

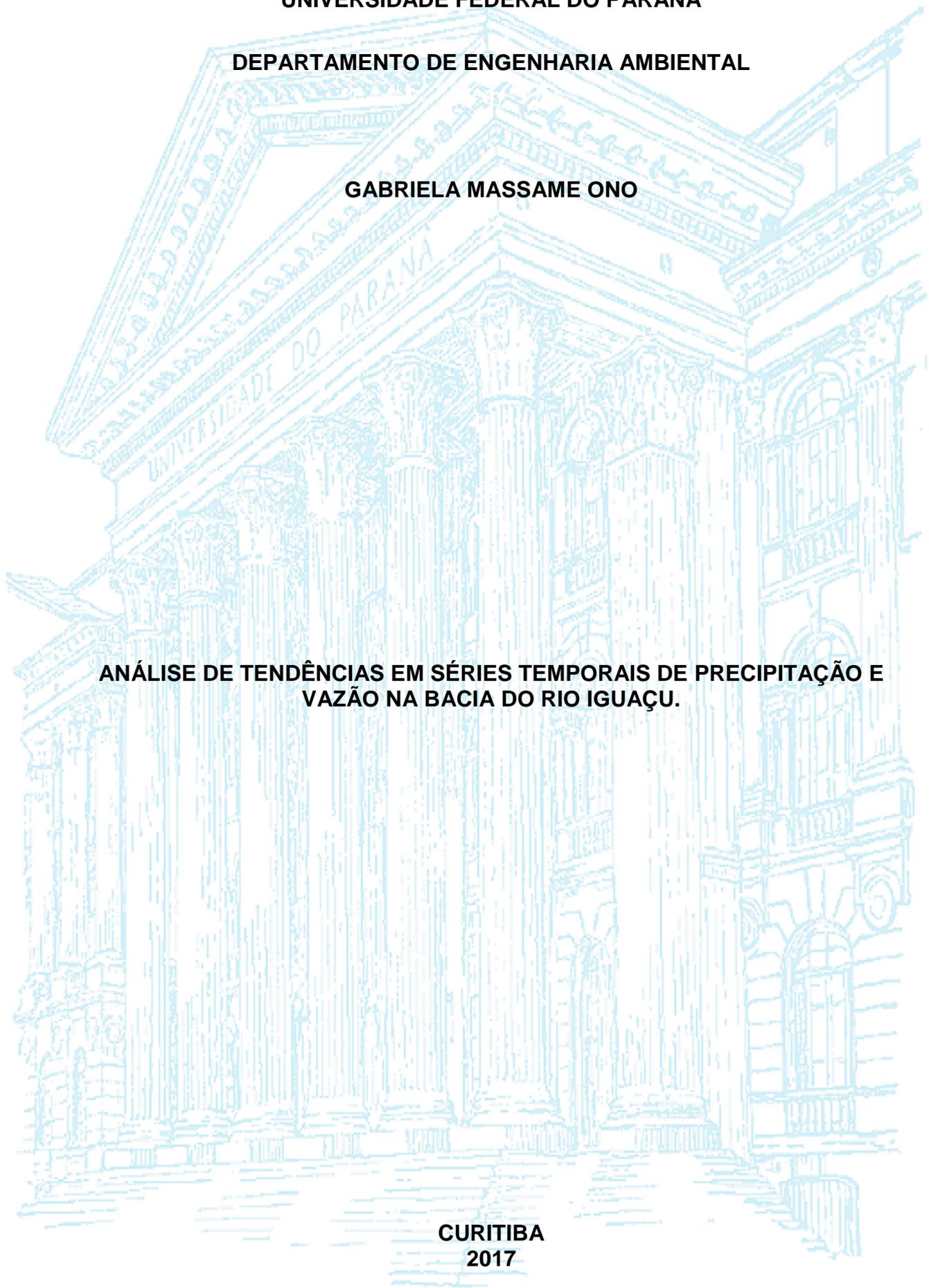
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

GABRIELA MASSAME ONO

**ANÁLISE DE TENDÊNCIAS EM SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO E
VAZÃO NA BACIA DO RIO IGUAÇU.**

**CURITIBA
2017**



GABRIELA MASSAME ONO

**ANÁLISE DE TENDÊNCIAS EM SÉRIES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÃO E
VAZÃO NA BACIA DO RIO IGUAÇU.**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho de Almeida

**CURITIBA
2017**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e a força necessária para eu alcançar meus objetivos pessoais e profissionais, e ter colocado em minha vida pessoas que me apoiam e me ajudam sempre.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Carvalho de Almeida, pelos sábios conselhos, dedicação e ajuda para a realização desse trabalho.

Aos meus pais e minha irmã, pelo amor, apoio e incentivo incondicionais, por compreenderem minha ausência dedicada aos estudos e por sempre me fortalecerem nos momentos mais difíceis.

Aos amigos, por alegrarem o meu dia-a-dia ao longo do curso, e por compartilharem comigo os melhores e mais marcantes momentos da faculdade.

Agradeço a Universidade Federal do Paraná e os professores do curso, pela oportunidade de cursar um ensino superior de qualidade, e por me proporcionar não só o conhecimento racional, mas a manifestação da educação no processo de formação profissional.

RESUMO

As mudanças climáticas e as atividades antrópicas nas bacias hidrográficas são fatores que podem influenciar na variabilidade das variáveis hidrológicas. Com o objetivo de avaliar tendências climáticas na bacia do rio Iguaçu, com dados diários de precipitação e vazão obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA) e pelo Instituto de Águas do Paraná (ÁguasParaná), foram aplicados testes de tendência bastante difundidos na literatura, como o teste de Mann – Kendall (MK), teste de Mann – Kendall Sazonal (SMK), e o teste de ponto de mudança (Pettitt). Para estes testes de tendências definiu-se a hipótese nula (H_0), com a ausência de tendências climáticas, e a alternativa (H_1), com a presença de tendências de aumento nas séries, a um nível de significância de 5%. Antes da aplicação destes testes, foi realizada uma análise preliminar dos dados, transformando os dados diários em dados mensais, para a retirada de ruídos das séries. Os resultados encontrados para o teste de MK e Pettitt foram de que para a precipitação, não há significância estatística para afirmar aumento desta variável e mudanças bruscas, respectivamente. Para as estações fluviométricas, todas mostraram ascendência dos valores e mudanças abruptas. O efeito da autocorrelação foi pouco significativo para a análise do teste de MK. Este incremento nas vazões não justificado pelo aumento de precipitação, pode ser caracterizado pelo uso intenso do solo na região da bacia em que foram selecionadas as estações fluviométricas, explicando deste modo as mudanças bruscas nas séries de vazão. A análise do teste SMK, mostrou que o efeito da sazonalidade é fortemente sentido para a estação de Fluviópolis, dificultando as análises sobre esta estação. Por fim, realizou-se uma análise em dados de desvio padrão mensal, para verificar se as eventuais mudanças identificadas pelo método de Pettitt poderiam estar associadas à alteração do uso do solo influenciando na variabilidade das séries estudadas. Pelo teste de MK, mostrou que em 50% das estações há aumento da taxa de precipitação, o que explicaria em partes o aumento na vazão. Constatou-se então, que as mudanças climáticas sentidas nessa bacia, caracterizam comportamentos locais, e não para a bacia como um todo.

Palavras-chave: Tendências climáticas, teste de Mann-Kendall, teste de Pettitt, precipitação, vazão, bacia do Iguaçu.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da análise de tendências.....	12
Figura 2 - Y VERSUS TEMPO. Variação do y com o tempo. FONTE: SOUZA (2015) adaptado de HELSEL E HIRSCH (2002).	13
Figura 3 - Mapa da localização da Bacia do Iguaçu. FONTE: ÁGUASPARANÁ e ANA (2010).....	19
Figura 4 - Perfil longitudinal do rio Iguaçu, mostrando os sucessivos represamentos. FONTE: MERENDA (2004).....	23
Figura 5 - Mapa das estações pluviométricas. FONTE: ÁGUASPARANÁ e ANA (2010).....	25
Figura 6 - Mapa das estações fluviométricas. FONTE: ÁGUASPARANÁ e ANA (2010).....	26
Figura 7 - Fluxograma da aplicação dos métodos.....	29
Figura 8 - Histogramas das frequências relativas das médias de precipitação mensais. A) Estação São Luiz do Oeste. B) Estação Bugre. C) Estação Pedra Lisa. D) Estação UHE ITAIPU. E) Estação Campina das Pedras. F) Estação Fluiópolis.	32
Figura 9 - Sequência temporal de dados de precipitação da estação São Luiz do Oeste.....	32
Figura 10 - Histogramas das frequências relativas das médias de vazões mensais. A) Estação Porto Amazonas. B) Estação São Mateus do Sul. C) Estação Fluiópolis. D) Estação União da Vitória.	34
Figura 11 - <i>Box plot</i> das médias de precipitação da estação Fluiópolis dividida no ponto de mudança.	42
Figura 12 - <i>Box plots</i> das séries de médias de vazão divididas no ponto de mudança. A) Estação Porto Amazonas. B) Estação São Mateus do Sul. C) Estação Fluiópolis. D) Estação União da Vitória.	44
Figura 13 - <i>Box plot</i> dos desvios padrões de precipitação de Fluiópolis dividida no ponto de mudança	46
Figura 14 - <i>Box plots</i> da série de desvio padrão de vazão dividida no ponto de mudança. A) Estação Porto Amazonas. B) Estação São Mateus do Sul. C) Estação Fluiópolis. D) Estação União da Vitória.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação e informações das estações pluviométricas.....	24
Tabela 2 - Identificação e informações das estações fluviométricas.....	27
Tabela 3 - Percentual de falhas nas séries de dados diários de precipitação.....	30
Tabela 4 - Percentual de falhas nas séries de dados diários de vazão.....	33
Tabela 5 - Resultado do teste de MK com efeito da autocorrelação, com dados de precipitação média mensal.....	36
Tabela 6 - Resultado do teste de MK com efeito da autocorrelação, com dados de vazão média mensal.	37
Tabela 7 - Resultado MK sem o efeito da autocorrelação, com dados de precipitação de média mensal.....	37
Tabela 8 - Resultado do teste de MK sem o efeito da autocorrelação, com dados de vazão de média mensal.	38
Tabela 9 - Resultado do teste de MK dos dados de médias mensais das estações meteorológicas no verão. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.	38
Tabela 10 - Resultado do teste de MK dos dados de médias mensais das estações meteorológicas no outono. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.....	39
Tabela 11 - Resultado do teste de MK dos dados de médias mensais das estações meteorológicas no inverno. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.....	39
Tabela 12 - Resultado do teste de MK dos dados de médias mensais das estações meteorológicas na primavera. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.....	40
Tabela 13 - Resultado do teste de SMK para os dados de precipitação mensal.	41
Tabela 14 - Resultado do teste de SMK para os dados de vazão mensal.	41
Tabela 15 - Resultado do teste de Pettitt com dados de precipitação mensal.	42
Tabela 16 - Resultado do teste de Pettitt com dados de vazão mensal.....	43
Tabela 17 - Resultado do teste de MK com dados mensais de desvio padrão de precipitação.....	45
Tabela 18 – Resultado do teste de MK com dados mensais de desvio padrão de vazão.....	45

Tabela 19 - Resultado do teste de Pettitt com dados de desvio padrão de precipitação.....	46
Tabela 20 - Resultado do teste de Pettitt com dados de desvio padrão de vazão. ...	47
Tabela 21 - Resultados dos testes com os dados das médias mensais. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.	49
Tabela 22 – Resultados dos testes com os dados dos desvios padrões mensais. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.	50

LISTA DE ABREVIATURA E/OU SIGLAS

IPCC	<i>International Painel of Climate Change</i>
AR4	<i>Fourth Assessment Report</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ET	Evapotranspiração
TAR	<i>Third Assessment Report</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
EDA	<i>Exploratory Data Analysis</i>
MK	Mann-Kendall
SMK	Mann-Kendall Sazonal
ÁguasParaná	Instituto das Águas do Paraná
RMC	Região Metropolitana de Curitiba

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
2.1	OBJETIVO GERAL	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO IGUAÇU	5
3.2	INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA VAZÃO	8
3.3	DETECÇÃO DE MUDANÇAS EM REGISTROS HIDROLÓGICOS	9
3.4	MÉTODOS UTILIZADOS PARA OBSERVAR TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS	11
3.5	TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE MANN-KENDALL	13
3.6	TESTE DE MANN-KENDALL SAZONAL	15
3.7	EFEITO DE AUTOCORRELAÇÃO NA TENDÊNCIA	16
3.8	TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE PETTITT	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1	ÁREA DE ESTUDO	19
4.1.1	LOCALIZAÇÃO	19
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BACIA DO RIO IGUAÇU	20
4.1.3	CLIMA	20
4.1.4	VEGETAÇÃO	21
4.1.5	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA DO IGUAÇU	21
4.1.6	APROVEITAMENTOS HIDROÉLETRICOS DO RIO IGUAÇU	22
4.2	DADOS DAS ESTAÇÕES HIDROMETEOROLÓGICAS	23
4.2.1	ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS	24
4.2.2	ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS	25
4.3	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE	27
5	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	30
5.1	PRECIPITAÇÃO	30
5.2	VAZÃO	33
6	RESULTADOS	36
6.1	TESTE DE MANN-KENDALL	36
6.2	TESTE DE MANN-KENDALL SAZONAL	40
6.3	TESTE DE PETTITT	41

6.4 ANÁLISE DOS DESVIOS PADRÕES.....	44
7 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE A - Sequência temporal das médias mensais de precipitação...	59
APÊNDICE B - Sequência temporal das médias mensais de vazão.....	61

1 INTRODUÇÃO

Frente à expectativa na intensificação dos efeitos das mudanças climáticas, e das limitações das estratégias para mitigá-los, a temática de adequação a eles vêm ganhando gradual relevância. Alguns estudos apontaram efeitos de mudanças nas temperaturas, outros observaram maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, alterações nos regimes de chuva, perturbações nas correntes marinhas, retração de geleiras, elevação do nível dos oceanos, entre outros (MARENGO, 2001).

Em relação às causas da mudança de clima, o *International Panel of Climate Change* (IPCC), no relatório *Fourth Assessment Report* (AR4), afirmava que é “muito provável” (até 90% de chance) que as atividades humanas, lideradas pela queima de combustível fóssil, estejam fazendo a atmosfera esquentar desde meados do século XX. Há estimativas para 2100 de um aumento médio de temperatura global de 3°C, em relação aos valores registrados antes da Era Pré-Industrial. Para o Brasil, os resultados do relatório IPCC AR4 projetaram com os modelos globais, além do aumento de temperatura, o aumento da intensidade de precipitação no Sul. (MARENGO e VALVERDE, 2007).

Entretanto, de acordo com Buchir (2013), existem alguns pesquisadores que são de opinião contrária ao consenso existente no IPCC em relação às mudanças climáticas e aquecimento do globo. Este grupo de pesquisadores recomenda um melhor aprofundamento nos debates sobre alterações climáticas, pois argumentam que o aquecimento é observado em áreas urbanas, onde se criam as chamadas “ilhas de calor”, ou somente num determinado ponto, refletindo deste modo um comportamento local e não global do clima. Eles concordam que houve um aumento na temperatura, mas não que esse cenário seja projetado para o futuro. Lindzen e Giannitisis, (2002); Molion (2008); Chapmam (2008); *apud* Buchir (2013), questionam a projeção feita pelos modelos numéricos de previsão do clima, principalmente quando se comparam os resultados entre eles.

Ainda assim, as projeções do clima são de extrema importância para identificar eventos extremos, auxiliar o planejamento e adequação do setor hidrelétrico, bem como outros aspectos sociais e ambientais.

Minuzzi e Caramori (2011) citam que as projeções climáticas futuras são feitas com base em tendências observadas no passado. A confiabilidade dos resultados depende da quantidade e da qualidade dos dados registrados. Diante das projeções constantemente divulgadas quanto às mudanças no clima e seus possíveis impactos nos ecossistemas, tornam-se necessárias informações e ferramentas cada vez mais confiáveis, visando aprimorar e atualizar a tomada de decisões.

Neste contexto, o estudo de tendências climáticas é uma importante ferramenta para analisar a direção das mudanças ambientais e será o objeto desse trabalho. O conceito de tendência climática desenvolvido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) explicita que é uma “elevação ou diminuição suave e monótona nos valores médios de uma série meteorológica, contendo apenas um máximo ou mínimo no ponto final da série.” Assim, de modo a certificar-se da veracidade de uma tendência, métodos estatísticos adequados devem ser utilizados, os quais incorporem a variabilidade natural das variáveis climáticas, tais como precipitação, temperatura, umidade do ar e vazão de rios, entre outros (SOUZA, 2015).

Além da análise de tendências sobre essas variáveis, a investigação sobre o uso e ocupação do solo é fundamental para complementar o diagnóstico sobre as mudanças climáticas. Alterações na utilização do solo podem alterar as características naturais e modificar o comportamento hidrológico de, por exemplo, uma bacia hidrográfica. Algumas das mais agressivas formas de modificação do uso e ocupação de uma bacia hidrográfica consistem no desmatamento e na urbanização. Com o desmatamento há uma menor quantidade de água interceptada pelo dossel, implicando desta maneira um aumento o escoamento superficial. A urbanização modifica a superfície do solo interferindo na fase terrestre do ciclo hidrológico, pois geralmente reduz a área de infiltração, causa a impermeabilização do solo e aumenta o escoamento superficial ocasionando cheias e inundações (TARGA *et al.*, 2012).

Segundo Nobre (2001), as regiões tropicais e países em desenvolvimento são os mais vulneráveis às mudanças climáticas, e as populações mais desfavorecidas serão as mais atingidas, visto que a degradação ambiental sempre afeta mais profundamente aos mais necessitados devido aos seus escassos

recursos financeiros. O Brasil é um país em desenvolvimento, logo, é de extrema importância que sejam realizados estudos que abordem o tema de variações no clima em âmbito nacional, de modo a antever possíveis cenários que possam prejudicar a população do país.

A Região Sul do Brasil tem grande parte de sua economia associada ao agronegócio, portanto as características do clima e suas variações podem determinar anos favoráveis ou desfavoráveis para a produção agrícola, criação de animais, geração de energia, bem como antever desastres naturais, deslizamentos de encostas e enchentes, entre outros (CERA e FERRAZ, 2015). Visto que o aumento da intensidade de precipitação pode agravar os efeitos catastróficos dos desastres hidrológicos, como deslizamento e enchentes, causando inúmeros agravos econômicos na reparação de infraestrutura e apoio aos prejudicados.

Um fundamento da Política Nacional dos Recursos Hídricos, implementado pela Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, declara que bacia hidrográfica é a unidade territorial para atuação do gerenciamento dos recursos hídricos (BRASIL, 1997). Devido à tamanha importância, o conceito foi aplicado para a escolha da área de estudo. Entre tantas outras, da Região Sul do Brasil, pôde-se destacar o potencial da bacia hidrográfica do rio Iguaçu. Importantes aproveitamentos hidrelétricos ocorrem na bacia com destaque para as usinas hidrelétricas de Foz do Areia (1.676 MW), de Salto Santiago (1.420 MW), de Segredo (1.260 MW), de Salto Caxias (1.240 MW) e de Salto Osório (1.078 MW), fazendo com que ela represente um fator importante na economia do estado do Paraná (SEMA, 2010).

A execução desse trabalho se justifica pela importância de conhecer a variabilidade da precipitação e vazão na bacia do Iguaçu, pois essas são variáveis essenciais para o planejamento da produção de energia elétrica e do agronegócio.

Este trabalho está estruturado com a presente introdução, a revisão bibliográfica, materiais e métodos, a análise exploratória preliminar dos dados, resultados, discussão e conclusão. A revisão bibliográfica possui um embasamento teórico para contextualizar os estudos sobre possíveis tendências no estudo de caso da bacia do Iguaçu e aborda conceitos e técnicas fundamentais para o desenvolvimento dessa pesquisa. Em materiais e métodos será apresentada a área de estudo, bem como as estações meteorológicas selecionadas com as séries de precipitação e vazão e a metodologia aplicada. Na parte da análise exploratória,

serão expostos alguns resultados preliminares e gráficos das séries de precipitação e vazão. Serão posteriormente apresentados os resultados das aplicações dos testes de análise. Por fim, serão apontadas e discutidas as principais conclusões da pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Alinhando o pensamento com a descrição da Introdução desse trabalho, a adequada gestão de recursos hídricos é uma forma de garantir o uso sustentável deste recurso para inúmeras aplicações.

Nesse sentido, o objetivo geral é identificar tendências de aumento nos valores de médias mensais, normalizados para diferentes números de dias de cada mês, de precipitação e vazão na bacia do rio Iguaçu, a partir das séries temporais obtidas nas estações pluviométricas e fluviométricas, respectivamente, ao longo da bacia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos podem ser resumidos em:

- I. Realizar duas análises estatísticas em dados de precipitação: a primeira aplicando o teste de tendências de Mann-Kendall (normal e sazonal), além de analisar o efeito da autocorrelação dos dados de precipitação, e a segunda analisando mudanças abruptas nas séries pelo método de Pettitt.
- II. Realizar duas análises estatísticas em dados de vazões fluviométricas: a primeira aplicando o teste de tendências de Mann-Kendall (normal e sazonal), além de analisar o efeito da autocorrelação dos dados de vazão, e a segunda analisando mudanças abruptas nas séries pelo método de Pettitt.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO RIO IGUAÇU

Buscando alguns dos eventos climáticos que já ocorreram no Brasil, podem-se mencionar os eventos extremos de secas, como o ocorrido na Amazônia em 2005, a intensa variação na precipitação nos estados do Paraná e do Rio Grande do Sul, os quais tiveram redução de 100 a 500 mm de precipitação em relação à média do verão para o período em 2004, 2005 e 2006 (MARENGO, 2006), e a recente estiagem que atingiu o estado de São Paulo de Outubro de 2013 a Março de 2014, a qual foi considerada a pior em 45 anos de registros do Estado (SOUZA, 2015).

Souza (2015) avaliou a existência de tendência à estiagem no Sistema Cantareira, São Paulo, e verificou que anualmente não existe tendência nas três regiões próximas ao Sistema Cantareira, ou seja, as mudanças climáticas ainda não são sentidas fortemente nesta região.

Por outro lado, há registros também de precipitação intensa. Em 2008, a região do Vale do Itajaí, em Santa Catarina, sofreu uma grande enchente, que resultou em mais de 100 mortes. Em janeiro de 2011, em decorrência de uma elevada quantidade de chuvas na região serrana do Rio de Janeiro, uma série de deslizamentos e enxurradas destruiu casas nas regiões de encosta e matou mais de 900 pessoas (EBC, 2015).

Pode-se considerar que avaliar o panorama climático do Paraná é o mesmo que avaliar o da bacia do rio Iguaçu, pois a mesma se estende do leste (Curitiba), até o extremo oeste do Estado (Foz do Iguaçu). Portanto, mudanças climáticas na bacia do rio Iguaçu podem ser contextualizadas nas mudanças climáticas do Sul do estado do Paraná.

Alguns indícios de que as mudanças climáticas podem estar atingindo a bacia hidrográfica do rio Iguaçu, já são reportados em artigos científicos. Marengo (2006) relatou que em 2006, o Paraná enfrentou uma das maiores estiagens de sua história. O rio Iguaçu apresentou a menor vazão de suas águas dos últimos 75 anos em julho de 2006. As cataratas do Iguaçu reduziram para 13% da vazão normal, a menor vazão desde que se começou a medi-la. Em consequência à falta de chuvas,

culturas de soja e milho, por exemplo, foram perdidas e o abastecimento para a população encontrou-se em situação crítica.

Quanto às tendências de temperatura previstas ao longo da bacia do Iguaçu, existe um estudo de temperaturas máximas e mínimas no Sul do Brasil durante o período 1960-2002 (MARENGO e CAMARGO, 2008), o qual aponta para um aquecimento sistemático da região Sul, tendo sido detectadas tendências positivas na temperatura máxima e mínima em níveis anual e sazonal. A amplitude térmica apresentou tendências negativas fortes neste período, sugerindo que as tendências na temperatura mínima são mais intensas do que as máximas, especialmente no verão, além do pronunciado aumento da frequência de dias quentes no inverno.

Uma das conclusões do trabalho de Marengo (2006) foi que a visão global esperada para a região Sul do Brasil para 2100, é que a produção de grãos poderá ficar inviabilizada com o aumento da temperatura, que as secas serão mais frequentes e que as chuvas serão restritas a eventos extremos de curta duração. As chuvas cada vez mais intensas poderiam castigar as cidades, com grande impacto social nos bairros mais pobres. Ventos intensos de curta duração poderiam também afetar o litoral. Com temperaturas mais altas e extremas em curto espaço, mais doenças seriam registradas.

Para as tendências de precipitação acumulada na bacia do Iguaçu, estudos mostram divergências. Um estudo realizado por Santos *et al.* (2017) avaliou tendências temporais pelo Teste de Mann-Kendall e Sen para precipitação e evapotranspiração (ET) no estado do Paraná. Foi analisado um total de 33 municípios paranaenses, do ano de 1980 a 2010, para ambas variáveis, entretanto, apenas cinco localidades (Bela Vista do Paraíso, Cerro Azul, Antonina, Cascavel e Mauá da Serra) apresentaram tendências significativas ($p < 0,05$) para precipitação e apenas quatro localidades (Antonina, Pinhais, Cascavel e Mauá da Serra) para ET.

Para precipitação, a tendência foi descendente nesses locais, exceto no Cerro Azul, que apresentou uma tendência ascendente. As precipitações apresentaram as maiores quantidades nas regiões costeira e sul-central e as menores quantidades nas regiões nordeste e noroeste. Quanto a ET, apresentou tendências de aumento nas quatro regiões. Apesar da maior parte das localidades apresentarem resultados sem significância estatística, as poucas tendências

significativas verificadas indicaram mudanças locais no estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2017).

Entretanto, os resultados apontados por Obregón e Marengo (2007), que utilizam modelos globais do IPCC *Third Assessment Report* (IPCC TAR), mostram tendências significativas de aumento da precipitação total anual na segunda metade do século XX em praticamente toda a Região Sul do Brasil. No estado do Paraná, os totais pluviométricos anuais foram analisados nos postos de Castro, Morretes, Quedas do Iguaçu e União da Vitória, todas pertencentes à Agência Nacional de Águas (ANA) indicando um aumento significativo em todas as estações, com exceção de Castro, onde se observou uma diminuição.

Minuzzi e Caramori (2011) analisaram o comportamento sazonal e anual da chuva, em 21 estações hidrológicas localizadas no estado do Paraná. Os resultados obtidos pelo Teste de Homogeneidade Normal Padrão não indicam pontos de mudanças estatisticamente significativos no comportamento climático da quantidade de chuva. Entretanto, a Análise de Regressão e o teste de Kendall mostram que, nas últimas décadas, a quantidade de chuva anual tem aumentado na metade leste do Paraná, principalmente na primavera.

Em relação aos eventos extremos da Região Sul do Brasil, apesar das secas registradas em 2004, 2005 e 2006, segundo Silva *et al.* (2015), há uma elevação de precipitação nos períodos secos e redução de chuvas fortes na minoria das estações estudadas por esses autores. Eles estudaram tendência em extremos de precipitação no estado do Paraná, no período de 1976 a 2010 e não encontraram tendências estatisticamente significativas na região. Entretanto, Alexander *et al.* (2006) *apud* Obregón e Marengo (2007), também analisaram tendências em extremos anuais de chuva e afirmaram que são iguais a chuva total acumulada: positivas no Sul do Brasil.

Teixeira (2004) também identificou uma tendência de aumento de eventos extremos de chuva, com maiores frequências nos anos de 1993-94 e 1997-98, que são anos de El Niño. No Sul do Brasil, em anos de El Niño, pode-se observar um aumento do número de eventos extremos de chuva no mês de novembro em relação aos anos normais. Em uma perspectiva regional, Detzel e Mine (2014) estudaram a não estacionaridade de vazões máximas na bacia do Iguaçu, identificando em uma série de vazão, que as duas maiores ocorreram em anos que tiveram uma intensa

manifestação do El Niño, em 1983 e 1998. No entanto, o El Niño é um fenômeno cíclico não associado às mudanças climáticas.

Bartiko *et al.* (2017), estudaram séries históricas de vazões máximas pelo teste de Pettitt, em todo o sul do Brasil e indicaram que 14 séries apresentaram mudanças abruptas na bacia do rio Iguaçu. As mudanças abruptas foram identificadas principalmente na década de 70.

Verifica-se, portanto, que não existe um consenso nos diversos estudos a respeito da existência ou não de tendência climática significativa estatisticamente no Paraná.

3.2 INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA VAZÃO

A vazão é uma variável hidroclimatológica que está diretamente relacionada com a intensidade e frequência de precipitação. De acordo com Marengo (2008), a época em que houve um aumento da média da vazão do rio Iguaçu, e também entre outros rios da bacia do Prata, foi a mesma em que houve uma tendência de aumento, cerca de 6% superior, de chuvas na bacia, no período de 1971 a 1990 comparado com o período de 1930 a 1970.

No entanto, existem outros fatores que podem acarretar variação da vazão de um determinado local. Lembrando-se da influência das atividades antrópicas sobre as mudanças climáticas, é válido verificar essa relação de influência quanto às modificações na vazão.

O clima regional e global podem mudar com o desmatamento e outras atividades associadas ao uso da terra, como a agricultura e a construção de grandes cidades. Um exemplo disso é o impacto do desmatamento e das mudanças no uso da terra, como resultado das atividades humanas na bacia do Prata que aumentaram rapidamente nas recentes décadas e há evidências de que estas ações modificam as características termodinâmicas da baixa atmosfera. Estas mudanças são resultados de complexas interações entre o clima, hidrologia, vegetação e o gerenciamento dos recursos água e terra (MARENGO e VALVERDE, 2007).

Os impactos sobre a vazão, causados pelos seres humanos podem variar entre construção de barragens, desmatamentos florestais, crescimento populacional,

atividades agropecuárias e de maneira geral, no uso e ocupação do solo da região (FERREIRA *et al.*, 2015).

De acordo com Marengo e Valverde (2007), existem evidências de que mudanças no uso da terra nas bacias dos rios Alto Paraná, Paraguai e Uruguai podem ter contribuído para um aumento de 28% no fluxo médio do rio Paraná desde 1970. O rio Iguaçu também tem apresentado aumentos sistemáticos nas vazões desde meados de 1970, mas a bacia tem experimentado poucas mudanças com o uso da terra e o desmatamento nas últimas décadas (GARCÍA e VARGAS, 1998 *apud* MARENGO e VALVERDE, 2007). Entretanto, nas regiões mais elevadas, a montante do rio, há a intensa ocupação urbana na região metropolitana de Curitiba (RMC).

Collishonn (2001), *apud* Marengo e Valverde (2007), apresentou resultados da avaliação do uso do solo para a bacia do rio Taquari, afluente do Jacuí no Rio Grande do Sul. Segundo o mesmo autor, se houvesse a transformação de toda a bacia de floresta em culturas anuais, o aumento do escoamento seria de 14,4% e para o pasto seria de 13,2%. Assim, o autor concluiu que a mudança do uso do solo na região pode explicar em parte as tendências do aumento das vazões.

Os estudos apontam na relação direta do uso do solo e da vazão. Todos esses fatores devem ser levados em consideração para que não se superestime ou subestime o poder da análise de tendências para a bacia do rio Iguaçu em relação à vazão. Dessa forma, não necessariamente tendências no regime de vazão estarão associadas às mudanças climáticas.

3.3 DETECÇÃO DE MUDANÇAS EM REGISTROS HIDROLÓGICOS

O exame dos dados hidrológicos por Kundzewicz e Robson (2004), mostrou algumas ressalvas e equívocos cometidos quando se utilizam dados hidrológicos em pesquisas. Os autores destacaram aspectos essenciais que muitas vezes são ignorados. Um dos destaques foi a importância da análise exploratória de dados (*Exploratory Data Analysis* - EDA) que nada mais é que um exame visual avançado dos dados. Isto envolve o uso de gráficos para explorar, compreender e apresentar dados, e é uma componente essencial de qualquer análise estatística. Esse procedimento permite uma maior apreciação das características dos dados, devido ao poder do cérebro humano e o sistema visual de identificar e interpretar padrões.

Eles defendem que essas técnicas são flexíveis e robustas e requerem apenas premissas mínimas sobre os dados.

A mudança de uma série de dados temporais pode ocorrer de diferentes formas: gradual (uma tendência), abrupta (uma mudança brusca), ou de uma forma muito complexa. Isso pode afetar a média, a mediana, a variância, a autocorrelação ou qualquer outra característica estatística dos dados.

Por conseguinte, o primeiro uso da EDA geralmente é para examinar os dados brutos para identificar problemas nos dados de valores suspeitos, padrões temporais (tendência, mudança abrupta e sazonalidade) e padrões regionais e espaciais. A EDA é inestimável quando se trata de interpretar os resultados de uma análise estatística e para examinar resíduos, gradientes de tendência e níveis de significância. Uma EDA bem conduzida é uma ferramenta tão poderosa que às vezes pode eliminar a necessidade de uma análise estatística formal. Com a EDA, os testes estatísticos tornam-se uma forma de confirmar se um padrão observado é significativo ou não.

A partir da análise exploratória dos dados, junto com a interpretação dos resultados existe a necessidade de apurar tanto quanto possível a via externa, a distinção entre a tendência que decorre da mudança do uso da terra, mudanças climáticas ou simplesmente de técnicas de medição alteradas. Ainda segundo Kundzewicz e Robson (2004), os dados são basilares na tentativa de detectar tendências ou outras alterações nos registros hidrológicos. Por isso os dados devem possuir um controle de qualidade antes de iniciar uma análise de tendência.

De acordo com Pinheiro (2016), existem diversos testes estatísticos que podem ser empregados na análise do comportamento de séries temporais. Alguns destes testes analisam as homogeneidades destas séries, considerando o período em que ocorrem, detectando possíveis “quebras”. Este tipo de análise tem por objetivo detectar se a não homogeneidade da série está relacionada a fatores climáticos ou não climáticos.

A maioria dos postos fluviométricos e pluviométricos escolhidos para esse trabalho correspondem a um linígrafo e pluviômetro analógico, os quais requerem atenção diária, ou seja, constante manutenção. Por isso, em alguns casos específicos, podem incidir problemas de inconsistências, que causam falhas ou ruídos nas séries de registros históricos. Os fatores que podem contribuir para a

disseminação de erros ou falhas nos registros podem ser as alterações ou mau funcionamento dos instrumentos de medição, troca do método de observação, mudança de localização do equipamento (urbanização e/ou uso do solo), entre outros (PINHEIRO, 2016).

3.4 MÉTODOS UTILIZADOS PARA OBSERVAR TENDÊNCIAS CLIMÁTICAS

Os cientistas coletam dados para aprender sobre os processos e sistemas que esses representam. Muitas vezes eles têm ideias prévias, chamadas hipóteses, de como os sistemas se comportam. Um dos principais objetivos da coleta de dados é testar se essas hipóteses podem ser comprovadas, com evidências fornecidas por eles. Os testes estatísticos são os meios mais quantitativos para determinar se as hipóteses podem ser comprovadas, ou se devem ser modificadas ou rejeitadas de imediato (HELSEL e HIRSCH, 2002).

Conforme Helsel e Hirsch (2002) para verificar uma hipótese de tendências deve-se primeiramente adotar uma hipótese nula (H_0) de que não há tendência, e uma hipótese alternativa (H_1) de que há tendência de aumento ou diminuição. No entanto, qualquer teste traz consigo uma definição matemática precisa do que se entende por “nenhuma tendência”, incluindo um conjunto de suposições geralmente relacionadas à forma de distribuição e correlação serial. O resultado do teste é uma "decisão" - ou (H_0) é rejeitado ou não rejeitado. Se a hipótese nula for rejeitada, isso significa que a hipótese alternativa pode ser aceita.

Helsel e Hirsch (2002) afirmam também que os testes de hipóteses têm vantagens, pois eles garantem que cada analista de um conjunto de dados usando os mesmos métodos chegarão ao mesmo resultado. Os cálculos podem ser verificados e aceitos por outros, além deles apresentarem uma medida da força da evidência (o p-valor).

O p-valor ou nível de significância é a probabilidade de um teste detectar erroneamente a tendência quando ela não está presente, desta maneira evita que a hipótese nula seja rejeitada quando não há tendência. Assim, um nível de significância de 5% seria interpretado como forte evidência contra a hipótese nula (KUNDZEWICZ e ROBSON, 2004).

Testes de tendência têm sido de grande interesse em ciências ambientais nas últimas duas décadas. Back (2001) define tendência em uma série temporal como uma mudança sistemática e contínua em qualquer parâmetro de uma dada amostra, excluindo-se mudanças periódicas ou quase periódicas. Portanto, será uma mudança caracterizada por um suave acréscimo ou decréscimo nos valores médios no período de registro (HELSEL e HIRSCH, 2002).

Hamed e Rao (1998) afirmam que os métodos de análise de tendências em séries temporais mais eficazes são os métodos paramétricos, apesar de exigirem que os dados sejam independentes e normalmente distribuídos. Já os testes de tendência não paramétricos exigem apenas que os dados sejam independentes e toleram valores anômalos nos dados, pois possuem mais resistência estatística.

Contudo, os dados das séries temporais de recursos hídricos além de não possuírem uma distribuição normal de dados, dependem de outras variáveis não controladas, possuem padrões sazonais e dependência em série (autocorrelação) isso implica que esses tipos de dados devem ser analisados por métodos não paramétricos (HELSEL e HIRSCH, 2002).

A partir do exposto anteriormente, pode-se resumir esquematicamente, na Figura 1, o método de análise de tendências.

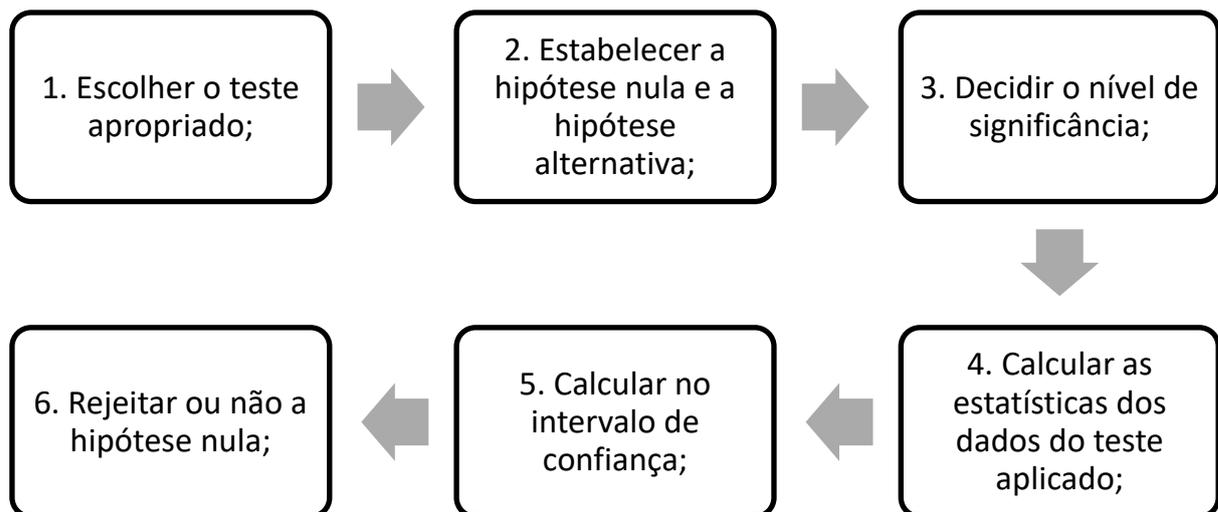


Figura 1 - Fluxograma da análise de tendências.

3.5 TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE MANN-KENDALL

Dentre os vários métodos existentes para análise de tendências de séries pluviais e fluviais, destaca-se o teste estatístico de Mann-Kendall (MK), bastante usado na análise de mudanças climáticas. É um dos métodos mais difundidos inclusive recomendado pela OMM, para avaliar a significância da tendência monótona em séries hidrológicas, se há tendência crescente ou decrescente, simplesmente por ter a vantagem de não necessitar de quaisquer hipóteses sobre a distribuição nos dados amostrais (BACK, 2001; BUCHIR, 2013).

Segundo Helsel e Hirsch (2002), em geral, o teste Mann-Kendall busca identificar se valores de uma variável Y aumentam ou diminuem gradualmente com t (tempo) como é exemplificado na Figura 2.

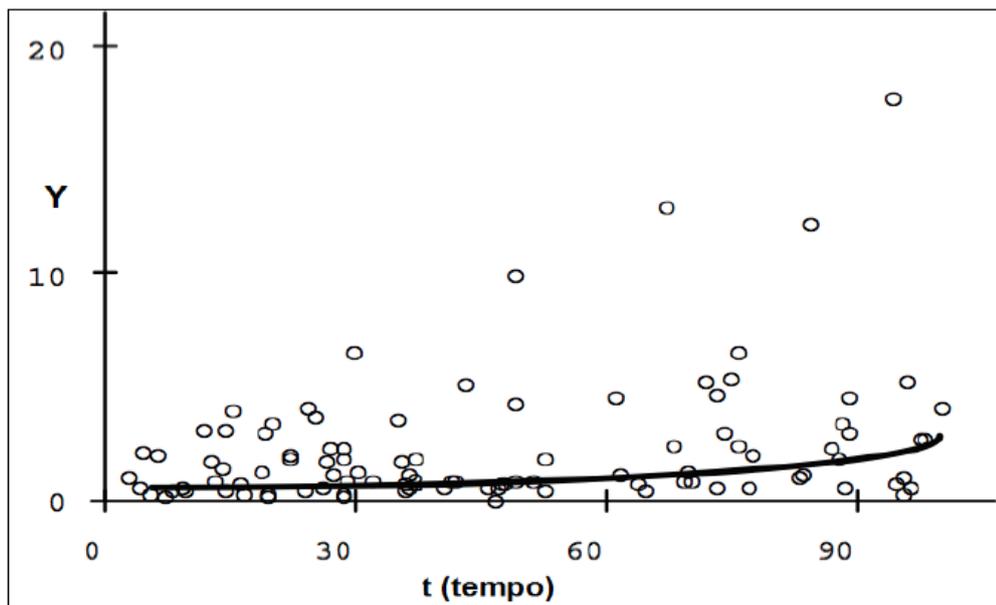


Figura 2 - Y VERSUS TEMPO. Variação do y com o tempo. FONTE: SOUZA (2015) adaptado de HELSEL E HIRSCH (2002).

O teste foi utilizado inicialmente por Mann (1945), e posteriormente alterado por Kendall e Stuart (1967), que criaram a correspondente estatística. A aplicação do teste é relatada por numerosos pesquisadores (MENEZES e FERNANDES, 2016; SALVIANO, GROppo e PELLEGRINO, 2016; SOUZA, 2015; BUCHIR, 2013), o que tem evidenciado resultados muito consistentes, pois segundo os mesmos pesquisadores, uma vantagem deste teste é que os resultados são fáceis de interpretar e se aplicam a todo o período em estudo (BACK, 2001; BUCHIR, 2013).

O teste MK normalmente adota o nível de significância 5%, onde a hipótese (H_0) deve ser rejeitada sempre que o valor da estatística de análise estiver fora do intervalo de confiança (BUCHIR, 2013).

Blain (2010) define este teste não paramétrico de Mann-Kendall, pela estatística S , representada pela equação

$$S = \sum_{j < i} \text{ sinal } (Z_i - Z_j), \quad (1)$$

em que, a série de dados é representada por Z

$$Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_i, Z_j, \dots, Z_n], \quad (2)$$

a diferença da sequência de valores $\text{ sinal } (Z_i - Z_j)$ é dada por

$$\text{ sinal } (Z_i - Z_j) = \begin{cases} 1; \text{ para } Z_i - Z_j > 0 \\ 0; \text{ para } Z_i - Z_j = 0 \\ -1; \text{ para } Z_i - Z_j < 0 \end{cases}. \quad (3)$$

A variância de S (σ_s), é dada pela equação

$$\sigma_s = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}, \quad (4)$$

onde n é o tamanho da amostra. Assim, a ocorrência ou não de tendência pode ser estimada pelo teste estatístico MK, dado por

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\sigma_s}}; \text{ para } S > 0 \\ 0; \text{ para } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\sigma_s}}; \text{ para } S < 0 \end{cases}. \quad (5)$$

A probabilidade de ocorrência de Z_{MK} (p-valor) no teste Mann-Kendall é aproximada pela função cumulativa da distribuição normal

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^2 e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (6)$$

3.6 TESTE DE MANN-KENDALL SAZONAL

Helsel e Hirsch (2002) afirmam que dados hidrológicos possuem padrões sazonais. Isso significa que em determinadas estações do ano, ocorrem fenômenos climáticos periodicamente semelhantes. Para lidar com essa dificuldade imposta pela elevada variabilidade sazonal dos dados observados, foi sugerida uma adaptação do método de Mann-Kendall por Hirsch *et al.* (1982) *apud* Buchir (2013). Este método alternativo é chamado de teste de Mann-Kendall Sazonal (SMK).

O cálculo da estatística do teste de SMK consiste em usar separadamente o teste de Mann-Kendall em cada uma das estações do ano, e posteriormente combinar os resultados. Assim, para cada estação do ano, os dados mensais correspondentes a um determinado ano são somados, de modo a obter-se um único valor para a referida estação. Com esses valores, obtém-se a estatística S para cada uma das estações. Por exemplo, para o inverno, somam-se os dados dos meses correspondentes a essa estação – Junho, Julho e Agosto - e utilizam-se esses valores para a obtenção da estatística para cada uma das estações, com o uso da Equação (1). Em seguida, somam-se as estatísticas S_i para a obtenção da estatística S_k

$$S_k = \sum_{i=1}^m S_i. \quad (7)$$

Por sua vez, a estatística de Mann-Kendall Sazonal (Z_{SMK}) é dada por

$$Z_{SMK} = \begin{cases} \frac{S_k - 1}{\sqrt{\sigma_{S_k}}}; \text{para } S_k > 0 \\ 0; \text{para } S_k = 0 \\ \frac{S_k + 1}{\sqrt{\sigma_{S_k}}}; \text{para } S_k < 0 \end{cases}, \quad (8)$$

sendo que σ_{S_k} é obtido através de

$$\sigma_{S_k} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)}{18}, \quad (9)$$

onde n_i é o tamanho da série em cada estação; e m o número de estações do ano. No entanto, se alguns dos valores na série de uma das estações estiverem repetidos, a fórmula da variância é modificada

$$\sigma_s = \frac{n(n - 1)(2 + 5) - \sum_{i=1}^m t_i(i)(i - 1)(2i + 5)}{18}, \quad (10)$$

em que t_i é o número de repetições (empates) de tamanho i ; i é o tamanho da repetição e n é o número de dados da série.

Assim, a hipótese nula é rejeitada no nível de significância p se $|Z_{SMK}| > Z_{crit}$; sendo o Z_{crit} obtido na tabela de distribuição normal com a probabilidade de p . (BUCHIR, 2013).

3.7 EFEITO DE AUTOCORRELAÇÃO NA TENDÊNCIA

Helsel e Hirsch (2002) citam que em dados hidrológicos, tais como vazão e precipitação, além da influência da sazonalidade, eles também são influenciados pela autocorrelação. A autocorrelação de uma variável significa que as observações consecutivas tendem a estar fortemente relacionadas entre si. Para o tipo mais comum de autocorrelação em recursos hídricos (autocorrelação positiva), os valores altos tendem a seguir os valores altos e os valores baixos tendem a seguir os valores baixos.

Também conhecida como persistência temporal, a autocorrelação temporal implicará na redução da variância das amostras de uma série criando maior chance de rejeitar a hipótese nula proposta (WILKS, 2006 *apud* SOUZA, 2015). Assim, no estudo de tendências climáticas, é essencial a investigação da autocorrelação entre os dados para que os resultados finais não sejam incorretos.

Um procedimento proposto por Yue *et al.* (2002) para a análise da autocorrelação dos dados hidrológicos é chamado de *pre-whitening*. O coeficiente de autocorrelação é calculado na série original com um atraso de uma observação (*lag-one*) e então removido desta série. Assim, é criada uma série considerada “limpa”, da qual poderão ser calculados os parâmetros de interesse e aplicados os métodos estatísticos. Tal cálculo é feito pela equação

$$Y_t = X_t - r_t X_{t-1}, \quad (11)$$

onde Y_t será a série de resíduo de regressão de primeira ordem, X_t é o valor original do dado e r_t é o coeficiente de autocorrelação.

De modo semelhante, Hamed e Rao (1998) também propõem um método, no qual uma eventual tendência nos dados seja retirada da série antes da “limpeza” da série, uma vez que existe uma influência recíproca entre autocorrelação e tendência.

3.8 TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE PETTITT

O teste de ponto de mudança mediano, ou teste de Pettitt para mudança, é baseado em uma classificação para identificar uma mudança na mediana de uma série sendo o tempo exato de mudança desconhecido (PETTITT, 1979; SIEGEL e CASTELLAN, 1988 *apud* KUNDZEWICZ e ROBSON, 2004). O teste é considerado robusto para mudanças na forma de função distribuição de probabilidades.

O teste não paramétrico de Pettitt pode ser utilizado para identificar mudanças bruscas em dados hidrológicos e séries temporais em complemento à análise de tendências. O teste estatístico se baseia na distribuição livre e com o

período da mudança de média desconhecido (KUNDZEWICZ e ROBSON, 2000). Para séries com T observações, o teste pode ser definido como

$$K_T = \max |U_{t,T}|, \quad (12)$$

onde $U_{t,T}$ é definido como

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j), \quad (13)$$

e sgn denota a função sgn (1 para positivo, 0 para zero e -1 para argumentos negativos).

Determinando o nível de significância p , a hipótese nula é rejeitada se

$$p > 2 \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right). \quad (14)$$

O ponto na série temporal que ocorreu a mudança pode ser estimado no tempo t quando o máximo de K_T ocorre, caso a hipótese nula tenha sido rejeitada no teste. Destaca-se que este é um teste bilateral, ou seja, estuda-se apenas a ocorrência ou não da mudança abrupta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 LOCALIZAÇÃO

A bacia do rio Iguaçu localiza-se na Região Sul do Brasil, na porção sul do estado do Paraná e na porção norte do estado de Santa Catarina, como pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Ela situa-se entre as latitudes $25^{\circ} 05' 00''$ S e $26^{\circ} 45' 00''$ S e as longitudes $48^{\circ} 57' 00''$ W e $54^{\circ} 50' 00''$ W, drenando uma área cerca de 70.800 km², o que corresponde cerca de 28% da área total do Estado (MERENDA, 2004). A população da bacia é estimada em 4,5 milhões de habitantes, que correspondem a 40,02% da população paranaense (IBGE, 2016).

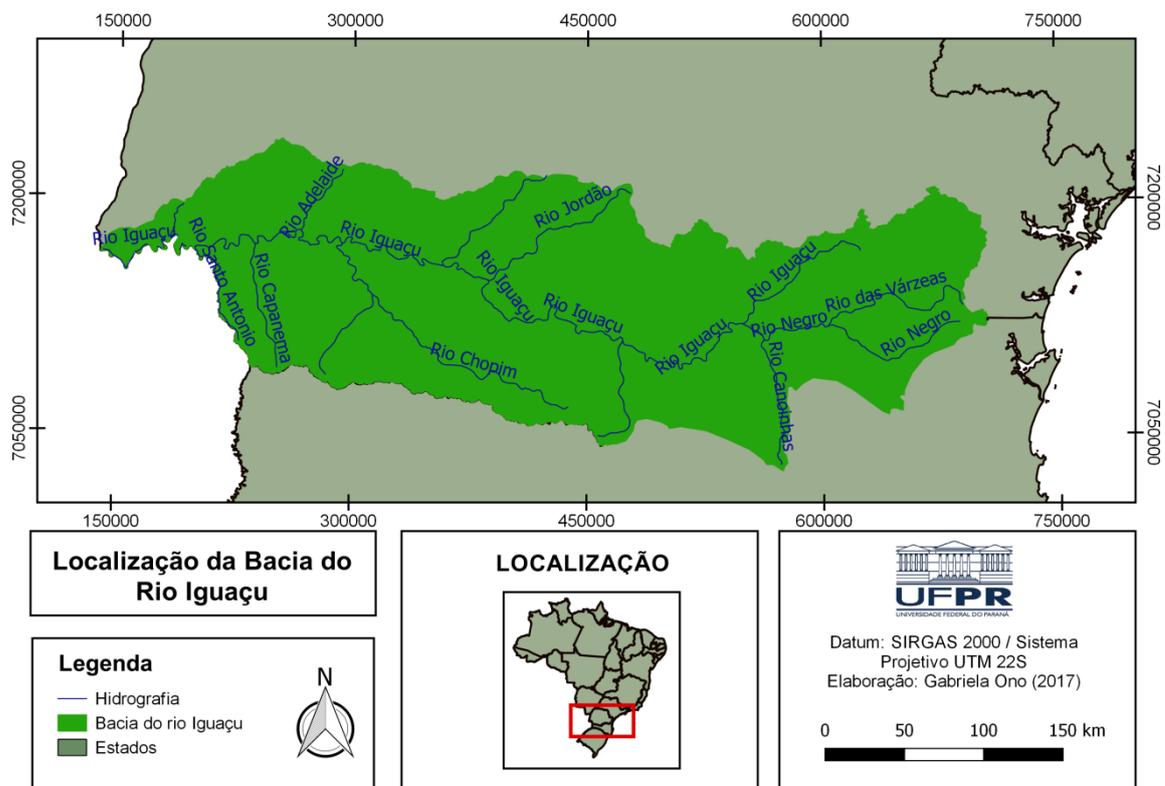


Figura 3 - Mapa da localização da Bacia do Iguaçu. FONTE: ÁGUASPARANÁ e ANA (2010).

Suas nascentes estão na Serra do Mar onde se formam inicialmente os rios Atuba e Iraí. No encontro das águas destes rios, no limite de Curitiba com São José dos Pinhais, nasce o Iguaçu. O seu início está localizado embaixo da ponte da BR-277, no trecho que liga a capital às praias. Entre os principais afluentes do Iguaçu, estão os rios Negro, Jordão e o Chopim (SANEPAR, 2017).

No estado do Paraná, as cidades mais importantes inseridas na bacia são: Curitiba, São José dos Pinhais, Colombo, Pinhais, Araucária, Guarapuava, Francisco Beltrão, Cascavel (parcialmente) e Foz do Iguaçu (MERENDA, 2004).

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BACIA DO RIO IGUAÇU

A direção preferencial do rio Iguaçu, Leste-Oeste, percorre aproximadamente 1.320 km, desde suas nascentes, na vertente ocidental da Serra do Mar, próximo à Curitiba, até a sua foz, no rio Paraná, passando pelos três planaltos paranaenses. Próximo à sua foz ele apresenta as Cataratas do Iguaçu, que são as maiores quedas (ou saltos) em volume de água do mundo (SEMA, 2010).

A bacia do Iguaçu tem um formato aproximadamente retangular, medindo em média 560 km de comprimento por 198 km de largura. O eixo mais extenso e que leva o nome de rio Iguaçu tem altitude máxima de 1.200 m (BUCHIR, 2013).

A bacia do Iguaçu está dividida nas seguintes Unidades Hidrográficas de Gestão de Recursos Hídricos, de acordo com a Resolução Nº 49/2006/CERH/PR: Baixo Iguaçu, Médio Iguaçu e Alto Iguaçu, esta última agrupada à Bacia do Alto Ribeira (SEMA, 2010).

4.1.3 CLIMA

As características climatológicas reinantes em toda bacia do rio Iguaçu, segundo a classificação de Köppen, enquadram-se como subtropical úmido, mesotérmico, sem estação seca, e a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C (BUCHIR, 2013).

As precipitações médias anuais variam entre 1.200 mm a 1.600 mm até o final do Segundo Planalto e de 1.600 mm a 1.800 mm no trecho correspondente ao

Terceiro Planalto. Assim sendo, a precipitação anual média é superior a 1.000 mm, com o mês mais seco excedendo a 60 mm (MERENDA, 2004).

Segundo Azevedo (1974) *apud* Buchir (2013), de maneira geral, no estado do Paraná os meses de Julho e Agosto (inverno) são os meses consecutivos mais secos, ficando Dezembro, Janeiro e Fevereiro (verão) como os meses mais chuvosos, e Outubro (primavera) como o mês mais chuvoso para a região oeste do Paraná. Ainda Azevedo (1974) *apud* Buchir (2013) afirma que a influência do relevo na bacia do rio Iguaçu se destaca nos planaltos das Araucárias, próximo dos municípios de Guarapuava e Palmas, onde a altitude chega a 1.200 m. A variação acentuada do relevo nessa região propicia a formação das chuvas orográficas, a partir da dinâmica de entrada de massas polares, apresentando valores de precipitação de 1.900 mm na região sudoeste da bacia do Iguaçu.

4.1.4 VEGETAÇÃO

Segundo a classificação adotada pelo IBGE, a floresta Subcaducifolia Subtropical com *Araucaria angustifolia*, originalmente abrangia quase toda a região da bacia do Iguaçu. No Baixo Iguaçu, ocupando uma área de aproximadamente 12% da bacia, ocorre a floresta Subcaducifolia Subtropical sem que haja limites nítidos, a não ser pela ausência de Araucária (BUCHIR, 2013).

Hoje a vegetação da bacia do Iguaçu está bastante alterada, quer em sua composição florística, quer em seus limites, tornando-se difícil uma real caracterização da cobertura original (BUCHIR, 2013).

4.1.5 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA DO IGUAÇU

No interior do Estado predomina a agropecuária, com destaque para as culturas de soja e trigo, além das pastagens. As indústrias da bacia, em sua maior parte, estão relacionadas com a agropecuária (SEMA, 2010). As bacias dos rios Iguaçu, Ivaí e Piquiri produzem a maior parte da área colhida do Estado, representando, respectivamente, 23%, 20%, e 18% da produção agrícola, sendo as principais culturas: soja, milho, trigo, feijão e a cana-de-açúcar (BUCHIR, 2013).

Em resumo, grande parte da área da bacia é ocupada com a classe de uso misto, aparecendo áreas de agricultura intensiva na região de Guarapuava, seguindo no sentido sudoeste, até a divisa com Santa Catarina. Há uma concentração de cobertura florestal na região do Médio e Baixo Iguaçu. Nas últimas décadas, as barreiras físicas e as altas declividades impediram a disseminação da mecanização no vale, o que contribuiu para manutenção da situação agrária da região e a preservação de áreas de matas nos locais de difícil acesso (MERENDA, 2004). O Alto Iguaçu, Curitiba e região metropolitana são tomadas predominantemente por áreas de uso urbano, com uma grande concentração populacional e as atividades industriais, comerciais e de serviços são as mais importantes (SEMA, 2010).

4.1.6 APROVEITAMENTOS HIDROÉLETRICOS DO RIO IGUAÇU

O elevado desnível da bacia do rio Iguaçu se constituiu em um grande atrativo para o aproveitamento hidroelétrico para esta bacia. Ela é responsável por cerca de 22,5% de toda energia hidroelétrica produzida no estado do Paraná. Portanto, buscando aproveitar este potencial, foram instaladas ao longo do curso do rio Iguaçu cinco grandes barramentos: Foz do Areia, Segredo, Salto Santiago, Salto Osório e Salto Caxias, representados equivalentemente na Figura 4. Destes, três operam sob regularização (Foz do Areia, Segredo e Salto Santiago) e os dois restantes, operam a fio de água (Salto Osório e Salto Caxias) (MERENDA, 2004; BUCHIR, 2013).

Por apresentar esta característica de acentuado desnível e um grande número de pessoas vivendo às margens dos principais reservatórios, há ocorrência de eventos de inundações rápidas e graduais que, inevitavelmente, provocam perdas materiais, tanto para economia do Estado como para a população (ARAUJO *et al.*, 2016). No total, esses barramentos alagam cerca de 515 km², e acumulam cerca de $18,5 \times 10^6 m^3$ de água (MERENDA, 2004).

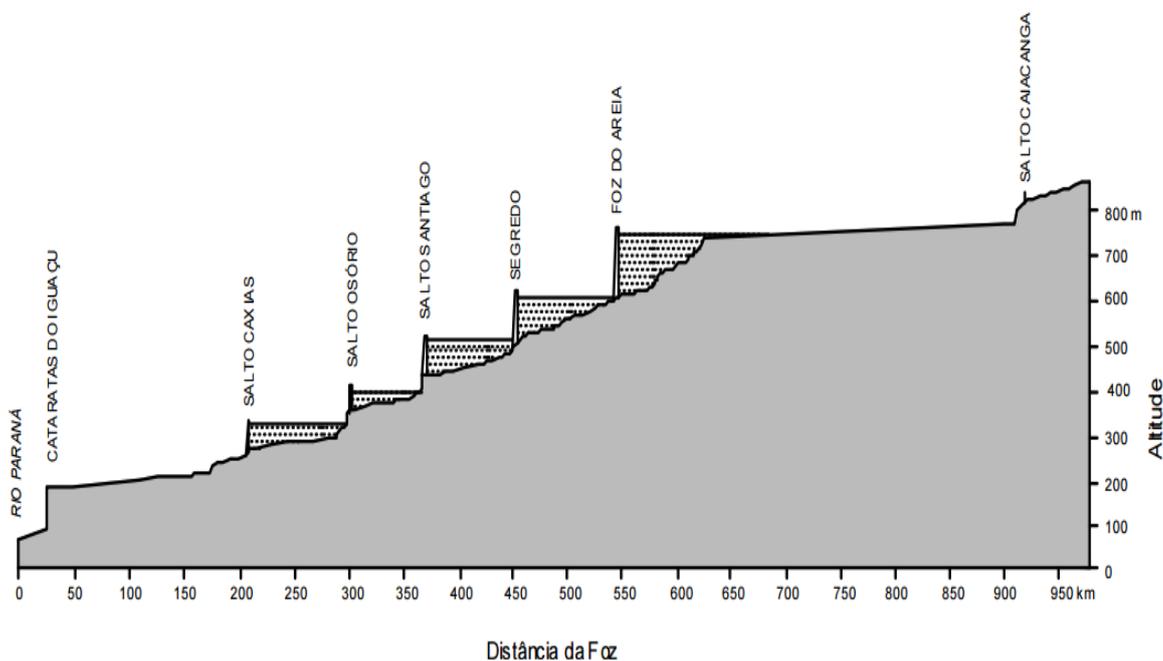


Figura 4 - Perfil longitudinal do rio Iguaçu, mostrando os sucessivos represamentos. FONTE: MERENDA (2004).

Há ainda a construção da sexta e última usina no rio Iguaçu. A usina Baixo Iguaçu já possuiu 72% de suas obras concluídas e entrará em operação no segundo semestre de 2018. Terá potência instalada de 340 MW, a qual será capaz de abastecer um milhão de pessoas (MATIELLO e QUELUZ, 2017).

4.2 DADOS DAS ESTAÇÕES HIDROMETEORÓLOGICAS

Segundo Martín-Vide (2004) *apud* Pinheiro (2016), os dados de observação são fundamentais para a qualidade da investigação de tendências, uma vez que descrevem a estrutura temporal dos fenômenos. Desta forma, é de grande importância a escolha das estações meteorológicas adequadas para análise de dados.

As Instituições Públicas responsáveis por gerenciar os bancos de dados utilizados nesse trabalho, são a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto das Águas do Paraná (ÁguasParaná). Os dados pluviométricos foram obtidos através do sítio eletrônico do Hidroweb gerenciado pela ANA, e os dados fluviométricos foram obtidos pelo Sistema de informações hidrológicas do ÁguasParaná.

Na escolha das estações, também foi utilizado o critério da extensão de cada série. Para análise de tendências as séries precisam ser suficientemente longas, para não comprometer a qualidade dos resultados. Kundzewicz e Robson (2004) recomendem o uso de séries com pelo menos 50 anos de dados. Entretanto, a fim de possibilitar a análise em mais número de estações de observações, adotou-se o critério sugerido por Serrano (1997), de utilização de séries com pelo menos 20 anos de observação, uma vez que para os dados de precipitação as séries apresentaram medições inferiores há 50 anos. Além disso, foram consideradas apenas as estações que estão em funcionamento e que possuem registros de dados até pelo menos 2015. Ainda assim, só foi possível utilizar dados consistidos para os dados de vazão. Para que as séries de precipitação fossem do tamanho estipulado para esse trabalho, também utilizaram-se dados brutos, ou seja não consistidos.

Os dados coletados eram diários, no entanto, foram calculadas as médias mensais das séries para reduzir o ruído na análise, visto ser um estudo de tendências de longo prazo.

4.2.1 ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Na busca por dados de precipitação, foram selecionadas seis estações pluviométricas que estão localizadas perto da margem do rio Iguaçu dispersas ao longo da bacia, como pode ser observado na Figura 5.

Na Tabela 1, encontram-se o nome das estações pluviométricas, o código correspondente da estação pluviométrica na ANA, os períodos de medição, os tamanhos das séries em anos, bem como as coordenadas geográficas das suas respectivas localizações na bacia do Iguaçu, as quais foram utilizadas para gerar os mapas.

Tabela 1 - Identificação e informações das estações pluviométricas.

Estação Pluviométrica	Código (ANA)	Período de medição	Anos de medição	Coord. Geográficas	
				Latitude	Longitude
SÃO LUIZ DO OESTE	2552033	1976 – 2015	39	-25,72°	-52,50°
BUGRE	2552031	1976 – 2015	39	-25,81°	-52,86°
PEDRA LISA	2550028	1975 – 2015	40	-25,69°	-50,01°

Estação Pluviométrica	Código (ANA)	Período de medição	Anos de medição	Coord. Geográficas	
				Latitude	Longitude
UHE ITAIPU	2553059	1992 – 2015	23	-25,56°	-53,93°
CAMPINA DAS PEDRAS	2549082	1984 – 2015	31	-25,57°	-49,42°
FLUVIÓPOLIS	2650006	1965 – 2015	50	-26,01°	-50,59°

A estação pluviométrica Fluviópolis possui a maior série, com 50 anos consecutivos de medição. E a menor série temporal de precipitação está na estação da UHE Itaipu, com 23 anos.

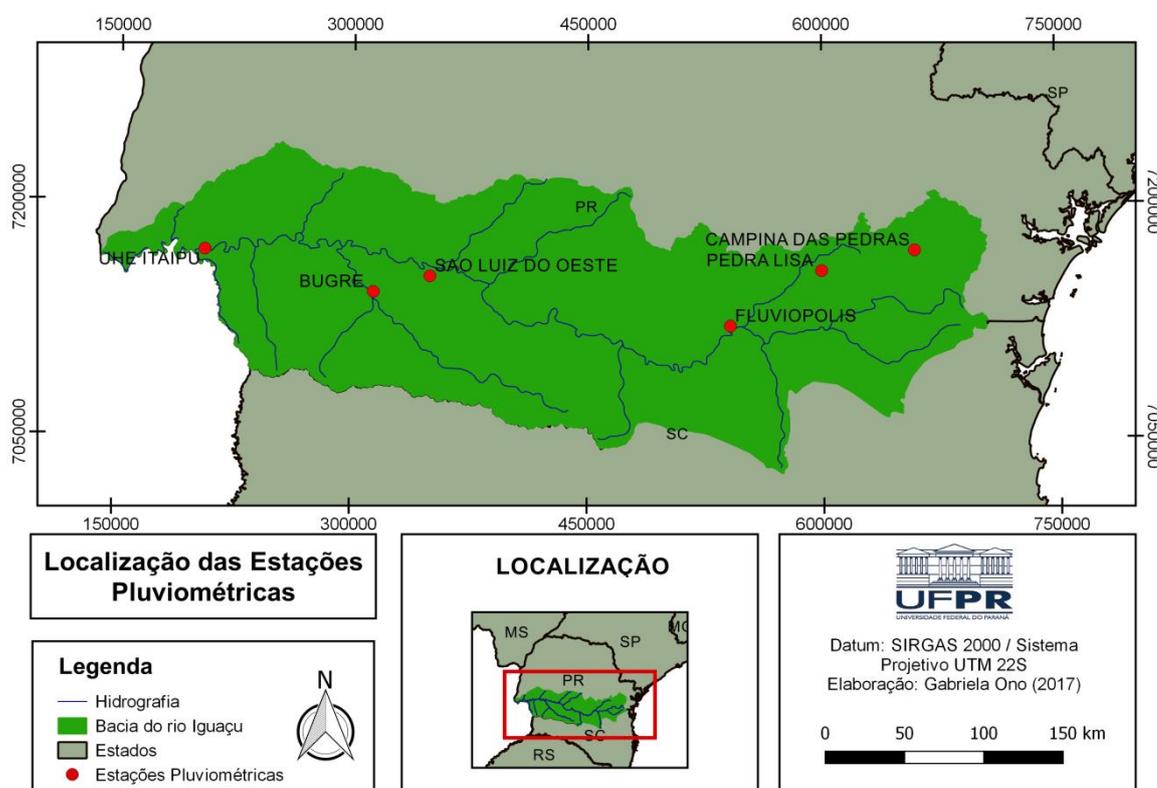


Figura 5 - Mapa das estações pluviométricas. FONTE: ÁGUASPARANÁ e ANA (2010).

4.2.2 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

Em complemento a verificação de tendências com os dados de precipitação, também foram avaliados séries temporais de vazão. Foram escolhidas estações fluviométricas distribuídas ao longo do rio, e que não possuem vazão regularizada por reservatórios e usinas hidrelétricas. As vazões regularizadas não são interessantes para esta análise, pois, teoricamente a vazão é regulada para manter

a vazão e funcionamento das usinas, não registrando assim a vazão natural na qual pode estar a tendência que se espera observar. Por conta disso, as estações fluviométricas se encontram antes do primeiro represamento da bacia, como mostra a Figura 6.

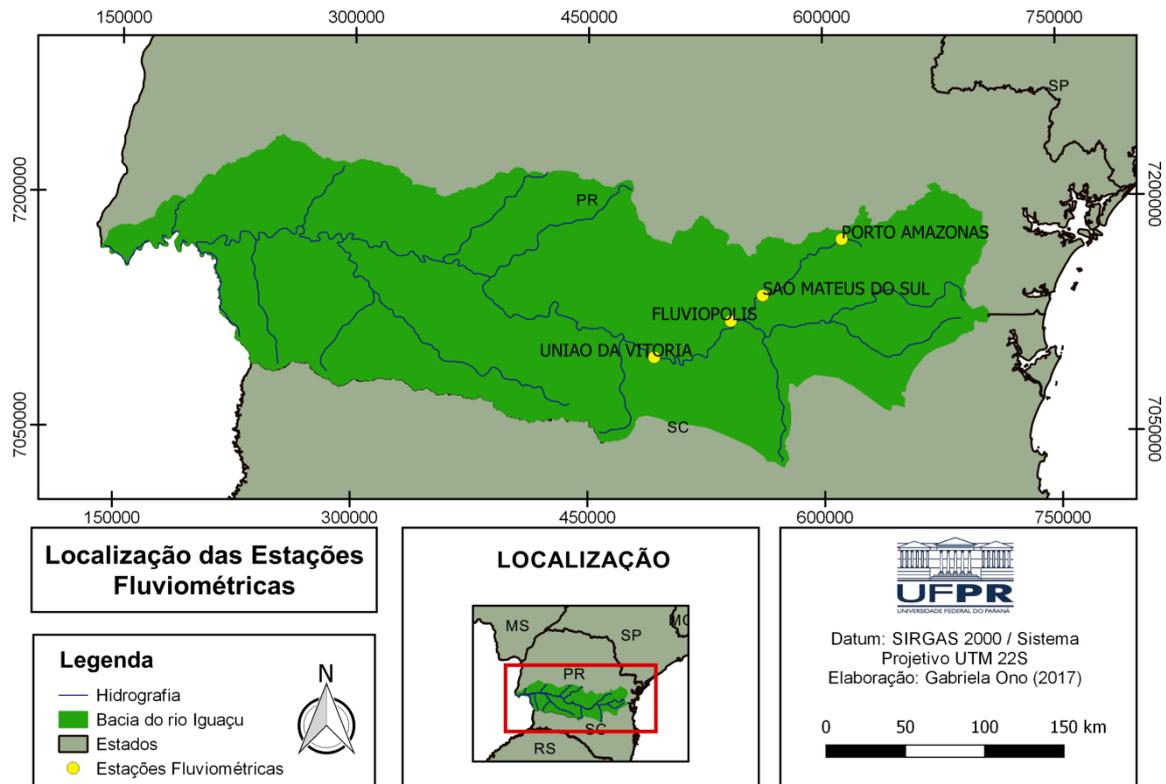


Figura 6 - Mapa das estações fluviométricas. FONTE: ÁGUASPARANÁ e ANA (2010).

Na Tabela 2, encontram-se o nome das estações fluviométricas, o código correspondente da estação fluviométrica na ANA, os períodos de medição, os tamanhos das séries em anos, bem como as coordenadas geográficas das suas respectivas localizações na bacia do Iguaçu, as quais foram utilizadas para gerar os mapas.

Para vazões, as séries temporais encontradas possuem mais anos de registros comparadas a aquelas encontradas para precipitações. A estação União da Vitória possui a série mais longa com 84 anos de medição, e para este caso a estação fluviométrica de Fluviópolis foi a estação com menor números de anos de medição, com 51 anos.

Tabela 2 - Identificação e informações das estações fluviométricas.

Estação Fluviométrica	Código (ANA)	Período de medição	Anos de medição	Coord. Geográficas	
				Latitude	Longitude
PORTO AMAZONAS	65035000	1936 – 2016	80	-25,54°	-49,88°
SÃO MATEUS DO SUL	65060000	1936 – 2015	79	-25,87°	-50,38°
FLUVIÓPOLIS	65220000	1964 – 2015	51	-26,01°	-50,59°
UNIÃO DA VITÓRIA	65310000	1931 – 2015	84	-26,22°	-51,08°

4.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE

Em todo método estatístico é necessário definir hipóteses nulas e alternativas. Estas são declarações que descrevem o que o teste está investigando (KUNDZEWICZ e ROBSON, 2004). Para testar a tendência nas médias das séries adotadas nesse trabalho pelo teste de MK, a hipótese nula (H_0) é que não há alteração na média das séries, e a hipótese alternativa (H_1) é que a média das séries de precipitação e vazão estão aumentando ao longo do tempo. Essa hipótese alternativa de aumento, em ambos conjuntos de dados, baseia-se nas pesquisas de Obregón e Marengo (2007), Minuzzi e Caramori (2011), Marengo (2008) e Bartiko *et al.* (2017). Assim foi definido um teste de hipóteses unilateral, visto que a tendência buscada é apenas para o aumento dos valores. Foi aplicado um nível de significância de $\alpha = 0,05$, que representa a probabilidade de se rejeitar a H_0 . A hipótese nula foi rejeitada quando o valor de $Z_{crit} > 1,645$.

Para realizar a análise de tendências, deve-se primeiramente garantir a qualidade dos dados utilizados. Para isso, a substituição das falhas das séries, a verificação do tempo de medição, entre outras análises e procedimentos preliminares foram realizados. As séries de dados foram tratadas previamente, verificando o percentual de falhas nos dados diários e qual a descontinuidade das séries. Adotando então, séries com percentual de falhas inferiores a 6%, e ainda sob a abordagem de Serrano (1997), superiores há 20 anos.

As falhas diárias foram substituídas pela média diária de cada série. Essa substituição visava minimizar a influência dos dados inseridos, na existência ou não de tendência na série. Após o preenchimento da série com os valores da média diária, foram calculadas as médias mensais, visando diminuir o ruído das séries. Para concluir a análise exploratória, produziram-se histogramas de frequência

relativa e gráficos com a sequência temporal das médias mensais de precipitação e vazão.

Depois de executado esses procedimentos, realizou-se o teste de análise de tendências com teste não paramétrico de Mann-Kendall e o teste de Mann-Kendall Sazonal. As equações matemáticas do teste de tendência foram implementadas em linguagem Fortran, fornecendo através deste programa os resultados das estatísticas. Primeiramente aplicou-se o teste de MK sem corrigir o efeito da autocorrelação. Através da equação de “limpeza”, retirou-se efeito da autocorrelação dos dados, e aplicou-se o MK novamente, obtendo uma nova série sem o efeito da autocorrelação, finalizando assim a aplicação deste método.

Para implementar o método de Mann-Kendall Sazonal (SMK), adotou-se as mesmas hipóteses e mesmo nível de significância do teste de MK. Para o cálculo desta metodologia, os dados mensais foram separados em estações do ano, sendo o verão os dados de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, o outono os dados de Março, Abril e Maio, o inverno os dados de Junho, Julho e Agosto, e a primavera com os dados de Setembro, Outubro e Novembro. Com as novas séries rearranjadas, aplicou o MK, gerando desta forma quatro estatísticas por série, uma para cada estação sazonal. Com essas estatísticas se aplica o SMK, obtendo um único Z por série.

Além da análise sazonal, também foi avaliada o MK para cada estação climática. Ou seja, aplicou-se o teste de MK e analisou-se essas estatísticas para os verões, outonos, invernos e primaveras de cada estação hidrometeorológica, separadamente.

Para robustecer os resultados que foram gerados, também foi aplicado o método estatístico para detecção de mudanças abruptas na série com o método de Pettitt. Esse método estatístico foi aplicado para refinar a análise dos dados, visando verificar a coerência dos resultados encontrados para a tendência. Ou seja, se em uma estação meteorológica apresentou uma tendência de aumento com o teste de MK, o teste de Pettitt serviria para mostrar se a série com tendência está realmente aumentando pela presença de tendência, que espera-se ser gradual e monotônica, ou se houve um ponto de mudança brusca, inserindo uma “quebra” na série, fazendo que esse aumento não necessariamente seja uma mudança climática, mas podendo ter alguma outra causa.

O teste foi aplicado utilizando-se uma hipótese bilateral, já que não se espera um aumento ou diminuição no valor dos dados e sim se há ou não um ponto de mudança na distribuição de probabilidade nos dados. Para este teste a H_0 assume que não existe mudança abrupta, por outro lado H_1 assume que existe o ponto de mudança na série. Para a rejeição da hipótese nula adotou-se um limite de significância igual a 0,05, ou seja, para $p - valor < 0,05$, rejeita-se H_0 .

Por fim, para verificar se as eventuais mudanças identificadas pelo método de Pettitt e Mann – Kendall poderiam estar associadas ao aumento da amplitude dos eventos de chuva e vazão, visto que o IPCC AR4 aponta para uma elevação das intensidades de chuvas no Sul do País (MARENGO e VALVERDE, 2007), utilizaram-se dados mensais de desvio padrão. Para estes dados foram aplicados apenas o teste de MK e Pettitt.

Na Figura 7 está representada esquematicamente a sequência da aplicação das análises.

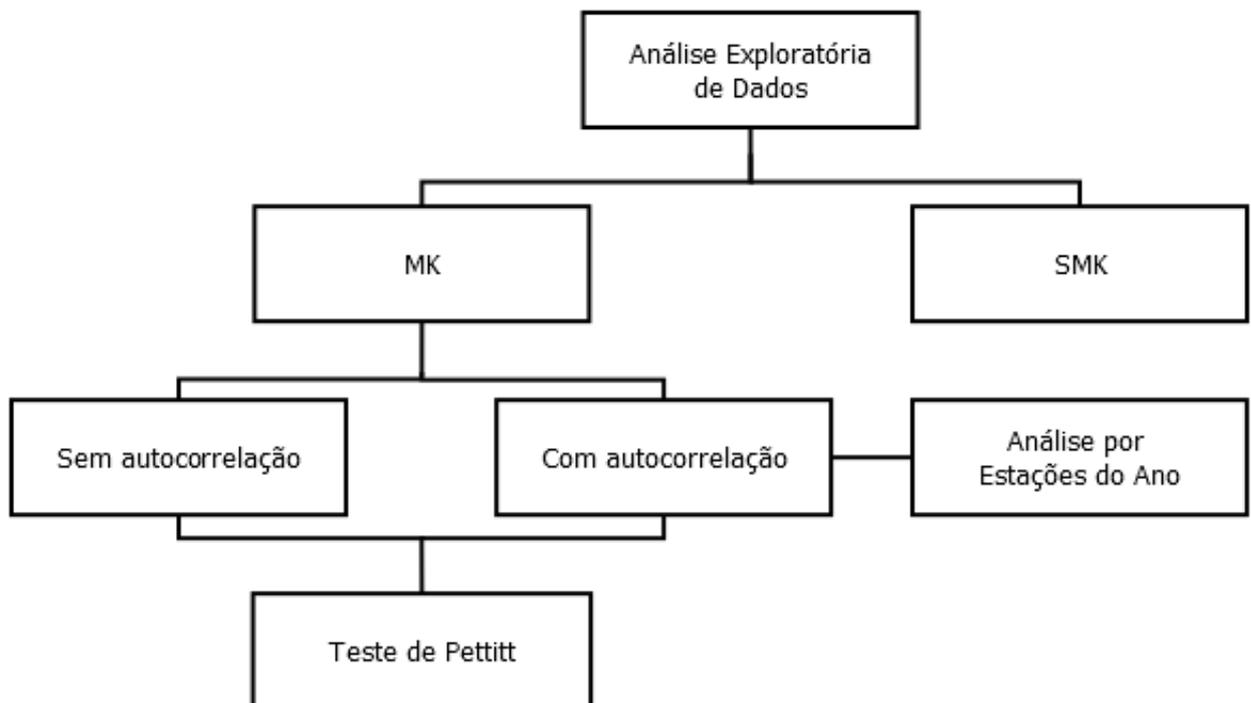


Figura 7 - Fluxograma da aplicação dos métodos.

5 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

5.1 PRECIPITAÇÃO

Primeiramente foram examinadas as falhas (falta de registro de dados diários) existentes nas séries de precipitação, como consta na Tabela 3. Todas as séries resultaram num percentual inferior a 6% de falhas, o que as tornou aptas para serem usadas nesse trabalho.

Tabela 3 - Percentual de falhas nas séries de dados diários de precipitação.

Estação Pluviométrica	Falhas (%)
SÃO LUIZ DO OESTE	0,21
BUGRE	5,57
PEDRA LISA	0,20
UHE ITAIPU PORTO	0,37
CAPANEMA	0,37
CAMPINA DAS PEDRAS	1,17
FLUVIÓPOLIS	0,12

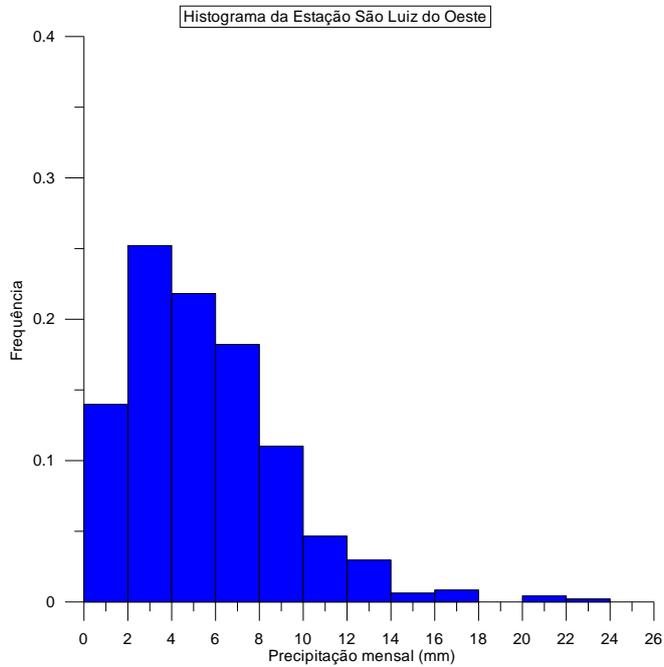
Visto que a capacidade visual humana é poderosa para distinguir padrões, e que estatísticas de tabela nem sempre mostram todas as informações necessárias, foram gerados com o programa Grapher 4, histogramas de frequência relativa, mostrados na Figura 8, com as médias mensais das precipitações de cada posto hidrometeorológico.

Na Tabela 1, observa-se que algumas séries de dados são mais longas do que outras, fazendo com que o número de dados seja diferente em cada estação. Em decorrência disto, utilizou-se a frequência relativa de cada série para construção dos gráficos e melhorar a análise.

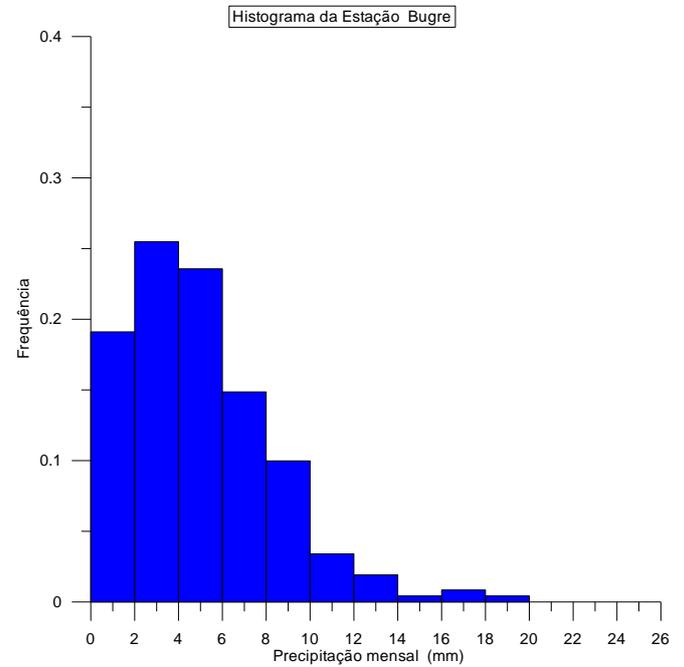
Os histogramas mostraram uma distribuição amostral assimétrica à direita, com maior probabilidade de ocorrência de valores menores do que maiores, como o esperado. Em todas as estações, o intervalo de 2 – 4mm tiveram pelo menos 25% de ocorrência, sendo este o intervalo mais representativo nas estações, exceto para estação UHE Itaipu e Campina das Pedras. Seguido do intervalo de 4 – 6mm com

mais de 20% de ocorrência em todas as estações. Fluvíópolis foi a estação que apresentou a maior frequência de eventos com maiores médias mensais de chuva.

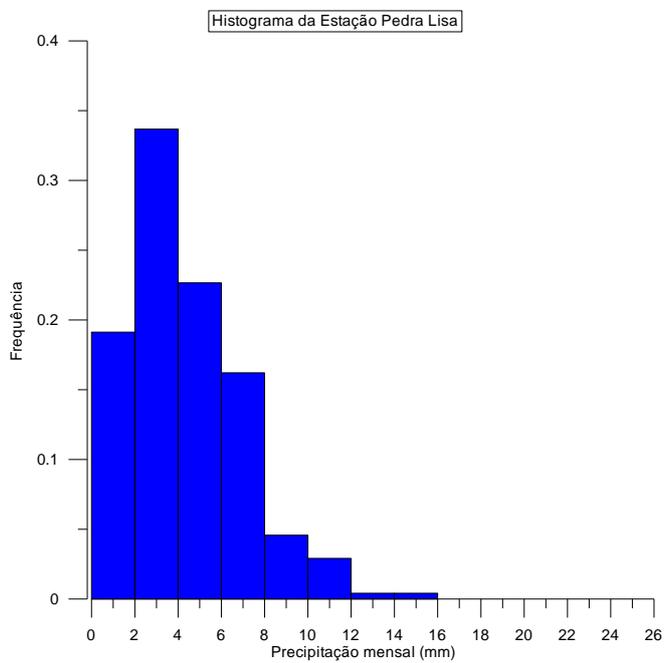
A)



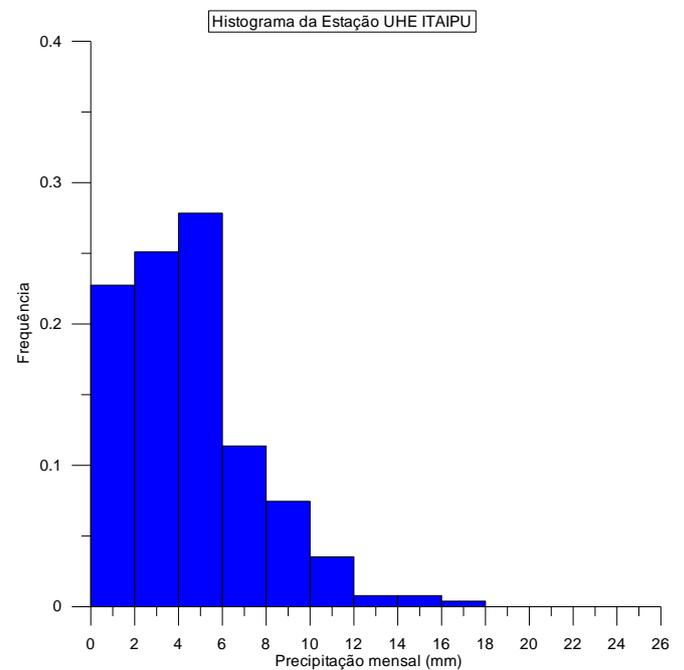
B)



C)



D)



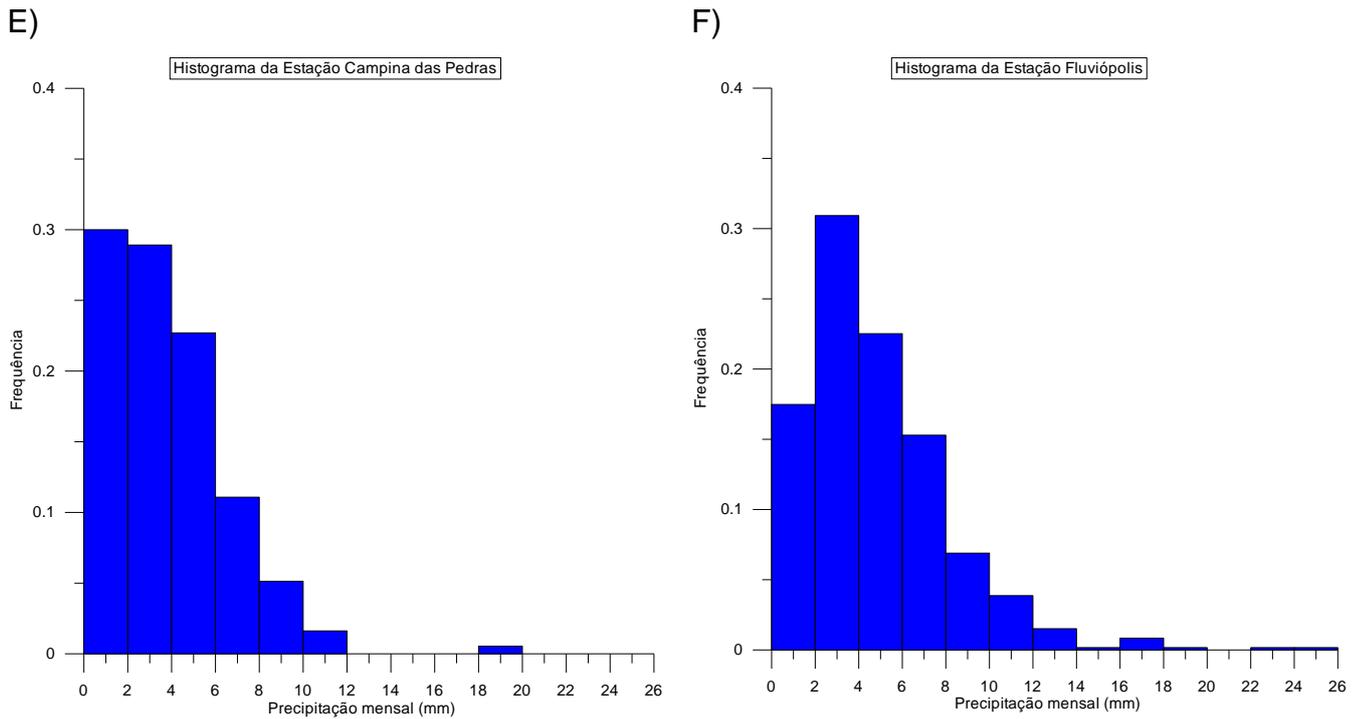


Figura 8 - Histogramas das frequências relativas das médias de precipitação mensais. A) Estação São Luiz do Oeste. B) Estação Bugre. C) Estação Pedra Lisa. D) Estação UHE ITAIPU. E) Estação Campina das Pedras. F) Estação Fluiópolis.

Para diagnosticar como as médias de precipitação e posteriormente de vazão estão distribuídas ao longo dos anos, foram construídos gráficos, com a sequência temporal dos respectivos dados, como o exemplo mostrado na Figura 9.

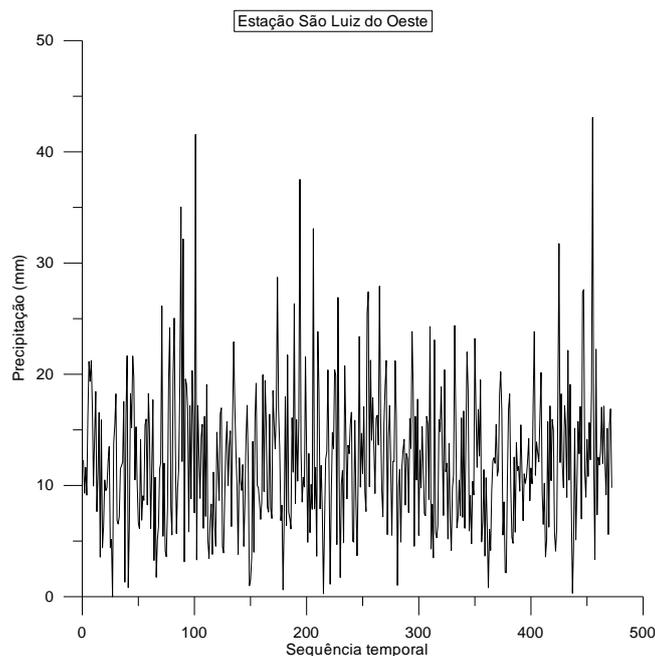


Figura 9 - Sequência temporal de dados de precipitação da estação São Luiz do Oeste.

Observou-se que as séries de precipitação não possuem valores discrepantes na distribuição dos dados, que poderiam comprometer as análises. Por essa razão, os demais gráficos das sequências temporais das outras estações pluviométricas estão no Apêndice A.

5.2 VAZÃO

Assim como para as médias de precipitação, foram realizadas as mesmas verificações com as séries temporais das estações fluviométricas selecionadas. As séries se mostraram bem completas como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Percentual de falhas nas séries de dados diários de vazão.

Estação Fluviométrica	Falhas (%)
PORTO AMAZONAS	0,00
SÃO MATEUS DO SUL	0,66
FLUVIÓPOLIS	0,05
UNIÃO DA VITÓRIA	0,00

Na Figura 10, estão representados os histogramas de frequência relativa das médias de vazões mensais. Algumas séries temporais de vazão também possuem séries mais longas do que outras, fazendo com que o número de dados seja diferente em cada estação. Desta forma, utilizou-se a frequência relativa para melhorar as análises.

As vazões médias das estações Fluvópolis e União da Vitória são superiores, em relação a Porto Amazonas e São Mateus do Sul. Por isso, o limite do eixo das vazões está diferente nos histogramas. A localização geográfica das estações Fluvópolis e União da Vitória são mais a jusante que os outros dois postos hidrometeorológicos, como mostra a Figura 6. Por essa razão recebem mais contribuições de outros afluentes, detendo as maiores vazões.

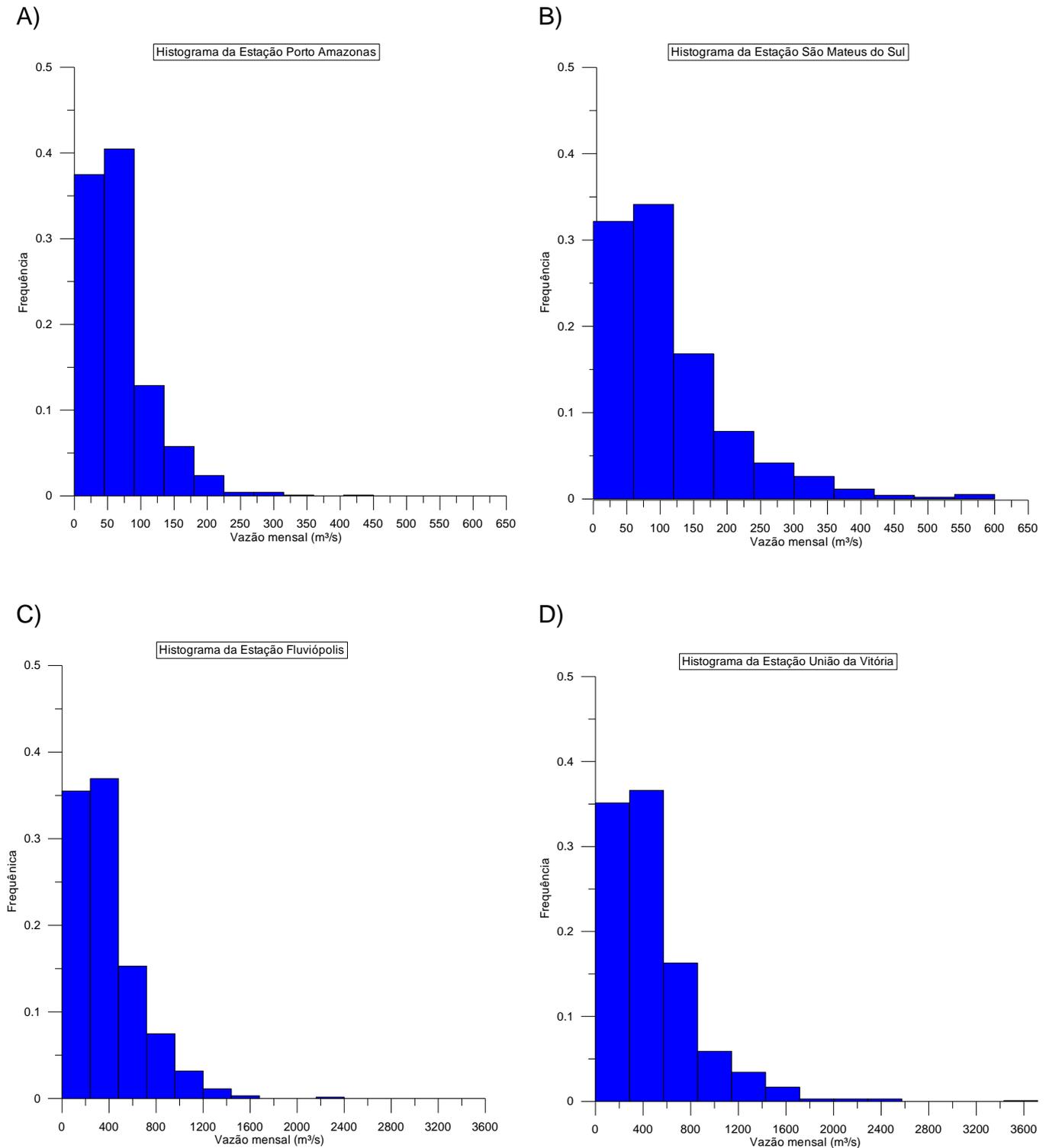


Figura 10 - Histogramas das frequências relativas das médias de vazões mensais. A) Estação Porto Amazonas. B) Estação São Mateus do Sul. C) Estação Fluiópolis. D) Estação União da Vitória.

Os histogramas de vazões também apresentaram uma distribuição amostral assimétrica à direita, todos com o comportamento semelhante, com maior

probabilidade de ocorrência de valores menores do que maiores. A não normalidade dos dados não é um problema, pois, os métodos empregados nesse trabalho são testes não paramétricos, os quais independem da distribuição dos dados.

Observou-se que as séries de vazão não possuem valores discrepantes na distribuição dos dados, que poderiam comprometer as análises. Por essa razão gráficos das sequências temporais das estações fluviométricas estão no Apêndice B.

6 RESULTADOS

6.1 TESTE DE MANN-KENDALL

A apreciação dos resultados do teste de tendência de MK será abordada neste tópico, adotando $Z_{crit} > 1,645$ para rejeição da hipótese nula H_0 , definida como a ausência de tendência de aumento na precipitação e vazão na bacia do Iguaçu.

A Tabela 5 e a Tabela 6, trazem os resultados dos dados de médias mensais de precipitação e vazão, respectivamente, com o efeito da autocorrelação. Nelas estão contidas as estatísticas S, que é o valor da comparação entre todos os valores da série, o valor de Z_{MK} que é o resultado do teste de tendência e a variância de S.

Tabela 5 - Resultado do teste de MK com efeito da autocorrelação, com dados de precipitação média mensal.

Estação Pluviométrica	Estatística		Variância
	S	Z_{MK}	S
SÃO LUIZ DO OESTE	1846	0,5372	$1,18 \times 10^7$
BUGRE	1999	0,5854	$1,16 \times 10^7$
PEDRA LISA	3097	0,8682	$1,27 \times 10^7$
UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	-2405	-1,7556	$1,87 \times 10^7$
CAMPINA DAS PEDRAS	535	0,2219	$5,79 \times 10^6$
FLUVIÓPOLIS	18661	3,8329	$2,37 \times 10^7$

Observa-se na Tabela 5 que todos os valores Z_{MK} ficaram menores que o Z_{crit} , exceto para a estação de Fluvíópolis, o qual resultou num $Z_{MK} = 3,8329$. Então, a estação pluviométrica de Fluvíópolis é a única estação em que pode-se rejeitar a hipótese nula. As demais estações não possuem significância estatística para rejeitar H_0 .

Por outro lado, na Tabela 6, todas as estações pluviométricas obtiveram $Z_{MK} > Z_{crit}$, portanto para todas as estações rejeitou-se H_0 .

Tabela 6 - Resultado do teste de MK com efeito da autocorrelação, com dados de vazão média mensal.

Estação Fluviométrica	Estatística		Variância
	S	Z_{MK}	S
PORTO AMAZONAS	75067	7,4256	$1,02 \times 10^8$
SÃO MATEUS DO SUL	76554	7,7150	$9,85 \times 10^7$
FLUVIÓPOLIS	18999	3,6085	$2,77 \times 10^7$
UNIÃO DA VITÓRIA	65710	6,0468	$1,18 \times 10^8$

A Tabela 7 e a Tabela 8 trazem os resultados dos dados de médias mensais de precipitação e vazão do teste de MK, respectivamente, no entanto, retirando o efeito da autocorrelação destas séries, visto que o efeito da autocorrelação pode prejudicar a variância das séries. Nelas estão contidas as estatísticas S, que é o valor da comparação entre todos os valores da série, o valor de Z_{MK} que é o resultado do teste de tendência e r_t que é o valor do coeficiente de autocorrelação.

Tabela 7 - Resultado MK sem o efeito da autocorrelação, com dados de precipitação de média mensal.

Estação Pluviométrica	Estatística		
	S	Z_{MK}	r_t
SÃO LUIZ DO OESTE	1788	0,5203	$3,05 \times 10^{-2}$
BUGRE	1945	0,5696	$1,81 \times 10^{-2}$
PEDRA LISA	2306	0,6464	0,1176
UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	-2626	-1,9170	0,1343
CAMPINA DAS PEDRAS	322	0,1334	0,1214
FLUVIÓPOLIS	18072	3,7119	0,1410

Os coeficientes de autocorrelação para os dados de precipitação, mostrados na Tabela 7, são baixos. Assim, como para os dados anteriores, os novos dados sem autocorrelação também se mostraram pouco significativos ao nível de confiança de 5% para cinco estações, apenas para a estação Fluviópolis se rejeitou a hipótese nula.

Já na Tabela 8, na qual apresenta os resultados sem o efeito da autocorrelação para os dados de vazão, observa-se que os coeficientes r_t possuem valores maiores, quando comparados com os coeficientes dos dados de

precipitação. Então, quando se retirou a autocorrelação das séries, as estatísticas Z_{MK} se acentuaram e confirmaram o padrão visto na Tabela 6, que rejeita-se a hipótese nula para todas as estações fluviométricas.

Tabela 8 - Resultado do teste de MK sem o efeito da autocorrelação, com dados de vazão de média mensal.

Estação Fluviométrica	Estatística		
	S	Z_{MK}	r_t
PORTO AMAZONAS	83576	8,2673	0,4858
SÃO MATEUS DO SUL	84724	8,5384	0,4564
FLUVIÓPOLIS	19868	3,7736	0,4781
UNIÃO DA VITÓRIA	70308	6,4699	0,4874

Para aplicar o Teste de Mann-Kendall Sazonal, foi visto que primeiramente foi necessário reorganizar as séries por estações do ano, para então aplicar o teste. Aproveitando que as séries estavam arranjadas sazonalmente, também foi aplicado o teste de MK para cada uma das estações do ano, para verificar tendência em cada uma delas. Na Tabela 9 a 12, estão registrados os valores obtidos na aplicação do teste, detalhadas a seguir. A Tabela 9, traz as estatísticas do verão de todos os postos meteorológicos estudados nesse trabalho.

Tabela 9 - Resultado do teste de MK dos dados de médias mensais das estações meteorológicas no verão. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.

Identificação	Estação Hidrometeorológicas	S	Estatística	
			Variância de S_K	Z_{MK}
P	SÃO LUIZ DO OESTE	418	180206	0,9823
P	BUGRE	133	189567	0,3031
P	PEDRA LISA	654	199247	1,4620
P	UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	-306	31200	-1,7267
P	CAMPINA DAS PEDRAS	-96	96741	-0,3054
P	FLUVIÓPOLIS	1314	378708	2,1336
F	PORTO AMAZONAS	5282	1623942	4,1441
F	SÃO MATEUS DO SUL	5528	1564893	4,4182
F	FLUVIÓPOLIS	992	450417	1,4766
F	UNIÃO DA VITÓRIA	4776	1874987	3,4871

Constatou-se que das 10 estações, quatro estações possuem tendência de aumento, sendo uma para precipitação (Fluviópolis) e três para a vazão (Porto Amazonas, São Mateus do Sul e União da Vitória). Ou seja, nas outras seis estações não houve a rejeição da H_0 .

Examinando a Tabela 10, que apresenta os dados de precipitação e vazão para o outono, observou-se indicação de tendência nas mesmas estações hidrometeorológicas que apresentaram tendência de aumento para o verão.

Tabela 10 - Resultado do teste de MK dos dados de médias mensais das estações meteorológicas no outono. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.

Identificação	Estação Hidrometeorológica	S	Estatística	
			Variância de S_K	Z_{MK}
P	SÃO LUIZ DO OESTE	404	199247	0,9028
P	BUGRE	408	194367	0,9231
P	PEDRA LISA	-131	214375	-0,2807
P	UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	43	31200	0,2377
P	CAMPINA DAS PEDRAS	-241	90788,7	-0,7965
P	FLUVIÓPOLIS	1260	386308	2,0256
F	PORTO AMAZONAS	4088	1623942	3,2071
F	SÃO MATEUS DO SUL	3950	1545533	3,1764
F	FLUVIÓPOLIS	-321	457624	-0,4730
F	UNIÃO DA VITÓRIA	2870	1874987	2,0952

Para o inverno, com os dados na Tabela 11, rejeita-se a hipótese nula apenas para três estações fluviométricas (Porto Amazonas, São Mateus de Sul e União da Vitória). Nenhum posto pluviométrico apresentou evidência estatística para rejeitar H_0 .

Tabela 11 - Resultado do teste de MK dos dados de médias mensais das estações meteorológicas no inverno. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.

Identificação	Estação Hidrometeorológica	S	Estatística	
			Variância de S_K	Z_{MK}
P	SÃO LUIZ DO OESTE	-120	199247	-0,2665
P	BUGRE	105	199247	0,2329
P	PEDRA LISA	150	214375	0,3218
P	UHE ITAIPU PORTO	222	32651,7	1,2230

Identificação	Estação Hidrometeorológica	S	Estatística Variância de S_K	Z_{MK}
CAPANEMA				
P	CAMPINA DAS PEDRAS	404	90788,7	1,3374
P	FLUVIÓPOLIS	976	386308	1,5686
F	PORTO AMAZONAS	5952	1623942	4,6698
F	SÃO MATEUS DO SUL	5994	1564893	4,7907
F	FLUVIÓPOLIS	-252	433230	-0,3813
F	UNIÃO DA VITÓRIA	5858	1874987	4,2773

Assim como para o verão e outono, a primavera mostrou sinal de aumento para as mesmas estações fluviométricas e pluviométrica, observadas na Tabela 12. Mesmo a estação UHE ITAIPU tendo seu Z_{MK} próximo do Z_{crit} , ainda assim não possui evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula.

Tabela 12 - Resultado do teste de MK dos dados de médias mensais das estações meteorológicas na primavera. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.

Identificação	Estação Hidrometeorológica	S	Estatística Variância de S_K	Z_{MK}
P	SÃO LUIZ DO OESTE	181	184847	0,4186
P	BUGRE	353	17158	0,8508
P	PEDRA LISA	595	194367	1,3473
P	UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	-258	29792	1,4889
P	CAMPINA DAS PEDRAS	428	99813,3	1,3515
P	FLUVIÓPOLIS	1769	371209	2,9018
F	PORTO AMAZONAS	4710	1623942	3,6952
F	SÃO MATEUS DO SUL	4368	1564893	3,4909
F	FLUVIÓPOLIS	-667	426082	-1,020
F	UNIÃO DA VITÓRIA	3840	1874987	2,8036

6.2 TESTE DE MANN-KENDALL SAZONAL

O teste de SMK foi empregado visando considerar o eventual efeito da sazonalidade dos dados hidrometeorológicos, apresentados nas Tabela 13 e Tabela 14. As tabelas contêm o somatório da estatística S de cada estação do ano, a variância de S e a estatística final do teste Z_{SMK} .

Na Tabela 13, estão as estatísticas de precipitação, as quais evidenciam aumento de precipitação no posto pluviométrico de Fluiópolis. Nas demais estações não se rejeita a hipótese nula. Pedra Lisa é o segundo maior valor da tabela, entretanto, ainda não possui forte evidência estatística para excluir a hipótese nula nesta estação.

Tabela 13 - Resultado do teste de SMK para os dados de precipitação mensal.

Estação Pluviométrica	Somatório de S	Estatística	
		Variância de S	Z_{SMK}
SÃO LUIZ DO OESTE	883	873,8	1,0093
BUGRE	999	868,5	1,1490
PEDRA LISA	1268	906,8	1,3971
UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	-299	353,3	-0,8490
CAMPINA DAS PEDRAS	495	614,9	0,8033
FLUVIÓPOLIS	5319	1233,9	4,3098

Para as vazões, na Tabela 14, nota-se que a sazonalidade influencia o posto pluviométrico de Fluiópolis, que sem a sazonalidade tinha $Z_{MK} > Z_{crit}$, e agora, com efeito da sazonalidade mudou a estatística. Mesmo assim, para as outras três estações pluviométricas houve a rejeição da H_0 .

Tabela 14 - Resultado do teste de SMK para os dados de vazão mensal.

Estação Fluviométrica	Somatório de S	Estatística	
		Variância de S	Z_{SMK}
PORTO AMAZONAS	20032	2548,6	7,8593
SÃO MATEUS DO SUL	19840	2498,0	7,9418
FLUVIÓPOLIS	-248	1329,4	-0,1873
UNIÃO DA VITÓRIA	17244	2738,6	6,3327

6.3 TESTE DE PETTITT

Com intuito de diagnosticar possíveis pontos de mudanças nas séries, ou seja, identificar a existência de mudança brusca na distribuição de probabilidade nos dados empregou-se o método de Pettitt, sendo os resultados apresentados na Tabela 15 e na Tabela 16. Nessas tabelas estão os valores de K_T que é o valor

máximo da estatística $U_{t,T}$ do teste de Pettitt, o p – valor que é a significância de probabilidade, o valor de T que é o número de dados na série temporal, a posição da mudança na série e a data da mudança com o mês e ano.

Na Tabela 15, estão os resultados do teste com os dados das médias de precipitação. Apenas a estação de Fluvópolis apresentou p – valor $< 0,05$, conseqüentemente, foi a única estação onde o ponto de mudança é estatisticamente significativo, indicando mudança para o mês de Novembro do ano de 1988.

Tabela 15 - Resultado do teste de Pettitt com dados de precipitação mensal.

Estação Pluviométrica	Estatística		T	Posição da mudança	Data da Mudança
	K_T	p-valor			
SÃO LUIZ DO OESTE	3612	0,9559	473	160	JUN/1989
BUGRE	3619	0,9442	471	153	NOV/1988
PEDRA LISA	5254	0,4697	485	411	JUN/2009
UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	3132	0,0607	256	75	OUT/1998
CAMPINA DAS PEDRAS	2280	1,0982	373	119	SET/1994
FLUVIÓPOLIS	17649	0,0003	597	277	NOV/1988

Para melhor visualização da série temporal de Fluvópolis, produziu-se um *box plot* separando a séries em dois conjuntos de dados, o primeiro do começo da série até o ponto de mudança, e o segundo do ponto seguinte da mudança até o fim da série, como mostra a Figura 11.

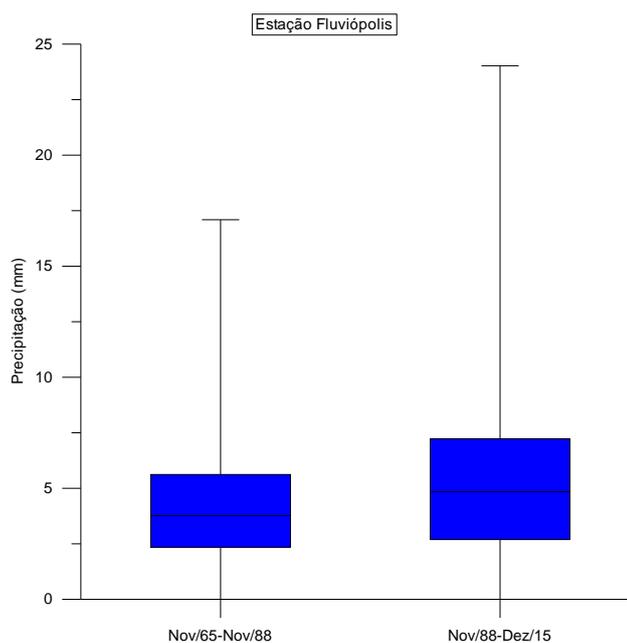


Figura 11 - *Box plot* das médias de precipitação da estação Fluvópolis dividida no ponto de mudança.

Na Figura 11, fica evidenciada a variabilidade dos dados, com o segundo *box plot* registrando uma maior diferença dos 3º e 1º quartis (amplitude interquartílica) e mediana, em relação ao primeiro *box plot*.

A Tabela 16, mostra que houve mudanças bruscas em todas as séries de vazão, com o $p - valor < 0,05$. Ou seja, rejeitou-se a H_0 para todas as estações. A data da mudança das estações São Mateus do Sul e Fluiópolis coincidiram para Dezembro de 1988, data essa próxima a data de mudança para os dados de chuva de Fluiópolis.

Tabela 16 - Resultado do teste de Pettitt com dados de vazão mensal.

Estação Fluviométrica	Estatística		T	Posição da mudança	Data da Mudança
	K_T	$p - valor$			
PORTO AMAZONAS	65468	0	972	397	JAN/1969
SÃO MATEUS DO SUL	63604	0	959	635	DEZ/1988
FLUIÓPOLIS	19913	0	629	300	DEZ/1988
UNIÃO DA VITÓRIA	62122	0	1020	458	FEV/1969

A Figura 12, reporta os *box plots* das séries descontínuas de vazão, pelas “quebras” das séries apontadas na Tabela 16. Assim como para a estação pluviométrica de Fluiópolis, foram produzidos *box plots* das estações fluviométricas separando as séries em dois conjuntos de dados. Para as estações Porto Amazonas e União da Vitória, a amplitude dos dados e a mediana são maiores na série posterior ao ponto de quebra. Já para as estações São Mateus do Sul e Fluiópolis, são notáveis maiores mediana e amplitude interquartílica para o segundo conjunto de dados. No entanto, a amplitude dos segundos conjuntos de dados, para estas estações, é menor que no primeiro conjunto, principalmente na estação de Fluiópolis. Nenhuma série apresentou valores suspeitos (*outliers*), e todas as séries são positivamente assimétricas.

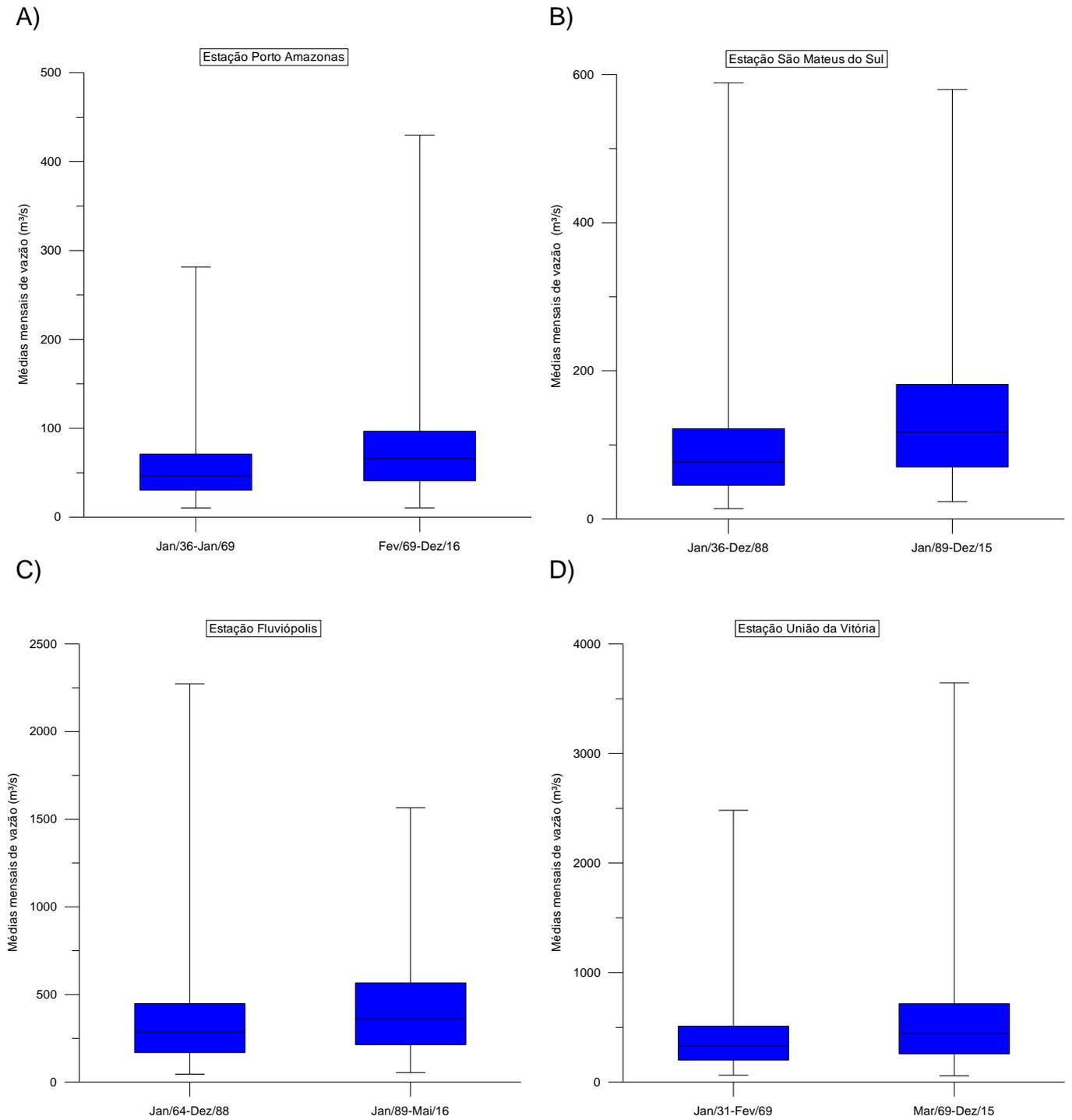


Figura 12 - *Box plots* das séries de médias de vazão divididas no ponto de mudança. A) Estação Porto Amazonas. B) Estação São Mateus do Sul. C) Estação Fluiópolis. D) Estação União da Vitória.

6.4 ANÁLISE DOS DESVIOS PADRÕES

Os testes de MK e Pettitt foram aplicados nas séries mensais de desvio padrão dos dados hidrológicos, para verificar como a amplitude de precipitação e

vazão estão se comportando ao longo do tempo, avaliando a coerência dos resultados já apresentados.

As Tabela 17 e Tabela 18, mostram os resultados das aplicações do método de MK para os dados de desvio padrão de precipitação e vazão, respectivamente. Nas Tabela 19 e Tabela 20 estão as estatísticas do teste de Pettitt para estes mesmos dados.

Observa-se na Tabela 17 que diferentemente dos dados da Tabela 5, na qual apenas Fluiópolis rejeitou-se a H_0 , as estações Pedra Lisa, Campina das Pedras e além da Fluiópolis obtiveram o $Z_{MK} > Z_{crit}$. Então para essas três estações pluviométricas, pôde se rejeitar a hipótese nula. As demais estações não possuem significância estatística para rejeitar H_0 .

Tabela 17 - Resultado do teste de MK com dados mensais de desvio padrão de precipitação.

Estação Pluviométrica	Estatística		Variância
	S	Z_{MK}	S
SÃO LUIZ DO OESTE	2303	0,6702	$1,17 \times 10^7$
BUGRE	5253	1,5389	$1,16 \times 10^7$
PEDRA LISA	6799	1,9064	$1,27 \times 10^7$
UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	-1029	-0,7507	$1,87 \times 10^6$
CAMPINA DAS PEDRAS	4703	1,9542	$5,78 \times 10^6$
FLUVIÓPOLIS	25382	5,2134	$2,37 \times 10^7$

Por outro lado, na Tabela 18, assim como na Tabela 6, verifica-se que todas as estações fluviométricas obtiveram $Z_{MK} > Z_{crit}$, portanto para todas as estações rejeitou-se H_0 .

Tabela 18 – Resultado do teste de MK com dados mensais de desvio padrão de vazão.

Estação Fluviométrica	Estatística		Variância
	S	Z_{MK}	S
PORTO AMAZONAS	63116	6,2433	$1,02 \times 10^8$
SÃO MATEUS DO SUL	63106	6,3696	$9,81 \times 10^7$
FLUVIÓPOLIS	17679	3,3578	$2,77 \times 10^7$
UNIÃO DA VITÓRIA	62434	5,7453	$1,18 \times 10^8$

Na Tabela 19 estão os resultado do teste de Pettitt com os dados dos desvios padrões de precipitação. Apenas a estação de Fluiópolis apresentou $p - valor < 0,05$, sendo, portanto, a única estação em que o ponto de mudança é

estatisticamente significativo, indicando mudança para o mês de Novembro do ano de 1988. O mesmo ocorre na Tabela 15 com os dados de médias mensais.

Tabela 19 - Resultado do teste de Pettitt com dados de desvio padrão de precipitação.

Estação Pluviométrica	Estatística		T	Posição da mudança	Data da Mudança
	K_T	$p - valor$			
SÃO LUIZ DO OESTE	3663	0,9361	473	423	JUN/2011
BUGRE	5044	0,4654	471	153	NOV/1988
PEDRA LISA	7118	0,1400	485	178	DEZ/1989
UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	2386	0,2631	256	75	OUT/1998
CAMPINA DAS PEDRAS	5152	0,0937	373	298	AGO/2009
FLUVIÓPOLIS	24337	0	597	277	NOV/1988

Assim como para as séries de médias, produziu-se um *box plot* separando a séries em dois conjuntos de dados. Na Figura 13, fica evidenciado no gráfico que a variabilidade dos dados são semelhantes em ambos os conjuntos de dados, com o segundo *box plot* registrando uma maior amplitude interquartílica e mediana, em relação ao primeiro *box plot*.

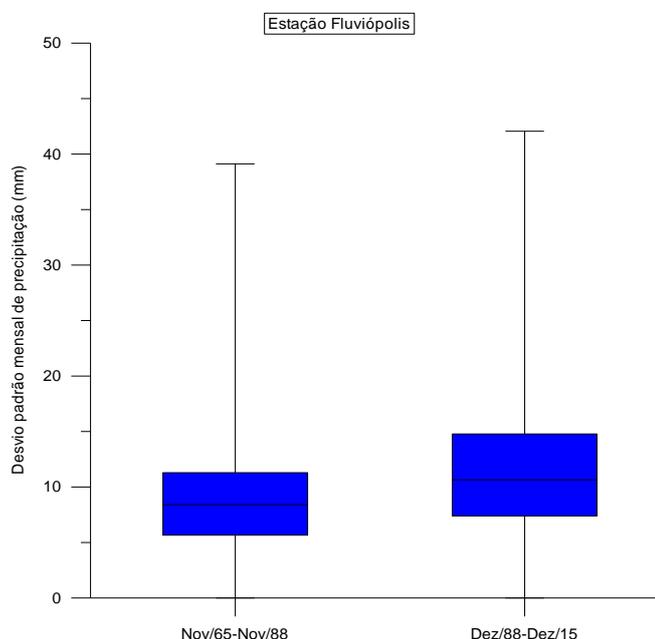


Figura 13 - *Box plot* dos desvios padrões de precipitação de Fluviópolis dividida no ponto de mudança

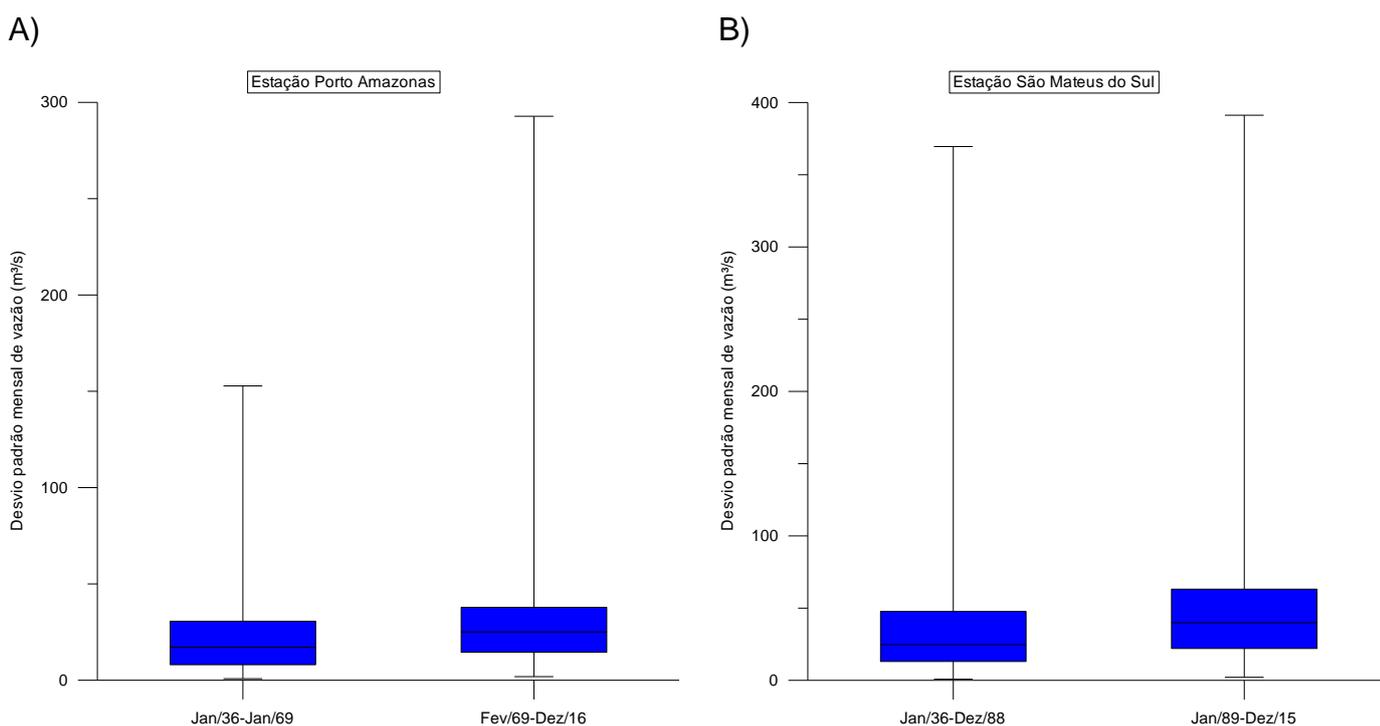
Igualmente à Tabela 16, a Tabela 20, mostra que houve mudanças bruscas em todas as séries de vazão, com o $p - valor < 0,05$. Ou seja, rejeitou-se H_0 para todas as estações. Muito embora, as datas das mudanças das estações estejam

diferentes entre si, Porto Amazonas e São Mateus do Sul apontaram mudança para a mesma data que das respectivas séries de médias. Para a estação fluviométrica de Fluiópolis, a data de mudança teve o mês alterado, mas ainda indicou o mesmo ano (1988) dos resultados das médias mensais, e União da Vitória, foi o único posto fluviométrico que indicou mudança para uma data diferente daquela apontada para a série de médias.

Tabela 20 - Resultado do teste de Pettitt com dados de desvio padrão de vazão.

Estação Fluviométrica	Estatística		T	Posição da mudança	Data da Mudança
	K_T	$p - valor$			
PORTO AMAZONAS	56396	0	972	397	JAN/1969
SÃO MATEUS DO SUL	52683	0	959	635	DEZ/1988
FLUIÓPOLIS	16633	0	629	292	ABR/1988
UNIÃO DA VITÓRIA	54359	0	1020	412	ABR/1965

Para concluir a análise do teste de Pettitt para os desvios padrões de vazão, também foram elaborados *box plots*, com o mesmo propósito e da mesma maneira daqueles da Figura 14. Para todas as estações, os *box plots* criados com os dados a partir do ponto de mudança das séries, apresentam maiores amplitudes interquartílicas, exceto para estação Porto Amazonas, medianas e amplitudes de dados maiores do que os *box plots* anteriores ao ponto de quebra das séries. Vale ressaltar que valores suspeitos não foram identificados nas séries.



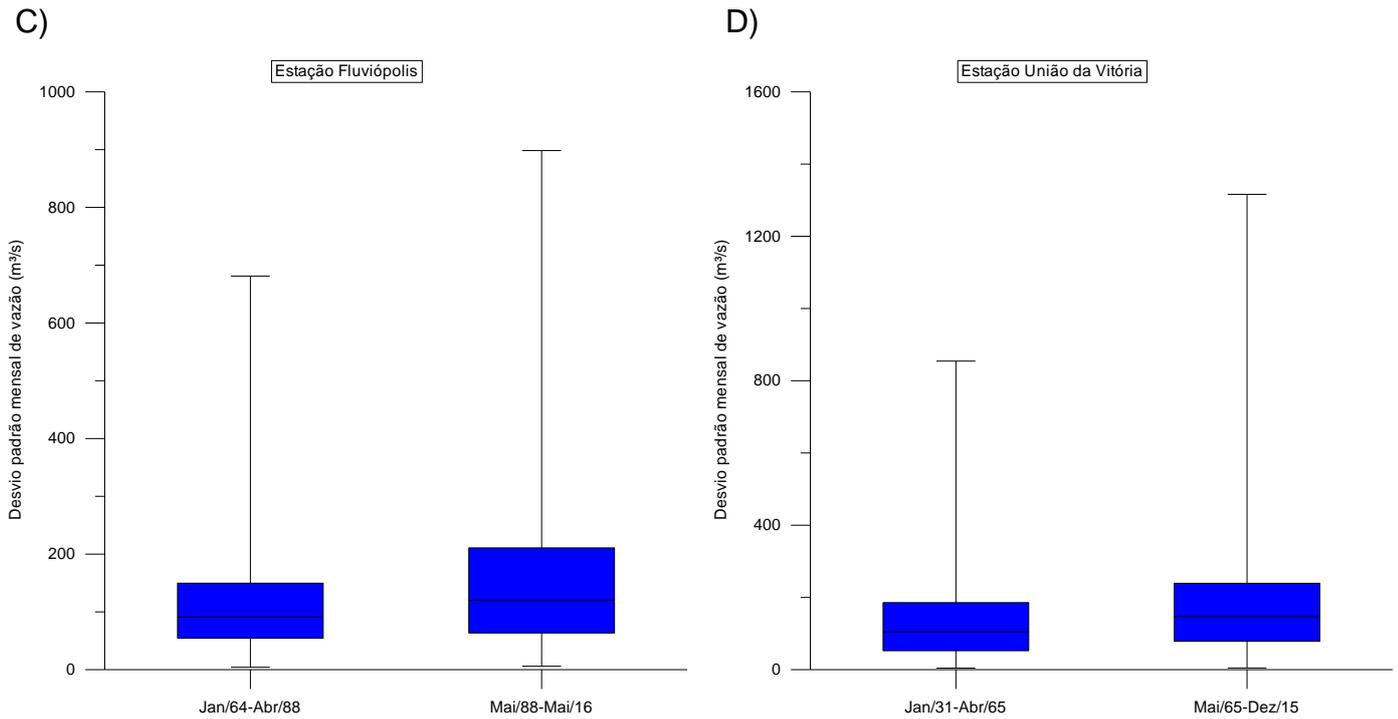


Figura 14 - *Box plots* da série de desvio padrão de vazão dividida no ponto de mudança. A) Estação Porto Amazonas. B) Estação São Mateus do Sul. C) Estação Fluviópolis. D) Estação União da Vitória.

Os resultados dos diversos testes estatísticos aplicados estão consolidados na Tabela 21 e na Tabela 22. Na Tabela 21 estão os resultados gerados com os dados de médias mensais e na Tabela 22 os resultados gerados com os dados de desvios padrões mensais, para todas as estações hidrometeorológicas.

Tabela 22 – Resultados dos testes com os dados dos desvios padrões mensais. P = Estação Pluviométrica; F = Estação Fluviométrica.

	Estações Hidrometeorológicas	Desvio padrão mensal	
		MANN-KENDALL	PETTITT
P	SÃO LUIZ DO OESTE	Não rejeita	Não rejeita
P	BUGRE	Não rejeita	Não rejeita
P	PEDRA LISA	Rejeita	Não rejeita
P	UHE ITAIPU PORTO CAPANEMA	Não rejeita	Não rejeita
P	CAMPINA DAS PEDRAS	Rejeita	Não rejeita
P	FLUVIÓPOLIS	Rejeita	Rejeita
F	PORTO AMAZONAS	Rejeita	Rejeita
F	SÃO MATEUS DO SUL	Rejeita	Rejeita
F	FLUVIÓPOLIS	Rejeita	Rejeita
F	UNIÃO DA VITÓRIA	Rejeita	Rejeita

7 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho foi analisar as tendências climáticas para a bacia do rio Iguaçu, com séries históricas de medições de precipitação e vazão pelos métodos de Mann-Kendall e Mann-Kendall Sazonal. Revisada a literatura, percebeu-se da necessidade de diagnosticar mudanças abruptas nestas séries, aplicando o teste de Pettitt, pois eventuais mudanças podem estar associadas a outros fatores que não as mudanças climáticas. Além disso, os resultados esperados para as tendências climáticas na área de estudo foi que elas apresentariam tendências positivas, ou seja, aumento nos valores das séries das duas variáveis hidrológicas.

Analisando os resultados gerados pelo teste de MK constatou-se uma inconsistência. Segundo Marengo (2008), a época em que houve uma elevação da média da vazão do rio Iguaçu foi a mesma em que houve uma tendência de aumento, cerca de 6% superior, de chuvas na bacia. No entanto, todas as estações fluviométricas apresentaram tendências positivas de acréscimo de vazão, e apenas uma das seis estações pluviométricas apresentou evidência estatística de aumento nas médias mensais de precipitação. Marengo e Valverde (2007) também observaram tendência ascendente para as vazões da bacia do Iguaçu, desde a década de 1970. Apesar disso, a rejeição da hipótese nula neste caso não sugere que o incremento na vazão esteja associado à mudanças climáticas. As estações fluviométricas escolhidas para este trabalho estão na bacia do Alto Iguaçu, e esta área têm sofrido grandes alterações no uso do solo nas últimas décadas. As séries temporais apresentam aproximadamente 80 anos de medição, e por conta disso, as mudanças no uso do solo podem estar sendo percebidas como incremento nas vazões.

Embora a literatura afirme que o efeito da autocorrelação possa alterar a variância dos dados, os resultados obtidos para as séries corrigidas deste efeito, ainda indicaram tendência positiva para os mesmos postos meteorológicos dos dados autocorrelacionados. Contudo, os coeficientes de autocorrelação para a precipitação denotaram valores menores em relação aos de vazão. Isso pode ser explicado pela “memória” que o rio tem com a vazão, o que não ocorre para chuvas.

Então, para o teste de tendência MK, não se comprovou a existência de tendências positivas para a precipitação, como esperado, pela falta de evidência estatística. Todavia, para este mesmo teste, as vazões fluviométricas mostraram a tendência esperada de aumento. Visto que a autocorrelação destes dados, não alterou as conclusões do teste. Acredita-se que esse comportamento, de aumento de vazão não justificado pelo aumento de precipitação, seja devido a intensificação de uso do solo da bacia, e não associado diretamente com as mudanças climáticas.

Para a estação de Fluviópolis detectou-se uma incoerência nos resultados da análise do método de MK por estações do ano. Para o verão, outono e primavera, estações mais chuvosas de acordo com Azevedo (1974) *apud* Buchir (2013), os dados de precipitação de Fluviópolis indicaram evidência estatística para o aumento de chuvas. No entanto, para os dados de vazão, não se observou-se essa evidência. Então, rejeitar H_0 para precipitação de Fluviópolis, não implica necessariamente que haja mudanças climáticas. No inverno, considerada a época de seca no Estado do Paraná, H_0 não foi rejeitada nem para chuva e nem para vazão. Para os demais postos meteorológicos, em todas as estações sazonais os resultados foram convergentes com aqueles aplicados para as séries originais.

Os resultados obtidos pelo teste de SMK foram análogos em relação àqueles encontrados para a análise sazonal, mas com as estatísticas Z_{MK} aumentadas. Percebeu-se que diferente do efeito da autocorrelação que não alterou a conclusão do teste de MK, o efeito da sazonalidade foi muito significativo e impactante para a estação Fluviópolis, que mostrou inconsistência de aumento na precipitação e nenhuma evidência de acréscimo na vazão desta estação. Por essa razão, as análises sobre essa estação, podem ser inconclusivas pela grande influência da sazonalidade.

Alguns resultados do teste de Pettitt foram coerentes com os resultados encontrados para o teste de tendência de MK. Nos casos onde não foi identificada tendência, também não houve evidência estatística identificando ponto de mudança brusca. Por outro lado as estações que mostraram tendência de aumento, também mostraram significância estatística para o teste de Pettitt. Ao examinar os *box plots* das estações que rejeitaram a H_0 no teste de Pettitt, nota-se que o aumento dos valores para o conjunto de dados depois da indicação de mudança, concordam com os resultados do teste de MK. Os anos mais apontados como os de mudança foram

Novembro e Dezembro de 1988 (Fluviópolis e Porto Amazonas) e Janeiro e Fevereiro de 1969 (União da Vitória e São Mateus do Sul).

Os resultados de Bartiko *et al.* (2017) corroboram, com os encontrados nesse trabalho, os quais indicaram que 14 séries apresentaram mudanças abruptas na bacia do rio Iguazu. As mudanças abruptas foram identificadas principalmente na década de 70, o mesmo período em Marengo (2008), aponta que ocorreu uma mudança significativa no regime de precipitação no sul do Brasil.

Apesar desse apontamento de Marengo (2008), os resultados desse trabalho não mostraram essa alteração no regime de chuvas. Em função disso, a expectativa é que as “quebras” nas séries pelo método de Pettitt possam ser devido a outros fatores, como já discutidos para o teste de Mann-Kendall. Visto que as sequências temporais dos dados não mostraram nenhuma anomalia na distribuição das séries, excluindo desta forma alterações no modo de medição dos dados. Então, as mudanças encontradas pelo método de Pettitt podem estar associadas à intensificação do uso do solo neste trecho da bacia, já que essa modificação de ocupação pode interagir de maneiras complexas com o clima e aumentar a vazão do rio.

A análise realizada com os dados de desvios padrões mensais das variáveis hidrológicas estudadas neste trabalho é de que para o teste de Pettitt os resultados das séries de médias e séries de desvios padrões foram semelhantes. Os pontos de mudanças foram identificados nas mesmas estações, ou seja, para estação meteorológica de Fluviópolis e para todas as estações pluviométricas. Contudo, a análise do teste de MK para esses dados de desvio padrão registra a ocorrência de mais duas estações pluviométricas com evidência estatística positiva, Pedra Lisa e Campina das Pedras. Isso significa que como o desvio padrão tem tendência crescente, as amplitudes dos eventos de chuvas também estão aumentando. Portanto, há uma indicação de um possível aumento na taxa de precipitação, o que talvez pudesse explicar o incremento nas vazões. Uma vez que espera-se que taxas de precipitação mais elevadas produzam mais contribuição no escoamento superficial na vazão, com o conseqüente aumento na amplitude das ondas de enchente.

Esses resultados também foram observados por Alexander *et al.* (2006) apud Obregón e Marengo (2007) e Teixeira (2004) que analisaram tendências em

extremos anuais de chuva e afirmaram que são iguais a chuva total acumulada: positivas no Sul do Brasil.

Para as estações pluviométricas, foram poucas as análises que mostraram tendência de aumento na precipitação. No estudo de Santos *et al.*, (2017), também foram poucas as estações pluviométricas com significância estatística, mas essas mostraram diminuição de chuvas. Muito embora, para todos os testes de hipóteses todas as estações pluviométricas mostraram tendência de aumento, exceto Fluvópolis, na análise de estações do ano e pelo teste de SMK.

Com essas análises, conclui-se que os métodos aplicados não foram estaticamente significativos para confirmar tendência ascendente em dados de precipitação, portanto, a tendência de aumento para as vazões, não são necessariamente relacionados às mudanças climáticas. Elas podem estar associadas à alteração no uso e ocupação do solo, visto que as localizações das estações pluviométricas estão numa área da bacia de urbanização e desmatamento, fenômenos com grandes contribuições no aumento das vazões. Além disso, os sinais positivos na amplitude das chuvas, pode em partes explicar os aumentos nas vazões. Visto que a taxa de precipitação pode aumentar, incrementando volumes na vazão do rio Iguaçu.

Todas essas análises descrevem comportamentos hidrológicos pontuais dentro da bacia do Iguaçu. As mudanças climáticas na escala regional são muito divergentes e nem sempre acompanham a tendência global. Portanto, não se pode afirmar que até o momento as mudanças climáticas são sentidas na totalidade da bacia.

Por fim, deve-se ressaltar que os estudos de mudanças climáticas devem ser cada vez mais aprofundados, sendo abordados os impactos locais das mesmas. Interessante também seria realizar estudos de uso e ocupação do solo na bacia do rio Iguaçu, para avaliar o real impacto, da alteração da utilização do solo, na vazão dos rios da bacia. Além disso, as análises de vazão poderiam incluir estações pluviométricas que estão nos afluentes do rio Iguaçu, ou seja, no Médio e no Baixo Iguaçu.

REFERÊNCIAS

ÁGUASPARANÁ. **Vazões Fluviométricas médias diárias**. Disponível em: <<http://www.sih-web.aguasparana.pr.gov.br/sih-web/gerarRelatorioVazoesFluviometricasMensais.do?action=carregarInterfacelNicia>> Acesso em: ago. de 2017.

_____. Shapefile: **Bacias Hidrográficas do Paraná**. 2010. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=79>> Acesso em: set. de 2017.

ANA. Hidroweb: **Arquivos digitais**. 2010. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?Tocltem=4100>> Acesso em: mai. de 2017.

_____. Hidroweb: **Sistema de Informação Hidrológica da Agência Nacional de Águas – ANA**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>> Acesso em: mai. de 2017.

ALEXANDER, L. V. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, **Submitted to J. Geophys Res.**, 2006.

AZEVEDO, D. C. Chuvas no Brasil: regime, variabilidade e probabilidades de alturas mensais e anuais. **Dissertação de Mestrado**. Porto Alegre. UFRGS. 1974.

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

BLAIN, G.C. **Deteção de tendências monótonas em séries mensais de precipitação pluvial no Estado de São Paulo**, v.69, n.4, p.1027-1033, Bragantina, Campinas, SP, 2010.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Dispõe sobre a Política Nacional dos Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

BARTIKO, D.; CHAFFE, P.; BONUMÁ, N. **Nonstationarity in maximum annual daily streamflow series from Southern Brazil**. RBRH, vol.22, Porto Alegre, 2017.

BUCHIR, L. M. **Análise da influência de mudanças climáticas nas precipitações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.

CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. Variações climáticas na precipitação no Sul do Brasil no clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.1, p. 81-88, 2015.

COLLISCHONN, W. Simulações hidrológicas em Grandes bacias. **Tese de doutorado**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS. Rio Grande do Sul, 2001.

DETZEL, D. H. M.; MINE, M. R. M. **Trends in hydrological series: methods and application.** *Iche*, v. 2014, n. i, p. 765-772, 2014.

EBC. **Meio Ambiente.** Disponível em: <<http://www.ebc.com.br/noticias/meio-ambiente/2015/11/conheca-os-principais-desastres-ambientais-ocorridos-no-brasil>> Acesso em: 25 Mai. 2017.

FERREIRA, D. H. L.; PENEREIRO, J. C.; FONTOLAN, M. R. **Análises estatísticas de tendências das séries hidro-climáticas e de ações antrópicas ao longo das sub-bacias do rio Tietê.** Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, SP, 2015.

GARCÍA, O. N.; VARGAS, W. M. The Temporal Climatic Variability in the 'Río De La Plata' Basin Displayed by the River Discharges. **Climatic Change**, v.38, p 359–379 (1998).

HAMED, K. H.; RAO A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hydrology.** Purdue University, West Lafayette, IN 47907, p.182-196, USA, 1998.

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. **Statistical Methods Water Resources.** Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation Chapter A3, p. 1-3, 2002.

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

IBGE. **Estados.** 2016 Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pr>> Acesso em: 17 Abr. 2017

KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. J. **Detecting trend and other changes in hydrological data.** World Climate Programme –Water. DATA and MONITORING, Appendix B , 2000.

_____. Change detection in hydrological records a review of the methodology. **Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques**, 49, 2004.

MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas Globais e Regionais: Avaliação do Clima Atual do Brasil e Projeções de Cenários Climáticos do Futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 16: p 1-18. 2001.

_____. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade (Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao longo do século XXI).** Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. p 52-59, Brasília, DF, 2006.

_____. **Água e Mudanças Climáticas**. Estud. av. vol.22 nº 63, São Paulo, SP, 2008.

MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. **International Journal of Climatology**, p. 893-904, 2008.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, Mudanças climáticas ed. 8: p. 5-7. Campinas, SP, 2007.

MARTÍN-VIDE, J. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. **International Journal of Climatology**, v.24, p. 959-971. 2004.

MATIELLO, C.; QUELUZ, G. A implantação da usina hidrelétrica do Baixo Iguaçu: uma análise a partir dos estudos em Ciência, Tecnologia e Sociedade. **Cadernos de Pesquisa Interdisciplinar em Ciências Humanas**, v. 16, n. 109, 2015.

MENEZES, F. P; FERNANDES, L. L.; **Análise de tendência e variabilidade da precipitação no estado do Pará**. Universidade Federal do Pará/FAESA/ITEC/UFPA. Belém, PA, 2016.

MERENDA, E. A. **Reservatório de Segredo e Área de Entorno: Aspectos Legais e Modificações no Uso do Solo**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Centro de Ciências Humanas, Letras E Artes: Departamento De Geografia. Universidade Estadual de Maringá. Agosto, 2004.

MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H. Seasonal and annual climatic variability of rainfall and dry spells in the state of Paraná, Brazil. **Revista Ceres** (Impr.) vol.58, nº.5, Viçosa, MG, 2011.

NOBRE, C. A. Mudanças Climáticas Globais: Possíveis Impactos nos Ecossistemas do País. **Parcerias Estratégicas**: N. 12, Setembro, 2001.

OBREGÓN, G.; MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima no Século XX no Brasil: Tendências de Chuvas e Temperaturas Médias e Extremas**. Relatório nº 2, Ministério do Meio Ambiente, 2007.

PARANÁ. **Clima no Paraná**. Secretaria do Esporte e Turismo do Paraná. Governo do estado. PR, 2017.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change point problem. **Appl. Statist.** v. 28, p.126–135, 1979.

PINHEIRO, G. M. **Variabilidade temporo-espacial da pluviosidade na bacia do Alto Iguaçu**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Curitiba, PR, 2016.

SALVIANO, F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, 64-73, 2016.

SANEPAR. **Iguaçu: da Nascente à Foz**. Disponível em: <<http://site.sanepar.com.br/conteudo/iguacu-da-nascente-foz>> Acesso em: 05 Jun. 2017.

SANTOS, L.; JOSÉ, J.; ALVES, D.; NITSCHKE, P.; REIS, E.; BEDER, F. Space-time variability of evapotranspiration and precipitation in the State of Paraná, Brazil. **Revista Ambiente e Água**, v.12, n.5, Taubaté, SP, 2017.

SEMA. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Bacias Hidrográficas do Paraná**. Série histórica. p, 29-41. Governo do Estado do Paraná. Curitiba, PR, 2010.

SERRANO, S. E. Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals: An Integrated Treatment of Surface, Subsurface, and Contaminant Hydrology, **HydroScience**. 1997.

SIEGEL, S.; CASTELLAN, N. J. **Non-parametric Statistics for the Behavioural Sciences**. McGraw-Hill, New York, USA, 1988.

SILVA, W. L.; DERECZYNSKI, C.; CHANG, M.; FREITAS, M.; MACHADO, B. J.; TRISTÃO, L.; RUGGERI, J. **Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 30, n-2, p. 181-194. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

SOUZA, B. P. **Análise de tendência em séries temporais de precipitação na região dos reservatórios do sistema Cantareira, São Paulo, SP**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2015.

TARGA, M.; BATISTA, G.; DINIZ, H.; DIAS, N.; MATOS, F. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science: (Ambi-Agua)**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 120-142, 2012.

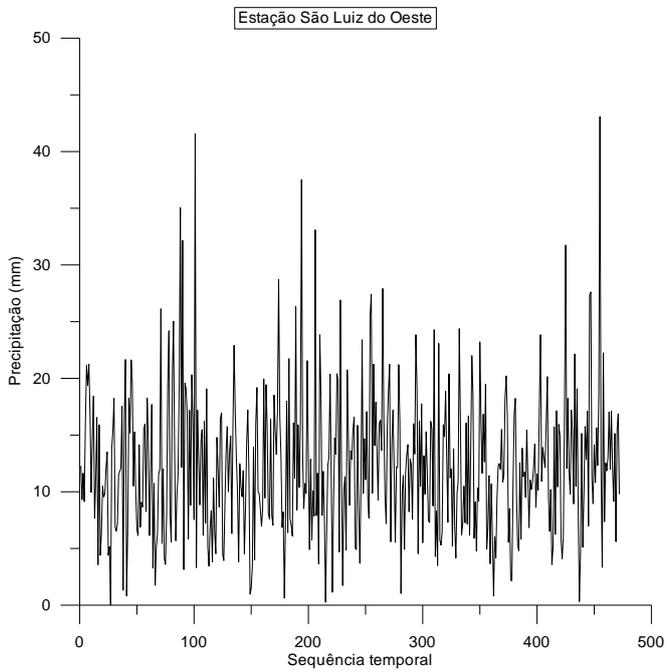
TEIXEIRA, M. S. **Atividade de ondas sinópticas relacionadas a episódios de chuvas intensas na região Sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado-Meteorologia. INPE, São Jose dos Campos, SP, 2004.

WILKS, D. S. Theoretical probability distributions. In: Statistical methods in the atmospheric sciences. **San Diego: Academic Press**, p. 102 -104, 2006.

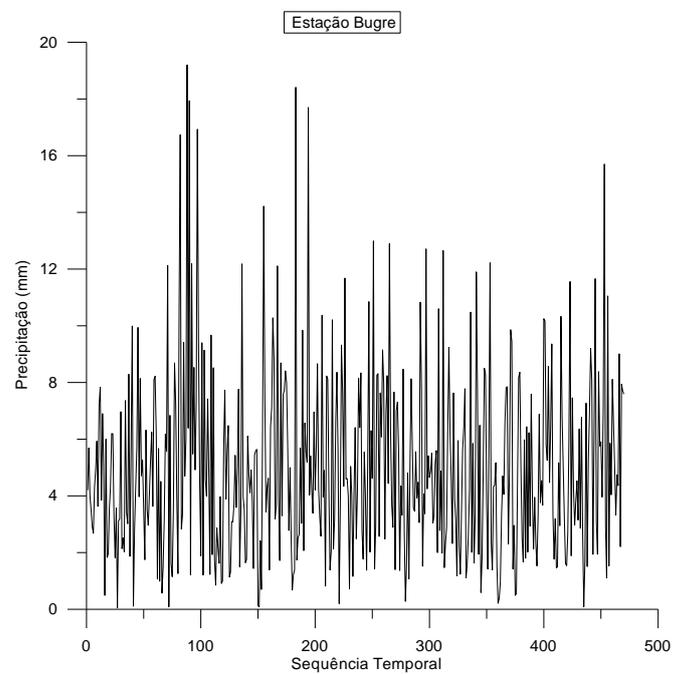
YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological Processes**, v.16, p. 1807-1829, 2002.

APÊNDICE A – Sequência temporal das médias mensais de precipitação

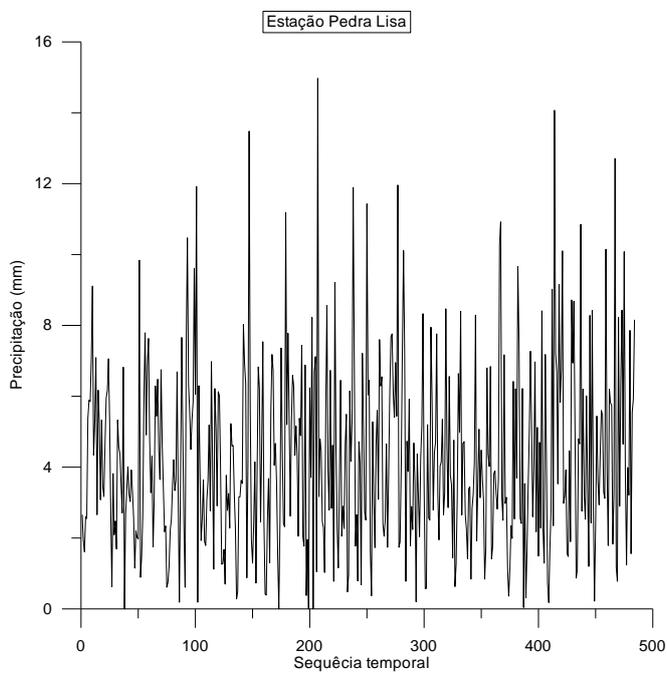
A)



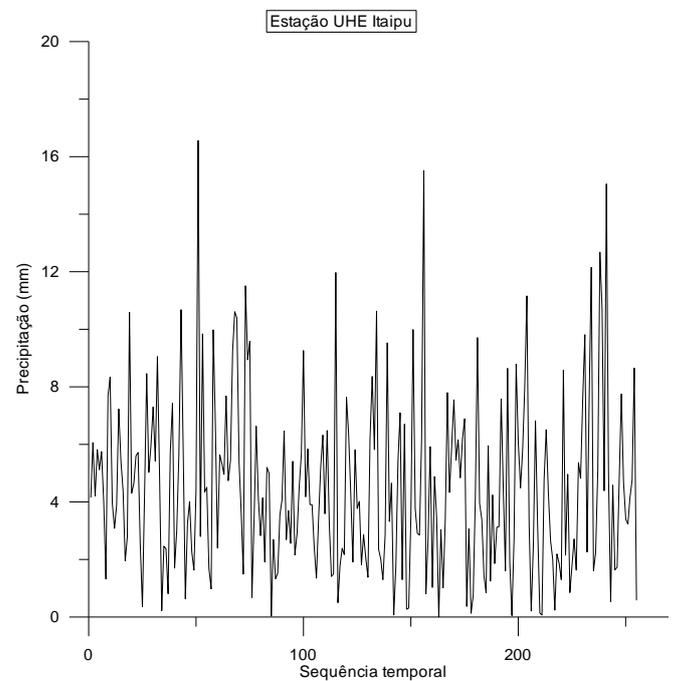
B)



C)



D)



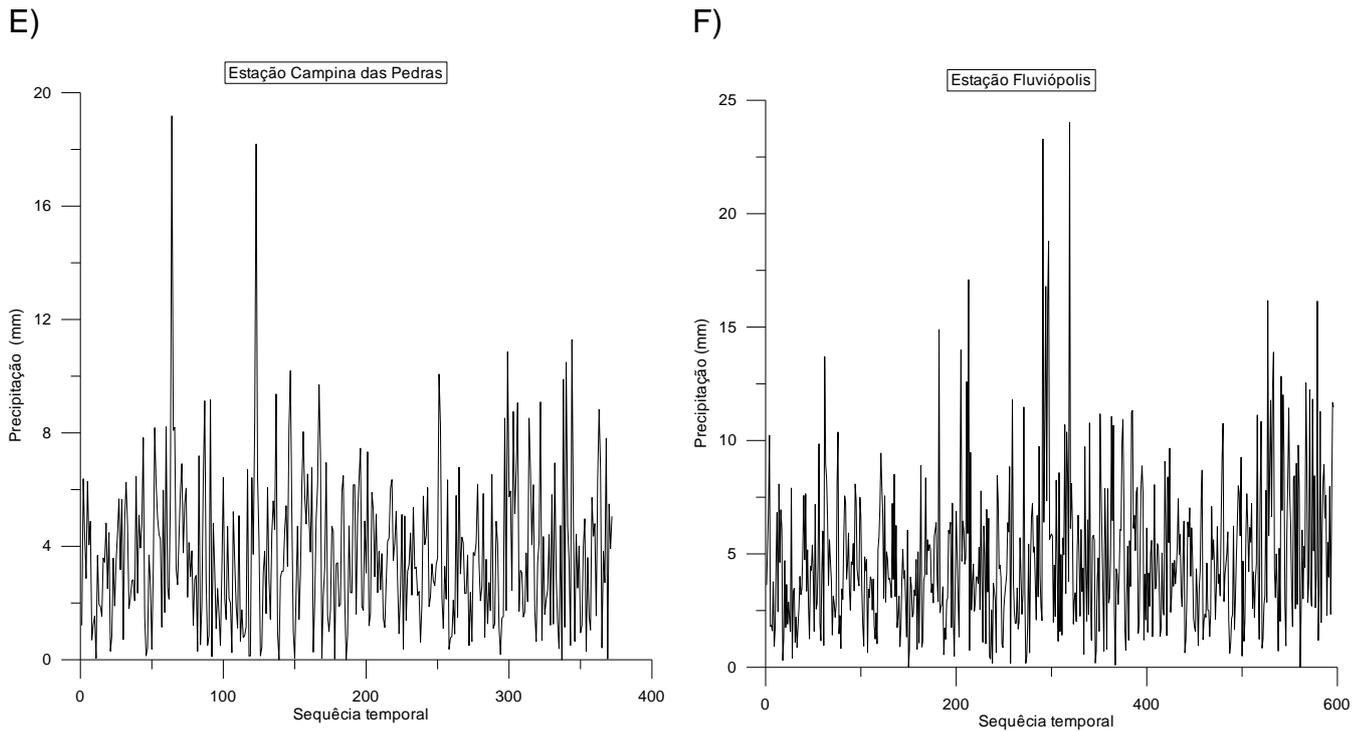


Figura A. 1 - Sequências temporais das médias de precipitação mensais. A) Estação São Luiz do Oeste. B) Estação Bugre. C) Estação Pedra Lisa. D) Estação UHE ITAIPU. E) Estação Campina das Pedras. F) Estação Fluvópolis.

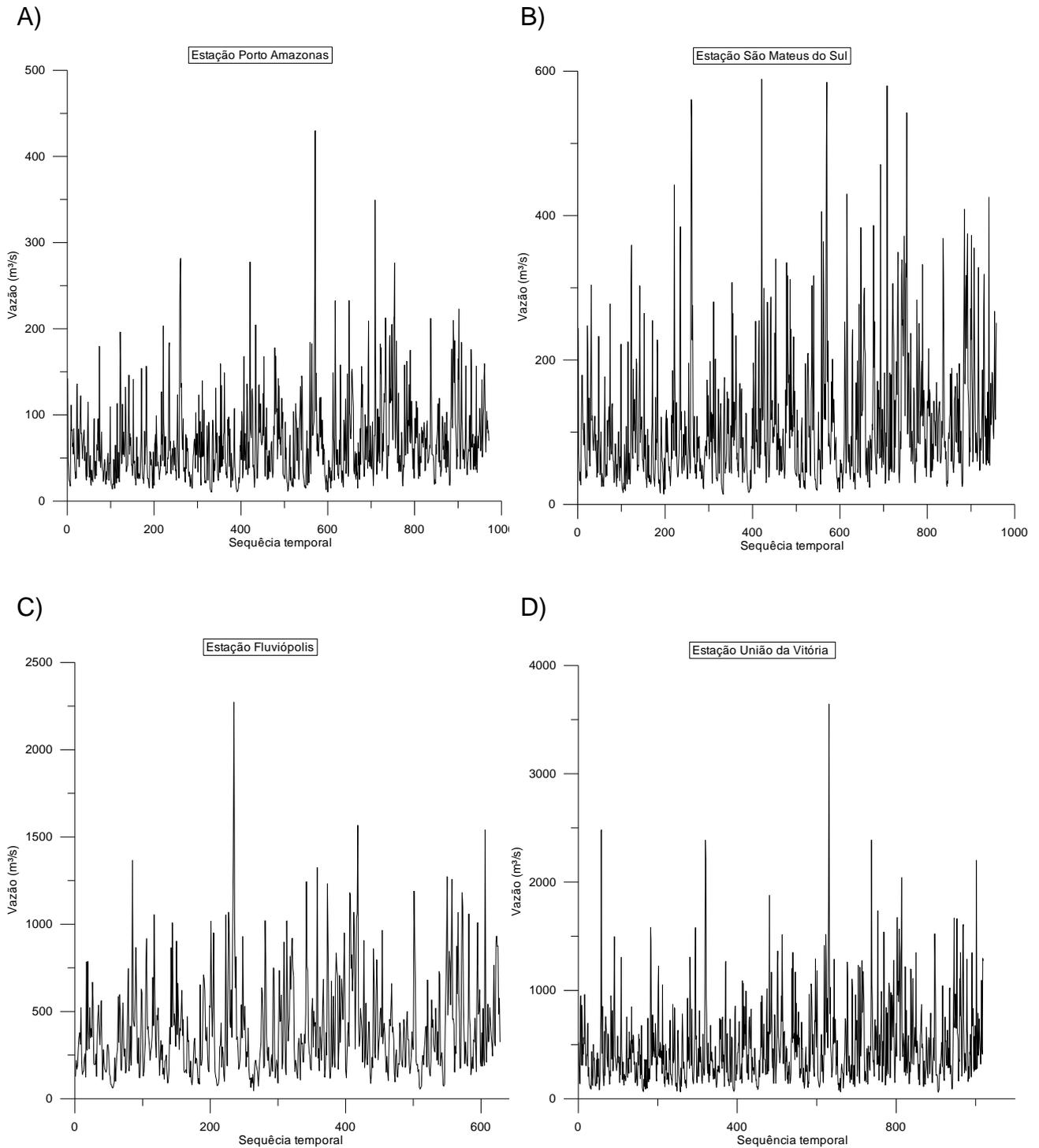
APÊNDICE B – Sequência temporal das médias mensais de vazão

Figura B. 1 - Sequências temporais das médias de vazões mensais. A) Estação Porto Amazonas. B) Estação São Mateus do Sul. C) Estação Fluviópolis. D) Estação União da Vitória.