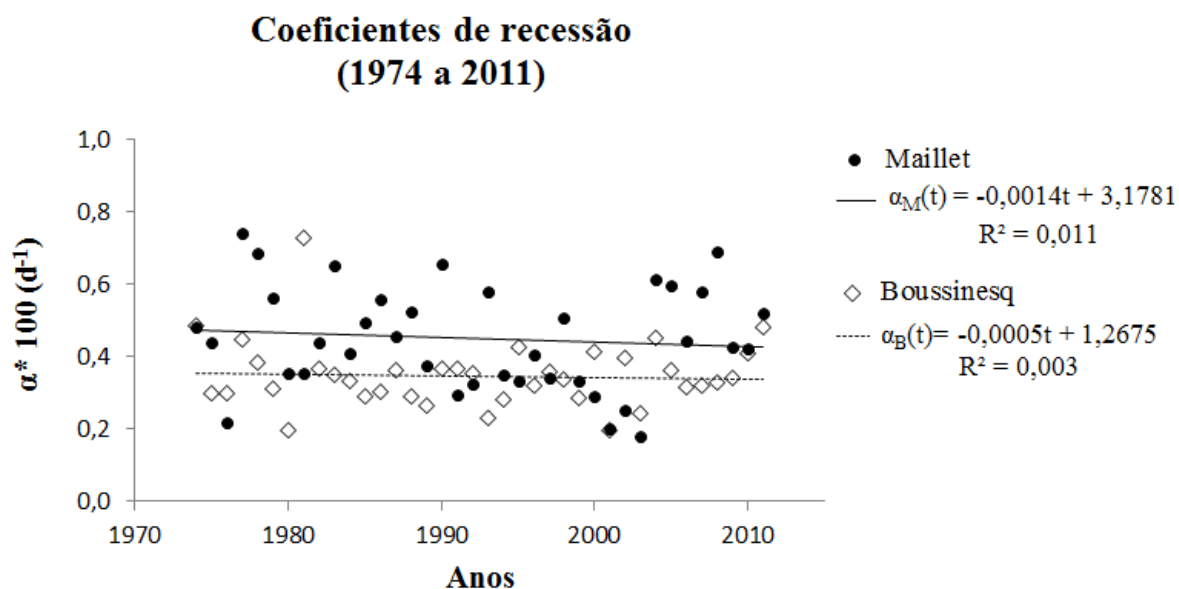


Figura 3.9. Coeficientes de recessão a partir dos modelos de Maillet e Boussinesq, e respectivas linhas de tendência.

Em alguns anos, mesmo utilizando o hidrograma das médias mensais de vazão, os altos índices de chuva nos períodos mais secos do ano dificultaram o cálculo do coeficiente α , gerando incertezas sobre os valores obtidos. A Figura 3.10 mostra a tendência linear das retas de regressão para ambos os modelos com a retirada do coeficiente α dos quatro anos cuja curva de recessão foi marcada por períodos chuvosos. Pode-se observar que mesmo com a retirada do coeficiente desses anos, que poderiam apresentar incertezas em seus valores, não é possível verificar uma tendência crescente ou decrescente do coeficiente de recessão ao longo dos anos.

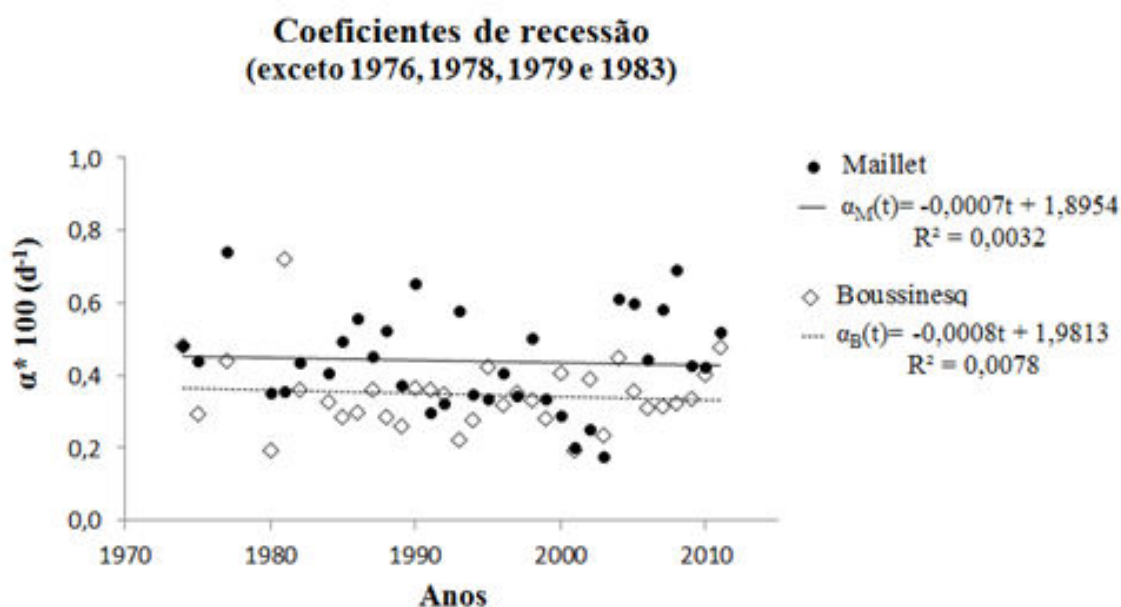


Figura 3.10. Linhas de tendência após a retirada dos coeficientes incertos.

Como o comportamento das tendências lineares apresentada por ambos os métodos foi semelhante, apenas o modelo exponencial de Maillet foi selecionado para realizar os cálculos dos coeficientes de recessão para as demais estações fluviométricas. O modelo, além de ser muito utilizado, fornece um bom ajuste para grande parte dos aquíferos (COSTA e BACELLAR, 2010; DEWANDEL et al., 2003).

3.4.3 Análise de correlação

Para explorar a influência da atividade canavieira sobre a quantidade dos recursos hídricos, os dados de vazão média anual dos rios e a área colhida de cana-de-açúcar em cada região foram correlacionados utilizando-se o teste de correlação de Kendall (τ).

Baseado na hierarquização dos valores, esse teste mede a relação monotônica entre duas variáveis, que pode ou não ser linear. Segundo Helsel e Hirsch (2002), a estatística τ do teste de correlação de Kendall em geral apresenta valores menores que outros testes de correlação, como Pearson (r) e Spearman (ρ). Correlações lineares “fortes” acima de 0,9 para esses testes correspondem a valores de τ maiores que 0,7. Nesta dissertação, as correlações foram consideradas significativas caso o p-valor do teste de correlação de Kendall (τ) fosse menor que 0,05 para um nível de significância de 5%.

3.5 Avaliação da qualidade dos recursos hídricos

Os métodos utilizados para a avaliação da qualidade da água dos rios foram semelhantes aos utilizados para estudar a relação da atividade canavieira com a quantidade dos recursos hídricos. No entanto, pelo fato de, em geral, os dados de qualidade não seguirem distribuição normal, possuírem sazonalidade, serem dependentes do fluxo dos rios, e a frequência de coleta dos registros nem sempre ser regularmente espaçada, foi necessária a aplicação de um procedimento específico.

A avaliação da qualidade dos recursos hídricos nesta dissertação baseou-se na mesma estrutura metodológica aplicada por Groppo et al. (2008), e detalhada em Groppo et al. (2006). Além de conter as principais ferramentas estatísticas para examinar o comportamento da qualidade, esses artigos podem ser utilizados como comparação para os resultados de avaliação de tendências de alguns parâmetros em alguns locais do estado de São Paulo.

O comportamento dos parâmetros de qualidade foi observado por meio da análise gráfica das séries, e examinado por meio da aplicação de testes estatísticos para investigar a presença ou

ausência de tendências, determinação da magnitude das tendências, e analisar a existência de mudanças bruscas nas séries. Por fim, correlações foram feitas entre as concentrações de cada parâmetro com dados de crescimento populacional e expansão da cultura da cana-de-açúcar. A descrição detalhada da metodologia utilizada é apresentada nas seções 3.5.1 e 3.5.2.

3.5.1 Análise exploratória e estatística dos dados de qualidade

A metodologia aplicada neste trabalho é baseada nas etapas de análise apresentadas em Groppo et al. (2006). Detalhes podem ser encontrados nos trabalhos de McLeod et al. (1991), Hipel e McLeod (1994), e Hirsch et al. (1991). A mesma metodologia foi também utilizada por Krusche et al. (1997) para o estudo de tendências no Rio Piracicaba.

Para aplicar essa metodologia fez-se uso das ferramentas do software XLSTAT, de melhor interface e maior flexibilidade que o programa McLeod-Hipel Time Series (MHTS), utilizado por Krusche et al. (1997) e Groppo et al. (2006). O programa MHTS (McLEOD e HIPEL, 2002), apesar de ser gratuito, tem a desvantagem de sua interface ser desenvolvida em DOS, sendo necessário inserir os dados no software manualmente. Além disso, o programa não fornece a modificação do teste de Mann-Kendall para séries autocorrelacionadas proposta por Hamed e Rao (1998) ou Yue e Wang (2004), podendo gerar erros nos resultados obtidos por esse teste que parte do pressuposto de que seus dados sejam independentes.

A Figura 3.11 apresenta o fluxograma dos principais testes estatísticos aplicados sobre as séries temporais dos parâmetros de qualidade, além de mostrar quais os dados e softwares utilizados para a execução dos testes citados nesta seção 3.5.1.

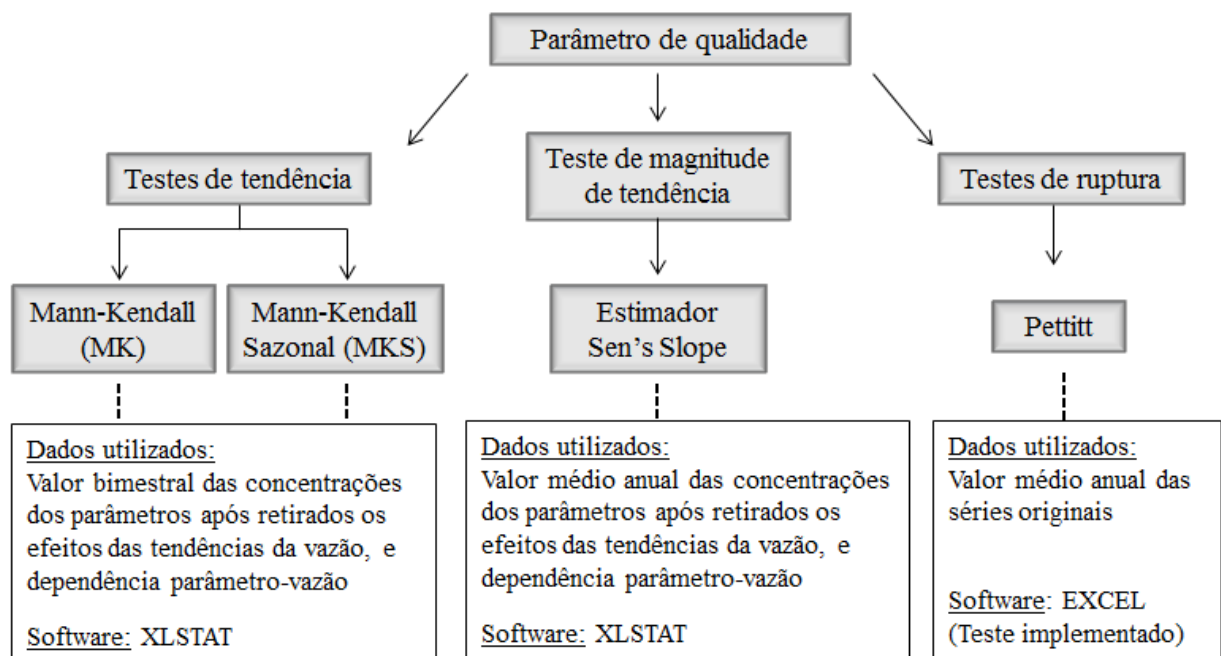


Figura 3.11. Fluxograma dos testes aplicados sobre os respectivos dados dos parâmetros de qualidade, e softwares utilizados.

3.5.1.1 Detecção de tendências

Para a aplicação dos testes de tendência foi utilizada uma metodologia específica que inclui análises gráficas e estatísticas antes da aplicação do teste de Mann-Kendall e do teste sazonal de Mann-Kendall. Foram verificadas a normalidade e a presença de sazonalidade dos dados, a dependência dos valores de parâmetros com a vazão dos cursos d'água, assim como a presença ou ausência de tendências nos dados de vazão, que podem provocar a detecção de falsas tendências nos parâmetros.

3.5.1.1.1 Tratamento preliminar dos dados

Os dados podem ser visualizados tanto na forma bruta como transformados a partir das transformações Box-Cox para que suas características gerais sejam observadas.

Embora os testes estatísticos descritos nos próximos tópicos sejam não paramétricos, Groppo et al. (2006) optaram pela normalização dos dados, pois, segundo contato pessoal com McLeod, esse procedimento faz com que os dados sejam distribuídos mais simetricamente. Dessa forma, duas vantagens foram citadas pelo autor: “alguns métodos não paramétricos, como a regressão RLWRS, assumem que os dados são distribuídos simetricamente, e para dados simetricamente distribuídos é mais fácil localizar o centro de distribuição”.

Portanto, primeiramente os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, estatisticamente mais robusto que outros testes, como os de Anderson Darling e Kolmogorov (HELSEL e HIRSCH, 2002).

As séries que não tinham distribuição normal foram submetidas às Transformações Box-Cox. A transformação Box-Cox consiste em encontrar um λ , conforme a Equação 3.4, que transforme os dados de uma série $x_1 \dots x_n$ a fim de que se aproximem de uma distribuição normal.

$$Y_t = \begin{cases} \lambda^{-1} [x_t^\lambda - 1] & \lambda \neq 0 \\ \ln(x_t), & \lambda = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Esse tipo de transformação também pode ser aplicado para corrigir anormalidades e reduzir o número de valores discrepantes da série (KRUSCHE et al., 1997). Após as transformações, a normalidade foi checada novamente. Mesmo quando a normalidade não foi atingida, optou-se por trabalhar com a série transformada, já que esta também pode ser usada para reduzir “outliers” e, segundo Helsel e Hirsch (2002), os testes estatísticos de tendência podem ser aplicados tanto à série original quanto transformada sem alteração de seus resultados. Além disso, para comparar varias bacias é apropriado que as séries de cada parâmetro sejam uniformes. Se a série de um parâmetro necessita ser transformada na maior parte das bacias analisadas, recomenda-se que a transformação também seja feita para os dados desse parâmetro nas demais bacias (GROPPO, 2005).

Apesar das transformações Box-Cox, as séries ainda apresentaram alguns valores discrepantes, e esses precisaram ser corrigidos. A presença desses valores pode ser atribuída às

descargas pontuais, a erros de medida, ou à variação causada por alguma intervenção na bacia (GROPPO et al., 2006). Foram considerados valores discrepantes aqueles maiores que a média total da série somada de três desvios padrões, e inferiores à média subtraída de três desvios padrões. Esses valores foram então substituídos pelo valor da média da série.

Os dados de vazão utilizados para toda a análise relacionada à qualidade das águas correspondem aos valores medidos nos mesmos dias em que foram feitos os monitoramentos das variáveis de qualidade estudadas.

A série final da vazão e de cada parâmetro após todos esses procedimentos foi denominada “série tratada”.

3.5.1.1.2 Retirada da tendência da vazão

A existência de uma tendência nos dados de vazão pode provocar a detecção de uma falsa tendência nos parâmetros. Portanto, antes de analisar as variáveis de qualidade, o teste de correlação de Kendall foi utilizado para verificar se os dados de vazão apresentam tendência em função do tempo. Quando uma tendência foi detectada, a técnica de regressão RLWRS foi utilizada para removê-la.

A técnica de regressão não paramétrica RLWRS (Robust Locally Weighted Regression Smooth) é um método de suavização desenvolvido por Cleveland (1979). A regressão RLWRS pode ser utilizada tanto para mostrar a relação entre duas variáveis que pode ser não linear, quanto para remover o efeito de uma variável explicativa sobre uma variável dependente (HIPEL e MCLEOD, 1994).

Para cada ponto (x_i, y_i) , define-se uma vizinhança (x_k, y_k) que será utilizada para gerar um polinômio baseado em mínimos quadrados ponderados. Os parâmetros do polinômio traçado são estimados com base na técnica de suavização local LOESS, que atribui maior peso aos pontos mais próximos de (x_i, y_i) , e menores pesos aos mais distantes. O peso específico é estabelecido

por um parâmetro suavizador f . Segundo Hipel e McLeod (1994), quando não há certeza sobre qual f utilizar, o valor 0,5 frequentemente produz bons resultados, e foi adotado neste estudo.

Se uma tendência na vazão for detectada pelo método de Mann-Kendall, a regressão RLWRS entre a vazão e o tempo é feita, e a tendência é retirada ao se trabalhar com os resíduos da curva de regressão, que correspondem à diferença entre os valores de vazão e os valores da regressão RLWRS. A série formada por esses resíduos foi denominada “vazão sem tendência” (VST).

3.5.1.1.3 Teste de dependência entre a vazão e o parâmetro.

A técnica de regressão RLWRS e o teste de correlação de Kendall, descrito em Hipel e McLeod (1994), foram utilizados respectivamente para observar e detectar a presença de uma possível correlação entre a série de vazão sem tendência e a série tratada de cada parâmetro.

A dependência entre a vazão e o parâmetro foi considerada significativa caso o p-valor do teste de correlação de Kendall (τ) fosse menor que 0,05 (nível de significância de 5%). Nos casos de correlação significativa, a dependência da vazão foi retirada ao se trabalhar com o residual da RLWRS entre os valores de vazão sem tendência e a série tratada de cada parâmetro. A série formada por esses resíduos foi denominada “parâmetro ajustado à vazão (PAV)”.

Portanto, a série final do parâmetro não contém os efeitos das tendências da vazão, e tampouco da dependência parâmetro-vazão.

3.5.1.1.4 Teste de sazonalidade

Para verificar a existência de sazonalidade na série final de cada parâmetro, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis (KRUSKALL e WALLIS, 1952; HIPEL e MCLEOD, 1994), além do método gráfico de Box-Plot (HIPEL e MCLEOD, 1994).

O teste de Kruskal-Wallis é um teste não paramétrico que verifica se diferentes amostras independentes seguem a mesma distribuição, e pode ser empregado para avaliar se uma série temporal é ou não sazonal.

Caso a hipótese nula H_0 do teste de Kruskal-Wallis não seja rejeitada, os dados não apresentam sazonalidade; já a ocorrência da hipótese alternativa H_1 indica que os dados são sazonalizados. Considerando um nível de significância de 5%, a hipótese nula é rejeitada caso a probabilidade associada ao valor observado (p-valor) da estatística de Kruskal-Wallis seja menor que 0,05.

3.5.1.1.5 Teste de tendência

Para as séries finais dos parâmetros que não apresentaram sazonalidade, foi aplicado o teste estatístico de Mann-Kendall (MK) para verificar a presença de tendência dos dados. Já quando a presença da sazonalidade foi observada, fez-se uso do teste de Mann-Kendall Sazonal (MKS).

O teste não paramétrico de Mann-Kendall Sazonal é uma modificação do teste de Mann Kendall (MK), apresentada em Hirsch et al. (1982), e aprimorada em Hirsch e Slack (1984). Os dados são agrupados dentro de blocos sazonais e, a partir de um procedimento de hierarquização, são testados quanto à tendência dentro de cada bloco (GROPPO et al., 2006). É um teste robusto à presença de dependência serial.

Para um nível de significância de 5%, a hipótese nula de ausência de tendência (H_0) não é rejeitada quando o p-valor relacionado à estatística S' do teste sazonal for maior que 0,05. Caso contrário, é constatada a presença de uma tendência significativa. Valores positivos de S' indicam uma tendência positiva, e valores negativos de S' indicam tendência de redução.

3.5.1.2 Estimativa da magnitude da tendência

O coeficiente de regressão de Sen's Slope (SEN, 1968), utilizado em trabalhos como os de Yu et al.(1993), Groppo et al.(2006) e Bouza-Deaño et al.(2008), foi aplicado para estimar a magnitude da tendência das séries a partir dos valores médios anuais das séries finais dos parâmetros. O método foi brevemente descrito no item 3.4.1.3.

3.5.1.3 Teste de ruptura das séries

A ocorrência de uma mudança brusca na série histórica dos parâmetros pode ser detectada pelo teste de Pettitt, descrito no item 3.4.1.2. O teste foi aplicado sobre os valores médios anuais das séries originais de cada parâmetro.

3.5.2 Análise de correlação

O teste de correlação de Kendall (τ) foi aplicado para analisar se o comportamento das concentrações dos parâmetros de qualidade foi significativamente influenciado pelo crescimento da área colhida de cana-de-açúcar. Dados demográficos também foram correlacionados com os registros de qualidade, pelo fato de o crescimento populacional ser considerado um dos principais fatores de influência sobre a degradação qualitativa dos recursos hídricos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Áreas selecionadas para o estudo

De acordo com os critérios adotados, a indisponibilidade de dados históricos com séries de vazão maiores que 15 anos em grande parte das estações monitoradas restringiu as regiões de estudo, além de muitas séries apresentarem falhas por falta de leituras em alguns períodos.

A seleção de uma região cuja bacia fosse drenada por uma área inferior a 500 km² foi dificultada pelo fato de as séries históricas mais longas serem referentes ao monitoramento de cursos d'água que drenam bacias maiores que 500 km². Rios em bacias de menor porte apresentam séries menores que 20 anos, com falhas superiores a 10% em seus dados, que prejudicam a análise das variáveis hidrológicas.

As faixas percentuais indicadas nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 representam a relação de área colhida de cana-de-açúcar com a área de cada município, nos anos de 1980, 1993, 2000, e 2010, respectivamente. A numeração de 1 a 22 nos mapas corresponde à divisão do estado de São Paulo em UGRHIs, cujos nomes são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Denominação das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

UGRHI	Nome	UGRHI	Nome
1	Mantiqueira	12	Baixo Pardo/Grande
2	Paraíba do Sul	13	Tietê/Jacaré
3	Litoral Norte	14	Alto Paranapanema
4	Pardo	15	Turvo/Grande
5	Piracicaba/ Capivari/ Jundiaí	16	Tietê/Batalha
6	Alto Tietê	17	Médio Paranapanema
7	Baixada Santista	18	São José dos Dourados
8	Sapucaí/Grande	19	Baixo Tietê
9	Mogi Guaçu	20	Aguapeí
10	Tietê/Sorocaba	21	Peixe
11	Ribeira de Iguape/Litoral	22	Pontal do Paranapanema

Fonte: ANA.

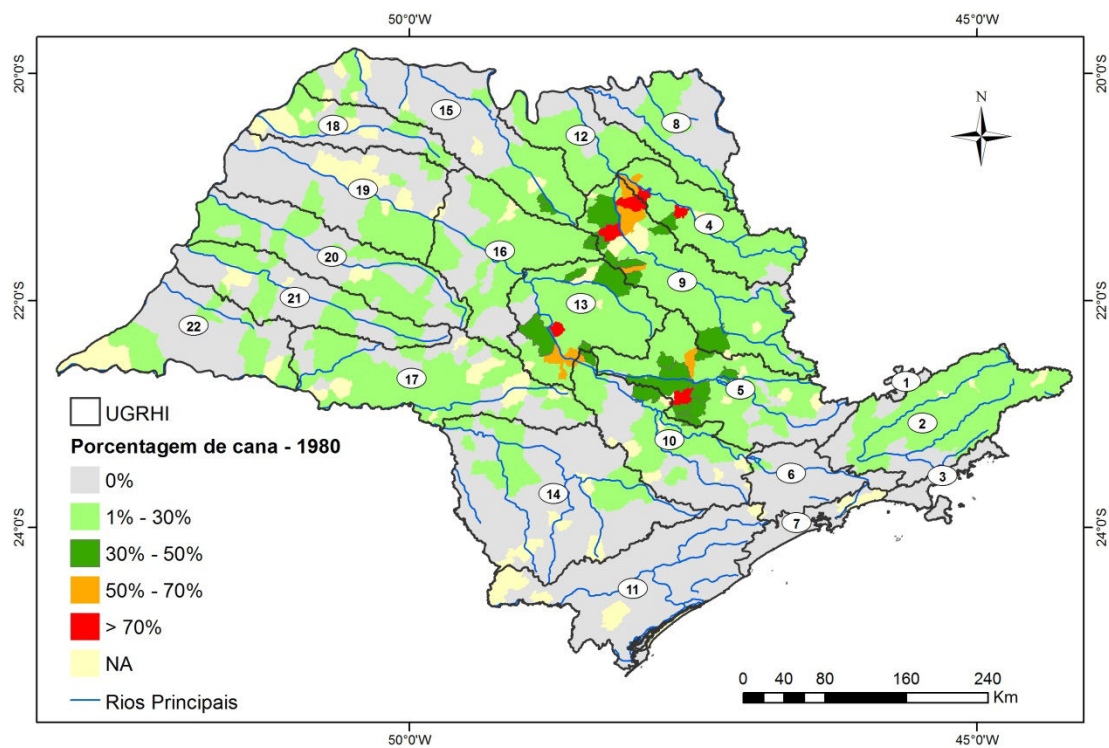


Figura 4.1. Relação entre a área de cana colhida em 1980 por área do município.

*NA: Municípios não existentes em 1980.

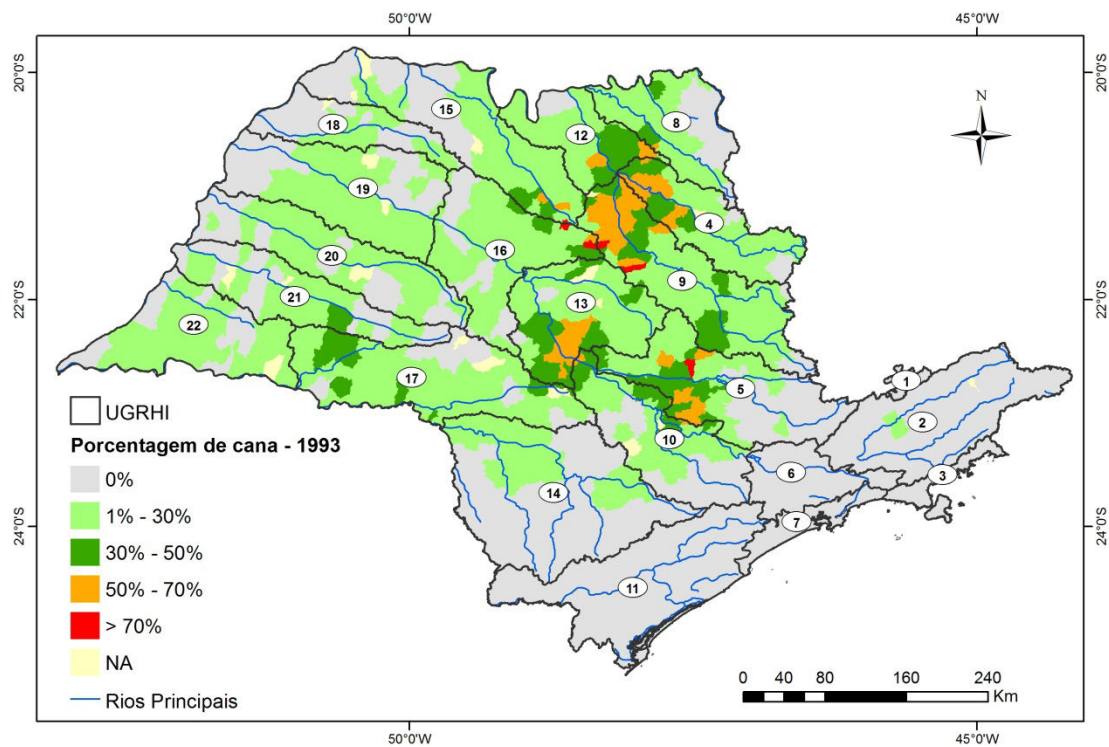


Figura 4.2. Relação entre a área de cana colhida em 1993 por área do município.

*NA: Municípios não existentes em 1993.

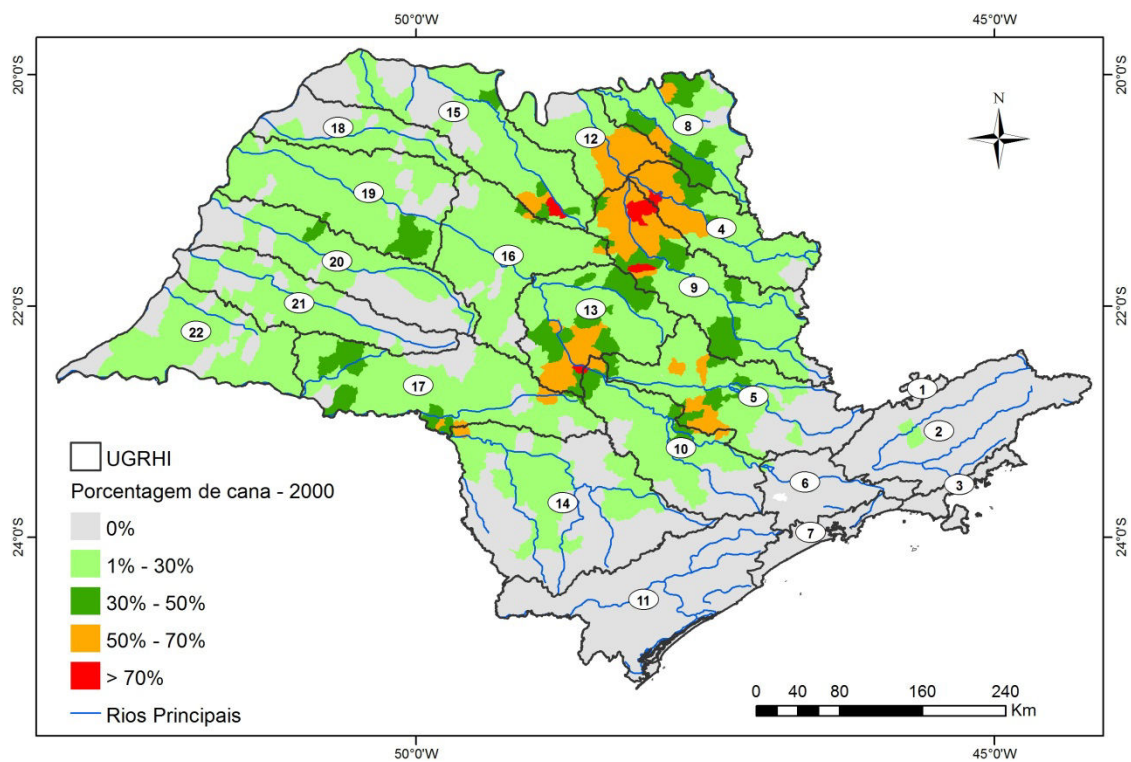


Figura 4.3. Relação entre a área de cana colhida em 2000 por área do município.

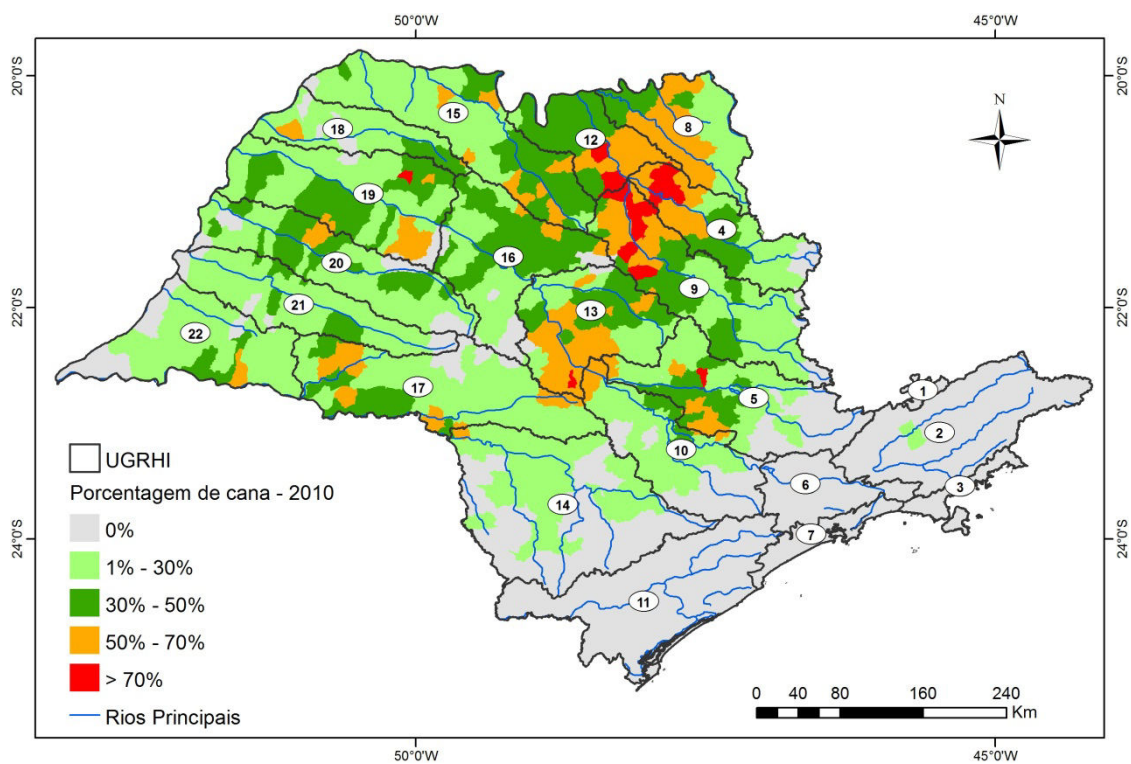


Figura 4.4. Relação entre a área de cana colhida em 2010 por área do município.

Observa-se que as Unidades de Gerenciamento Pardo, Mogi Guaçu, Tietê-Jacaré, e Baixo-Pardo/Grande abrangem as regiões com maior crescimento de colheita da cana ao longo dos anos, nas quais alguns municípios apresentam faixas de 1 a 30% em 1980, a 50 - 70%, ou até maiores que 70% em 2010. Na região oeste do estado, principalmente nas áreas compreendendo as UGRHIs do Baixo Tietê e Aguapeí, também houve expansão canavieira nas últimas décadas. A UGRHI do Piracicaba-Capivari-Jundiaí não foi caracterizada por uma expansão significativa como as demais unidades citadas anteriormente, pois os municípios que a compõe já apresentavam grande densidade canavieira desde a década de 1980 e, com o passar dos anos, alguns até mostraram redução em sua área de cana colhida.

A partir das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 foram selecionadas para a análise:

- Região de Jaú, cujos efeitos das atividades antrópicas se dão sobre o Rio Jaú. Segundo os critérios de seleção apresentados na seção 3.1, essa foi a bacia de menor área de drenagem (417 km²) possível para análise das séries de vazão.
- Regiões dos municípios de Pontal e Ribeirão Preto, com áreas de drenagem 12.445 km² e 10.679 km², respectivamente, cujo impacto se dá sobre o Rio Pardo.

A Figura 4.5 mostra a localização dos municípios em que estão os pontos de monitoramento de vazão analisados.

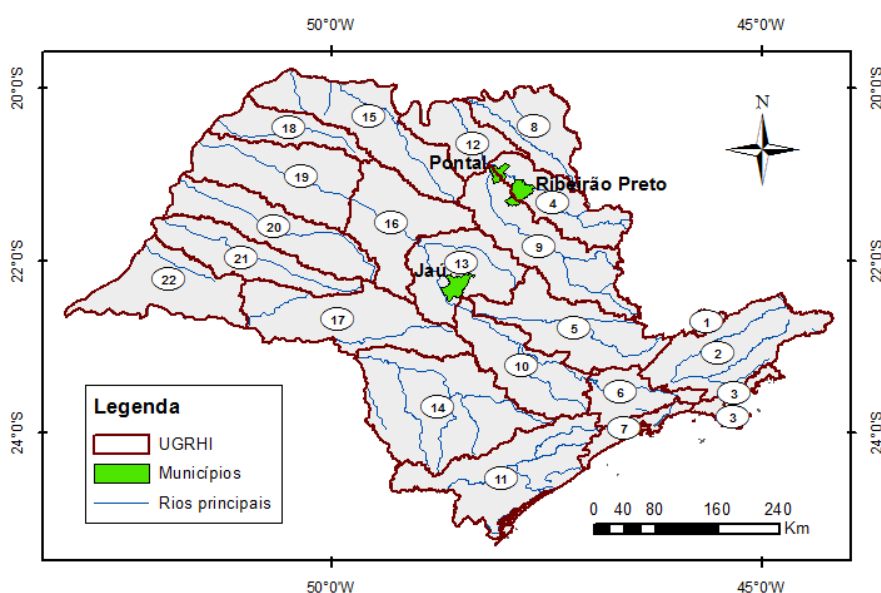


Figura 4.5. Municípios com vazões monitoradas selecionadas para análise.

4.2 Avaliação das séries de vazão e precipitação

A análise dos dados brutos de precipitação e vazão, dos resultados dos testes estatísticos e dos coeficientes de recessão do fluxo base é apresentada a seguir, para cada região.

4.2.1 Região de Jaú

Na região de Jaú, as análises do comportamento das chuvas foram feitas tanto para a precipitação total média na bacia do Rio Jaú quanto para os dados dos postos pluviométricos separadamente. Como o comportamento dos dados de chuva calculada na bacia a partir das ferramentas do programa ArcGis é similar ao das chuvas pontuais, as séries de vazão foram comparadas principalmente com a chuva na bacia.

A distribuição dos valores médios da vazão e da precipitação total na bacia do Rio Jaú entre os anos de 1982 a 1999 pode ser observado na Figura 4.6. A normalização e a média móvel de quatro anos para os mesmos valores são mostrados na Figura 4.7. Os valores médios para as séries de vazão e precipitação anual durante todo o período foi de $6,54 \text{ m}^3/\text{s}$, e $1484,1 \text{ mm}$, respectivamente.

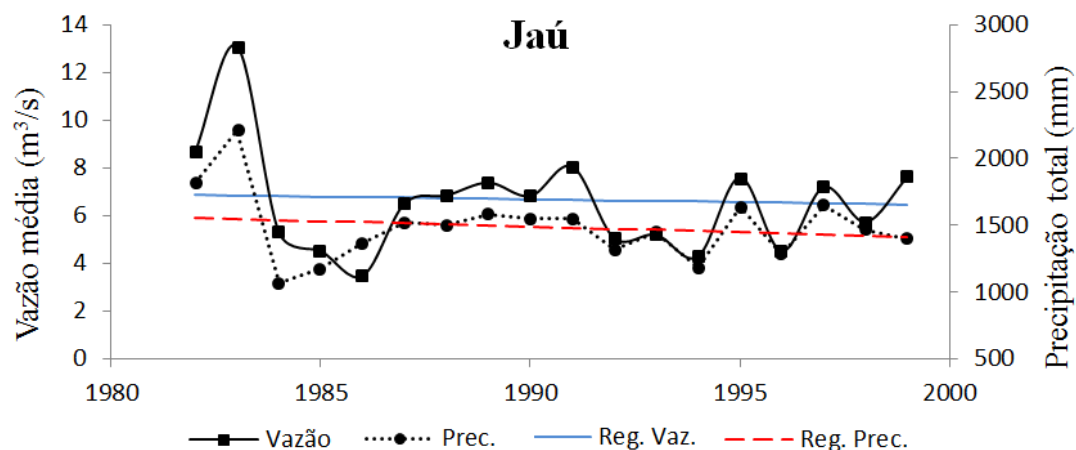


Figura 4.6. Vazão média, precipitação total anual média na bacia do Rio Jaú, e respectivas retas de regressão.

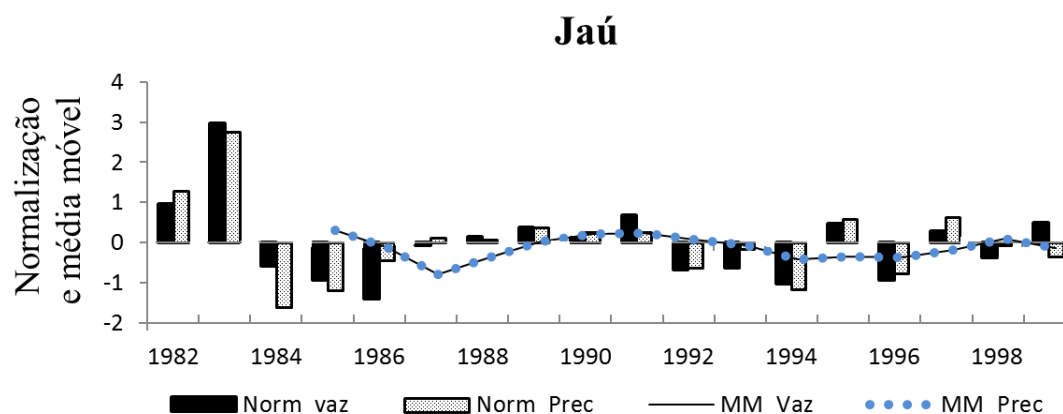


Figura 4.7. Normalização e média móvel de quatro anos da vazão média e precipitação total média anual na bacia do Rio Jaú.

O alto índice de chuvas em 1983, também observado nas demais regiões de Pontal e Ribeirão Preto, coincide com o registro do El Niño 1982-1983, fenômeno que amplia os volumes de chuva no estado de São Paulo (SOLER et al., 2010; NUNES et al., 2000).

Pode-se observar que ambas as séries apresentam comportamento semelhante ao longo do tempo, demonstrando a forte influência da precipitação sobre a vazão do rio, confirmada pelos resultados muito semelhantes de média móvel de quatro anos para as duas séries, como mostra a Figura 4.7.

As linhas traçadas na Figura 4.6 correspondem às regressões obtidas a partir do estimador de Sen's slope, alternativa não paramétrica à regressão linear. Ambas as séries anuais seguem uma tendência negativa semelhante, porém sem grandes alterações, como também pode ser notado pelas médias móveis e normalizações que não apresentaram variações significativas em torno de zero. As séries tampouco indicaram possíveis tendências de aumento ou decréscimo dos valores no período estudado.

A Tabela 4.2 mostra os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall (MK) para a vazão média e para a precipitação total em cada estação de chuva, assim como para a precipitação total média na bacia do Rio Jaú, em base mensal, anual e sazonal.

Tabela 4.2. Valores da estatística Z do teste de MK para as estações da região de Jaú.

Período	Vazão	Precipitação			
	62742000 (1982 a 1999)	Prec. Bacia (1982 a 1999)	2248012/036 (1982 a 1999)	2248016 (1982 a 1999)	2248079 (1985 a 1999)
JAN	0,08	0,15	0,08	0,83	0,89
FEV	0,15	0,61	0,08	0,04	0,89
MAR	-0,08	-1,14	-0,23	-0,98	-0,79
ABR	-0,83	-1,36	-0,91	-1,29	-0,69
MAI	-0,83	-0,68	0,23	-0,98	-1,68**
JUN	-0,08	0,23	0,18	0,08	0,49
JUL	-0,98	-0,61	-0,65	-0,42	-1,09
AGO	-2,42*	-0,84	-0,97	-0,88	-0,40
SET	-0,91	0,15	0,00	0,23	0,79
OUT	-0,61	0,98	0,83	0,98	2,08*
NOV	-1,14	-0,23	0,00	-0,23	-0,49
DEZ	-1,44	-0,91	-0,91	-0,61	-1,29
Anual	-0,23	-0,15	-0,30	-0,38	-0,59
DJF	0,30	0,23	0,08	0,30	-0,10
MAM	-0,68	-1,36	-0,83	-1,67**	-1,58
JJA	-1,59	-1,21	-0,98	-1,48	-0,40
SON	-0,15	0,00	0,00	0,00	0,69

*e**: Tendência significativa para intervalo de confiança de 95% ($\alpha_0=0,05$) e 90% ($\alpha_0=0,1$), respectivamente.

Todas as estações apresentaram tendências anuais negativas, porém não significativas. Os valores anuais negativos da estatística Z foram principalmente influenciados pelas tendências negativas dos meses de outono (MAM) e inverno (JJA). Para a série de vazão entre 1982 e 1999, apenas verificou-se tendência significativa para o mês de agosto, negativa, com valor de Z de -2,42 para um intervalo de confiança de 95%.

A estação de precipitação 2248079 entre 1985 e 1999 apresentou tendências significativas para os meses de maio ($\alpha_0=0,1$) e outubro ($\alpha_0=0,05$). Nesse caso, dois extremos podem ser observados: o valor de Z de -1,68 indica que o mês de maio, caracterizado pelo clima seco, tendeu a ficar mais seco ao longo dos anos em virtude da redução dos índices de chuva. No entanto, para a série do mês de outubro, úmido, em que a estatística Z é dada por 2,08, a ocorrência de chuvas aumentou e o mês tendeu a ficar mais úmido. Os resultados dessa estação, mesmo analisados em um intervalo de tempo menor, concordaram com as tendências positivas e negativas, porém não significativas, das demais estações pluviométricas.

De maneira geral, os resultados de Z para a vazão média e precipitação total média na bacia tiveram comportamentos semelhantes, com tendências de maior amplitude negativa, principalmente no outono e inverno (período estiagem), e tendências de baixas amplitudes positivas para janeiro e fevereiro, na maioria das vezes não significativas.

Tanto a série de vazão média anual quanto as de precipitações totais médias anuais na bacia não apresentaram tendências significativas para os testes de Mann-Kendall sequencial e Pettitt. Os resultados de ambos os testes são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Resultados dos testes de MKseq e Pettitt para as séries hidrológicas em escala anual entre 1982 e 1999, na região de Jaú.

Teste	Vaz. 62742000	Prec. Bacia	Prec. 2248036/012	Prec. 2248016
Mkseq	T ns MB = ns	T ns MB = ns	T ns MB = ns	T ns MB = ns
Pettitt	MB = ns p-valor = 0,74	MB = ns p-valor = 0,74	MB = ns p-valor = 0,74	MB = ns p-valor = 0,74

T: Tendência; ns: não significativo a $\alpha_0=0,05$; MB: ano de ocorrência de mudança brusca.

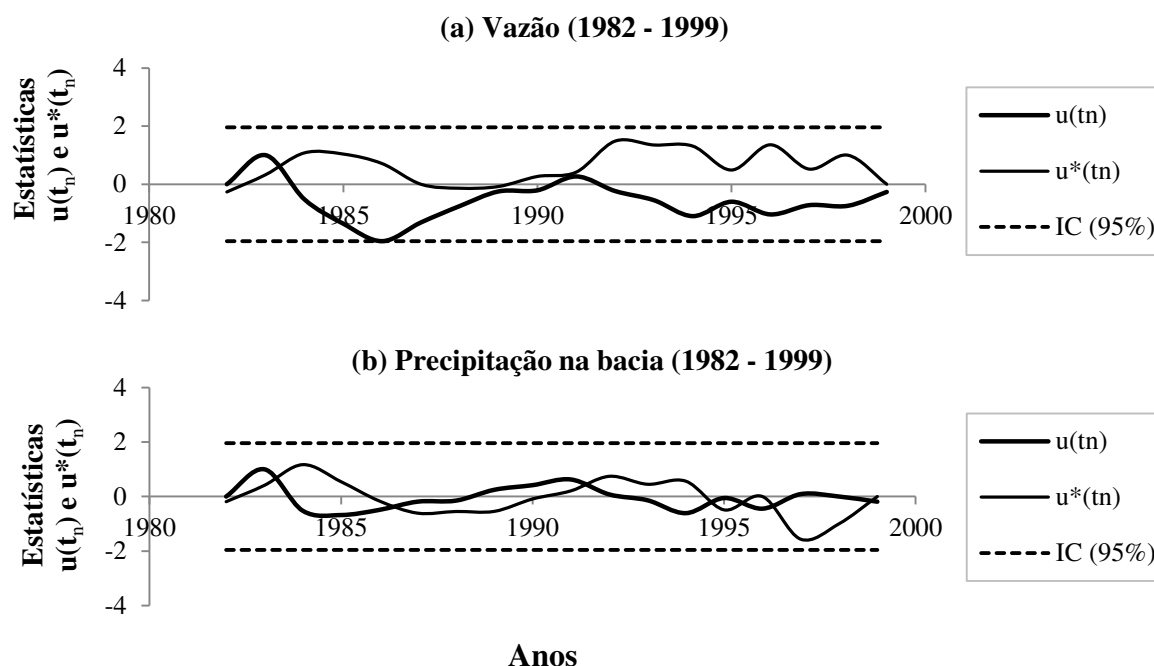


Figura 4.8 (a) e (b). Estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ de MKseq para a série de vazões mensais anuais do Rio Jaú, e precipitação total média anual na bacia.

A análise gráfica das estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ de MKseq para a série de vazão, representadas pela Figura 4.8(a), mostra que a estatística $u(t_n)$ não ultrapassou os limites correspondentes ao intervalo de confiança (IC) de 95% entre 1982 e 1999. Apesar do cruzamento das séries entre 1983 e 1984, não é possível afirmar que este momento indica o início de uma tendência, ou uma mudança brusca nas médias. Entre 1984 e 1987 pode-se observar um pequeno decréscimo da vazão, seguido de um aumento, porém nenhum resultado foi estatisticamente significativo. Para as estações de chuva, muitos cruzamentos de $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ foram observados, e os resultados também não foram significativos. Os resultados dos testes de Pettitt confirmam a ausência de mudanças bruscas nas séries estudadas.

O estimador Sen's Slope foi empregado para quantificar a mudança por unidade de tempo da vazão média mensal, bem como a precipitação total mensal na bacia ao longo dos anos. O programa XLSTAT fornece os resultados para este estimador, juntamente com os resultados do teste de Mann Kendall. Caso seja detectada a presença de uma tendência significativa pelo teste de Mann-Kendall, supondo que essa seja linear, a magnitude da tendência é dada pelo coeficiente de Sen. Considerando a significância de MK, apenas o coeficiente do mês de agosto da vazão pode ser considerado significativo a 95% de confiança, com taxa decrescente de $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ por ano. A Figura 4.9 mostra que as magnitudes de tendência da vazão têm comportamento semelhante ao das magnitudes das tendências de precipitação. Quando os coeficientes de precipitação são positivos, as magnitudes das tendências de vazão também são positivas, ou menos negativas.

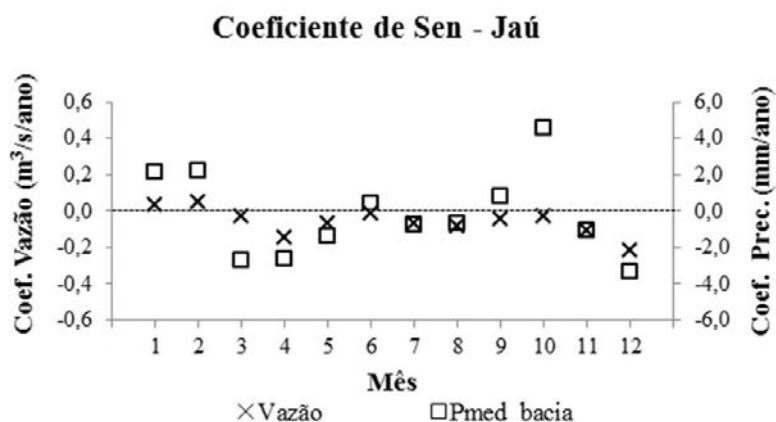


Figura 4.9. Estimador de Sen's Slope para a vazão média mensal e precipitação média mensal na bacia do Rio Jaú.

O coeficiente de recessão do fluxo base para o Rio Jaú também não apresentou tendência significativa. A Figura 4.10 apresenta os valores de α calculados pelo modelo exponencial de Maillet. A regressão linear foi traçada tanto considerando o valor de α para todos os anos entre 1982 e 1999 ($\alpha(t)$), quanto sem considerar o valor de α para 1983 ($\alpha^*(t)$), cujo alto índice de chuvas nos períodos mais secos pode ter gerado incertezas sobre os valores obtidos. Para ambos os casos os valores oscilam ao longo do tempo, sem apresentar mudanças consideráveis.

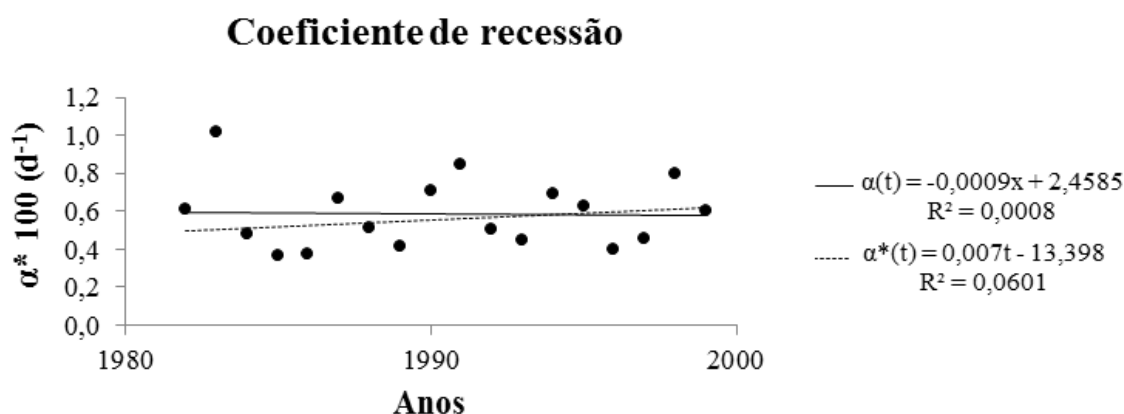


Figura 4.10. Comportamento do coeficiente de recessão (α) para o Rio Jaú ao longo dos anos.

4.2.2 Região de Pontal

Os valores de vazão média anual e precipitação total anual entre 1974 e 2011 para as estações da região de Pontal são apresentados na Figura 4.11. A vazão média do Rio Pardo na estação de Pontal, para todo o período estudado, foi de 213 m³/s, e o coeficiente de Sen para essa série foi de 0,43 m³/s por ano, indicando um ligeiro aumento da vazão com o tempo. Diferentemente da região de Jaú, os postos de precipitação foram analisadas pontualmente, sem o cálculo da precipitação média na bacia. Dentre os postos pluviométricos avaliados, 2048033 foi o único no qual os dados estão disponibilizados de 1974 a 2011, coincidindo com o período completo de análise da vazão. O valor médio da precipitação total nesse posto foi de 1520 mm por ano.

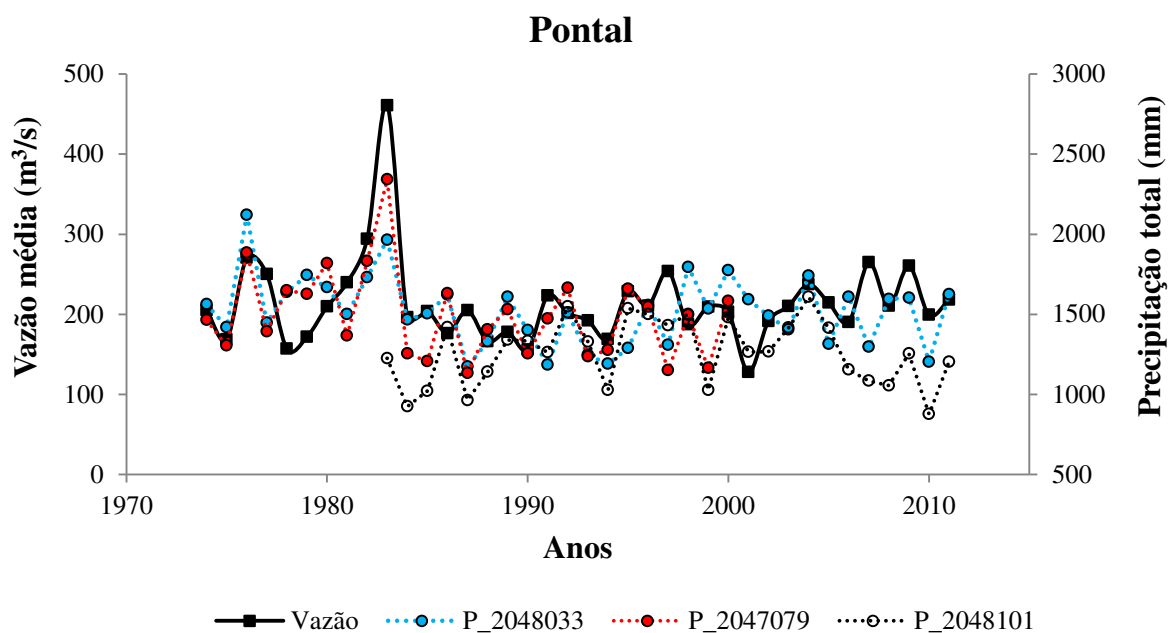


Figura 4.11. Vazão média e precipitação total anual das estações da região de Pontal.

Pela Figura 4.12 é possível observar que, embora as estações pluviométricas consideradas não tenham medições durante todo o período analisado, os dados das três estações apresentam comportamentos similares quando da normalização de seus valores.

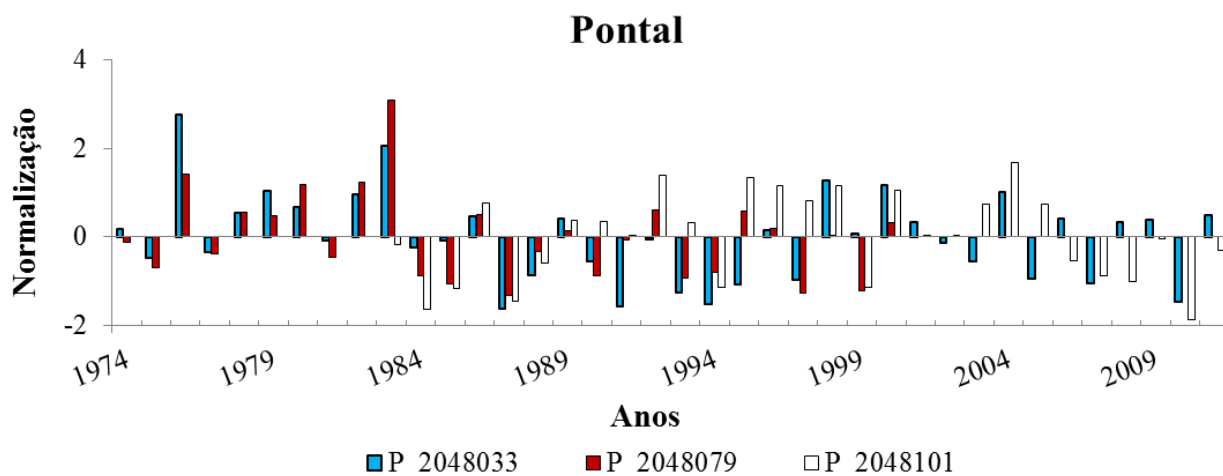


Figura 4.12. Normalização das precipitações totais de cada estação da região de Pontal.

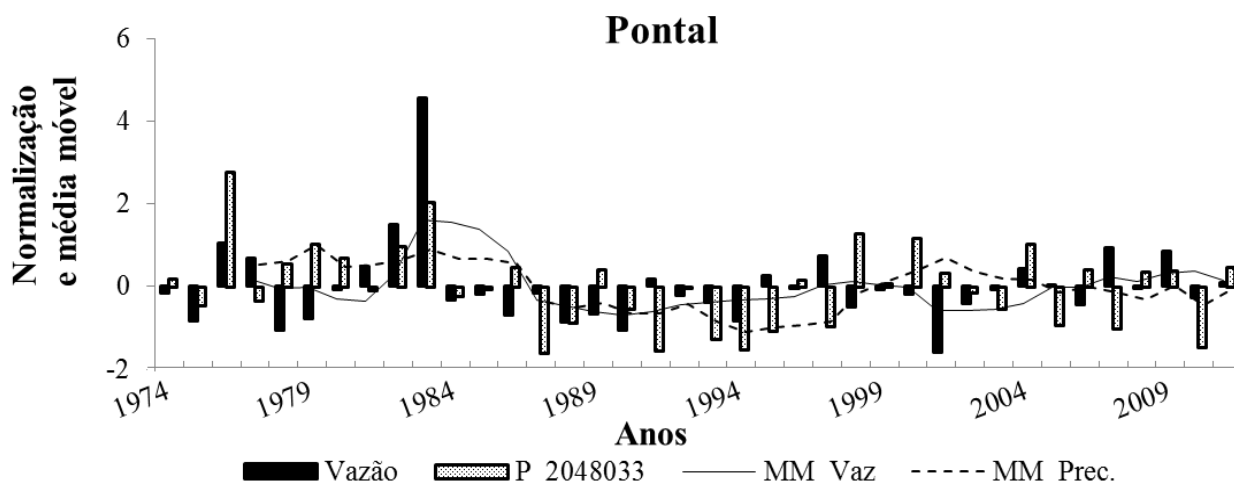


Figura 4.13. Normalização e média móvel de quatro anos da vazão média e precipitação total anual da estação 2048033.

De modo geral, é possível observar o reflexo das alterações dos valores de precipitação sobre as vazões, principalmente até 1996, como mostra também a Figura 4.13, na qual, das estações pluviométricas, apenas a 2048033 é reproduzida. Embora a partir de 1997 os valores normalizados de vazão não sigam o padrão da estação 2048033, nota-se que a normalização para os valores de vazão apresentam pouca variabilidade ao longo dos anos, principalmente a partir de 1984, após o evento do El Niño 1982-1983.

Os resultados do teste estatístico de Mann-Kendall (MK) para vazão média entre 1974 e 2011 foram significativos apenas para o mês de março, ao nível de confiança de 90%, cujo valor da estatística Z de 1,68 indicou tendência crescente ao longo dos anos. Tendências positivas foram observadas entre fevereiro e maio para as séries de vazão, e para os demais meses as amplitudes da estatística Z diminuem. Na escala mensal, não foram detectadas tendências significativas para as séries de precipitação. No entanto, tendência negativa a 90% foi obtida para série sazonal SON (primavera) para a estação de precipitação 2048033. Os resultados do teste de Mann-Kendall para a região de Pontal são apresentados na Tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4. Valores da estatística Z do teste de MK para as estações da região de Pontal.

Período	Vazão	Precipitação		
	61855000 (1974 a 2011)	2048033 (1974 a 2011)	2047079 (1974 a 2000)	2048101 (1983-2011)
JAN	-0,05	0,73	0,54	-0,54
FEV	1,16	0,73	0,75	0,43
MAR	1,68**	-1,27	-0,88	0,39
ABR	0,73	-0,75	-1,42	-0,77
MAI	0,35	-0,18	0,50	-0,53
JUN	-0,05	-0,49	-0,80	1,35
JUL	-0,03	-0,74	-1,24	0,53
AGO	-0,58	0,24	-0,09	0,04
SET	-0,63	-0,55	-0,04	-0,15
OUT	0,20	-0,94	-1,61	0,39
NOV	-0,43	-0,75	-0,69	1,14
DEZ	-0,87	-1,48	-0,88	0,17
Anual	0,70	-0,83	-1,17	0,02
DJF	0,40	-0,01	-0,67	0,02
MAM	0,96	-1,45	-0,83	-0,49
JJA	-0,13	-1,19	-0,71	0,41
SON	-0,08	-1,71**	-1,17	0,73

*e**: Tendência significativa para intervalo de confiança de 95% ($\alpha_0=0,05$) e 90% ($\alpha_0=0,1$).

Os testes de Mann-Kendall sequencial e Pettitt também não indicaram tendências significativas nem mudanças abruptas nas séries anuais de vazão entre 1974 e 2011. A Tabela 4.5 mostra os resultados de ambos os testes, e os gráficos das estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ de MKseq são dados pelas Figuras 4.14 (a), (b), (c), (d).

Tabela 4.5. Resultados dos testes de MKseq e Pettitt para as séries hidrológicas em escala anual entre 1974 e 2011, e 1984 e 2011, na região de Pontal.

Testes	(1974-2011)		(1984-2011)	
	Vaz. 61855000	Prec. 2048033	Vaz. 61855000	Prec. 2048033
Mkseq	T ns	T(-): 1993	T (+): 2009	T ns
	MB = ns	MB = 1983	MB= 2003	MB = ns
Pettitt	MB = ns	MB = ns	MB = ns	MB = ns
	p = 0,70	p = 0,18	p = 0,29	p = 0,16

T(+/-); ano: Tendência significativa (positiva/ negativa); ano que T se torna significativa. MB: ano de ocorrência de mudança brusca. ns: não significativo a $\alpha_0=0,05$.

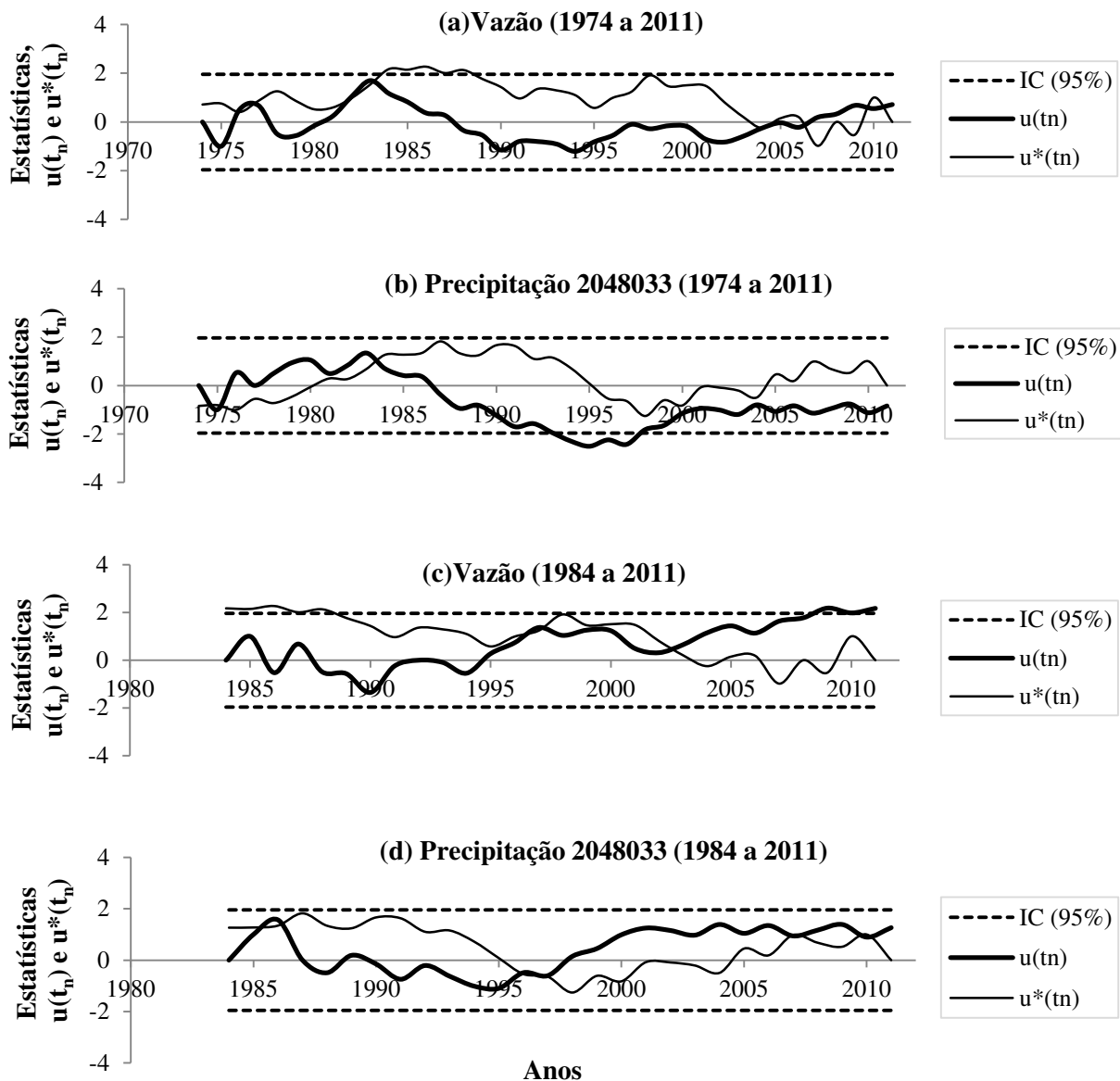


Figura 4.14 (a), (b), (c), (d). Estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ de MKseq para as séries de vazões mensais anuais e precipitação (2048033) de 1974 a 2011, e de 1984 a 2011 em Pontal.

De acordo com a Figura 4.14 (b), para a estação pluviométrica 2048033 e com a série completa entre 1974 e 2011, uma tendência negativa foi detectada entre 1983 e 1995, tornando-se significativa em 1993; porém após 1995 os valores da estatística $u(t_n)$ começam a aumentar. Embora os resultados para a vazão não tenham sido significativos, o comportamento da estatística $u(t_n)$ também apresentou período decrescente de vazão entre 1983 e 1994, seguido de

período crescente a partir de então. Como os altos valores de vazão e precipitação em 1983 influenciaram os resultados de MKseq, o teste também foi aplicado entre 1984 a 2011. Neste caso, o comportamento da vazão também foi semelhante ao da precipitação, como mostram as Figuras 4.14 (c) e (d), porém uma tendência positiva significativa foi observada apenas na série de vazão.

Os resultados do estimador Sen's Slope para as séries hidrológicas mensais da estação de Pontal são apresentados na Figura 4.15. Mesmo considerando todas as estações de precipitação com períodos de análise distintos, estas seguem padrões similares com coeficientes positivos em janeiro e fevereiro (exceto a estação 2048101), que se reduzem em março e abril; nos meses mais secos do ano a taxa de variação é praticamente nula. As magnitudes de tendência de vazão, embora não significativas, exceto para março, apresentam comportamento semelhante ao das magnitudes das séries de precipitação.

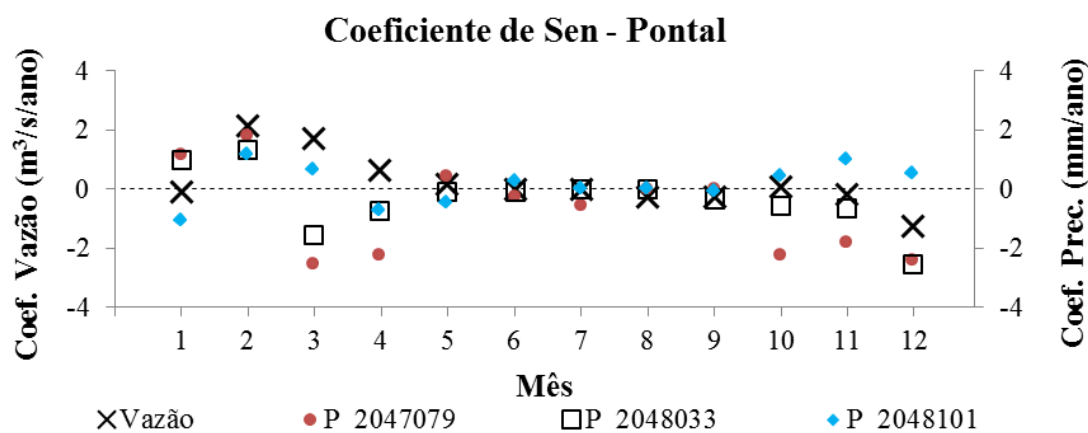


Figura 4.15. Estimador de Sen's Slope para a vazão média mensal e precipitações totais mensais na região de Pontal.

A disposição dos coeficientes de recessão do fluxo base ao longo dos anos é apresentada na Figura 4.16. Os hidrogramas de alguns dos anos compreendidos entre as décadas de 1970 e 1980 foram marcados por períodos chuvosos entre o outono e inverno, o que interferiu nos valores de alfa calculados. Portanto, a Figura 4.16 apresenta uma reta de regressão linear considerando todos os coeficientes de todos os anos ($\alpha(t)$), e outra desconsiderando os anos de 1976, 1978, 1979, 1983 ($\alpha^*(t)$). Em ambas as retas pode-se observar uma pequena redução de α ao longo dos anos, porém estatisticamente não significativa.

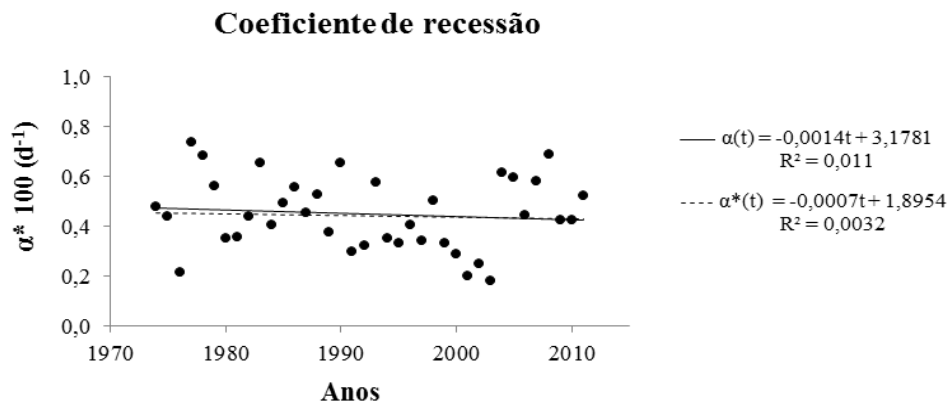


Figura 4.16. Comportamento do coeficiente de recessão para o Rio Pardo, em Pontal.

4.2.3 Região de Ribeirão Preto

As análises exploratórias dos dados de vazão média do Rio Pardo, bem como de precipitação total anual das estações localizadas na região de Ribeirão Preto, são apresentadas na Figura 4.17. O período completo de análise das séries de vazão foi de 1974 a 2011. A vazão média anual para os 37 anos foi de 188 m³/s, e o coeficiente de Sen de 0,12 m³/s por ano indica um pequeno aumento dos valores de vazão com o passar dos anos. Assim como na região de Pontal, os postos pluviométricos foram analisados pontualmente, sendo que os dados das estações pluviométricas 2147077 e 2147092 estão disponibilizados de 1974 a 2011. O valor médio de precipitação total anual foi de 1694 mm para o posto 2147092, e 1737 mm para o posto 2147077.

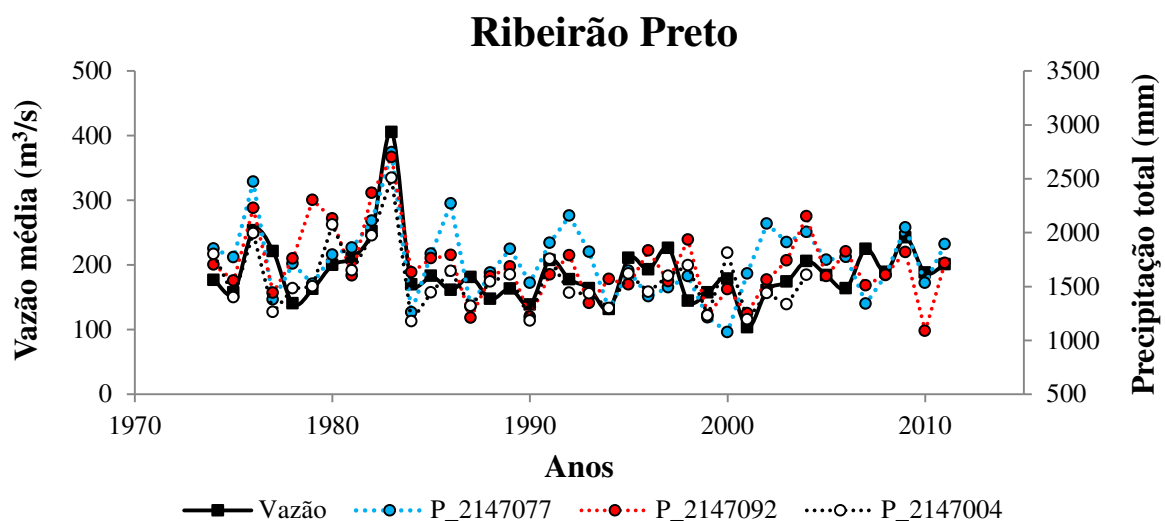


Figura 4.17. Vazão média e precipitação total anual das estações da região de Ribeirão Preto.

A Figura 4.18 ilustra a normalização e a média móvel de quatro anos dos dados da estação fluviométrica do Rio Pardo em Ribeirão Preto. Já a normalização de todas as estações pluviométricas é apresentada na Figura 4.19. A partir da análise exploratória das Figuras 4.18 e 4.19, pode-se observar que novamente o padrão dos dados de vazão tende a seguir o padrão dos dados de precipitação. Até 1983, índices maiores de chuva em todas as estações, como em 1976, 1982 e 1983, coincidem com valores mais altos da normalização da vazão. Entre 1984 e 2001, a normalização da vazão e das precipitações apresentaram resultados, em geral, negativos. A ocorrência de índices positivos a partir de 2002 coincide com o aumento das vazões que caracterizam tendência crescente, visualizada na Figura 4.18 também pela curva da média móvel da vazão para os últimos anos da série.

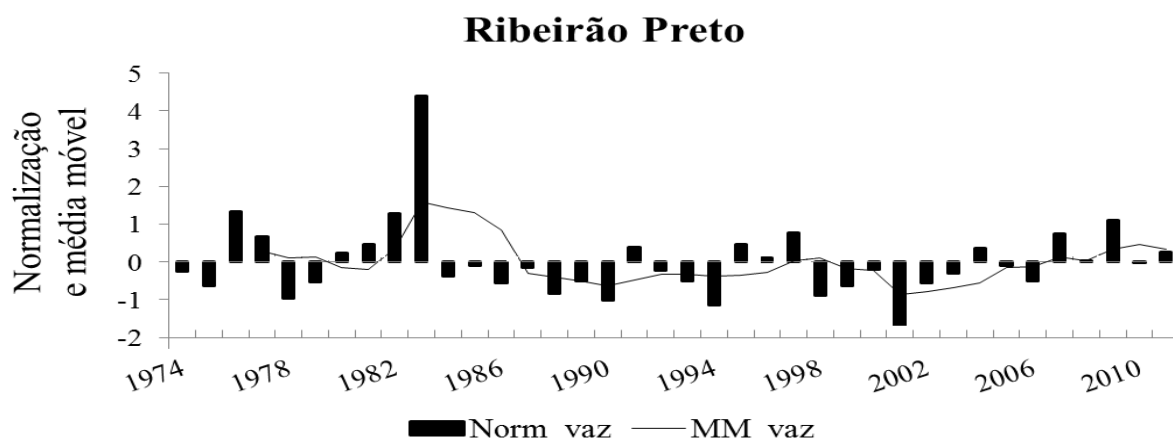


Figura 4.18. Normalização e média móvel de quatro anos da vazão média anual em Ribeirão Preto.

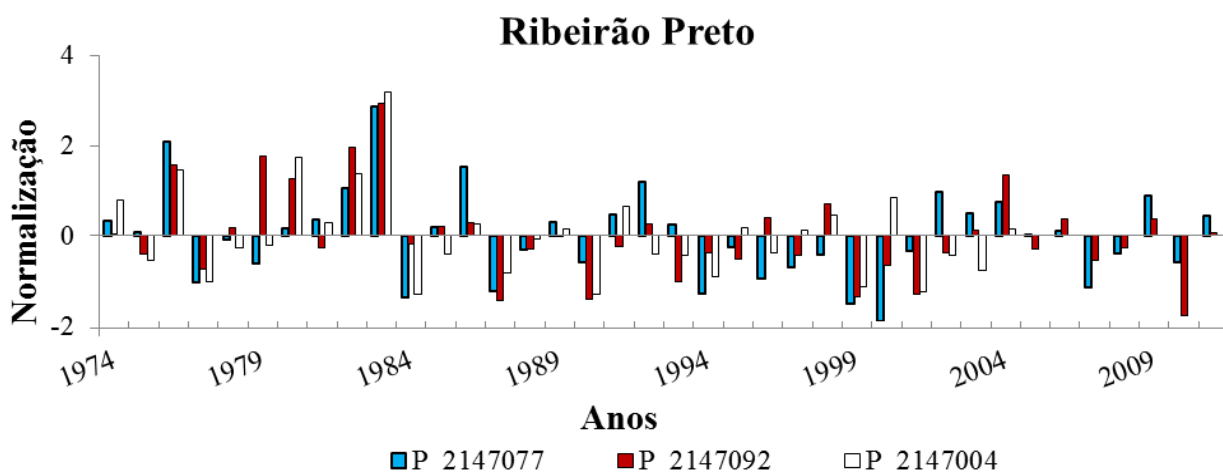


Figura 4.19. Normalização dos registros das precipitações totais no ano das estações da região de Ribeirão Preto.

A aplicação do teste de Mann-Kendall não indicou nenhuma tendência significativa para a série histórica de vazão entre 1974 e 2011, nas escalas mensal, anual ou sazonal, considerando o intervalo de confiança de 90% ou 95%. Em geral, tendências positivas foram obtidas entre janeiro e março para as séries de vazão e precipitação, e negativas para a maioria dos meses de inverno e primavera. O teste apenas forneceu tendências significativas para as estações de chuva nos meses de abril e dezembro para a estação 2147092, novembro para o posto 2147004, e em escala sazonal para a série SON de todas as estações pluviométricas. A estação 2147004 abrange um período de avaliação menor, porém os resultados da estatística dessa estação não apresentam padrões tão distintos ao dos resultados obtidos para a estação 2147092. Os resultados do teste de Mann-Kendall são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Valores da estatística Z do teste de Mann Kendall para as estações da região de Ribeirão Preto.

Período	Vazão	Precipitação		
	61834000 (1974 a 2011)	2147077 (1974 a 2011)	2147092 (1974 a 2011)	2147004 (1974-2004)
JAN	0,08	0,58	0,35	1,09
FEV	1,03	0,42	0,43	0,88
MAR	1,08	0,30	0,44	0,34
ABR	0,03	-1,40	-1,80**	-1,29
MAI	-0,33	0,05	-0,43	0,48
JUN	-1,01	-0,63	-1,13	-1,12
JUL	-0,58	-0,42	-0,88	-0,55
AGO	0,03	-0,02	-1,06	-0,77
SET	-0,25	-1,57	-1,22	-1,27
OUT	-0,33	-0,38	-0,60	-0,68
NOV	-1,33	-0,85	-0,65	-1,67**
DEZ	-1,23	-1,56	-2,69*	-1,33
Anual	0,20	-0,70	-1,26	-1,19
DJF	0,05	-0,27	-0,73	0,24
MAM	0,30	-0,69	-1,63	-0,82
JJA	-0,68	-0,72	-1,21	-1,56
SON	-0,93	-1,71**	-1,89**	-1,65**

*e**: Tendência significativa para intervalo de confiança de 95% ($\alpha_0=0,05$) e 90% ($\alpha_0=0,1$), respectivamente.

Os resultados da versão sequencial do teste de Mann-Kendall e do teste de ruptura de Pettitt para as estações com dados monitorados de 1974 a 2011, e de 1984 a 2011, são apresentados na Tabela 4.7. Para o período de 1974 a 2011, os resultados confirmaram a ausência de tendência significativa para a série anual de vazão média, como no teste de MK, e forneceram tendências negativas significativas para as séries de precipitação.

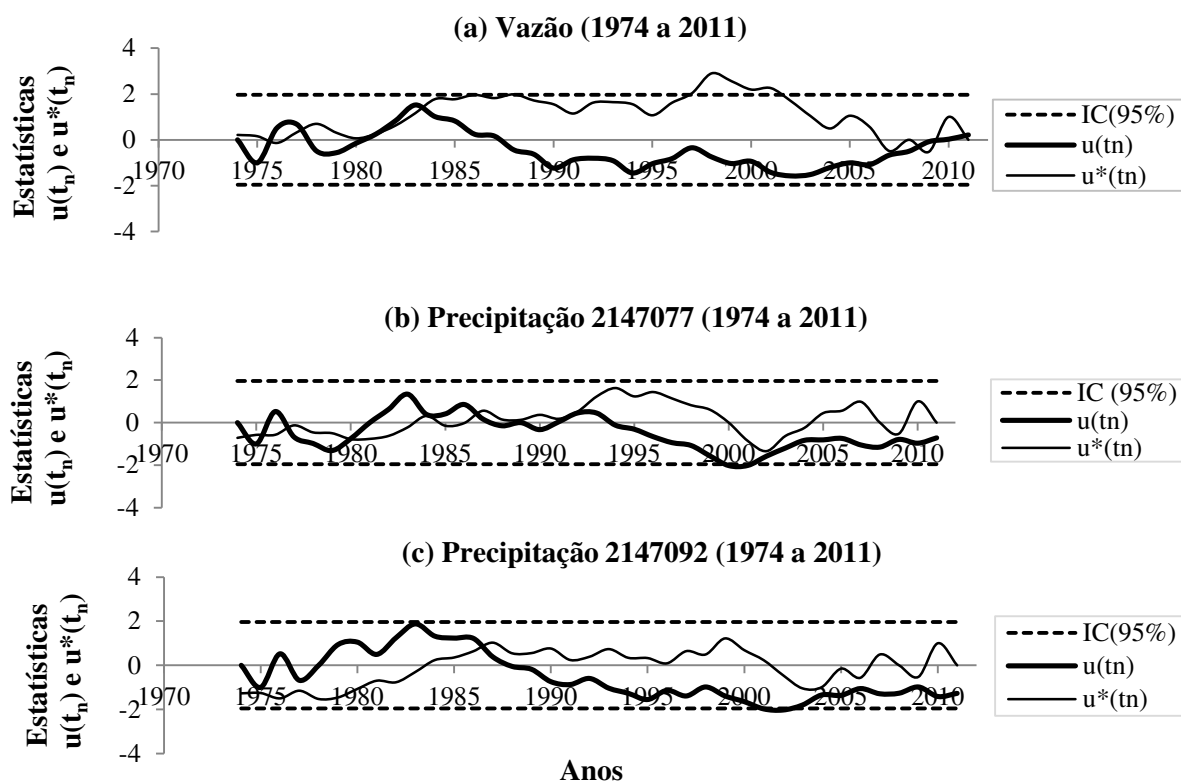
Tabela 4.7. Resultados dos testes de MKseq e Pettitt para as séries hidrológicas em escala anual entre 1974 e 2011, e 1984 e 2011, na região de Ribeirão Preto.

Teste	(1974-2011)			(1984-2011)		
	Vaz. 61834000	Prec. 2147077	Prec. 2147092	Vaz. 61834000	Prec. 2147077	Prec. 2147092
Mkseq	T ns	T(-); 2000	T(-); 2001	T ns	T ns	T ns
	MB = ns	MB = 1992	MB = 1986	MB = ns	MB = ns	MB = ns
Pettitt	MB = ns	MB = ns	MB = ns	MB = ns	MB = ns	MB = ns
	p = 0,72	p = 0,50	p = 0,11	p = 0,14	p = 0,59	p = 1,12

T(+/-); ano: Tendência significativa (positiva/negativa); ano que T se torna significativa. 'ns': não significativo a $\alpha_0=0,05$. MB: ano de ocorrência de mudança brusca.

As estatísticas $u(t_n)$, $u^*(t_n)$, e os intervalos de confiança do teste de MKseq para o período de 1974 a 2011 são apresentados na Figuras 4.20 (a), (b) e (c). As estatísticas $u(t_n)$ das séries históricas de vazão e das estações de precipitação foram caracterizadas por valores decrescentes após 1983, e crescentes a partir do início dos anos 2000.

O teste de Pettitt não gerou resultados significativos para nenhuma das séries na região de Ribeirão Preto nos períodos avaliados.



Figuras 4.20 (a), (b) e (c). Estatísticas $u(t_n)$ e $u^*(t_n)$ de MKseq para as séries de vazão mensal anual e precipitações totais mensais entre 1974 e 2011 em Ribeirão Preto, Rio Pardo.

Assim como a estação de Pontal, as magnitudes dos coeficientes de Sen das séries mensais da vazão acompanharam o padrão das séries mensais pluviométricas na região de Ribeirão Preto, como pode ser observado na Figura 4.21. Os meses com predomínio de coeficientes positivos para as precipitações coincidiram com coeficientes mais positivos da série de vazão, sendo o oposto também verificado. Entre os meses de inverno, a taxa de variação ao ano foi praticamente nula.

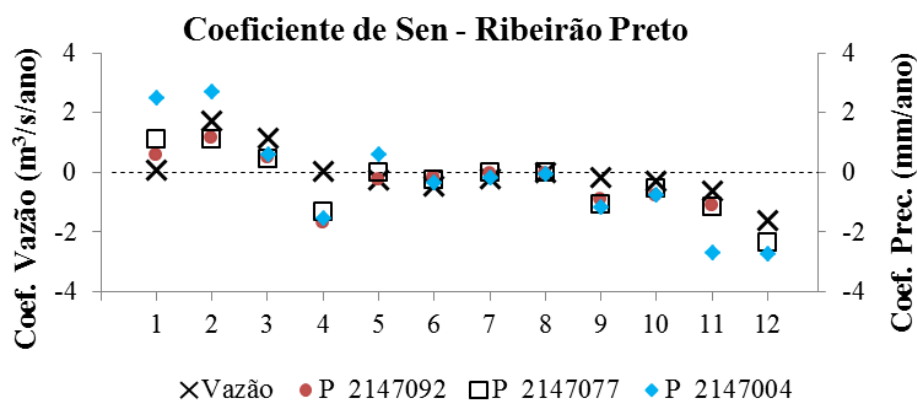


Figura 4.21. Estimador de Sen's Slope para a vazão média mensal e precipitações totais mensais das estações da região de Ribeirão Preto.

Os coeficientes de recessão do fluxo base para as vazões da estação de Ribeirão foram parecidos, e também não apresentaram tendência significativa ao longo do tempo. A Figura 4.22 mostra os valores de α , e as retas de regressão linear obtidas considerando-se todos os anos ($\alpha(t)$), e desconsiderando os anos de 1976, 1979, 1981, 1983 ($\alpha^*(t)$), nos quais a presença de diversos eventos de chuva durante o outono e inverno influenciaram os valores de α calculados.

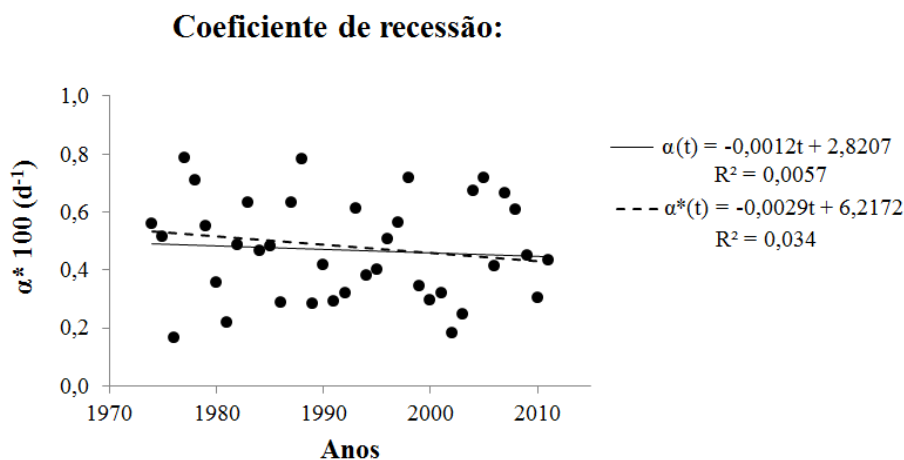


Figura 4.22. Comportamento do coeficiente de recessão para o Rio Pardo, em Ribeirão Preto.

4.3 Atividade canavieira e impactos sobre a vazão

4.3.1 Região de Jaú

A atividade canavieira na região de Jaú, como citado anteriormente, teve início nos anos 1930. O monitoramento da utilização da terra realizado pelos censos do IBGE a partir de 1950 mostra que a região foi caracterizada pela redução de pastagens e aumento de áreas de lavouras (temporárias e permanentes), como apresentado na Figura 4.23. A partir dos anos 1980, a cana-de-açúcar passou a ocupar mais de 50% das áreas de lavouras, e, desde então, se tornou a principal atividade agrícola dos três municípios nas últimas décadas.

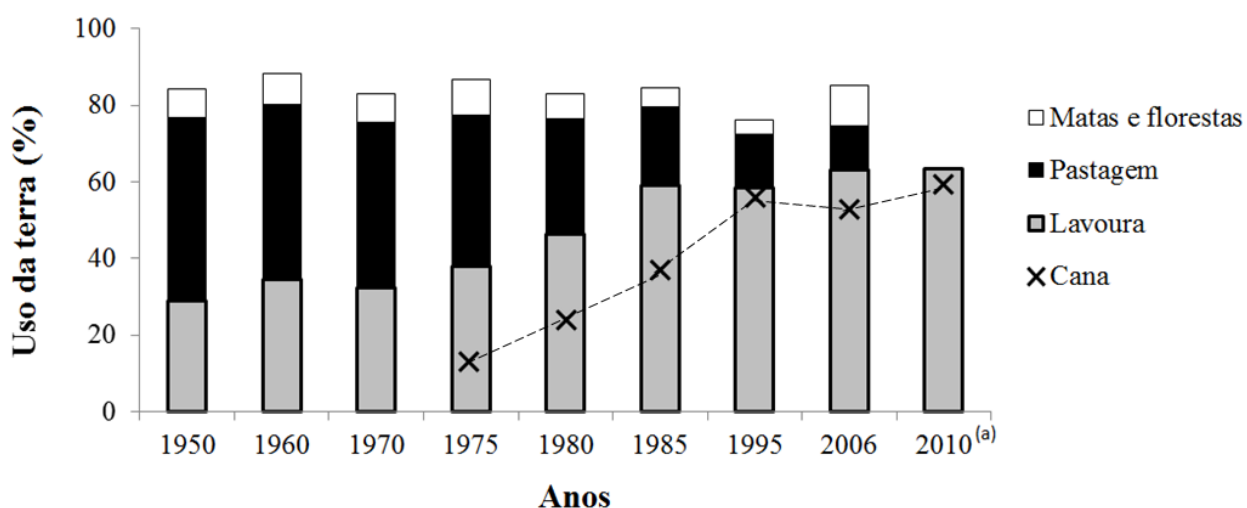


Figura 4.23. Histórico do uso da terra na área total dos três municípios da região de Jaú.

Fonte: IBGE, 2013. ^(a) Dados sobre pastagem e matas e florestas não estão disponíveis para 2010.

As informações sobre o uso da terra nas regiões tiveram como base os dados disponibilizados pelo IBGE em nível municipal. Em decorrência disso, não é possível afirmar com precisão como ocorreu a mudança do uso da terra nas áreas delimitadas para avaliação. A evolução e ocupação das terras podem ser detalhadas através do mapeamento do uso da terra baseado na interpretação visual de imagens de satélite com escala e resolução adequadas para que seja feito de forma correta.

Para a análise de correlação entre a evolução da vazão média anual e da área de cana colhida entre 1982 e 1999, dois casos foram considerados. No primeiro caso, a correlação foi feita assumindo-se que a parcela de cada município localizada dentro da sub-bacia do Rio Jaú fosse completamente ocupada por cana. Para tanto, considerou-se que 14%, 35%, e 36% do total da área colhida de cana nos municípios de Jaú, Dois Córregos e Mineiros do Tietê, respectivamente, estivessem compreendidas dentro da sub-bacia delimitada; a avaliação foi feita com o auxílio do ArcGis. Por fim, fez-se a correlação entre o somatório dessas parcelas e a vazão média anual na estação fluviométrica de Jaú. No segundo caso, a correlação foi feita considerando-se a soma de toda a área de cana colhida nos três municípios. O teste de correlação não paramétrico aplicado foi o de Kendall τ . Os resultados da estatística τ foram -0,07 (p-valor: 0,73) para o primeiro caso, e -0,10 (p-valor: 0,57) para o segundo. Portanto, em nenhuma das situações pode-se observar uma correlação significativa a um intervalo de confiança de 95%.

A evolução da área colhida de cana-de-açúcar total nos três municípios e da vazão média anual do Rio Jaú são apresentadas na Figura 4.24. Mesmo entre os anos de 1991 e 1995, em que se observa uma taxa maior de crescimento da cultura canavieira, a vazão manteve-se dentro do valor médio de $6,54 \text{ m}^3/\text{s}$, e não é possível atribuir ao aumento dessa lavoura na região de Jaú as oscilações do comportamento da vazão desse período, pois entre 1992 e 1994 também foram observados menores valores médios de precipitação anual.

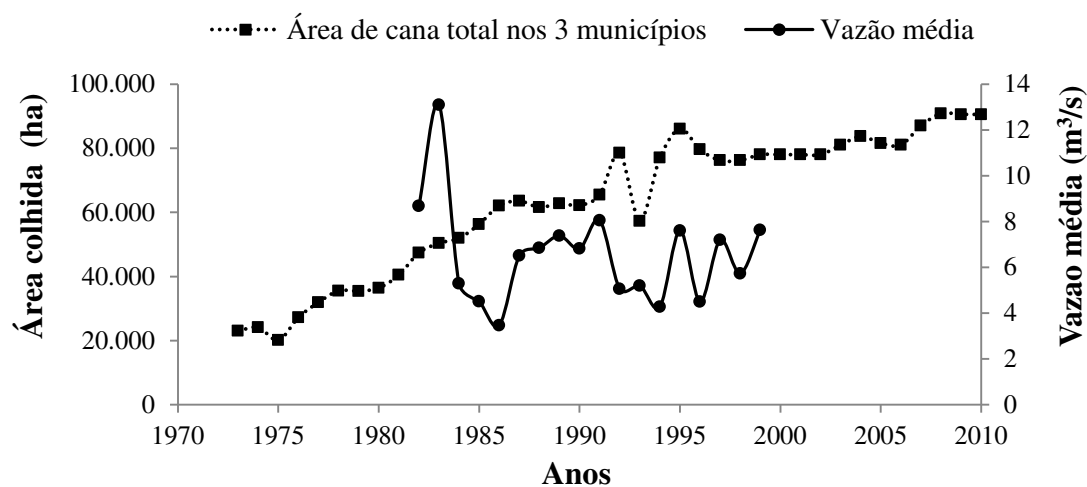


Figura 4.24. Área colhida de cana total nos três municípios da região de Jaú, e vazão média anual do Rio Jaú.

Dentre as regiões analisadas, a sub-bacia do Rio Jaú é a que possui menor área drenada (392 km², conforme calculado pelo ArcGis) e, portanto, segundo a literatura, é o caso no qual o impacto da mudança do uso da terra poderia ser melhor identificado. No entanto, a aplicação dos testes de tendência de Mann-Kendall (MK e MKseq) e de ruptura de Pettitt não apresentou tendências significativas para a série de vazão em nível anual. Os resultados do teste de Mann-Kendall para as séries em nível mensal e sazonal da vazão média e da precipitação total média na bacia apresentaram comportamentos semelhantes. Por fim, não foi observada mudança significativa ao longo dos anos a partir da análise conjunta dos dados de vazão com os dados de área de cana-de-açúcar na região. Portanto, não foi possível verificar mudanças no comportamento do regime hidrológico da sub-bacia do Rio Jaú que possam ser atribuídas especificamente ao crescimento da atividade canavieira na região.

Cabe ressaltar que, conforme recomendado pela WMO (2008), uma série histórica de vazão de 17 anos é pequena para a análise adequada do comportamento do fluxo de um corpo d'água. Porém a escolha de outra região com área de drenagem inferior a 500 km² foi dificultada pela indisponibilidade de séries de monitoramento longas e contínuas, em cursos d'água de pequeno porte localizados em regiões com crescimento significativo da atividade canavieira.

4.3.2 Regiões de Pontal e Ribeirão Preto

As regiões de Pontal e Ribeirão Preto tiveram o café como a pioneira cultura de destaque, cuja expansão gerou grandes alterações ambientais, tais como a intensa derrubada da cobertura de vegetação natural e a degradação do solo. Após a crise cafeeira no Século XX, as atividades agroeconômicas de maior importância passaram a ser a pecuária e cana-de-açúcar (SIGRH, 2013).

As Figuras 4.25 e 4.26 mostram o histórico de alterações dos principais usos da terra em ambas as regiões, com base nos dados do IBGE, considerando a área completa de todos os cinco municípios da região de Pontal, e seis da região de Ribeirão Preto.

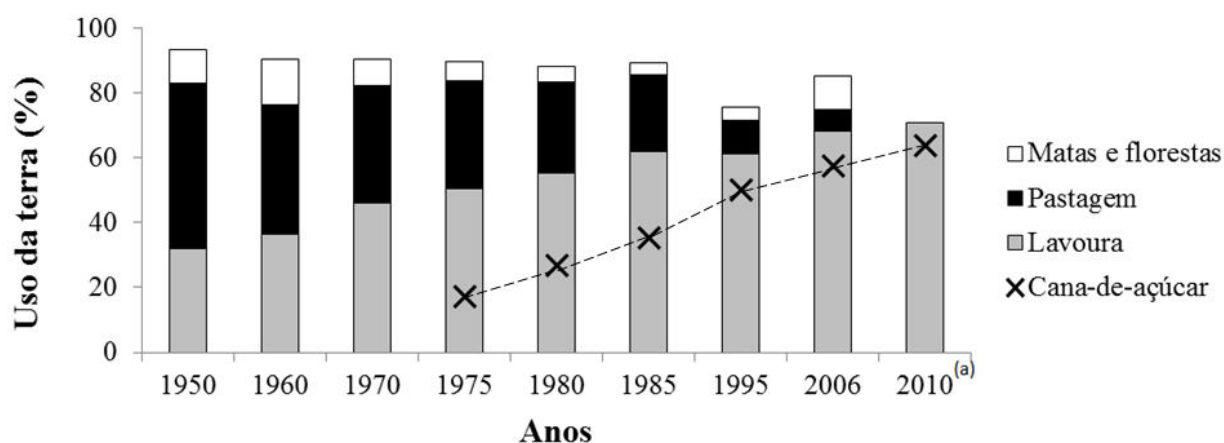


Figura 4.25. Histórico do uso da terra na área total dos municípios da região de Pontal.
Fonte: IBGE, 2013. ^(a) Dados sobre pastagem e matas e florestas não estão disponíveis para 2010.

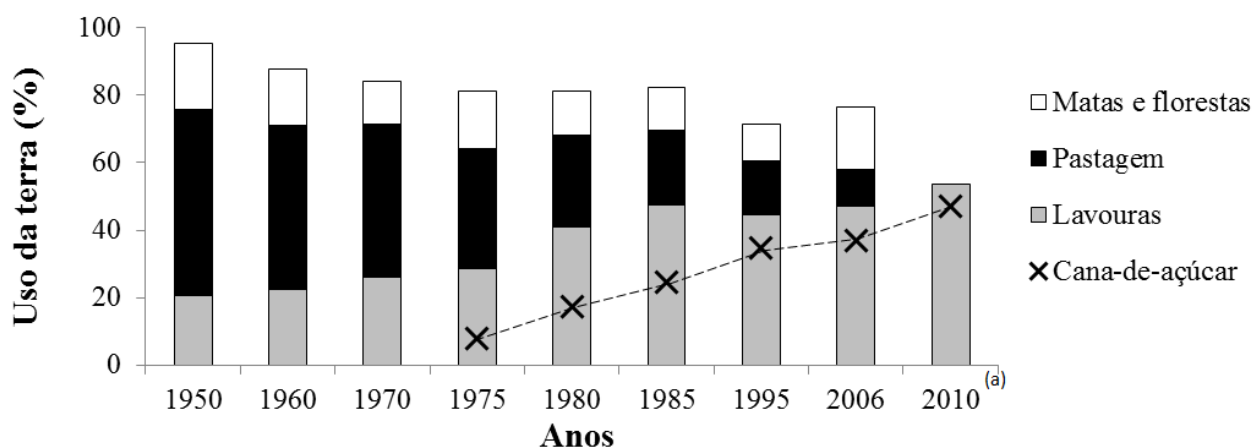


Figura 4.26. Histórico do uso da terra na área total dos municípios da região de Ribeirão Preto.
Fonte: IBGE, 2013. ^(a) Dados sobre pastagem e matas e florestas não estão disponíveis para 2010.

Em 1992, o município de Ribeirão Preto foi desmembrado em Guataporã (412,64 km²) e Ribeirão Preto (650,37 km²). Portanto, para que a comparação com os anos posteriores de 1995 a 2010 fosse feita da maneira correta, foi necessário realizar uma estimativa de qual parcela da área para cada uso da terra até 1992, fornecidos pelo IBGE, estavam localizados na nova área municipal de Ribeirão Preto a partir daquele ano. Para estimar a área de lavoura, fez-se a relação entre a área de lavoura de Guataporã em 1995, e a área total de lavoura em Guataporã e Ribeirão Preto juntos nesse mesmo ano. Tendo a porcentagem do total de lavoura referente à área de

Guataporá, a quantidade restante foi atribuída à nova área de Ribeirão Preto. O mesmo procedimento foi realizado para os demais usos da terra, e a estimativa obtida foi que 60% das áreas ocupadas por lavoura, 60% das matas e florestas, 71% das áreas ocupadas por pastagem, e 77% das áreas de cana colhida, até 1992, estavam localizados na área municipal delimitada por Ribeirão Preto após o desmembramento.

A partir das Figuras 4.25 e 4.26, pode-se observar que, em ambas as regiões, houve crescente aumento das áreas ocupadas por lavouras e redução das áreas de pastagem ao longo do tempo. A partir dos anos 1980, a cultura canavieira passou a representar mais de 50% da área de lavoura de ambas as regiões, porcentagem que aumentou ao longo dos anos, atingindo cerca de 80% em 1995, e 90% das áreas de lavouras em 2010. Embora a área total dos municípios que compõe a região de Ribeirão Preto (2.580 km²) seja um pouco maior que a de Pontal (2.416 km²), a cultura canavieira foi, e ainda é praticada mais intensamente na região de Pontal.

Para a análise de correlação entre a vazão média anual e a área colhida de cana-de-açúcar na região de Pontal entre 1974 e 2010, considerações semelhantes às realizadas para a região de Jaú foram adotadas. No primeiro caso, considerou-se que 28%, 30%, e 57% da área colhida de cana dos municípios de Batatais, Sertãozinho e Pardo, respectivamente, estivessem contidos nas áreas dos municípios localizadas dentro da UGRHI-4. Já no segundo caso, considerou-se o somatório da área total de cana colhida nos cinco municípios. As correlações de Kendall τ feitas entre a vazão e a os valores de área com cana-de-açúcar foram de 0,092 (p-valor: 0,42) para o primeiro caso, e 0,087 (p-valor: 0,45) para o segundo. Portanto, não foi possível observar correlação significativa para o intervalo de confiança de 95%, na região de Pontal, em ambas as situações consideradas.

A vazão média anual na estação 61855000, em Pontal, e a área de cana colhida em todos os municípios apenas da região de Pontal, assim como da região de Pontal e Ribeirão Preto juntos, são apresentados na Figura 4.27. Pela análise gráfica não é possível observar mudança nos padrões de vazão, que permaneceu em torno da média de 213 m³/s mesmo no período de maior crescimento de cana-de-açúcar, entre 1989 e 1995.

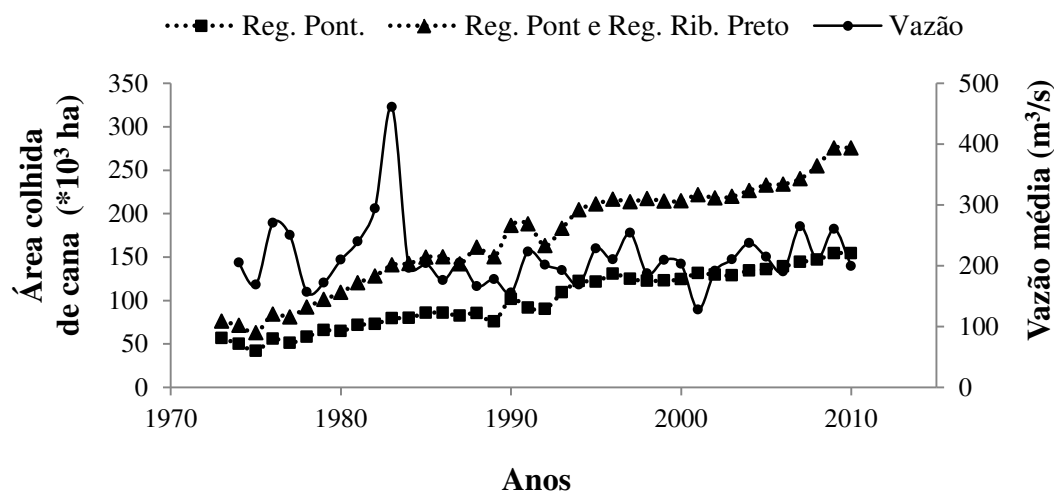


Figura 4.27. Área colhida de cana apenas na região de Pontal, nos municípios da região de Pontal e Ribeirão Preto, e vazão média anual do Rio Pardo na estação fluviométrica de Pontal.

Da mesma forma, as vazões da estação de 61834000 em Ribeirão Preto mantiveram-se em torno da média de $188 m^3/s$, mesmo entre 1986 e 1990, quando o crescimento de cana na região de Ribeirão Preto foi mais acentuado, como mostra a Figura 4.28. Em ambas as figuras, nos períodos em que houve oscilação, ou maior crescimento da área colhida de cana, o perfil de vazão está mais associado com o perfil das precipitações na região do que com as mudanças do uso da terra.

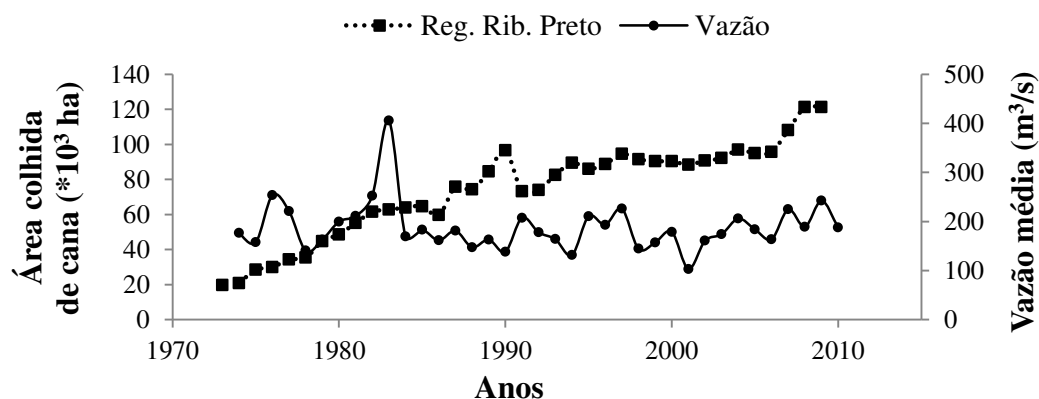


Figura 4.28. Área colhida de cana-de-açúcar apenas na região de Ribeirão Preto, e vazão média anual do Rio Pardo na estação fluviométrica de Ribeirão Preto.

A Tabela 4.8 apresenta os valores das estatísticas de correlação de Kendall τ feitas entre a vazão da estação do Rio Pardo, em Pontal, e os valores de área com cana-de-açúcar em todos os

municípios da região de Pontal (“P”), da região de Pontal e Ribeirão Preto juntos (“P+RP”), e de toda a UGRHI Pardo. Da mesma forma, são apresentados os valores de τ entre a vazão da estação do Rio Pardo, em Ribeirão Preto, e os valores de área colhida de cana-de-açúcar em todos os municípios da região de Ribeirão Preto (“RP”), e de todos os demais municípios da UGRHI Pardo, localizados a montante dessa estação de vazão (“RP + mun. montante”).

Tabela 4.8. Coeficiente de correlação de Kendall τ entre as vazões médias anuais e área colhida de cana-de-açúcar anual entre 1974 e 2010.

	Vazão em Pontal			Vazão em Ribeirão Preto	
	P	P + RP	UGRHI-4	RP	RP + mun. montante
τ	0,087	0,047	0,044	0,006	-0,002
p-valor	0,45	0,69	0,70	0,96	0,99

Em todos os casos, não foram encontradas correlações significativas, e os valores de τ permaneceram em torno de zero. Estatisticamente, de acordo com os resultados do p-valor, pode-se afirmar que, com a vazão da estação de Ribeirão Preto, as correlações foram próximas de zero, e, com a vazão em Pontal, houve a indicação de pequena correlação positiva. Os resultados de τ , mesmo praticamente desprezíveis, foram maiores quando consideradas as áreas colhidas de cana localizadas mais próximas de cada estação fluviométrica.

Apesar do expressivo crescimento da atividade canavieira sobre cerca de 40% da área de cada uma das duas regiões entre 1974 e 2010, não foi possível observar correlações significativas entre as vazões e a área colhida de cana-de-açúcar nas regiões de Pontal e Ribeirão Preto. Mesmo nos períodos de maior variação das áreas com cana, o comportamento das vazões é mais semelhante ao perfil de oscilação das precipitações do que com as alterações do uso da terra.

Como apresentado anteriormente nas Tabelas 4.4 e 4.6 (seções 4.2.2 e 4.2.3), em ambas as regiões, os resultados anuais e sazonais para o teste de Mann-Kendall não foram significativos. Na região de Pontal, a significativa tendência crescente na vazão, a um intervalo de confiança de 90%, para a série dos meses de março pode não ter relação com a expansão da cultura canavieira, visto que os meses do início do ano são os de maior consumo de água pela cana, além de corresponderem ao período de menor exposição do solo. Caso o solo permanecesse exposto nessa

época, o escoamento superficial seria facilitado e, conseqüentemente, contribuiria com o aumento da vazão.

Para as vazões médias anuais em Pontal e Ribeirão Preto, os resultados dos testes de Mann-Kendall sequencial e Pettitt também não indicaram tendências, ou mudanças bruscas nas séries durante o período completo de 1974-2011. A avaliação da série anual de vazão entre 1984 e 2011, para Pontal, apresentou resultados de aumento significativos que podem ser relacionados com o comportamento semelhante da estatística $u(t)$ do teste de MKseq para a precipitação no mesmo período.

Em relação ao coeficiente de recessão do fluxo base, para ambas as estações fluviométricas analisadas nenhuma apresentou perfil de variação significativo.

Os resultados apresentados na literatura sobre o aumento do escoamento dos rios em bacias inferiores a 1 km^2 devido ao crescimento de culturas anuais, como citados em Tucci e Clarke (1997), não foram verificados nas bacias avaliadas nessa dissertação, consideradas de média e larga escala, conforme Costa et al. (2003). Mesmo com o intenso crescimento da atividade canavieira nas regiões avaliadas, tanto na vazão do Rio Jaú como nos pontos de monitoramento da vazão do rio Pardo, não foi possível verificar alterações no escoamento devido à expansão da atividade canavieira, mostrando que os resultados de bacias pareadas não devem ser extrapolados para bacias superiores a 100 km^2 , como citam Bruijnzeel (1990) e Tucci e Clarke (1997).

4.4 Avaliação das séries dos parâmetros de qualidade das águas

Os resultados da análise dos parâmetros de qualidade da água nas estações localizadas em Pontal e Ribeirão Preto são apresentados simultaneamente, a fim de facilitar a comparação entre os dois pontos de monitoramento do Rio Pardo.

Os valores médios, desvio padrão, e mediana de cada parâmetro de qualidade durante os períodos de avaliação, assim como dos dados de vazão nas estações de Pontal e Ribeirão Preto,

são apresentados na Tabela 4.9. Além disso, constam na tabela os padrões de algumas variáveis estipulados pela Resolução 375/05 da CONAMA, para águas doces superficiais de Classe 2³.

Tabela 4.9. Informações gerais sobre os parâmetros de qualidade e vazão analisados.

	Unidade	Período	Padrão CONAMA ¹	Pontal			Ribeirão Preto		
				Mediana	Média	σ	Mediana	Média	σ
Potássio	(mg/L)	2001-2011	-	2,52	2,65	0,91	2,54	2,63	0,63
Fósforo	(mg/L)	1989-2011	<0,1 ^a	0,08	0,09	0,05	0,05	0,06	0,04
Nitrito	(mg/L)	1992-2011	<1	0,018	0,020	0,017	0,008	0,010	0,014
Nitrato	(mg/L)	1989-2011	<10	0,28	0,33	0,21	0,24	0,28	0,14
N _{amon}	(mg/L)	1989-2011	<3,7 ^b	0,11	0,12	0,08	0,06	0,10	0,09
NKT	(mg/L)	1989-2011	-	0,59	0,63	0,29	0,45	0,54	0,39
Sol. Tot.	(mg/L)	1989-2011	-	85,50	89,28	32,91	77,00	87,66	43,44
OD	(mg/L)	1989-2011	≥ 5	5,70	5,53	1,19	6,80	7,05	1,24
DBO _(5,20)	(mg/L)	1989-2011	≤ 5	2,00	2,30	2,06	2,00	1,96	1,06
DQO	(mg/L)	1989-1999	-	13,00	13,73	4,30	13,00	13,82	4,59
pH	(U.pH)	1989-2011	6 a 9	6,60	6,60	0,32	6,70	6,74	0,47
Vazão	(m ³ /s)	1989-2011	-	159,35	205,38	120,55	139,55	178,02	108,22

¹ Padrão CONAMA 375/05.

^a Varia em função do ambiente (lêntico, intermediário, lótico).

^b Varia em função do pH (3,7 mg/L, para pH < 7,5).

Com os resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a hipótese de normalidade para as séries de todos os parâmetros é rejeitada e, portanto, foi necessária a transformação Box-Cox em todos os casos. O coeficiente τ de Kendall não indicou correlação significativa entre a vazão e o tempo, tanto para a série de Pontal (p-valor: 0,81) quanto para a de Ribeirão Preto (p-valor: 0,83). A relação entre as séries de cada parâmetro e a série de vazão verificada pelo teste de correlação de Kendall apresentou baixos coeficientes de τ , todos inferiores a 0,5; portanto, não há forte correlação entre os dados dos parâmetros e da vazão, mesmo quando a correlação de Kendall foi indicada como significativa (p-valor de τ inferior a 0,05). Os resultados desses testes são apresentados na Tabela 4.10.

³ As águas classificadas como Classe 2 correspondem às águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário, à aquicultura, à atividade de pesca, e à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto (CONAMA, 2005).

Tabela 4.10. Testes de Shapiro-Wilk e de correlação de Kendall τ entre vazão e cada parâmetro das estações de qualidade de Pontal e Ribeirão Preto, e entre a vazão e o tempo.

	Pontal				Ribeirão Preto			
	Shapiro Wilk ^a		Kendall τ ^b		Shapiro Wilk ^a		Kendall τ ^b	
	W	p-valor	τ	p-valor	W	p-valor	τ	p-valor
Potássio	0,74	< 0,00	0,01	0,94	0,78	< 0,00 ⁽¹⁾	0,07	0,45
Fósforo	0,90	< 0,00 ¹	0,04	0,47	0,92	< 0,00	0,21	0,00
Nitrito	0,83	< 0,00	-0,44	< 0,00	0,34	< 0,00 ⁽¹⁾	-0,13	0,05
Nitrato	0,87	< 0,00	-0,24	< 0,00	0,95	0,00	-0,15	0,01
N _{amon}	0,88	< 0,00	-0,27	< 0,00	0,79	0,00 ⁽¹⁾	-0,09	0,13
NKT	0,97	0,00	0,03	0,65	0,64	< 0,00 ⁽¹⁾	0,09	0,14
Sol. Tot.	0,89	< 0,00	0,35	< 0,00	0,74	< 0,00	0,41	< 0,00
OD	0,96	0,00	-0,01	0,90	0,77	< 0,00	-0,27	< 0,00
DBO	0,41	< 0,00 ¹	-0,15	0,02	0,60	< 0,00 ⁽¹⁾	-0,17	0,03
DQO	0,83	< 0,00 ¹	0,03	0,77	0,89	0,00 ⁽¹⁾	-0,03	0,77
pH	0,94	< 0,00 ¹	-0,08	0,18	0,96	0,00 ⁽¹⁾	-0,16	0,01
Vazão	0,79	0,00	-0,01	0,81	0,83	< 0,00	0,01	0,83

^a p-valor < 0,05: rejeita-se a hipótese de normalidade a 95% IC.

^b p-valor < 0,05: correlação significativa a 95% IC.

¹ Mesmo após a transformação Box-Cox, a série não atingiu normalidade.

Nas séries das variáveis nas quais foram verificadas correlação com a vazão, a dependência foi retirada ao se trabalhar com os resíduos da RLWRS entre a vazão e a série tratada dos parâmetros. Os demais testes de sazonalidade, tendência e magnitude de tendência foram então aplicados sobre os resíduos da regressão não paramétrica RLWRS, denominados parâmetro ajustado à vazão (PAV).

A Tabela 4.11 apresenta os resultados do teste de sazonalidade de Kruskal-Wallis (KW), dos testes de tendência de Mann-Kendall (MK), e Mann-Kendall Sazonal (MKS) para as séries cujo coeficiente τ de Kendall indicou correlação com a vazão. Os testes foram aplicados tanto sobre as séries sem retirar a dependência da vazão (sem PAV), quanto sobre os resíduos da regressão RLWRS (PAV). Pode-se observar que, ao se trabalhar com as séries PAV, a sazonalidade é detectada com menor frequência pelo teste de KW, e o teste de MK é então aplicado, ao invés do teste de MKS. No entanto, as mesmas conclusões foram obtidas tanto por MK ou por MKS para as séries com ou sem PAV, com exceção da série de sólidos totais em Ribeirão Preto.

Tabela 4.11. Resultados dos testes de sazonalidade para as séries sem retirada da dependência da vazão (sem PAV) e com retirada da dependência da vazão (PAV).

		KW		MK		MK Sazonal			
		p-valor		Z (Tend.)		S'	p-valor	S'	p-valor
		sem PAV	PAV	sem PAV	PAV	sem PAV		PAV	
Pontal	Nitrito	< 0,00	0,68	-	4,20 T(+)	498	0,00 T(+)	-	-
	Nitrato	0,01	0,38	-	6,03 T(+)	783	< 0,00 T(+)	-	-
	N _{amon}	0,00	0,40	-	2,74 T(+)	384	< 0,00 T(+)	-	-
	Sol. Tot.	< 0,00	0,00	-	-	200	0,03 T(+)	188	0,04 T(+)
Ribeirão Preto	Fósforo	0,01	0,86	-	2,8 T(+)	384	0,001 T(+)	-	-
	Nitrato	0,11	0,51	5,00 T(+)	5,12 T(+)	-	-	-	-
	Sol. Tot.	<0,00	0,00	-	-	188	0,043 T(+)	152	0,1 (ns)
	OD	<0,00	0,00	-	-	-292	0,01 T(-)	-288	0,01 T(+)
	pH	0,46	0,62	-1,32 (ns)	-1,46 (ns.)	-	-	-	-
	DBO	0,54	0,50	6,07 T(+)	6,18 T(+)	-	-	-	-

T(+/-): Tendência significativa (positiva/negativa); 'ns': não significativo.

Como as conclusões a partir dos resultados das séries com ou sem a retirada da dependência da vazão dos parâmetros não foram diferentes, serão considerados como resultados finais os obtidos a partir da série PAV. Apenas para a série de DBO, embora as conclusões também tenham sido semelhantes, optou-se por continuar com a série sem o ajuste devido à dependência da vazão, pois a análise exploratória gráfica do DBO mostrou que os valores passaram de 1 mg/L para 3 mg/L entre 1999 e 2001, e depois seguiram praticamente constantes e iguais a 2 mg/L entre 2001 e 2012. O aumento do DBO para um valor constante durante um intervalo tão longo provavelmente não teve relação com vazão.

Portanto, os testes estatísticos de sazonalidade e tendência foram aplicados sobre a série PAV para o nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal, e sólidos totais em Pontal, e fósforo, nitrato, sólidos totais, oxigênio dissolvido, e pH em Ribeirão Preto.

Os resultados finais para os testes estatísticos de Kruskal-Wallis (KW), de Mann-Kendall (MK), de Mann-Kendall Sazonal (MKS) e Sen's slope são apresentados nas Tabelas 4.12 e 4.13 para Pontal e Ribeirão Preto, respectivamente. O teste de Run foi aplicado antes dos testes de tendência para verificar se as séries continham autocorrelação. Caso autocorrelacionadas, o teste de MK foi feito com a correção de Yue e Wang (2004), e a opção "dependência serial" do teste de MKS do XLSTAT foi selecionada.

Tabela 4.12. Resultados dos testes de sazonalidade (KW), autocorrelação (Run), tendência (MK e MKS) e magnitude (Sen) dos parâmetros de qualidade e vazão da estação de Pontal.

	KW ¹	Run ²	MK ³		MKS ⁴			Sen ⁵
	p-valor	p-valor	Z	Tend	S'	p-valor	Tend.	Coef. (mg/L/ano)
Potássio	< 0,00	0,06	-	-	42	0,19	ns	0,003
Fósforo	0,44	0,07	1,60	ns	-	-	-	0,003
Nitrito	0,64	< 0,00	5,08	T+	-	-	-	0,078
Nitrato	0,38	< 0,00	6,03	T+	-	-	-	0,049
N _{amon}	0,40	0,00	2,74	T+	-	-	-	0,012
NKT	0,48	< 0,00	-2,45	T-	-	-	-	-0,021
Sol. Tot	0,00	0,20	-	-	188	0,04	T+	0,002
OD	< 0,00	< 0,00	-	-	118	0,36	ns	0,052
DBO _(5,20)	0,11	0,82	3,47	T+	-	-	-	0,017
DQO	0,68	0,00	2,25	T+	-	-	-	0,001
pH	0,79	0,04	0,56	ns	-	-	-	0,001
Vazão	< 0,00	0,00	-	-	-9	0,94	ns	0,000

¹ p-valor < 0,05: presença de sazonalidade ($\alpha_0=0,05$).

² p-valor < 0,05: presença de correlação serial ($\alpha_0=0,05$).

³ Z < -1,96: tendência negativa significativa (T-); Z > 1,96: tendência positiva significativa (T+), ($\alpha_0=0,05$).

⁴ p-valor < 0,05: tendência significativa, S' > 0: positiva, S' < 0: negativa ($\alpha_0=0,05$).

⁵ teste aplicado sobre as médias anuais dos parâmetros. 'ns': não significativo

Tabela 4.13. Resultados dos testes de sazonalidade (KW), autocorrelação (Run), tendência (MK e MKS), e magnitude (Sen) dos parâmetros de qualidade e vazão da estação de Ribeirão Preto.

	KW ¹	Run ²	MK ³		MKS ⁴			Sen ⁵
	p-valor	p-valor	Z	Tend.	S'	p-valor	Tend.	Coef. (mg/L/ano)
Potássio	< 0,00	0,26	-	-	14	0,68	ns	0,000
Fósforo	0,86	0,00	2,80	T+	-	-	-	0,009
Nitrito	0,65	0,00	4,28	T+	-	-	-	0,135
Nitrato	0,51	< 0,00	5,12	T+	-	-	-	0,031
N _{amon}	0,37	< 0,00	5,16	T+	-	-	-	0,083
NKT	0,00	0,00	-	-	-174	0,15	ns	-0,013
Sol. Tot.	0,00	0,80	-	-	152	0,10	ns	0,001
OD	0,00	0,00	-	-	-288	0,01	T-	0,000
DBO _(5,20)	0,50	0,96	6,18	T+	-	-	-	0,029
DQO	0,92	0,00	2,61	T+	-	-	-	0,143
pH	0,62	0,10	-1,46	ns	-	-	-	0,000
Vazão	< 0,00	0,01	-	-	60	0,59	ns	0,000

¹ p-valor < 0,05: presença de sazonalidade ($\alpha_0=0,05$).

² p-valor < 0,05: presença de correlação serial ($\alpha_0=0,05$).

³ Z < -1,96: tendência negativa significativa (T-); Z > 1,96: tendência positiva significativa (T+), ($\alpha_0=0,05$).

⁴ p-valor < 0,05: tendência significativa, S' > 0: positiva, S' < 0: negativa ($\alpha_0=0,05$).

⁵ teste aplicado sobre as médias anuais dos parâmetros. 'ns': não significativo

Por fim, os resultados para o teste de ruptura de Pettitt, realizados sobre as séries originais, são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14. Resultados do teste de Pettitt dos parâmetros de qualidade e vazão das estações de Pontal e Ribeirão Preto

	Período	Pontal		Ribeirão Preto	
		p*	MB	p*	MB
Potássio	2001-2011	0,69	ns	0,89	ns
Fósforo	1989-2011	0,33	ns	0,03	1999
Nitrito	1992-2011	0,00	1998	0,02	1999
Nitrato	1989-2011	0,00	1998	0,00	1998/1999
N _{amon}	1989-2011	0,01	1995	0,00	1996
NKT	1989-2011	0,00	1997	0,41	ns
Sol. Tot.	1989-2011	0,06	ns	0,08	ns
OD	1989-2011	0,36	ns	0,01	2002
DBO _(5,20)	1989-2011	0,01	1998	0,00	1998
DQO	1989-1999	0,52	ns	0,27	ns
pH	1989-2011	0,48	ns	0,26	ns
Vazão	1989-2011	1,08	ns	0,94	ns

*p-valor < 0,05: presença de mudança brusca ($\alpha_0 = 0,05$). ns: não significativo.

Dentre os parâmetros avaliados, as séries de potássio e pH não apresentaram tendências significativas pelos testes de MK e MKS. O comportamento de ambas as séries ao longo do tempo não sofreu alterações significativas, e com o teste de Pettitt não foram identificadas mudanças bruscas nas séries históricas avaliadas.

Ao longo de todo o período analisado, a série histórica de Pontal apresentou maiores concentrações de fósforo que a série de Ribeirão Preto, como pode ser observado pelos valores das medianas de 0,08 mg/L e 0,05 mg/L, respectivamente, em cada região. As concentrações de fósforo ultrapassam constantemente o limite de 0,1 mg/L estipulado pelo CONAMA, principalmente na estação de Pontal. Aumento das concentrações de fósforo foi observado em ambos os postos, e o teste de MK indicou tendência positiva significativa para Ribeirão Preto, com taxa de crescimento dada pelo estimador Sen's Slope de 0,009 mg/L ao ano, sendo 1999 o ano de mudança do comportamento da série.

Tendências de crescimento significativas foram observadas para todas as séries de nitrogênio avaliadas, com exceção da série de NKT cuja tendência foi negativa, e significativa

apenas para a estação de Pontal. Em geral, as concentrações de nitrito e N_{amon} em Pontal foram superiores às de Ribeirão, principalmente entre os períodos de 1998 a 2003, para o nitrito, e 1997 a 2001 para o N_{amon} . Já as variações de concentração de nitrato e NKT foram semelhantes em ambos os postos. O teste de Pettitt indicou 1998 e 1999 como anos de significativa mudança no comportamento das séries de nitrito e nitrato, e o período entre 1995 e 1996 para a série de N_{amon} em Pontal e Ribeirão Preto. A tendência negativa detectada em Pontal para o NKT, cuja taxa de redução anual foi de -0,021 mg/L por ano, teve 1997 como ano de mudança abrupta da série nessa estação.

As séries de sólidos totais não apresentaram variações consideráveis ao longo do tempo, porém por meio da análise das regressões RLWRS pode-se observar tendência ligeiramente crescente a partir de 2002. A versão sazonal de Mann-Kendall detectou tendência positiva para a série história de sólidos totais na estação de Pontal, porém nenhum ano de mudança no comportamento das médias foi identificado como significativo.

O comportamento das séries de oxigênio dissolvido foi semelhante nos dois postos, porém as concentrações foram inferiores para Pontal, chegando a extrapolar os limites estipulados pelo CONAMA entre os anos de 1997 e 2004. Nenhuma tendência significativa foi detectada em Pontal, porém os dados da estação de Ribeirão Preto indicaram tendência decrescente, sendo 2002 o ano de ruptura da série dado pelo teste de Pettitt.

Os níveis de DBO variaram entre 1 e 2 mg/L entre 1989 e 1998, aumentando para 3 mg/L de 1999 a 2001, e a partir do meio de 2001 as concentrações mantiveram-se praticamente constantes e iguais a 2 mg/L. Para ambas as estações foram verificadas tendências significativas, possivelmente influenciadas pelo aumento das concentrações a partir de 1998. As magnitudes dadas pelo estimador de Sen foram 0,02 e 0,03 mg/L ao ano para Pontal e Ribeirão, respectivamente. O ano de mudança indicado pelo teste de ruptura foi 1998.

Os dados de DQO foram analisados apenas até 1999. A série completa fornecida pela CETESB foi dada até 2009, porém, para os dois postos estudados e para outras estações em regiões diferentes, a quantidade medida entre 2000 e 2009 foi de 50 mg/L, sem mudanças. Portanto, assumiu-se que as medidas feitas nesse período continham erros. Em geral, as estações

de Pontal e Ribeirão Preto apresentaram valores parecidos ao longo do tempo, sendo oscilações de maior amplitude observadas entre 1995 e 1997, principalmente em Ribeirão Preto. Os testes realizados indicaram tendências positivas significativas em ambas as estações, porém nenhum ano de mudança foi apontado pelo teste de Pettitt.

Embora analisados entre 1979 e 2001, Groppo et al. (2008) também apontam resultados de tendências positivas para séries de nitrato, amônia, fósforo e DBO em diversas bacias do estado de São Paulo, incluindo a do Rio Mogi-Guaçu, localizada ao lado da UGRHI Pardo e com características de uso da terra semelhantes às áreas analisadas.

4.5 Qualidade das águas e fatores de influência

O crescimento populacional e as mudanças do uso da terra foram assumidos como os principais fatores de influência sobre os parâmetros de qualidade das águas, assim como em Lorz et al. (2012). Como visto anteriormente, o principal uso da terra nas regiões analisadas é a lavoura, representada majoritariamente pela cana-de-açúcar. O teste de correlação de Kendall foi utilizado para avaliar se a variação desses possíveis vetores influenciou significativamente o comportamento dos parâmetros de qualidade ao longo dos anos.

A população total dos municípios de cada região foi correlacionado tanto com a média anual dos valores originais das séries dos parâmetros de qualidade, quanto com a média anual das mesmas séries utilizadas para a aplicação dos testes de tendência de Mann-Kendall, denominadas nesta sessão por 'sMK' (séries tratadas, sem efeitos de possíveis dependências parâmetro-vazão). As séries anuais de população foram obtidas através do IBGE. Com o desmembramento do município de Ribeirão Preto, considerou-se que apenas 1,2% da população registrada até 1992 vivia na área na qual se encontra o município de Guataporã.

A Figura 4.29 mostra a evolução do total de habitantes nos municípios da região de Pontal e da região de Ribeirão Preto. Para essa última região, foram discriminados o número de habitantes correspondente apenas à cidade de Ribeirão Preto (RP) e o número de habitantes dos

demais municípios (Reg. Rib. Preto sem RP), nos anos de 1980, 1990, 2000 e 2010. O crescimento populacional foi contínuo ao longo dos anos. É notável a importância populacional do município de Ribeirão Preto, que não só corresponde a mais de 80% da população da região de Ribeirão Preto, como também chega a ser aproximadamente 2,5 vezes mais populoso que o número de habitantes total da região de Pontal.

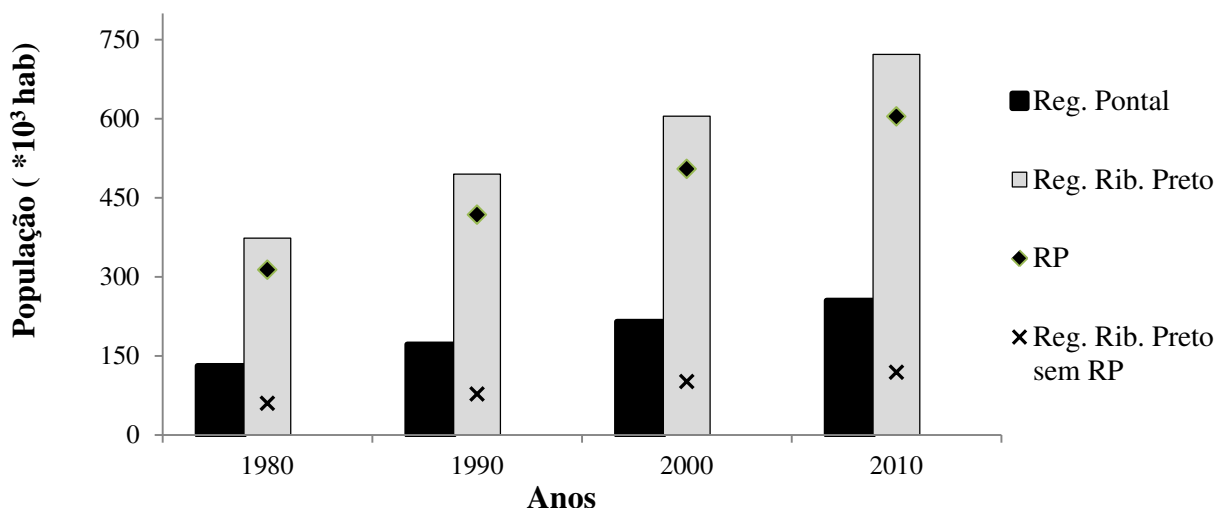


Figura 4.29. Evolução do crescimento populacional nas regiões de estudo.

Os dados populacionais e de área de cana dos municípios de Batatais, Jardinópolis, Pontal, Sales Oliveira e Sertãozinho foram correlacionados com as médias anuais de cada parâmetro monitorado na estação de qualidade de Pontal (61851000). Já os dados municipais (número de habitantes e área colhida de cana) de Altinópolis, Brodowski, Cravinhos, Ribeirão Preto, Serrana e Serra Azul foram correlacionados com as médias anuais de cada parâmetro monitorado na estação de qualidade de Ribeirão Preto (61835000). As Tabelas 4.15 e 4.16 apresentam os resultados das correlações de Kendall em cada região, tanto a realizada com os dados originais das séries das variáveis de qualidade (Orig.), quanto das séries finais utilizadas nos testes de tendência (sMK).

Tabela 4.15. Correlação entre o total populacional dos municípios e a média anual dos parâmetros, considerando as séries originais e séries finais utilizadas nos testes de MK.

		P	K	N _{amon}	NO ₃	NO ₂	NKT	Sol.Tot.	OD	DBO	DQO	pH	
Região Pontal	Orig.	τ	0,16	0,13	0,40	0,71	0,46	-0,35	0,37	0,04	0,39	0,39	0,03
		<i>p</i> -valor	0,29	0,65	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,79	0,01	0,10	0,85
	sMK	τ	0,23	0,13	0,34	0,77	0,54	-0,34	0,38	0,06	0,52	0,42	0,06
		<i>p</i> -valor	0,13	0,65	0,03	0,00	0,00	0,03	0,01	0,71	0,00	0,09	0,71
Reg. Rib. Preto	Orig.	τ	0,38	-0,05	0,64	0,70	0,24	-0,13	0,28	-0,38	0,49	0,48	-0,14
		<i>p</i> -valor	0,01	0,88	0,00	0,00	0,11	0,40	0,06	0,01	0,00	0,04	0,34
	sMK	τ	0,35	-0,07	0,63	0,67	0,51	-0,23	0,35	-0,38	0,42	0,40	-0,16
		<i>p</i> -valor	0,02	0,86	0,00	0,00	0,00	0,14	0,02	0,01	0,01	0,09	0,31

Tabela 4.16. Correlação entre a área colhida de cana nos municípios e a média anual dos parâmetros, considerando as séries originais e séries finais utilizadas nos testes de MK.

		P	K	N _{amon}	NO ₃	NO ₂	NKT	Sol.Tot.	OD	DBO	DQO	pH	
Região Pontal	Orig.	τ	0,18	0,09	0,40	0,65	0,39	-0,30	0,35	0,01	0,37	0,13	0,04
		p-valor	0,24	0,72	0,01	0,00	0,01	0,06	0,02	0,96	0,02	0,58	0,80
	sMK	τ	0,23	0,00	0,29	0,69	0,48	-0,28	0,34	0,02	0,47	0,09	0,02
		p-valor	0,14	1,00	0,06	0,00	0,00	0,07	0,03	0,91	0,00	0,76	0,91
Reg. Rib. Preto	Orig.	τ	0,14	-0,13	0,53	0,52	0,18	-0,20	0,09	-0,45	0,39	0,18	-0,19
		p-valor	0,35	0,59	0,00	0,00	0,26	0,18	0,55	0,00	0,01	0,43	0,23
	sMK	τ	0,14	-0,09	0,54	0,53	0,37	-0,20	0,15	-0,32	0,37	0,11	-0,23
		p-valor	0,35	0,72	0,00	0,00	0,03	0,20	0,32	0,04	0,02	0,64	0,13

Os resultados das correlações considerando tanto as séries originais quanto séries finais utilizadas nos testes de tendência foram similares e, em geral, levam às mesmas conclusões. Em ambas as tabelas, apenas as correlações relacionadas ao nitrito (NO₂) na região de Ribeirão Preto são estatisticamente significativas só quando consideradas as séries não originais (sMK).

Os resultados da Tabela 4.15 indicaram correlações positivas significativas entre a população e os parâmetros da série de nitrogênio, sólidos totais e DBO na região de Pontal. Em todos esses casos as correlações podem ser consideradas moderadas, com exceção do nitrato, cujos valores indicaram forte dependência com o crescimento populacional ($\tau > 0,7$). Já na região

de Ribeirão Preto, relações significativas foram encontradas para os parâmetros fósforo, nitrogênio amoniacal, nitrato (NO_3), OD e DBO para as séries originais e sMK. A relação negativa associada ao oxigênio dissolvido indica a deterioração da qualidade das águas nessa região, atrelada ao crescimento populacional. As relações mais fortes com a população foram verificadas para os parâmetros de nitrogênio amoniacal e nitrato. Da mesma forma, os valores positivos de τ referentes ao fósforo total (P), série de nitrogênio (exceto NKT), sólidos totais e DBO provavelmente estão relacionados ao lançamento de matéria orgânica nas águas pelo tratamento inadequado de esgotos sanitários e efluentes industriais.

Na região de Pontal, pode-se observar que os parâmetros da série de nitrogênio, sólidos totais e DBO também apresentam correlação positiva significativa com a área de cana-de-açúcar na região, como mostra a Tabela 4.16. Os valores de sólidos totais e DBO mostraram menor correlação com a presença da cultura canavieira, enquanto a maior relação foi obtida com a série de nitrato ($\tau = 0,6$). Já na região de Ribeirão Preto, a associação significativa com a cana se deu para as séries médias anuais de nitrogênio amoniacal, nitrato, OD e DBO, sendo os coeficientes de maior valor referentes às variáveis nitrogênio amoniacal e nitrato.

As séries de fósforo e potássio, componentes da vinhaça e de fertilizantes, não apresentaram valores significativos com a área agrícola canavieira. Para todos os resultados significativos os coeficientes são maiores quando da associação dos valores médios anuais dos parâmetros com o a população anual, em relação à associação com o crescimento da cultura da cana na região. Todas as associações significativas indicadas na Tabela 4.16 também são significativas conforme apresentado na Tabela 4.15, indicando que o comportamento desses parâmetros ao longo dos anos foi tanto influenciado pelo aumento da atividade canavieira quanto pelo crescimento populacional em ambas as regiões.

A Figura 4.30 mostra a localização das usinas sucroalcooleiras contidas dentro da UGRHI-4, em ambas as regiões avaliadas.

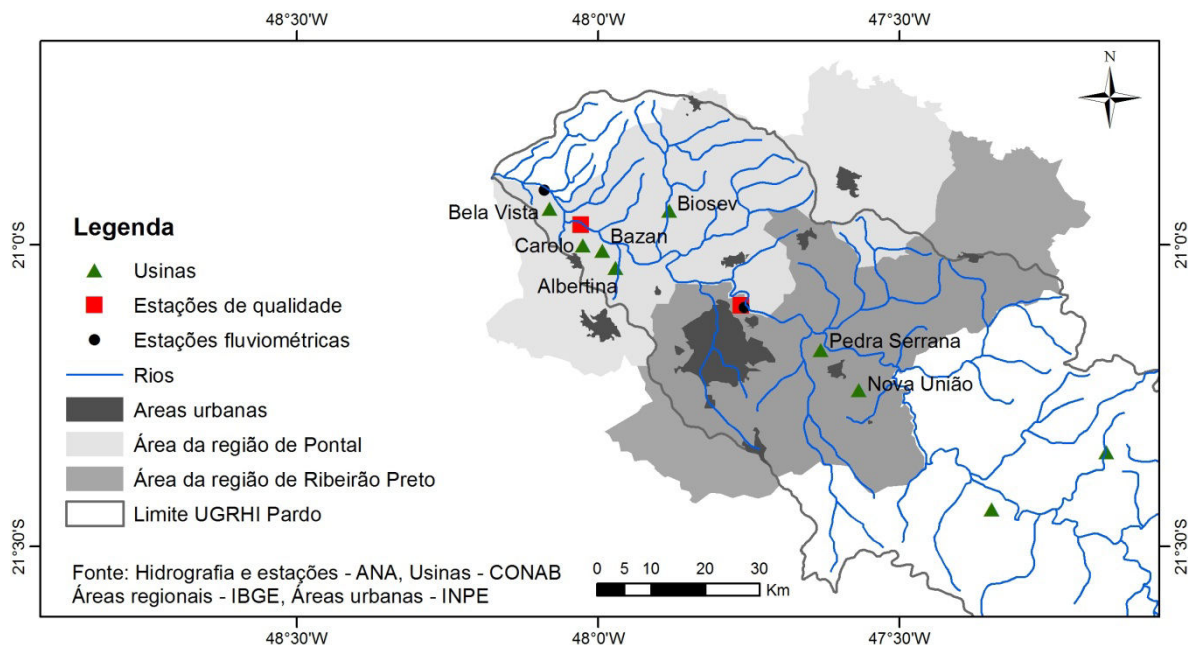


Figura 4.30. Usinas, estações de monitoramento de vazão e qualidade e áreas urbanas.

A partir da Figura 4.30, pode-se observar que, na área da região de Pontal, as usinas sucroalcooleiras estão mais perto da estação de qualidade 61851000 do que as áreas urbanas dos municípios que as compreendem. Já no caso da região de Ribeirão Preto, a área urbana da cidade de Ribeirão Preto deve exercer maior influência sobre a qualidade das águas monitoradas na estação 61835000 do que as duas usinas do município de Serrana, localizadas a 16 e 25 km em linha reta dessa estação.

Em um raio de até 10 km do posto de qualidade de Pontal estão localizadas quatro usinas. No entanto, segundo informações dos Relatórios Zero da CBH-Pardo e CBH-Mogi-Guaçu elaborados em 2000, os efluentes industriais das usinas dos municípios de Sertãozinho e Pontal são lançados na UGRHI Mogi-Guaçu apesar da proximidade com o Rio Pardo. Mesmo com o lançamento dos efluentes e águas residuais em outra Unidade de Gerenciamento, o processo de fertirrigação, geralmente aplicado em áreas próximas às usinas, pode influenciar a queda da qualidade das águas avaliadas na estação de Pontal.

Para as séries dos parâmetros de qualidade que apresentaram associações significativas com a área ocupada pela cana-de-açúcar, foram traçados gráficos a fim de que relações entre as concentrações das variáveis e a expansão da cultura ao longo do tempo pudessem ser observadas.

A Figura 4.31 apresenta a porcentagem da área total dos municípios da região de Pontal ocupada com a cultura canavieira em cada ano, e as concentrações de nitrito obtidas pelo monitoramento da qualidade das águas, que é realizado em um único dia por bimestre.

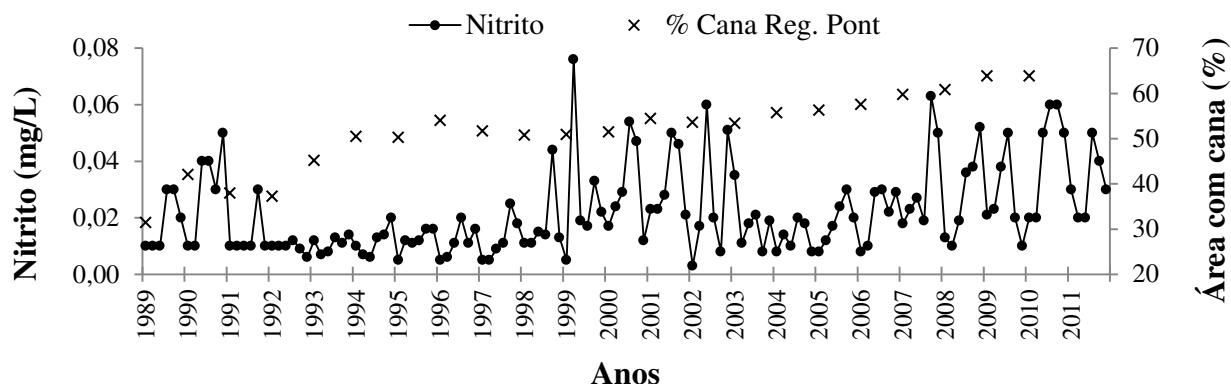


Figura 4.31. Valor das concentrações da série original do nitrito da estação 61851000, sem “outliers”, e expansão canavieira na região de Pontal.

Em geral as aplicações da vinhaça e fertilizantes nitrogenados ocorrem na etapa de pré-plantio e início do ciclo da cultura, principalmente a partir de meados do segundo semestre. A partir da análise gráfica ponto a ponto das concentrações (Figura 4.31), não é possível observar uma relação clara entre a época em que é realizado o monitoramento das variáveis de qualidade e o período de aplicação dos principais potenciais poluentes do setor sucroalcooleiro. Para facilitar as análises gráficas, optou-se pela comparação do crescimento anual da cana-de-açúcar com a média anual das concentrações, como mostra Figura 4.32.

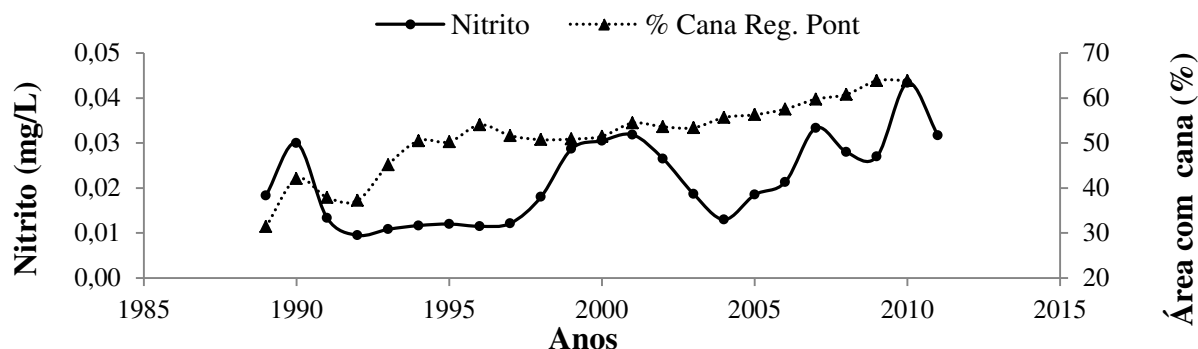


Figura 4.32. Médias anuais das concentrações da série original do nitrito da estação 61851000, sem “outliers”, e expansão canavieira na região de Pontal.

Os gráficos referentes à expansão canavieira e às concentrações das séries originais dos demais parâmetros cuja correlação com a cana foi significativa encontram-se no Apêndice C. As concentrações obtidas nos dias de monitoramento que não estivessem compreendidas dentro do intervalo “média aritmética $\pm 3\sigma$ ” foram consideradas discrepantes, e substituídas pelo valor médio de toda a série (GROPPO et al., 2006), a fim de evitar que possíveis erros nas medidas ou descargas pontuais influenciassem na análise dos resultados.

Segundo a análise dos gráficos da evolução da concentração de cada parâmetro e da cultura canavieira ao longo dos anos, pode-se observar um crescimento mais intenso da cana entre os anos de 1989 a 1995 nos municípios da região de Pontal. A partir de então a cultura continua a se expandir, mas continuamente a taxas reduzidas. De forma geral, o perfil das séries de nitrogênio (N_{amon} , NO_3 e NO_2) foi de aumento com o tempo, como indicado também pelos resultados dos testes estatísticos de tendência de Mann-Kendall. Os parâmetros relacionados à série de nitrogênio apresentaram picos de concentração entre 1998 e 2001 (também indicados pelo teste de Pettitt), seguidos de uma queda brusca, e continuaram a aumentar de forma relativamente constante. A porcentagem da área de cana-de-açúcar presente na área total dos municípios não sofreu oscilações que pudessem justificar, com certeza, os picos dessas concentrações. As oscilações dos registros podem estar associadas à aplicação de mais ou menos fertilizantes, como também à ocorrência de chuvas em dias próximos à realização do monitoramento da qualidade das águas, nos quais o escoamento superficial formado carrega consigo os componentes nitrogenados até atingirem os corpos d’água.

Na região de Ribeirão Preto, a área colhida de cana apresentou pequena queda entre 1991 e 1992, porém voltou a crescer até 1995, quando se manteve em um patamar praticamente constante até 2007. Entre 2008 e 2010 um aumento de cerca de 10% da área colhida pôde ser observado. As séries dos parâmetros de correlação significativa com a cultura da cana nessa região (N_{amon} , NO_3 , NO_2 , OD e DBO) apresentaram alguns picos entre 2000 e 2003, época em que a área colhida de cana permaneceu sem alterações. As mesmas observações apontadas para a região de Pontal sobre os fatores que podem influenciar o comportamento da série de nitrogênio, também se aplicam às proximidades de Ribeirão Preto.

O tratamento inadequado dos efluentes e das águas residuais resultantes dos processos de produção de açúcar e etanol, assim como os efluentes industriais de outros setores, além do sucroalcooleiro, podem contribuir para o aumento dos índices de DBO e, conseqüentemente, para a degradação da qualidade da água observada pela redução das concentrações de oxigênio dissolvido principalmente na região de Ribeirão Preto. Embora as concentrações de DBO e sólidos totais tenham aumentado, assim como a atividade canavieira nas regiões, os coeficientes de correlação entre eles foram menores.

A Tabela 4.17 contém informações sobre as usinas localizadas nas regiões analisadas, tais como o ano em que foram fundadas, a UGRHI onde são lançados os efluentes industriais dessas unidades e a distância de cada uma ao posto de qualidade da região na qual estão inseridas. As usinas da região de Pontal são das décadas de 1940 a 1960, período em que os dados sobre qualidade não estão disponíveis. As usinas mais recentes encontram-se em Serrana e Sertãozinho, porém nenhuma alteração nas séries dos parâmetros de qualidade avaliados pode ser especificamente atribuída à instalação dessas unidades.

Tabela 4.17. Informações sobre as usinas das regiões de Pontal e Ribeirão Preto.

Usina (Nome fantasia)	Ano de fundação ¹	Município	UGRHI (Lançamento) ²	Distância em linha reta ao posto de qualidade (km) ³
Carolo - Nossa Sra.	1946	Pontal	Mogi Guaçu	4 ^a
Bazan	1947	Pontal	Mogi Guaçu	6 ^a
Bela Vista	1952	Pontal	Mogi Guaçu	6 ^a
Biosev - Unidade Jardest	1964	Jardinópolis	Pardo	15 ^a
Albertina	1996	Sertãozinho	Mogi Guaçu	10 ^a
Nova União	1992	Serrana	Pardo	25 ^b
Pedra-Serrana	2008	Serrana	Pardo	16 ^b

Fonte: ¹ CTBE (2013); ² SIGRH (2013); ³ Elaboração própria. ^a Distância da usina ao posto de qualidade de Pontal. ^b Distância da usina ao posto de qualidade de Ribeirão Preto.

O resumo dos principais resultados dos testes estatísticos aplicados aos parâmetros de qualidade da água é mostrado na Tabela 4.18. As células vazias indicam que os resultados não foram significativos para o teste com o parâmetro em questão. São apresentados os resultados do teste de tendência de Mann-Kendall ou Mann-Kendall Sazonal (MK/MKS); o ano de mudança brusca na série, indicado pelo teste de ruptura de Pettit; e os coeficientes τ de Kendall para as

correlações das médias anuais dos parâmetros com a população regional (τ -pop.), e com a área colhida de cana-de-açúcar em cada região (τ -cana).

Tabela 4.18. Resumo dos testes estatísticos para avaliação da qualidade da água do Rio Pardo

	Pontal					Ribeirão Preto				
	MK/ MKS	Pettitt (ano)	τ -pop Orig. sMK	τ -cana Orig. sMK		MK/ MKS	Pettitt (ano)	τ -pop Orig. sMK	τ -cana Orig. sMK	
Potássio										
Fósforo						T(+)	1999	0,38 0,35		
Nitrito	T(+)	1998	0,46 0,54	0,39 0,48		T(+)	1999	0,51		0,37
Nitrato	T(+)	1998	0,71 0,77	0,65 0,69		T(+)	98/99	0,7 0,67	0,52	0,53
N _{amon}	T(+)	1995	0,4 0,34	0,40		T(+)	1996	0,64 0,63	0,53	0,54
NKT	T(-)	1997	-0,35 -0,34							
Sol.Tot.	T(+)		0,37 0,38	0,35 0,34				0,35		
OD						T(-)	2002	-0,38 -0,38	-0,45	-0,32
DBO	T(+)	1998	0,39 0,52	0,37 0,47		T(+)	1998	0,49 0,42	0,39	0,37
DQO	T(+)					T(+)		0,48		
pH										

T(+/-): Tendência significativa (positiva/ negativa).

Apesar da aplicação da vinhaça nas áreas agrícolas na UGRHI Pardo e da provável utilização de fertilizantes a base de potássio, não foram detectadas variações significativas em suas concentrações e tampouco correlações significativas com a área ocupada pela cultura canavieira, que teve expansão de cerca de 10% ao longo do período analisado (2001 a 2011) em ambas as regiões.

Assim como para o potássio, não foi verificada dependência entre os índices de fósforo e a expansão canavieira. Os testes estatísticos com resultados significativos restringiram-se à região de Ribeirão Preto, na qual foram observadas tendências crescentes nas concentrações de fósforo pelo teste de Mann-Kendall, com ano de mudança brusca na série indicado como 1999, e correlações significativas com o crescimento populacional. Sabe-se que, em 2010, grande parte dos efluentes domésticos dos municípios de Altinópolis, Brodowski, Ribeirão Preto e Serra Azul foram tratados (SIGRH/CBH-MOGI, 2010), porém são necessárias informações referentes a todo o período analisado sobre a realização do tratamento de efluentes para se chegar a conclusões mais específicas. Cabe ressaltar a grande concentração populacional no município de Ribeirão Preto frente aos demais municípios, fato que pode ter influenciado significativamente os resultados obtidos.

As séries de nitrogênio, com exceção do NKT, apresentaram tendências de crescimento significativas entre 1989 e 2011. Os coeficientes τ de Kendall indicaram que o comportamento desses parâmetros pode ser associado tanto ao crescimento da área de cana-de-açúcar nas proximidades das estações de monitoramento avaliadas, quanto ao crescimento populacional. Ou seja, o aumento das concentrações das séries de nitrogênio, exceto NKT, pode ser influenciado pelo lançamento de esgotos sanitários e efluentes industriais sem tratamento adequado, e pela lixiviação do nitrogênio decorrente da aplicação de fertilizantes nitrogenados nas plantações de cana-de-açúcar. Embora tenham aumentado com o tempo, as concentrações desses parâmetros não excederam os limites estipulados pela CONAMA.

As séries de DBO e sólidos totais que apresentaram tendências positivas significativas também mostraram correlação tanto com a população quanto com a área de cana, porém em menor magnitude. O comportamento das séries pode estar relacionado ao tratamento inadequado de efluentes industriais (incluindo a indústria sucroalcooleira), à presença de matéria orgânica e esgoto sanitário nas águas, que contribuem para a redução da qualidade das águas. A redução da qualidade das águas pode ser observada principalmente na região de Ribeirão Preto, com tendências negativas para as concentrações de oxigênio dissolvido nos pontos de monitoramento, e cujos valores chegaram a exceder os limites da CONAMA.

A grande concentração populacional no município de Ribeirão Preto também impacta a qualidade das águas na região de Pontal, contribuindo para a observação de maiores valores absolutos de nitrogênio e fósforo, e menores índices de OD em Pontal, comparados à Ribeirão Preto.

Os anos de mudança brusca indicados pelo teste de Pettitt para as médias anuais das séries não coincidiram com os períodos de crescimento da atividade canavieira.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações gerais

O objetivo dessa dissertação consistiu em verificar se, com os dados disponíveis de monitoramento das águas do estado de São Paulo, podem ser observados impactos sobre as vazões e sobre a qualidade das águas devido ao crescimento da atividade canavieira.

Para tanto, foram adotados procedimentos de análise estatística sobre séries históricas de chuva, vazão e qualidade das águas baseados em testes não paramétricos de detecção de tendência (Mann-Kendall, Mann-Kendall sequencial, e Mann-Kendall Sazonal), magnitude de tendência (estimador Sen's Slope), de mudanças bruscas das séries (Pettitt), e de correlação de Kendall (τ).

5.2 Conclusões

A indisponibilidade de séries históricas de vazão e qualidade das águas para longos períodos em regiões nas quais a atividade canavieira apresentou crescimento significativo restringiu a identificação de regiões adequadas para este estudo, principalmente em bacias de pequena área de drenagem.

Na sub-bacia do Rio Jaú, região com a menor área de drenagem entre as analisadas, não foram observadas tendências anuais para os dados de vazão. Apesar do crescimento de 20% da área colhida de cana-de-açúcar nos três municípios da região durante os 17 anos de análise, não foram verificadas mudanças no comportamento do regime hidrológico da sub-bacia do Rio Jaú que pudessem ser atribuídas à expansão canavieira.

Nas regiões de Pontal e Ribeirão Preto, nas quais o crescimento da cana-de-açúcar foi de 40% ao longo dos 36 anos de análise, também não foram observadas correlações significativas

entre as vazões médias anuais e a área colhida de cana-de-açúcar. Tendências e mudanças bruscas nas séries de vazão média anual entre 1974 e 2011 também não foram detectadas.

Em todas as regiões analisadas, as alterações do comportamento das vazões foram semelhantes às variações das precipitações. O coeficiente de recessão do fluxo base calculado a partir das vazões de todas as estações fluviométricas não apresentou tendências significativas. Portanto, não foi possível observar impactos sobre a vazão de estiagem devido à expansão da cultura canavieira nas regiões.

Apesar da aplicação de procedimentos estatísticos adequados para analisar o comportamento de séries históricas, as avaliações dos resultados dos testes não indicaram mudanças na dinâmica das vazões que pudessem ser atribuídas às alterações do uso da terra. Essa abordagem pode ter sido prejudicada pela extensão das bacias consideradas, as quais sofrem efeitos de diversas atividades antrópicas como a utilização do solo para pastagens, áreas urbanas e, mesmo em menor escala, para outras culturas além da cana-de-açúcar. Mesmo com o expressivo crescimento da cultura canavieira nas regiões consideradas, as alterações sobre as vazões devido à mudança do uso da terra são influenciadas por diversos fatores tais como pela forma como foi feita a conversão do uso da terra, a proporção de conversão realizada com compactação ou não do solo; qual vegetação foi substituída, entre outros. Dessa maneira, o estudo em bacias de média e larga escala, como as consideradas nesta dissertação, dificulta o isolamento dos efeitos da produção de cana-de-açúcar em meio aos diversos fatores simultâneos que ocorrem nas áreas de drenagem, além das variações climáticas, e que influenciam os regimes dos rios.

Quanto às análises realizadas sobre os dados de monitoramento da qualidade das águas do Rio Pardo nas regiões de Pontal e Ribeirão Preto, pode-se concluir o que é apresentado nos parágrafos abaixo.

Apesar da expansão da lavoura canavieira nas regiões de Pontal e Ribeirão Preto, acompanhada da aplicação da vinhaça e utilização de fertilizantes a base de potássio e fósforo nos campos, não foram detectadas variações significativas em suas concentrações associadas à atividade canavieira. Uma tendência positiva significativa para o fósforo total foi observada na

estação de qualidade da região de Ribeirão Preto, correlacionada com o crescimento populacional e, provavelmente, influenciada pelo lançamento de efluentes domésticos e industriais de forma inadequada sobre os recursos hídricos da região.

As séries de nitrato, nitrito, e nitrogênio amoniacal apresentaram tendências de crescimento significativo para ambas as estações de monitoramento da qualidade analisadas. Os testes de correlação indicaram que tanto a expansão das áreas ocupadas por cana-de-açúcar, quanto o crescimento populacional, podem estar associados às maiores concentrações desses parâmetros durante o período analisado. A utilização de fertilizantes nitrogenados e o lançamento inadequado sem tratamento prévio de esgotos sanitários e efluentes industriais podem ter contribuído para aumentar as concentrações de nitrogênio que, mesmo com o aumento, não excederam os limites estipulados pela CONAMA.

As séries de DBO e sólidos totais, com tendências positivas significativas, também apresentaram correlação significativa com a população e com a área colhida de cana. A presença de matéria orgânica e esgoto sanitário nas águas, e o lançamento de efluentes industriais (incluindo o do setor sucroalcooleiro) sem tratamento prévio, ou com tratamento inadequado podem contribuir para o aumento das concentrações desses parâmetros. A degradação da qualidade das águas na região de Ribeirão Preto pode ser observada pela detecção de significativas tendências negativas para as concentrações de OD, cujos valores chegaram a exceder os limites da CONAMA.

A avaliação qualitativa dos cursos d'água do estado de São Paulo de forma abrangente foi limitada à extensão das séries históricas disponibilizadas, principalmente dos parâmetros de qualidade influenciados pela atividade canavieira, em áreas com crescimento da cana-de-açúcar.

Com os resultados obtidos, conclui-se, portanto, que com os dados disponíveis para o monitoramento dos rios do estado de São Paulo, estado brasileiro com base de dados mais rica, não é possível afirmar com rigor que a produção em larga escala da cana-de-açúcar tem sido responsável por alterações no fluxo dos rios e pela deterioração da qualidade das águas.

5.2 Sugestões para trabalho futuros

Para trabalhos futuros são feitas as sugestões relacionadas nos parágrafos abaixo.

- Os resultados obtidos nas regiões avaliadas nesta dissertação podem ser aprimorados através de simulações computacionais com modelos de chuva-deflúvio e modelos hidrológicos que analisem o comportamento das vazões em resposta aos diversos usos da terra e às influências climáticas.

- Para observar os impactos sobre a situação dos cursos d'água ao longo dos anos devido à mudança do uso da terra, a interpretação de imagens de satélite pode fornecer informações mais precisas, se comparados com os dados municipais do IBGE utilizados neste estudo.

- Os impactos diretos na vazão dos rios devido à atividade canavieira podem ser avaliados em bacias com menores dimensões que as estudadas nesta dissertação, nas quais as técnicas de análise estatística utilizadas podem indicar resultados mais concretos sobre os efeitos da cana, por essas pequenas bacias apresentarem menores fatores de impacto sobre os recursos hídricos. Nesse caso, em função da ausência de dados, são necessários procedimentos de monitoramento no campo, que deveriam estar restritos aos parâmetros objeto de avaliação, mas que a princípio apresentarão restrições sobre a extensão das séries históricas.

- A análise estatística adotada também pode ser aplicada em regiões com menor grau de antropização, e em áreas onde a cultura da cana tem sofrido expansão, como em outros locais da região Centro-Oeste do Brasil. Porém o histórico de informações dessas áreas deve ser ainda mais restrito que analisado neste trabalho.

- Para a melhor aplicação dos procedimentos estatísticos empregados nesta dissertação, seria adequada a avaliação da evapotranspiração da cana e de outras culturas da região. Isso poderia ser feito por estimativas, em função da área plantada e de informações climáticas.

- As alterações no escoamento superficial principalmente nos períodos de solo exposto, além dos efeitos da erosão sobre a quantidade de sólidos nos leitos d'água, também são

importantes temas de pesquisa pouco abordados nos estudos relacionados à cultura anual da cana-de-açúcar.

Para a análise da qualidade das águas, sugere-se:

- A utilização de modelos que simulem o reflexo sobre a concentração dos parâmetros de qualidade analisados devido às diferentes taxas de crescimento da população e da produção de cana-de-açúcar, entre outras atividades econômicas que possam impactá-las.

- A análise dos fatores de influência sobre a qualidade dos recursos hídricos pode ser aprimorada a partir da elaboração de um histórico do tratamento de efluentes domésticos e industriais em cada município, além da obtenção de maiores informações sobre os pontos de lançamento desses efluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. 2013. Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em: 2013

Anuário da Cana 2013- **Brazilian Sugar and Ethanol Guide**. ProCana Brasil. 420 p., 2013.

BIRSAN, M.; MOLNAR, P.; BURLANDO, P.; PFAUNDLER, M. Streamflow trends in Switzerland. **Journal of Hydrology**, v. 314, p. 312-329, 2005.

BOUZA-DEAÑO, R.; TERNERO-RODRÍGUEZ, M.; FERNÁNDEZ-ESPINOSA A.J. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain). **Journal of Hydrology**, v. 361, p. 227-239, 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2012. 387 p.

BRASIL. **Portaria do Ministério do Interior. nº 323, de 29 de novembro de 1978**. 1978. Disponível em: <<http://faolex.fao.org/docs/pdf/bra14330.pdf>>. Acesso em: setembro de 2013.

BRUIJNZEEL, L.A., 1990. **Hydrology of moist forests and the effects of conversion: a state of knowledge review**, Free University, Amsterdam, p. 224.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS-CGEE. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. CGEE, NIPE, UNICAMP. Brasília, DF. 536p. 2009.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS-CGEE. **Sustainability of sugarcane bioenergy**. Brasília-DF: CGEE. 336p. 2012.

CEPAGRI- Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. Clima dos municípios Paulistas. Disponível em: <www.cpa.unicamp.br>. Acesso em: janeiro 2014

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Norma Técnica P4.231 Dez/2006. Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. 2006. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf>. Acesso: setembro de 2013.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo 2012. Série Relatórios**. São Paulo: CETESB, 2013. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em: agosto de 2013.

CHAPMAN, D (editor). **Water quality assessments - a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring**. UNESCO/WHO/UNEP. London: E & Fm Spon, 2ed., 651 p., 1996.

CLEVELAND, W. S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. **Journal of the American Statistical Association**. v. 74, n. 368, p. 829-836, 1979.

CONAMA. **Resolução nº 375, de 17 de março de 2005**. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.2005.

COSTA, F.M.; BACELLAR L.A.P. Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir do fluxo de base. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n.3, p. 173-183, 2010.

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

CTBE - Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol. **Sugarcane Integrated Information System- SIIS**. Disponível em: <<http://www2.bioetanol.org.br/siis/mapas/>>. Acesso em: dezembro de 2013.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Banco de dados fluviométrico e pluviométrico do estado de São Paulo**. Disponível em: <www.dae.sp.gov.br>. Acesso em: fevereiro de 2013.

DEWANDEL, B.; LACHASSAGNE, P.; BAKALOWICZ, M.; WENG, PH., AL-MALKI, A. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. **Journal of Hydrology**, v. 274, p. 248-269, 2003.

ELIA NETO, A. **Captação e uso de água no processamento da cana-de-açúcar. Capítulo 5: Impactos no suprimento de água.** In Macedo, I.C. (Org.). A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. São Paulo: Berlendis & Vertecchia: UNICA. 232p. 2005.

ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A.; PIO, A. A. B.; CONDE, A. J.; GIANNETTI, F.; & DONZETTI, J. L **Manual da conservação e reuso de água da agroindústria sucroenergética.** ANA, FIESP, UNICA, CTC. Brasília: ANA, 2009. 288p.

ELIA NETO, A.; ZOTELLI, L.C.; DONZELLI, J.L. Cenários de demanda de água industrial para o setor sucroenergético nas bacias hidrográficas do estado de São Paulo. In: II Congresso Estadual de Comitês de Bacia; 2010. **Anais...** São Paulo: Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/basecon/2CBHs-Anais/listaresumosoral.htm>>. Acesso em: julho de 2013.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Guidance for Data Quality Assessment. Practical methods for Data Analysis.** EPA QA/G-9. QA00 Version. 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/region6/qa/qadevtools/mod4references/secondaryguidance/g9-final.pdf>>. Acesso: julho de 2013.

FURLAN, D. N. **Variabilidade temporal e espacial das chuvas e do balanço hídrico no estado de Rondônia: caracterização e análise de tendência.** 2009. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, p.2086 - 2097, 2008.

GROPPO J.D. **Estudo de tendências nas séries temporais de qualidade de água de rios do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenção antrópica.** 2005. Dissertação de mestrado em Ecologia de Agroecossistemas. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

GROPPO, J.D.; MORAES, J.M.; BEDUSCHI, C.E; MARTINELLI, L.A. Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenção antrópica. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 181-193, 2005.

GROPPO, J.D.; MORAES, J.M.; MARTINELLI, L.A. Estudo de tendência de parâmetros de qualidade de água na bacia do Rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.11, n.3., p. 79-87, 2006.

GROPPO, J.D.; MORAES, J.M.; BEDUSCHI, C. E., GENOVEZ, A. M.; MARTINELLI, L.A. Trend analysis of water quality in some rivers with different degrees of development within the São Paulo State, Brazil. **River Research and Applications**, v.24, n.8, p. 1056-1067, 2008.

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

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. **Statistical Methods in Water Resources**. US Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, Chapter A3. USGS, 2002. 524 p.

HIPEL, K.W.; McLEOD, A.I.. **Time series modelling of water resource and environmental systems**. Developments in water science 45, Netherlands: Elsevier, p. 1013, 1994.

HIRSCH, R. M.; SLACK J. R.; SMITH R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. **Water Resources Research**, v.18, n.1 , p. 107-121, 1982.

HIRSCH, R. M.; SLACK J. R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. **Water Resources Research**, v.20, n.6 , p.727-732, 1984.

HIRSCH, R. M.; ALEXANDER, R.B.; SMITH, R.A. Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality. **Water Resources Research**. v. 27, n.5, p. 803-813, 1991.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 2013.

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

KARPOUZOS, D.Z.; KAVALIERATOU, S.; BABAJIMOPOULOS, C. Trend analysis of precipitation data in Pieria Region (Greece). **European Water**, v. 30, p. 31-40, 2010.

KRUSCHE, A. V. ; CARVALHO, F. P. ; MORAES, J. M. ; CAMARGO, P. B. ; BALLESTER, M. V. R. ; HORNINK, S. ; MARTINELLI, L. A. ; VICTORIA, R. L. Spatial and temporal water quality variability in the Piracicaba River basin, Brazil. **Journal of the American Water Resources Association**, v.33, n. 5, p.1117-1123, 1997.

KRUSKALL, W.H.; WALLIS, W.A. Use of ranks on one-criterion variance analysis. **Journal of American Statistical Association**, v.47, n.260, p. 583-621, 1952.

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. J. Change detection in hydrological records—a review of the methodology/ Revue méthodologique de la detection de changements dans les chroniques hydrologiques, **Hydrological Sciences Journal**, London, v. 49, n.1, p. 7-19, 2004.

LEAL , M. R. L. V.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F.V; SEABRA, J.E. A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O. F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 11-19, 2013.

LORZ, C.; ABBT-BRAUN, G.; BAKKER, F.; BORGES, P.; BÖRNICK, H.; FORTES, L.; FRIMMEL, F.; GAFFRON, A.; HEBBEN, N.; HÖFER, R.; MAKESCHIN, F.; NEDER, K.; ROIG, L. ; STEINIGER, B. ; STRAUCH, M. ; WALDE, D. ; WEIß, H. ; WORCH, E. ; WUMMEL, J. Challenges of an integrated water resource management for the Distrito Federal, Western Central Brazil: climate, land-use and water resources. **Environmental Earth Sciences**, v.65, n.5, p.1575-1586, 2012.

MA, Z.; KANG S.; ZHANG, L.; TONG, L.; SU, X. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 239-249, 2008.

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

MARTINELLI,L.A.; FILOSO,S.; ARANHA, C.B.; FERRAZ, S. F. B.; ANDRADE, T M. B.; RAVAGNANI, E. C.; COLETTA,L.D.; CAMARGO, P.B. Water use in sugar and ethanol industry in the State of São Paulo (Southeast Brazil). **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, v. 3, n. 2, p. 135-142, 2013.

McLEOD, A.I.; HIPEL, K.W.; BODO, B.A. Trend Analysis Methodology for Water Quality Time Series. **Environmetrics**, v.2, n.2, p.169-200, 1991.

McLEOD, A.I.; HIPEL, K.W. **The McLeod-Hipel Time Series PC Package**. Reference Manual Version 1.6. p 128, 2002.

MORAES, J.M.; GENOVEZ, A.M.; MORTATTI, J.; BALLESTER, M.V.; KRUSCH, A. V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R.L. Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da Bacia do Rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 2, n.2. p 65-79, 1997.

MORAES, J.M.; PELLEGRINO, G. Q.; BALLESTER, M.V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R.L.; KRUSCH, A. V. Trends in Hydrological Parameters of a Southern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. **Water Resources Management**, Netherlands, v. 12, p. 295-311, 1998.

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

NATHAN, R.J.; MCMAHON, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, v.26, p. 435-447, 1990.

NUNES, L.C.; DE CALBETE, N. O. Variabilidade pluviométrica no Vale do Paraíba Paulista. **In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, p. 3987-3994, 2000.

OLIVEIRA-FILHO, E.C.; LIMA, J.E.F.W.. **Potencial de impacto da agricultura sobre os recursos hídricos na região do Cerrado**. Documentos 56. Ministério da agricultura, Pecuária e Abastecimento/ Embrapa Cerrados. Planaltina, DF, 2002. 48p.

PAIVA, J. B. D., PAIVA, E. M. C. D.(Org.) **Hidrologia Aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 628 p.

PEREIRA, V. R. **Conversão de uso das terras e alterações das condições hidrológicas: o caso das bacias do Atibainha e do Cachoeira**. 2012. Tese de doutorado - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PETTITT, A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, v.28, n.2, p. 126-135, 1979.

ROCHA, G. (Coord.). **Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo. Escala 1: 1.000.000. Nota explicativa.** DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica; IG - Instituto Geológico; IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; CPRM - Serviço Geológico do Brasil. São Paulo. 119p. 2005.

SÃO PAULO. **Resolução SMA- 88 (19-12-2008).** Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo – SMA. 2008a.

SÃO PAULO. **Zoneamento Agroambiental para o setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo.** São Paulo: SMA, 2008b. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/zoneamento-agroambiental/>>. Acesso em: julho de 2013.

SEARCY, J.K.; HARDISON C.H. **Double-Mass Curves.** Manual of Hydrology: Part 1. General Surface-Water Techniques. “Geological Survey Water-Supply Paper 1541-B, U.S. Department of Interior, Washington, D.C.”, 1960, 41p.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau, **Journal of the American Statistical Association**, v.63, p.1379-1389, 1968.

SIGRH -Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do estado de São Paulo. **Relatórios Zero e Relatórios de Situação do CBH Tietê-Jacaré, do CBH Mogi-Guaçu e do CBH-Pardo.** Disponíveis em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>. Acesso em: setembro de 2013.

SIGRH/CBH-MOGI. **Minuta Relatório de Situação 2011 do CBH-MOGI** . Tabela “indicadores_ municipios_11out2011”. Ano base 2010. Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo/ Comitê da Bacia Hidrográfica do Mogi-Guaçu. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>. Acesso em: setembro de 2013.

SILVA, R. F. G. **Estimativa de parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos em áreas de embasamento através de métodos indiretos.** 2009 . Dissertação de mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.11, n.1, p. 108-114, 2007.

SNEYERS, R. **On the statistical analysis of series of observations**. Technical Note N° 143, World Meteorological Organization, Geneva, n. 415, 1990. 192 p.

SOLER, C.M.T.; SENTELHAS, P.C.; HOOGENBOOM, G. The impact of El Niño Southern Oscillation phases on off-season maize yield for a subtropical region of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 30, p. 1056–1066, 2010.

SOUSA, S. A. V. **Disponibilidade e uso de água no Brasil: irrigação. Capítulo 5: Impactos no suprimento de água**. In Macedo, I.C. (Org.). A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. São Paulo: Berlendis & Vertecchia: UNICA. 232p. 2005.

SOUZA, A.D.G.; TUNDISI, J.G. Water quality in watershed of the Jaboatão River (Pernambuco, Brazil): a Case Study. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 46, n.4, p. 711-721, 2003.

TALLAKSEN, L.M. A review of baseflow recession analysis. **Journal of Hydrology**, v. 165, p.349-370, 1995.

TUCCI, C.E.M. et al. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 2 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS: ABRH, 2000. 943 p.

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

UNEP. **The bioenergy and water nexus**. United Nations Environment Programme (UNEP), Oeko-Institut and Institute for Applied Ecology Bioenergy Task 43, 2011, p.39. Disponível em: < www.unep.org/pdf/Water_Nexus.pdf >. Acesso: outubro de 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA: **Unicadata**. Disponível em: < <http://www.unicadata.com.br/> >. Acesso: Outubro de 2013.

YANG, Y.; TIAN, F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River Catchment, China. **Journal of Hydrology**, v. 374, p. 373–383, 2009.

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

YUE, S.; WANG, C. The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. **Water Resources Management**, Netherlands, v. 18, p. 201-218, 2004.

WALTER, A.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F.V; LEAL , M. R. L. V ; SEABRA, J.E. A.; CUNHA, M. P.; PICOLI; M. C. A. ; OLIVEIRA, C. O. F. Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. **Wiley Interdisciplinary Reviews-Energy and Environmental**, v. 2, n. 6. 2013.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Guide to Hydrological Practices**. Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. Geneva, WMO-No 168, v.1, 6 ed., 2008, p. 296.

APÊNDICE A - OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE RECESSÃO (α)

O modelo exponencial, dado pela Equação A.1, pode ser interpretado a partir de um gráfico semi-logarítmico, simulando uma relação linear de recarga. O método gráfico de Barnes de separação do fluxo base é frequentemente utilizado para a obtenção do coeficiente de recessão (COSTA e BACELLAR, 2010; NATHAN e MCMAHON, 1990). Um hidrograma é obtido a partir do logaritmo das vazões em função do tempo, expresso em dias. A constante é então calculada por meio da inclinação do período final do hidrograma, de acordo com a Equação A.2.

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (\text{A.1})$$

$$\log Q_t = \log Q_0 - (\alpha \cdot \log e) t \quad (\text{A.2})$$

na qual, Q_t é a vazão no instante t , Q_0 a vazão no início da recessão, e α o coeficiente de recessão (constante).

Segundo Dewandel et al. (2003), a fórmula de Maillet (Equação A.1) é aplicável, apenas à parte final da curva de recessão, quando não há influência de precipitação no escoamento e apenas o escoamento subterrâneo é responsável pela recarga do sistema.

O modelo de Boussinesq, que simula um comportamento quadrático da curva de recessão, também é geralmente utilizado (SILVA, 2009; DEWANDEL et al., 2003). Ele foi proposto a partir de algumas considerações, tais como: aquífero poroso, não-confinado, homogêneo e isotrópico, limitado inferiormente por uma camada impermeável horizontal; as equações são dadas por:

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)^2} \quad (\text{A.3})$$

$$\alpha = \frac{(\sqrt{Q_0} - \sqrt{Q_t})}{t \cdot \sqrt{Q_t}} \quad (\text{A.4})$$

Em locais de clima úmido, o período de recessão não é representado por uma única curva com redução gradual da vazão, como mostra a Figura 2.4. As chuvas que ocorrem durante o período de estiagem geram diversos segmentos de recessão, com diferentes inclinações e intervalos de duração. Nesses casos, é comum a aplicação de técnicas baseadas na representação exponencial do escoamento, que consideram as recessões individuais a fim de formar uma curva de recessão mestra, como os métodos de Matching Strip e Correlação (NATHAN e MCMAHON, 1990; TALLAKSEN, 1995; SILVA, 2009; COSTA e BACELLAR, 2010). Segundo Tallaksen (1995), esses métodos são mais suscetíveis a erro, pois as curvas individuais encontram-se em diferentes estágios do processo de descarga do aquífero, têm comportamentos distintos, além de serem sensíveis a eventos climáticos esporádicos. Portanto, a subjetividade envolvida na aplicação dessas técnicas leva ao questionamento da qualidade de seus resultados e faz com que a utilização de métodos mais objetivos e automáticos seja melhor.

Outra opção de análise da curva de recessão consiste em avaliar cada segmento individualmente e obter um coeficiente de recessão médio para as diversas curvas, se suas inclinações não apresentarem diferenças significativas entre si (TALLAKSEN, 1995).

Nesta dissertação, os modelos de Maillet e Boussinesq foram adotados para o cálculo do coeficiente de recessão (α) de cada ano da série histórica de vazão. A obtenção de α para o modelo exponencial de Maillet foi feita a partir do método gráfico de Barnes.

Primeiramente, optou-se por obter o coeficiente α a partir do hidrograma em função do tempo em dias. A média móvel de cinco dias dos valores do fluxo em escala logarítmica foi utilizada para evitar possíveis erros de leitura e a influência de pequenos eventos. No entanto, a ocorrência de chuvas ao longo do ano dificulta a análise do período de estiagem a partir dos dados diários. O cálculo do coeficiente é muito sensível ao intervalo de tempo adotado, assim como à vazão inicial do período de recessão.

A Figura A1 mostra o hidrograma diário (média móvel de cinco dias) dos dados de vazão do ano de 1991 da estação de Pontal, utilizado pelo método de Barnes para o cálculo de α , considerando o modelo exponencial. Também apresenta o valor do coeficiente α obtido por meio da inclinação de duas retas traçadas a fim de representar a curva de recessão. A vazão de recessão

para ambas as retas foi a mesma. No entanto, a escolha de vazões iniciais de recessão distintas, porém próximas, obtidas com apenas quatro dias de diferença, resulta em uma variação de aproximadamente 10% do valor de α .

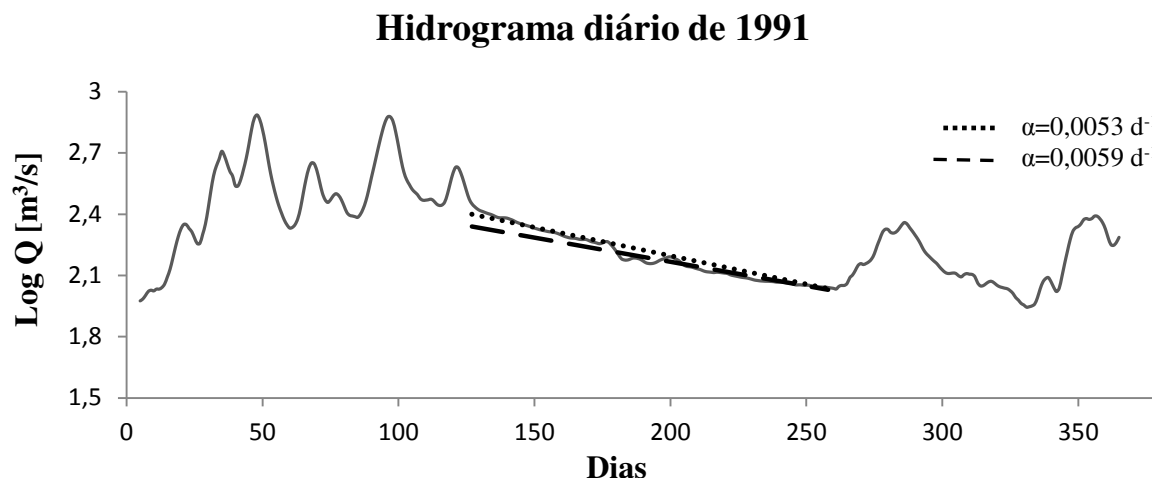


Figura A1. Hidrograma diário, diferentes retas de representação da curva de recessão e respectivos coeficientes α .

A análise de cada segmento de recessão a fim de se encontrar um coeficiente médio para o período de estiagem também dificultou o cálculo de α . Os vários eventos de precipitação ao longo dos anos avaliados geraram diversos segmentos, de duração variável, com inclinações que apresentam diferenças significativas entre si, como mostra a Figura A2.

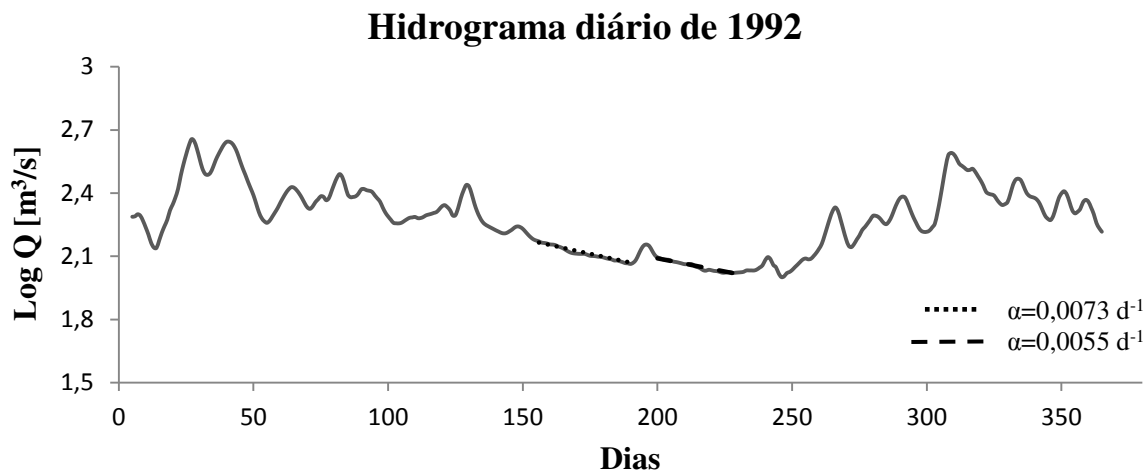


Figura A2. Coeficientes de recessão distintos para cada segmento de recessão.

Os efeitos das chuvas sobre a avaliação gráfica do hidrograma durante os períodos mais secos foram reduzidos ao utilizar hidrogramas registrados a partir das vazões médias mensais, como mostra a Figura A3. Uma vez padronizada a metodologia para traçar as retas de recessão, considerando a parte final do período de recessão, a análise de hidrogramas de médias mensais reduz a variabilidade de diversos segmentos distintos de recessão que resultaria da análise de dados diários, melhorando a comparação entre o coeficiente α dos diversos anos.

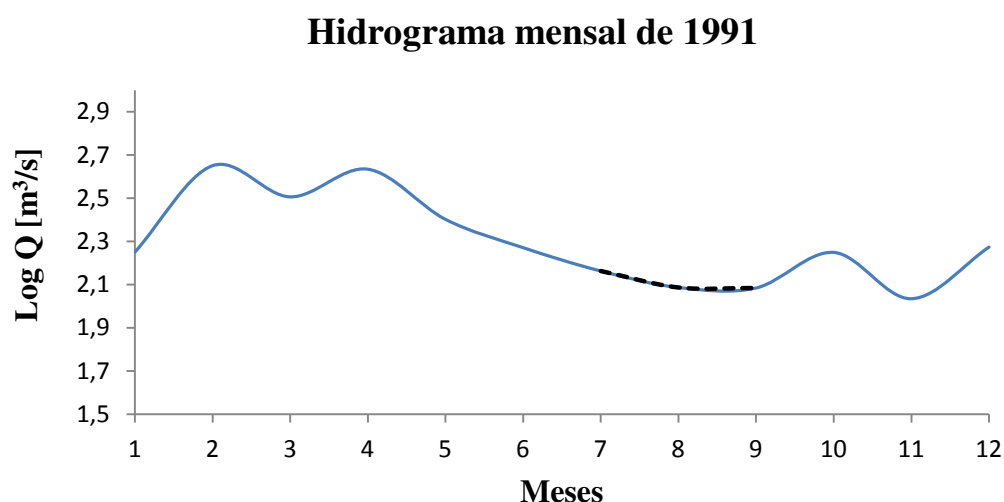


Figura A3. Determinação da reta de recessão pelo método de Barnes para médias mensais.

Como comparação, o método de Matching Strip foi aplicado a alguns hidrogramas diários de dados de vazão ao longo dos anos, porém o coeficiente da curva mestra obtido foi muito sensível às diversas recessões individuais considerando comprovando a subjetividade do método, que é aspecto citado na literatura.

APÊNDICE B – PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

O significado ambiental dos parâmetros físico-químicos analisados neste trabalho é apresentado brevemente a seguir, de acordo com as descrições apresentadas em CETESB (2013).

B1. Oxigênio Dissolvido (OD)

Os níveis de OD indicam a capacidade de um corpo d'água natural manter a vida aquática. A quantidade de oxigênio dissolvido nas águas é influenciada por diversos fatores, como as características hidráulicas do rio, a velocidade do escoamento, a fotossíntese das algas e o grau de eutrofização de corpo d'água.

O crescimento de algas em um corpo d'água eutrofizado pode prejudicar a avaliação do grau de poluição das águas, se utilizado como base de análise apenas o OD. Em águas poluídas, a decomposição da matéria orgânica reduz a concentração de OD, ao passo que em águas não poluídas a concentração de OD é maior.

B2. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A demanda bioquímica de oxigênio corresponde à quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbica. O parâmetro é geralmente obtido observando-se o consumo de oxigênio em cinco dias, a uma temperatura de incubação de 20°C (DBO_{5,20}).

A alta concentração de DBO em um rio pode ser causada pelo despejo de matéria orgânica na água. Dessa forma, mais oxigênio será necessário para oxidar os resíduos orgânicos, podendo esgotar o oxigênio e provocar, por exemplo, o desaparecimento de peixes.

B3. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A demanda química de oxigênio corresponde à quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por meio de um agente químico, como o dicromato de potássio, com maior poder de oxidação que a grande maioria dos microorganismos.

O aumento da DQO de um corpo d'água é causado principalmente por efluentes industriais. Sua análise em conjunto com o DBO pode indicar o quão biodegradável são os resíduos. Os valores de DQO são superiores aos de DBO, pois a demanda de oxigênio pelo agente químico é maior. Como DBO mede apenas a parcela biodegradável, quanto mais próximo seu valor for do DQO, mais biodegradáveis são os despejos lançados ao rio.

B4. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é uma importante variável da qualidade da água por influenciar muitos processos químicos e biológicos que acontecem dentro do corpo d'água. Como efeito indireto, pode contribuir para a precipitação de elementos químicos tóxicos como metais pesados, além de poder exercer efeito sobre a solubilidade de nutrientes. Os valores aceitáveis de pH encontram-se entre 6 e 9, de forma que não prejudique a vida aquática. Valores mais baixos podem ocorrer em águas com muita matéria orgânica, e valores mais elevados em águas eutrofizadas (CHAPMAN, 1996).

B5. Série de sólidos

Os sólidos presentes nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo após os processos de evaporação, secagem ou calcinação da amostra, quando submetidos a uma temperatura e tempo pré-estabelecidos. Efluentes industriais e esgotos sanitários influenciam na concentração de diversas frações de sólidos. O excesso de sólidos pode prejudicar a vida aquática, sedimentar o leito dos rios, além de contribuir para a retenção de bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios, promovendo decomposição anaeróbia.

B6. Séries de nitrogênio

Nesta dissertação, as séries de nitrogênio avaliadas correspondem ao nitrogênio orgânico, amônia, nitratos e nitritos. O nitrogênio total KJELDAHL, representado por NKT, que também foi analisado neste trabalho, indica a concentração de nitrogênio orgânico e amoniacal.

O lançamento de esgotos sanitários, efluentes industriais, processos realizados por bactérias e algas, e a utilização de fertilizantes em áreas agrícolas interfere nas diferentes concentrações de nitrogênio dos cursos d'água. Dentre essas fontes, os esgotos sanitários, em geral, são a principal fonte, lançando nitrogênio orgânico devido à presença de proteínas, e nitrogênio amoniacal pela uréia na água.

As etapas da degradação da poluição em um rio podem ser associadas às relações entre as formas de nitrogênio. Em um rio poluído, a predominância de nitrogênio orgânico e amoniacal é um indicativo de que o foco de poluição se encontra próximo. Já a maior concentração de nitritos e nitratos indica que as descargas de esgotos estão mais distantes. Isso se deve ao fato de que as formas orgânica e amoniacal serem formas reduzidas do nitrogênio, e os nitratos e nitritos, formas oxidadas do mesmo.

O potencial de contaminação das águas pelo nitrogênio utilizado na adubação das culturas depende da quantidade aplicada, do uso pela planta, do nível de nutrientes no solo, da matéria orgânica e do clima. Para o caso da cana-de-açúcar, o consumo médio de nitrogênio pela cultura é superior à dose aplicada do fertilizante (CGEE, 2009).

O nitrogênio presente em fertilizantes nitrogenados possui facilidade de lixiviação, principalmente na forma de nitrato, que é pouco retido pelo solo. Há evidências do acúmulo de nitrato nas águas subterrâneas, mas a contribuição dos fertilizantes para isso não é bem definida (OLIVEIRA-FILHO e LIMA, 2002).

A descarga excessiva de nitrogênio, em conjunto com o fósforo e outros nutrientes, contribui para a eutrofização do curso d'água, aumentando a quantidade de algas que, por sua vez, podem prejudicar o abastecimento público ou poluir os cursos com a morte e decomposição

desses organismos. Para a legislação em vigor, o nitrogênio amoniacal é padrão de classificação das águas naturais, e padrão de emissão de esgotos.

B7. Fósforo e potássio

A principal fonte de fósforo em águas naturais é a descarga de esgotos sanitários, devido à matéria orgânica fecal e ao detergente em pó utilizado domesticamente. Alguns fertilizantes utilizados nas áreas agrícolas, assim como alguns efluentes industriais, podem aumentar a quantidade de fósforo nos cursos d'água.

O fósforo, assim como o nitrogênio, é um dos principais nutrientes para os processos biológicos, podendo contribuir para os processos de eutrofização das águas. A maior parte do fósforo perdido nos solos agrícolas se dá pelo escoamento superficial. Desta forma, a melhor maneira de controlar a eutrofização causada por esse elemento é o controle da erosão (OLIVEIRA-FILHO e LIMA, 2002).

As águas fluviais naturalmente possuem baixa concentração de potássio, menor que 10 mg/L. A descarga de efluentes industriais e a utilização de fertilizantes em áreas agrícolas são os principais responsáveis pelo aumento da quantidade de potássio nas águas.

A principal preocupação ambiental associada ao potássio é a perda de produtividade do solo devido à manutenção inadequada do potássio em áreas agrícolas. As deficiências de potássio podem limitar o aproveitamento de nitrogênio por uma cultura, e aumentar o potencial de lixiviação de nitrato (OLIVEIRA-FILHO e LIMA, 2002).

O processo de fertirrigação através do lançamento da vinhaça em áreas de cana planta ou soqueiras de cana é utilizado para suprir as necessidades de nitrogênio, fósforo e potássio para o cultivo da cana, sendo o potássio o elemento utilizado para definir as taxas de aplicação da vinhaça (ELIA NETO et al., 2009). Dependendo da taxa de absorção de potássio pela planta e da concentração desse elemento na vinhaça, a alta concentração de sais pode causar a salinização do solo (SILVA et al., 2007).

APÊNDICE C – CONCENTRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE E CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Os gráficos a seguir representam as médias anuais das concentrações da série original dos parâmetros da estação 61851000, e expansão canavieira nos municípios da região de Pontal. Apenas são apresentados os gráficos cuja correlação dos parâmetros com a cana foi significativa. As concentrações medidas nos dias de monitoramento que não estavam compreendidas dentro do intervalo “Média aritmética \pm 3*desvio padrão” foram considerados “outliers”, e substituídos pelo valor médio de toda a série (GROPPO et al., 2006).

As setas indicadas nas figuras correspondem aos anos de mudança brusca indicados pelo teste de Pettitt.

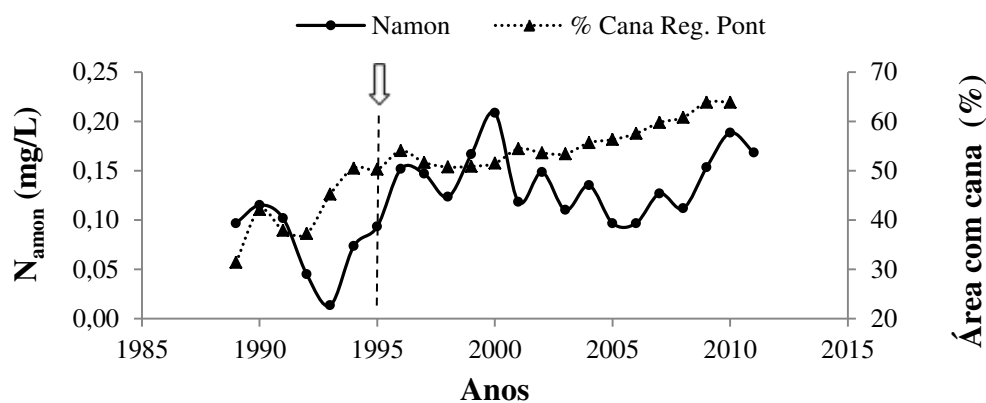


Figura C1. Concentrações de N_{amon} e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.

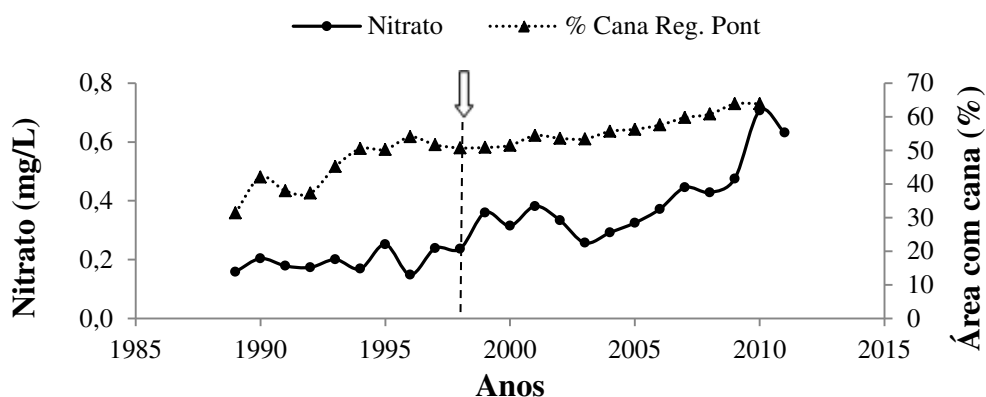


Figura C2. Concentrações de NO_3 e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.

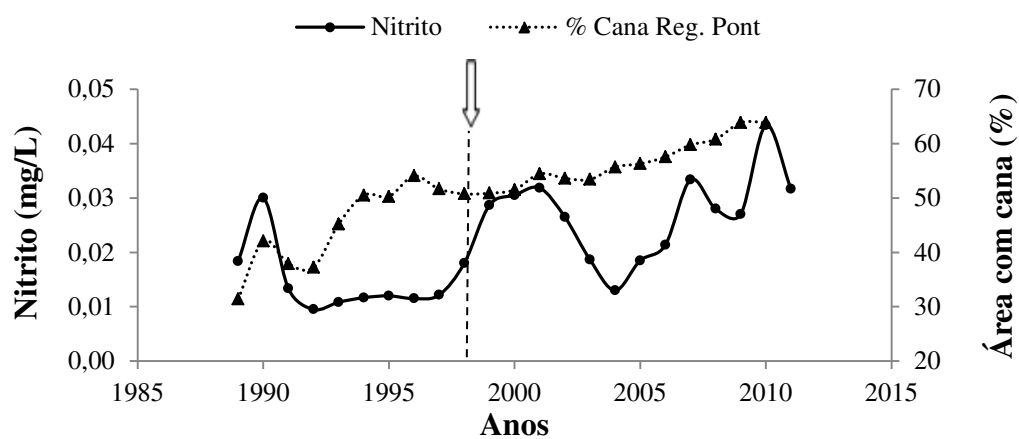


Figura C3. Concentrações de NO_2 e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.

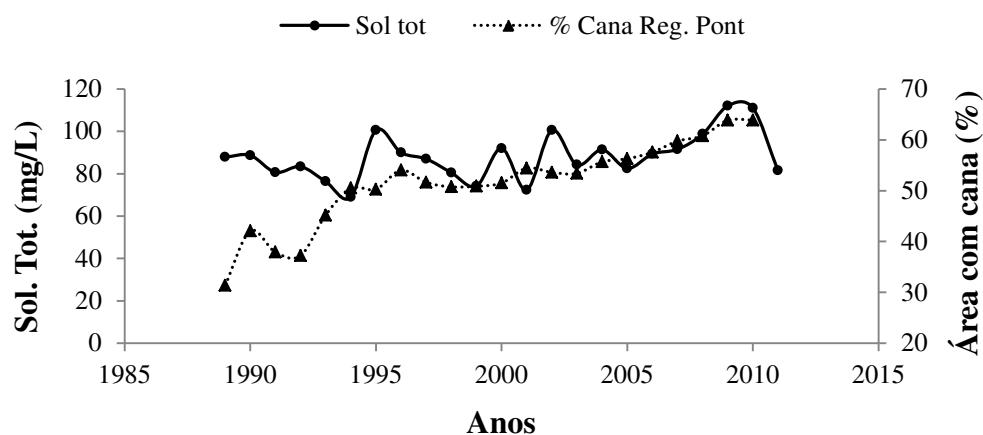


Figura C4. Concentrações de sólidos totais e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.

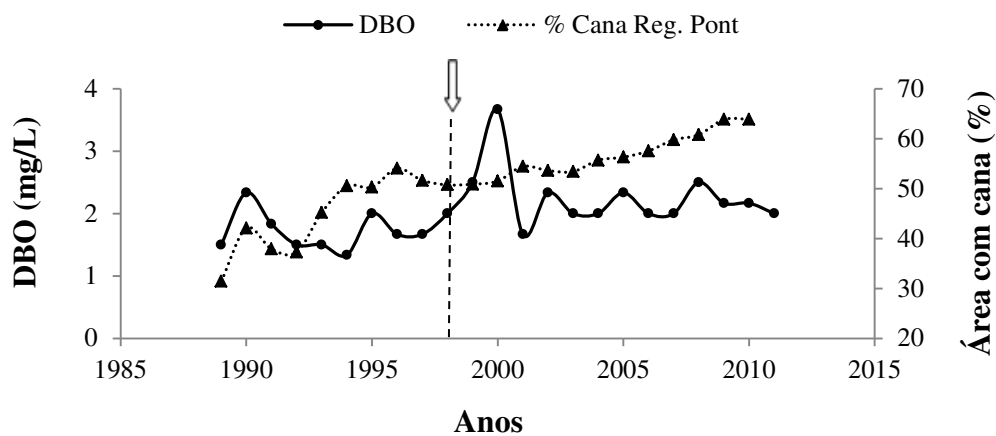


Figura C5. Concentrações de DBO e expansão da cana-de-açúcar na região de Pontal.

Os gráficos a seguir representam as médias anuais das concentrações das séries originais dos parâmetros da estação 61835000 e, também, da expansão canavieira nos municípios da região de Ribeirão Preto. Apenas são apresentados os gráficos cuja correlação dos parâmetros com a cana foi significativa.

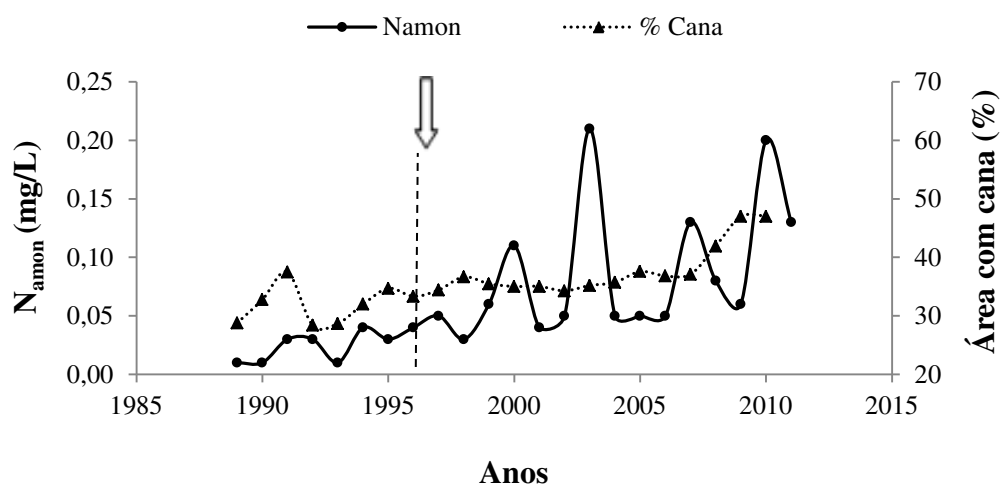


Figura C6. Concentrações de N_{amon} e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto.

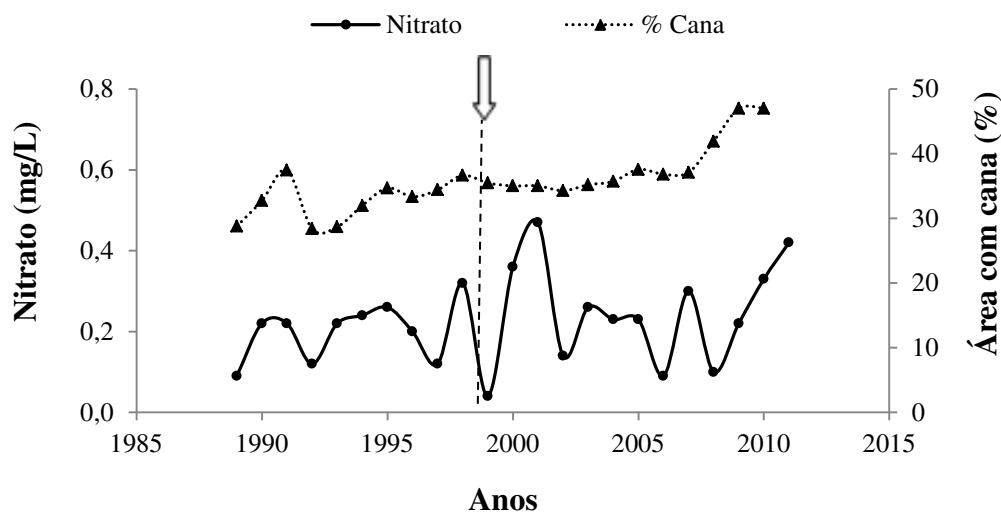


Figura C7. Concentrações de NO_3 e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto.

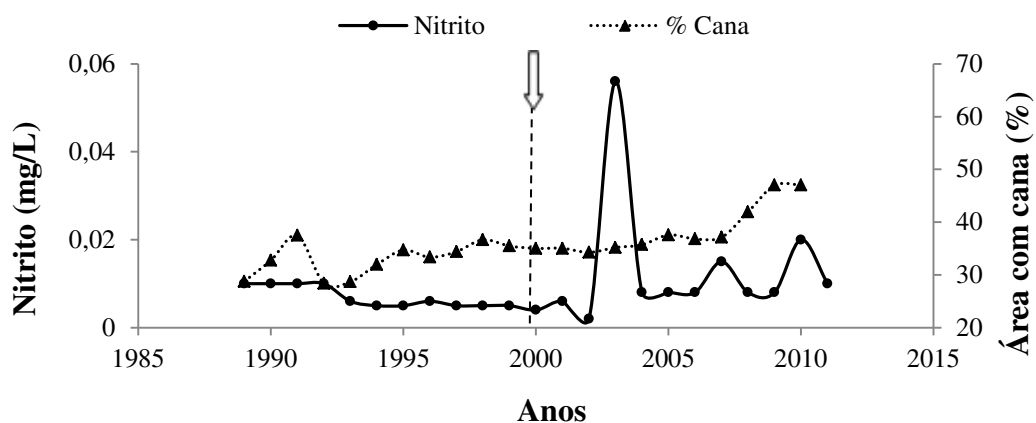


Figura C8. Concentrações de NO_2 e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto.

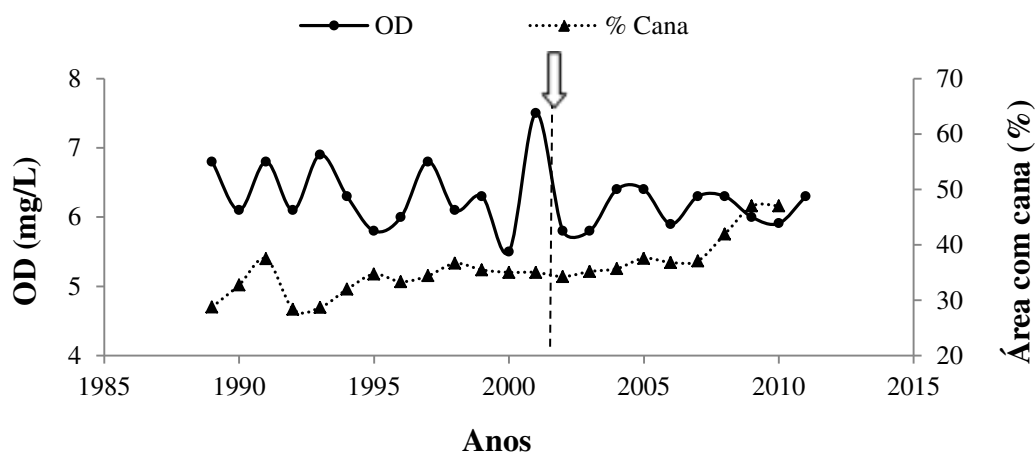


Figura C9. Concentrações de OD e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto.

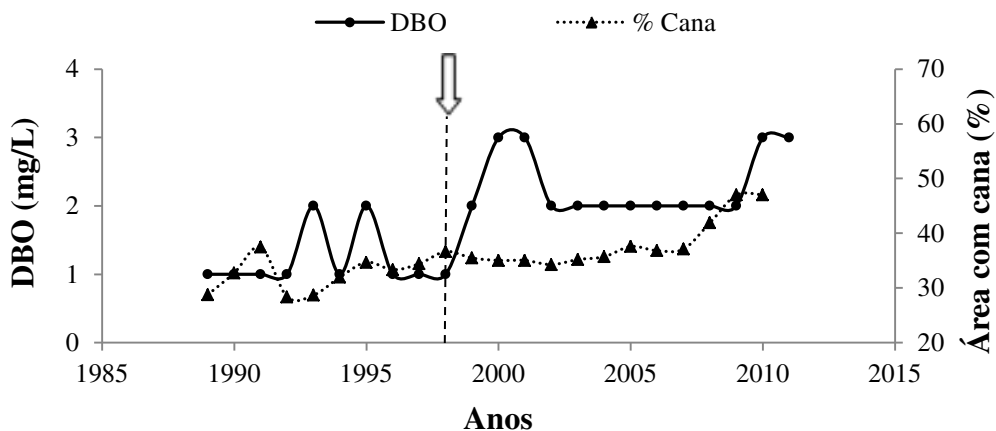


Figura C10. Concentrações de DBO e expansão da cana-de-açúcar na região de Ribeirão Preto.