

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – CAMPUS DE CASCAVEL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CONTROLE ESTATÍSTICO E PREVISÃO DO MONITORAMENTO DO ÍNDICE DE
QUALIDADE DA ÁGUA**

KETLLIN ZANELLA DA CONCEIÇÃO

CASCAVEL

2017

KETLLIN ZANELLA DA CONCEIÇÃO

**CONTROLE ESTATÍSTICO E PREVISÃO DO MONITORAMENTO DO ÍNDICE DE
QUALIDADE DA ÁGUA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vilas Boas

CASCADEL – PARANÁ - BRASIL

ABRIL- 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

C744c

Conceição, Ketllin Zanella da
Controle estatístico e previsão do monitoramento do índice de qualidade da água. / Ketllin Zanella da Conceição. Cascavel, 2017.
58 f.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Vilas Boas
Revisor: José Carlos da Costa

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2017.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

1. Recursos hídricos. I. Vilas Boas, Márcio Antônio. II. Costa, José Carlos da, Rev. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

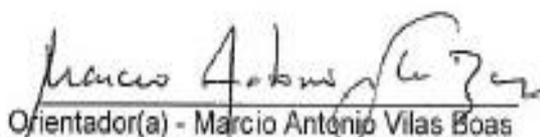
CDD 20.ed. 551.48
CIP-NBR 12899

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9^a/965

KETLLIN ZANELLA DA CONCEIÇÃO

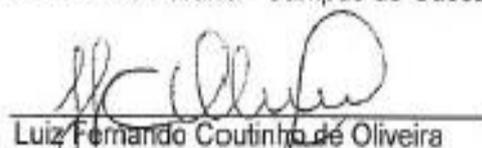
"Controle Estatístico e Previsão do Monitoramento do Índice de Qualidade da Água"

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Recursos Hídricos, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Marcio Antonio Vilas Boas

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



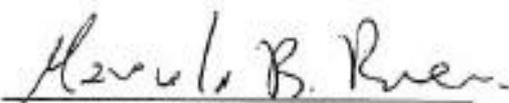
Luiz Fernando Coutinho de Oliveira

Universidade Federal de Lavras (UFLA)



Simone Damasceno Gomes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Marcelo Bevilacqua Remor

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 12 de junho de 2017

BIOGRAFIA

Ketllin Zanella da Conceição nasceu em 2 de dezembro de 1991, em Cascavel – PR, Concluiu o curso de graduação em Ciências Biológicas - Bacharelado, pela Universidade Paranaense – UNIPAR, no ano de 2013 e o curso de graduação em Ciências Biológicas - Licenciatura, pelo Centro Universitário Assis Gurgacz – FAG, no ano de 2014. Em 2015 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, sob a orientação do Prof. Dr. Márcio Antônio Vilas Boas. Durante esse período foi bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Antônio Vilas Boas, por cada conversa e ensinamento, mas principalmente, pela amizade e pelas orientações de vida.

Aos meus pais, Elizeu Aparecido da Conceição e Rosimeri Zanella da Conceição, por serem meu exemplo, minha inspiração, meu incentivo, minha força e o alicerce para eu ter chegado até aqui. Nem em mil palavras, conseguiria demonstrar o tamanho da minha gratidão por vocês.

Ao meu esposo Danilo Iani Bonaparte, por cada palavra doce, por cada abraço, por cada sorriso e cada lágrima durante esse tempo. Mas, principalmente, por sempre segurar a minha mão e estar ao meu lado. Você tornou o caminho mais fácil.

A cada uma das pessoas da minha família que contribuíram na minha criação, na formação dos meus valores. Eu não seria a mesma, sem vocês.

Às queridas Karine, Camila, Regiane e Bruna pela amizade, pelas conversas e pelos sorrisos. A trajetória seria mais árdua sem vocês.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade do crescimento profissional.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, por dividirem seus conhecimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo auxílio financeiro.

A todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta, meu sincero obrigada!

CONTROLE ESTATÍSTICO E PREVISÃO DO MONITORAMENTO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA

RESUMO

O desenvolvimento desordenado dos grandes centros urbanos e o desenvolvimento industrial vêm dificultando a conscientização sobre o uso racional e sustentável da água. O uso indiscriminado desse recurso vem chamando atenção da comunidade científica e percebe-se uma infinidade de trabalhos científicos a fim de que se avaliem o uso e a qualidade da água. Uma das formas de se avaliar a qualidade da água é pela utilização de indicadores, que têm por finalidade analisar as características físico-químicas e biológicas e, assim, permitir a avaliação da qualidade das águas de um corpo hídrico. Utilizou-se o índice de capacidade do processo para se avaliar de forma rápida os parâmetros que envolvem o índice de qualidade da água (IQA). Desse modo, objetivou-se com esse trabalho determinar o índice de qualidade da água bem como aplicar metodologias de controle de qualidade estatístico para avaliar o monitoramento de qualidade da água em rios. Portanto, para se realizar o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizado um banco de dados com parâmetros físico-químicos e microbiológicos dos rios Passaúna e Piraquara, pertencentes às cidades de Araucária e Piraquara, respectivamente. O índice de qualidade da água foi determinado com a série temporal e, posteriormente, esses dados foram submetidos ao controle estatístico do processo, com os gráficos de controle de Shewhart individual, MMEP e CUSUM, além do desenvolvimento do índice de qualidade do processo. A partir desses dados foi desenvolvido um modelo de previsão com o método de Holt-Winters Aditivo. O IQA detectou que os rios mantiveram-se em qualidade média até o ano 2000, entretanto, a partir desse ano foi possível visualizar uma tendência decrescente na qualidade das águas dos rios avaliados. Essa tendência também foi identificada pelos gráficos de controle. Os gráficos foram capazes de identificar que as águas dos rios não estavam em controle estatístico, identificando alguns pontos que excederam os limites de controle utilizados. O índice de capacidade do processo demonstrou que o rio Piraquara foi classificado com águas de melhor qualidade, quando comparado ao rio Passaúna. O método de previsão de Holt-Winters demonstrou que continuaria com uma tendência decrescente no IQA e, conseqüentemente, na qualidade da água, em ambos os rios avaliados. As ferramentas estatísticas utilizadas demonstraram ser rápidas e eficientes para a avaliação do controle de qualidade de águas. Por fim, sugere-se que sejam desenvolvidas mais pesquisas utilizando a técnica do controle estatístico do processo para avaliação do meio ambiente.

Palavras-chave: recursos hídricos; gráficos de controle; Holt-Winters.

STATISTICAL CONTROL AND MONITORING OF WATER QUALITY INDEX FORECASTING

ABSTRACT

The unplanned development of large urban centers as well as the industrial one have hindered sustainable awareness regarding the correct water application. The unruly use of this resource has drawn the scientific community attention, thus, several scientific trials have been carried out in order to evaluate the use and quality of water. The use of indicators is one of the possibilities to evaluate water quality, which aims at analyzing physical-chemical and biological characteristics, and so allowing the evaluation of water body quality. In order to quickly evaluate the parameters involving water quality index (WQI), the process capability index was used. Thus, this trial aims at determining the water quality index as well as applying statistical quality control methodologies to evaluate the monitoring of water quality in rivers. Therefore, a database with physical-chemical and microbiological parameters from Passaúna and Piraquara rivers was applied to carry out this research development. Those rivers are in Araucária and Piraquara cities, respectively. The water quality index was determined by the time series, and subsequently data were submitted to statistical process control, with Shewhart individuals, EWMA and CUSUM, control charts as well as the development of the process quality index. Based on these data, a model of forecast was developed according to Holt-Winters Additive method. The WQI detected that the studied rivers remained under an averaged quality until the year of 2000, however, since that year, it was possible to observe a decreasing trend in water quality of the evaluated rivers. This trend was also identified by control charts. The graphs were also able to identify that waters of the rivers were not under statistical control, identifying some points that exceeded the used control limits. The process capacity index showed that the Piraquara River was classified with better quality of water when compared to the Passaúna River. The Holt-Winters prediction method showed that both rivers would continue with a decreasing trend in WQI and consequently in water quality. The applied statistical tools proved to be fast and efficient to evaluate water quality control. Finally, it is suggested that other researches should be developed using the technique of statistical process control for environmental evaluation.

Keywords: water resources; control charts; Holt-Winters.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
1` INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Índice de qualidade de água.....	13
3.2 Controle estatístico do processo (CEP)	15
3.3 Gráficos de controle estatístico.....	16
3.4 Índice de capacidade do processo	20
3.5 Séries temporais e previsão de demanda pelo método de Holt-Winters	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1 Índice de qualidade da água.....	24
4.2 Análise estatística	25
4.2.1 Gráficos de controle	26
4.2.2 Capacidade do processo	28
4.2.3 Métodos de previsão	29
4.2.3.1 Erros dos métodos de previsão	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 Análise da estatística descritiva.....	31
5.2 Gráficos de controle para medidas individuais.....	35
5.3 Análise do índice de capacidade do processo	43
5.4 Previsão pelo método de Holt-Winters.....	45
6 CONCLUSÕES	53
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Limites dos parâmetros para rios de classe 2.....	14
Tabela 2	Pesos w_i utilizados no cálculo do IQA.....	25
Tabela 3	Faixas do IQA preconizadas pela Agência Nacional das Águas	25
Tabela 4	Estatística descritiva dos parâmetros analisados pelo índice de qualidade da água no rio Passaúna, em Araucária - PR.....	31
Tabela 5	Estatística descritiva dos parâmetros analisados pelo índice de qualidade da água no rio Piraquara, em Piraquara - PR.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Gráfico de Shewhart para medidas individuais.	18
Figura 2	Gráfico de média móvel exponencialmente ponderada.	19
Figura 3	Gráfico de soma cumulativa.	20
Figura 4	Gráficos de controle Shewhart para IQA, para os rios Passaúna (a) e Piraquara (b).	36
Figura 5	Gráficos de Shewhart para o IQA para os rios Passaúna (a) e Piraquara (b), com linhas de referências da ANA.	37
Figura 6	Gráfico de média móvel exponencialmente ponderada para o IQA, para os rios Passaúna (a) e Piraquara (b).	39
Figura 7	Gráfico de média móvel exponencialmente ponderada para IQA dos rios Passaúna (a) e Piraquara (b), com linhas de referência da ANA.	40
Figura 8	Gráficos de controle de soma acumulada (CUSUM), para IQA dos rios Passaúna (a) e Piraquara (b).	41
Figura 9	Capacidade do processo para IQA do rio Passaúna.	44
Figura 10	Capacidade do processo para IQA do rio Piraquara.	45
Figura 11	Previsão do IQA para o rio Passaúna, pelo método de Holt-Winters.	46
Figura 12	Previsão do IQA para o rio Piraquara, pelo método de Holt-Winters.	47
Figura 13	Gráficos de controle (a) Shewhart, (b) MMEP e (c) CUSUM, para a previsão do IQA do rio Passaúna.	48
Figura 14	Gráficos de controle (a) Shewhart, (b) MMEP e (c) CUSUM, para a previsão do IQA do rio Piraquara.	49
Figura 15	Capacidade do processo para a previsão do IQA do rio Passaúna.	50
Figura 16	Capacidade do processo para a previsão do IQA do rio Piraquara.	51

1` INTRODUÇÃO

O uso da água para suprir as mais diversas atividades humanas cada vez mais vem ganhando destaque no meio científico, existindo a clara preocupação para que o uso desse recurso seja feito de forma racional e sustentável. O que se observa no cenário atual é que o desenvolvimento desordenado dos grandes centros urbanos e o desenvolvimento industrial vêm dificultando a conscientização sobre a necessidade do uso sustentável da água.

A exploração dos recursos hídricos de forma não sustentável é motivo de preocupação entre pesquisadores e o setores públicos responsáveis. Esse recurso vem sendo utilizado de forma indiscriminada e, caso não sejam tomadas medidas corretivas, talvez não seja possível mantê-lo e preservá-lo para as futuras gerações. A necessidade de se monitorar os ambientes aquáticos existe para que se possa fazer o acompanhamento de uma bacia hidrográfica. O acompanhamento da qualidade da água de uma bacia, permite a identificação e correção pontual de poluentes.

Das formas de se monitorar a água de maneira sustentável uma é com a utilização de índices de qualidade. Essa ferramenta permite ao analista ambiental fazer um diagnóstico rápido e preciso no ecossistema aquático e de todo o ambiente que o circunda. O acompanhamento com esse índice de qualidade é essencial para que se garanta que a água esteja dentro dos limites exigidos para cada tipo de uso, já que essa não tem uma qualidade definida e depende do contexto e o fim para o qual será usada.

A utilização de índices de qualidade permite que o pesquisador avalie o ambiente aquático com uma reunião de parâmetros físico-químicos e microbiológicos; as alterações presentes nesses parâmetros podem ser decorrentes de atividades antrópicas e alterações naturais. A partir dessa avaliação, comparam-se os valores obtidos com a legislação vigente e determina-se a necessidade ou não de uma intervenção para amenização de impactos ambientais.

Algumas análises estatísticas, amplamente utilizadas no meio industrial, vêm demonstrando a possibilidade serem utilizadas como parâmetros de monitoramento ambiental. O controle estatístico do processo é uma destas ferramentas, em que pequenas alterações podem ser identificadas, com intenção de ser amenizar determinada variabilidade. As técnicas responsáveis por essa identificação são os gráficos de controle. Ferramentas que possuem possibilitam identificar o ponto de oscilação para que seja possível aplicar uma medida corretiva, a fim de que as alterações parem de acontecer.

As técnicas de previsão também são amplamente utilizadas no âmbito industrial, entretanto, elas vêm demonstrando grande utilidade no monitoramento ambiental. O método de Holt-Winters, por exemplo, utiliza valores de observações anteriores e, a partir disso, é capaz de prever valores futuros. A utilização de ferramentas capazes de fazer previsões pode ser uma aliada para o monitoramento de qualidade das águas, de modo que seria possível identificar a evolução de um problema, antes mesmo que ele acontecesse. A identificação precoce de futuras alterações, permitiria que medidas corretivas fossem aplicadas antes que os problemas fossem agravados.

Nesse sentido, justifica-se a realização deste trabalho de análise dos índices de qualidade de água, posto que são importantes para o monitoramento dos recursos hídricos. O conhecimento desses índices, juntamente com os métodos de previsão, torna eficazes o monitoramento das águas, uma vez que, com eles, pode ser possível a realização do manejo correto do recurso, caso esse esteja apresentando características de degradação, além da classificação do rio de acordo com as legislações vigentes do país.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Aplicar o índice de qualidade da água e técnicas do controle estatístico em dados de qualidade da água dos rios Passaúna e Piraquara.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o índice de qualidade da água dos rios Passaúna e Piraquara;
- Verificar a eficiência dos gráficos de controle estatístico para monitorar a qualidade da água dos rios;
- Determinar o melhor modelo de gráficos de controle para o banco de dados;
- Determinar o índice de capacidade do processo para o índice de qualidade da água obtido nos dois rios;
- Comparar o índice de capacidade do processo para o índice de qualidade da água dos rios Passaúna e Piraquara;
- Realizar a previsão do índice de qualidade da água dos rios Passaúna e Piraquara.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Índice de qualidade de água

Os fatores relacionados à qualidade da água têm sido determinantes para o bem-estar da saúde humana. A manutenção da qualidade desse recurso em níveis que não comprometam a saúde tem sido uma questão crucial para a população em diversas partes do planeta. Nesse sentido, as mudanças no estado qualitativo da água vêm recebendo maior atenção nas últimas décadas (OLIVEIRA PINTO et al., 2015).

O monitoramento das águas não depende somente das variáveis escolhidas para serem estudadas. Gelting e Baloch (2013) observam que além das variáveis escolhidas para o monitoramento das análises, também é necessário realizar uma avaliação ambiental num conjunto de atividades, de modo que vise a qualidade da água, a microbiologia, a segurança alimentar, a saúde ambiental, a irrigação, o manejo e a gestão das bacias hidrográficas. Desta forma, o monitoramento das águas permite uma visão holística e multidisciplinar.

A água de má qualidade pode ser prejudicial também numa perspectiva econômica, sendo que este recurso tem que ser direcionado para a melhoria do abastecimento do sistema de água, cada vez que o nível de qualidade determinado pela legislação é alterado. Por essas razões, existe uma crescente cobrança para melhorar o tratamento da água e da gestão de qualidade, a fim de garantir esse recurso de forma potável para toda a população (JUNTUNEN et al., 2013).

A garantia da água de qualidade é um dos desafios mais difíceis encontrados pelos gestores dos recursos hídricos, uma vez que existe dificuldade em garantir água sem contaminação nas fontes próximas aos grandes centros urbanos. O Índice de Qualidade da Água (IQA) é uma ferramenta que apresenta de forma clara as condições acerca de um corpo hídrico em forma de *ranking*, sendo essencial para que se possam tomar medidas preventivas pontuais ou generalizadas (FERNANDES; SCALIZE, 2015).

O uso do IQA permite a integração de vários parâmetros para um único número, possibilitando a interpretação e análise simultânea de parâmetros de qualidade (MOYEL; HUSSAIN, 2015).

Os métodos de determinação do IQA refletem com precisão as variações espaciais e temporais da qualidade da água. Dessa forma, um método de avaliação de qualidade da água deve ser amplamente utilizado na gestão ambiental, devendo ser de fácil domínio, cálculo e interpretação. Essa medida de um único valor é amplamente adotada por departamentos de proteção ambiental (LI; ZOU; AN, 2016).

Apesar da quantidade de índices de qualidade de águas existentes, até o momento, nenhum é utilizado universalmente, de modo que as agências de águas, usuários e gestores de recursos hídricos em diferentes países possam escolher um método, usar e adaptar pequenas modificações de forma que ele responda também à sua realidade (TYBAGI et al., 2013).

O IQA é considerado uma ferramenta rápida e sistemática de avaliação para classificar as características da água em relação às fontes poluidoras. Esse procedimento passou a ser utilizado no diagnóstico da qualidade das águas de superfície, áreas costeiras, controle e gerenciamento dos recursos hídricos. Este indicador é calculado pelo produtório ponderado da qualidade de água correspondente aos parâmetros selecionados e, a partir do resultado obtido, a qualidade do corpo hídrico é classificada entre péssima e ótima, relacionando um intervalo de variação do IQA (0-100) a uma cor de referência (OLIVEIRA PINTO et al., 2015).

As cores utilizadas para identificar a legenda do IQA facilitam a visualização dos resultados de um monitoramento temporal do local em estudo e apresentam os relatórios de água. Para que ocorra a classificação das cores, deverá ser realizada a determinação de nove parâmetros (Tabela 1) que interferem diretamente na indicação da qualidade de água influenciada pela presença de agentes poluidores no corpo hídrico (SARON; AMARAL, 2015).

Os parâmetros que são analisados nesta pesquisa foram instituídos pela Agência Nacional das Águas e os valores limites para esses parâmetros para águas doces de Classe 2, em que se enquadram os rios aqui estudados, estão apresentados na Tabela 1, de acordo com o estabelecido na Resolução 357/2005, do CONAMA (BRASIL, 2005).

Tabela 1 Limites dos parâmetros para rios de classe 2

Parâmetro	Limite CONAMA 357/2005
Sólidos totais	No máximo 500 mg L ⁻¹
Turbidez	Até 100 UNT
Temperatura	Altas temperaturas podem causar grandes danos aos recursos hídricos
Demanda bioquímica de oxigênio	5 dias a 20°C até 5 mg L ⁻¹ de O ₂
Fósforo total	Até 0,050 mg L ⁻¹
Oxigênio dissolvido	< 5 mg L ⁻¹ de O ₂
Potencial hidrogeniônico	6,0 a 9,0
Nitrogênio total	3,7 mg L ⁻¹ de N para pH ≤ 7,5 2,0 mg L ⁻¹ de N para 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 mg L ⁻¹ de N PARA 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 mg L ⁻¹ de N para pH > 8,5
Coliformes termotolerantes	1000 coliformes a cada 100 mL

Fonte: Brasil (2005).

O IQA varia de acordo com o tipo de utilização e o critério de qualidade aceitável, e depende das condições existentes, que variam temporalmente e por região. Assim, o índice de qualidade de água desempenha um importante papel na avaliação de uma determinada fonte de água, que recebe influência do tempo e de outros fatores que podem alterar a sua qualidade. No geral, o IQA é um eficiente indicador da avaliação do ambiente aquático de uma forma simples e compreensível (POONAM; TANUSHREE; SUKALYAN, 2013).

A avaliação do IQA é valiosa e única para descrever o estado geral da qualidade da água e descrever em termos qual a seleção da técnica de tratamento é adequada para satisfazer as questões em causa. Descreve a influência composta por diferentes parâmetros de qualidade e comunica informações de qualidade aos gestores públicos e legislativos (EFFENDI, 2016). Várias técnicas podem ser utilizadas para a realização do acompanhamento de fatores ambientais. Carvalho et al. (2016) afirmam que, cada vez mais, as técnicas estatísticas vêm contribuindo para o acompanhamento dos ecossistemas aquáticos.

3.2 Controle estatístico do processo (CEP)

O controle estatístico do processo (CEP) é uma ferramenta poderosa para detecção de problemas, demonstrando a estabilidade do processo e a melhoria da capacidade por meio da redução da variabilidade. O CEP é capaz de detectar rapidamente mudanças de um processo, possibilitando que ocorra uma investigação e a ação corretiva, antes que uma grande quantidade de não conformidades comece a acontecer (MONTGOMERY, 2004).

As técnicas do CEP avaliam o comportamento de um processo e, ajudam a manter os padrões dentro de faixas adequadas. Caso o padrão esteja fora da faixa esperada, faz-se necessária a implementação de uma ação corretiva, para que se retorne o processo ao padrão esperado, deixando-o em estado de controle (GIRON et al., 2013).

O principal objetivo do CEP é estabelecimento de um processo de nível aceitável e estável para assegurar serviços com exigências específicas. Caso ocorra alguma alteração no processo, esse método procura determinar as razões dessas variações, a fim de continuar com o processo controlado (FU; WANG; DONG, 2017).

O controle estatístico do processo deve ser utilizado em dados que apresentem normalidade, a fim de verificar a variabilidade no atendimento às especificações e exigências de qualidade, possibilitando a identificação de pontos problemáticos no processo (MONTGOMERY, 2004).

Existem dois tipos de variação em relação ao CEP, a variação por causa comum que implica a avaliação observada e reflete em flutuações aleatórias, quando o processo está sob controle; e a variação por causas especiais em que não existem mais variações esperadas, acontecendo por acaso, ou seja, a variação acontece devido a fatores externos deixando o processo fora do controle estatístico (MALEKI; AMIRI; CASTAGLIOLA, 2017; FRETHEIM; TOMIC, 2015).

Para os autores Oberoi et al. (2016), as causas comuns são evidenciadas por um padrão de variação estável e repetitivo. A melhoria real da qualidade requer um foco contínuo para reduzir a variação comum da causa. As variações por causas especiais são um sinal de que algo mudou no processo. São evidenciadas por uma ruptura do padrão de variação estável e repetitivo e resultam de um desempenho imprevisível e, portanto, devem ser identificadas e removidas antes de tomar outras medidas para melhorar a qualidade.

Entre as principais ferramentas utilizadas no controle estatístico do processo estão os gráficos de controle. Esses gráficos são técnicas de monitoramento capazes de demonstrar como o processo está se desenvolvendo (MONTGOMERY, 2004).

3.3 Gráficos de controle estatístico

As técnicas de gráficos de controle geram índices de fácil interpretação que possibilitam avaliar se o processo está sob controle estatístico (ORSSATTO; VILAS BOAS; EYNG, 2015). Essas ferramentas podem ser aplicadas em processos industriais e não industriais (MONTGOMERY, 2004). Para Zanini et al. (2016), os gráficos de controle são métodos eficazes para se tentar reduzir a variabilidade de um processo.

O uso mais importante de um gráfico de controle é melhorar o processo. Nesse sentido, Montgomery (2004) afirma que a maioria dos processos não opera em um estado de controle estatístico e que, conseqüentemente, a utilização de gráficos de controle ajudará na identificação de algum descontrole. Se as causas puderem ser eliminadas do processo, a variabilidade será reduzida e o processo será melhorado.

De forma geral, é correto afirmar que os gráficos de controle funcionam como um teste de hipótese, em que a hipótese nula identifica se o processo está sob controle estatístico e a hipótese alternativa indica que esses não estão sob controle estatístico, ou seja, um ponto de plotagem fora dos limites de controle é o equivalente a não rejeição dessa hipótese (FERREIRA; NOMEINI; OLIVEIRA, 2016; MONTGOMERY, 2004).

Os gráficos de controle exibem a característica de qualidade de uma determinada amostra. São constituídos por uma linha central que representa o valor médio de

determinada característica de qualidade. As outras duas linhas exibidas no gráfico são os limites de controle. Se o processo estiver sob controle estatístico, os pontos deverão estar dentro dos limites de controle, então nenhuma ação será necessária, visto que o processo está ocorrendo de forma adequada. Entretanto, um ponto que fique fora dos limites de controle, demonstra que o processo está fora de controle e que há necessidade de uma investigação para se encontrar e eliminar as causas desse comportamento (MONTGOMERY, 2004).

Zanini et al. (2016) afirmam que um padrão normal nos gráficos pode ser visualizados se a maioria dos pontos estiverem próximos à linha central, se poucos pontos se espalharem e se aproximarem das linhas limite de controle e nenhum dos pontos excederem os limites de controle.

Para que se verifique que o processo está dentro do controle esperado, é essencial que se observe nos pontos de plotagem um padrão aleatório. Caso exista uma sequência grande de pontos plotados acima da linha central e apenas um ou dois abaixo, isso é um indicativo de que algo pode estar afetando esse controle (MONTGOMERY, 2004).

A verificação de padrões é importante, pois permite analisar o grau de instabilidade de uma característica no processo. Caso alguma das regras citadas não seja atendida é necessário que se investigue os motivos da existência de causas especiais, a fim de removê-las (ZANINI et al., 2016).

Quando se está avaliando características de qualidade que apresentam variáveis, como é o caso da análise da água de rios, é necessário realizar o monitoramento da sua variabilidade; para isto podem ser usados os gráficos de controle por variáveis, também conhecidos como gráficos de Shewhart individual (MONTGOMERY, 2004).

Os gráficos de Shewhart foram introduzidos Estados Unidos por meados de 1930, quando Shewhart aplicou gráficos de controle estatístico em uma indústria, prevendo problemas relacionados à qualidade. Esses gráficos são representados por três linhas paralelas; a linha central (LC) que representa o valor médio da característica analisada; a linha superior (LSC) que representa o limite superior de controle; e a linha inferior (LIC) que representa o limite inferior de controle. Se os valores plotados no gráfico estiverem contidos dentro dos limites, sem apresentarem nenhum tipo de tendência, considera-se que o processo está sob controle estatístico (GIRON et al., 2013; MONTGOMERY, 2004). Um exemplo de gráfico de controle de Shewhart individual pode ser observado na Figura 1.

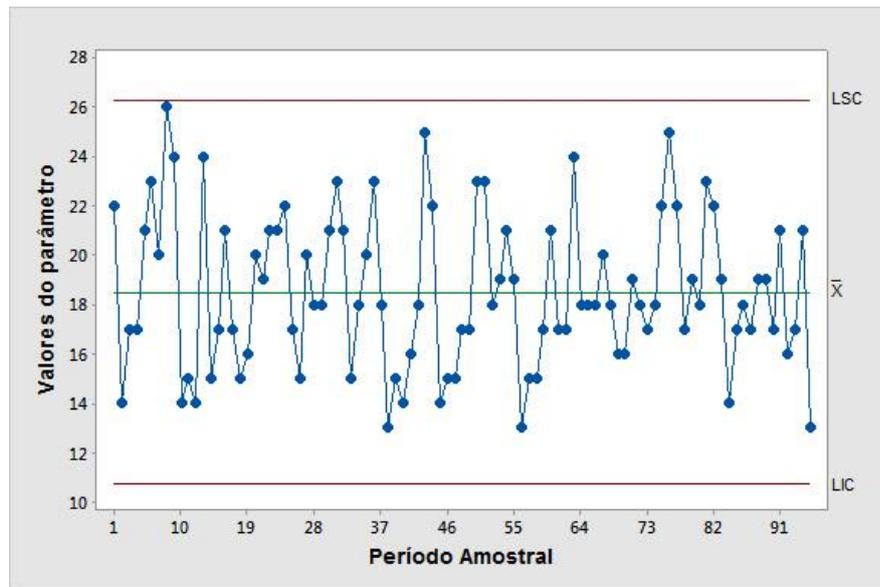


Figura 1 Gráfico de Shewhart para medidas individuais.

Uma grande desvantagem encontrada nos gráficos de controle de Shewhart individual é que o mesmo usa apenas as informações sobre o processo contido na última observação da amostra e ignora qualquer informação dada por toda sequência de pontos. Essa característica acaba tornando o gráfico relativamente insensível a pequenos deslocamentos do processo (MONTGOMERY, 2004).

Frigo et al. (2016) consideraram o gráfico de Shewhart para medidas individuais como robusto, em que esses demonstraram resultados coerentes para avaliação da irrigação por aspersão em dados autocorrelacionados. Freitas (2015) também considerou o gráfico de Shewhart individual eficiente, ao avaliar a qualidade das águas da bacia do rio Mourão.

Entretanto, Zanini et al. (2016), ao estudarem o controle estatístico de qualidade industrial direcionados à área da saúde, consideraram os gráficos de Shewhart individual ineficientes para detectar pequenos desvios e insensíveis para emitir o sinal de alerta preventivo. Já os gráficos do tipo média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) e de controle de soma cumulativa (CUSUM) foram considerados eficientes para detectar pequenos desvios e para emitir sinais de alerta precoce. Para Maleki, Amiri e Castagliola (2017), os gráficos de controle de Shewhart individual são eficazes para processos sensíveis a grandes mudanças, contudo, para pequenas e moderadas modificações os mais indicados seriam MMEP e CUSUM.

Para casos em que se encontrem pequenas variações, em relação média do processo, Montgomery (2004) indica que os gráficos do tipo MMEP e CUSUM são indicados para que se possa fazer essas pequenas identificações. Na Figura 2 pode ser observado um exemplo de gráficos de controle de MMEP.

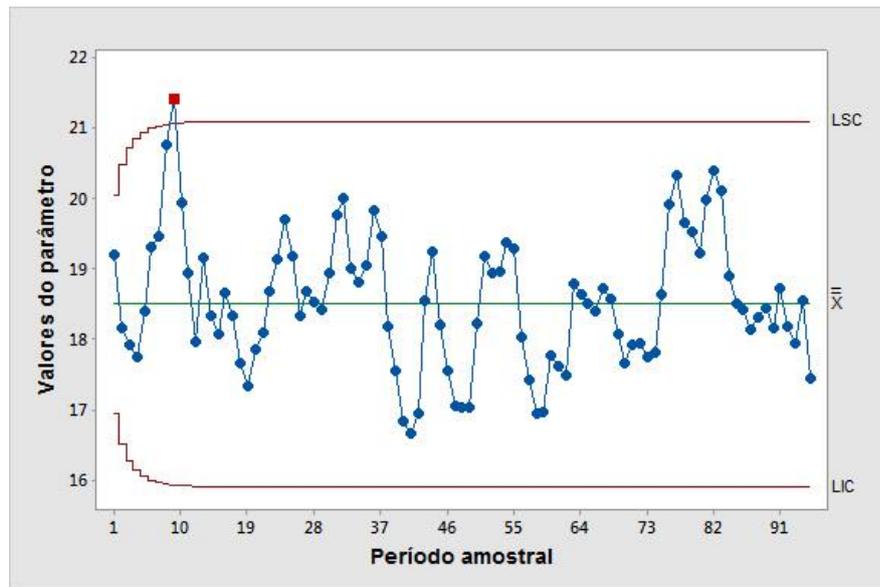


Figura 2 Gráfico de média móvel exponencialmente ponderada.

O gráfico de controle de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) é uma boa alternativa para detectar as pequenas variações não identificadas pelos gráficos de Shewhart individual. O desempenho deste gráfico é parecido com o de soma cumulativa e, em alguns aspectos, pode ser até mais fácil de configurar e operar. Esses gráficos são tipicamente utilizados para observações individuais, ou seja, $n=1$ (MONTGOMERY, 2004).

Henning et al. (2016) estudaram a indústria alimentícia por meio de gráficos de controle e concluíram que ao analisar os gráficos de MMEP e CUSUM. Os autores verificaram uma tendência decrescente nas variáveis estudadas, identificando uma diminuição na qualidade do alimento. Para os autores, esses gráficos foram mais eficientes do que o de Shewhart individual, que não detectou as pequenas variações. Orssatto, Vilas Boas e Eying (2015), ao avaliarem o desempenho de uma estação de tratamento de esgoto por meio de gráficos de controle de MMEP, consideraram que esta ferramenta dá respostas de fácil identificação e demonstra as falhas existentes no processo.

Devido à sensibilidade para pequenas variações no processo, o CUSUM demonstra grande eficiência, pois, além de identificar os desajustes, é capaz de demonstrar quando a variação ocorreu, pois analisa o histórico do processo e não apenas a última observação. O gráfico de CUSUM utiliza todas as informações na sequência dos valores da amostra, plotando as somas cumulativas nos desvios dos valores da amostra de um valor alvo. Montgomery (2004) aconselha que se trabalhe com valores de observações individuais com esse tipo de gráfico. Um exemplo de gráfico de CUSUM pode ser visualizado na Figura 3.

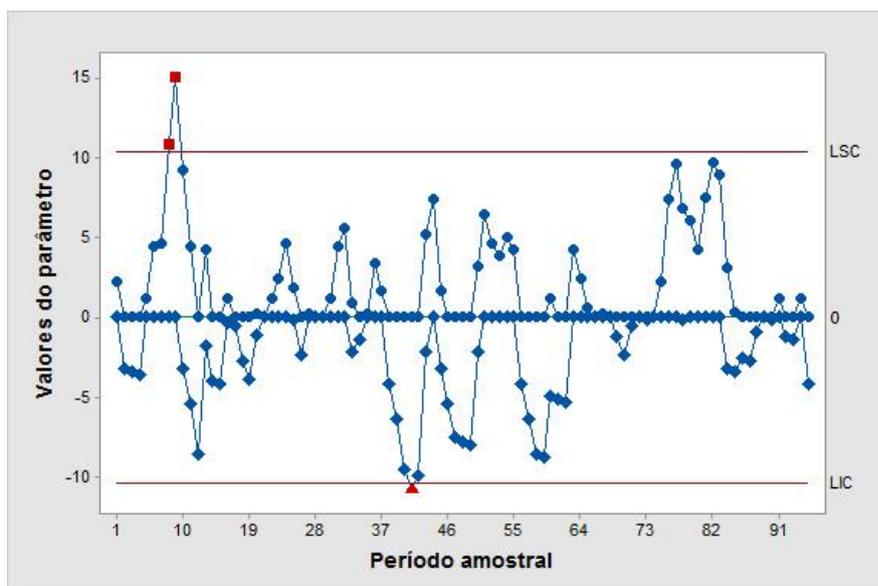


Figura 3 Gráfico de soma cumulativa.

Frigo et al. (2016) classificaram os gráficos de CUSUM como sensíveis e capazes de detectar pequenas variações, ao analisar o controle de uniformidade de irrigação, devido à velocidade do vento. Follador et al. (2012a), ao estudarem os gráficos de controle de qualidade de soma cumulativa, para medirem o nível de qualidade da água do rio Mandurim, constataram que os gráficos foram uma boa alternativa para identificar parâmetros que estavam fora do controle por causas especiais.

3.4 Índice de capacidade do processo

Montgomery (2004) definiu a capacidade do processo (C_p) como um estudo formal para estimar a capacidade que o processo tem de assumir a forma de uma distribuição de probabilidade normal. O estudo da capacidade do processo pode ser amplamente definido como a capacidade de um processo para atender às expectativas esperadas, que são definidas pelos limites de controle (KAYA; KAHRAMAN, 2011).

A capacidade do processo é o intervalo sobre o qual a variação natural ocorre, conforme determinado pelo sistema de causas comuns. É a capacidade da combinação de pessoas, máquinas, métodos, materiais e medições para produzir um produto que satisfaça consistentemente às especificações esperadas. A proporção da produção dentro das especificações do projeto mede a capacidade do processo, ou seja, é a medida de uniformidade do processo. A capacidade do processo pode ser medida se todas as causas especiais forem eliminadas e o processo estiver no estado de controle estatístico (OBEROI et al., 2016).

O C_p é definido como uma proporção da especificação da largura dos limites de controle sobre o espalhamento do processo, normalmente utilizando desvios-padrão. Se as variações presentes no processo forem grandes, o valor que o C_p apresentará será pequeno, indicando uma baixa capacidade no processo (KAYA; KAHRAMAN, 2011; MONTGOMERY, 2004).

O índice de capacidade do processo é medido para que se possa verificar a competência de um processo. Dessa forma, quando se tem a necessidade de calcular o índice de capacidade do processo, compara-se a variação com os limites necessários, sendo esses, superior e/ou inferior (ORSSATTO; VILAS BOAS; EYNG, 2015; MONTGOMERY, 2004).

Para Oberoi et al. (2016), a importância da capacidade do processo está na avaliação da relação entre a variação natural do processo e as especificações do projeto. O cálculo do C_p não tem significado se o processo não estiver sob estado de controle estatístico.

A capacidade do processo C_p não considera onde a média do processo está localizada, em relação às especificações. O C_p concentra-se na dispersão do processo e não dá nenhuma indicação do desempenho real do processo. O índice do C_{pk} foi desenvolvido para solucionar esse problema. O C_{pk} é utilizado para fornecer uma indicação da variabilidade associada a um processo, mostrando como o processo confirma as suas especificações. O índice é utilizado para relacionar as tolerâncias naturais com as especificações limites (KAYA; KAHRAMAN, 2001; MONTGOMERY, 2004; KANE, 1986).

No índice de capacidade do processo a variável C_p fornece a magnitude da variação global do processo, em relação aos limites de especificação, e é incapaz de detectar a saída da média do processo do centro de especificação, por isso não pode ser usada para explicar o desempenho do processo completamente. Já o C_{pk} leva em consideração a localização da média do processo, bem como a variação do processo em relação aos limites de especificação (AHMAD; ASLAM; JUN, 2016).

O estudo do índice de capacidade do processo pode ser aplicado nas mais diversas áreas do conhecimento. Ferreira, Nomelini e Oliveira (2016) que utilizaram o índice de capacidade do processo para avaliar a produção de uma indústria de autopeças; Tamagi et al. (2016) procuraram avaliar com o índice da capacidade do processo a uniformidade e distribuição de água por meio de irrigação com aspersores; Shaban (2014) aplicou o índice de capacidade do processo a fim de melhorar o processo de reutilização de água; Giron et al. (2013) aplicaram o índice de capacidade do processo para investigar o desempenho de uma empresa do setor avícola.

3.5 Séries temporais e previsão de demanda pelo método de Holt-Winters

Uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo. Essas séries podem ser utilizadas nas diversas áreas do conhecimento (MORETTIN; TOLOI, 2006). A análise das séries temporais consiste em procurar alguma relação de dependência existente temporalmente nos dados, identificando o mecanismo gerador da série com o objetivo de extrair periodicidades relevantes nas observações, descrever o seu comportamento e fazer previsões (BAYER; SOUZA, 2010).

Os principais objetivos das séries temporais, segundo Morettin e ToloI (2006) são:

- investigar o mecanismo gerador da série temporal;
- fazer previsões de valores futuros da série, sendo que estas podem ser de curto ou longo prazo;
- descrever apenas o comportamento da série, este mecanismo é utilizado a partir da construção de gráficos, verificação de existência de tendências, ciclos, variações sazonais, entre outros;
- procurar periodicidade relevante nos dados.

Existem várias classes de métodos de previsões relacionados às séries temporais. Uma classe de métodos tradicionais de previsão é a suavização ou alisamento exponencial. Essas técnicas assumem que os valores extremos da série representam a aleatoriedade e, assim, por meio da suavização dos extremos, pode-se identificar o padrão básico da série que é um objetivo de interesse. Os métodos de suavização possuem grande popularidade, devido à simplicidade, à eficiência computacional e à razoável precisão (BAYER; SOUZA, 2010).

A previsão das séries temporais consiste inicialmente no ajustamento de um modelo adequado para os dados históricos obtidos e, em seguida, esse modelo deve ser adequado e adaptado para fazer previsões futuras. Algumas vezes o modelo que proporciona os melhores ajustes para os dados, não oferece as melhores previsões (CHATFIELD, 1988).

As previsões são técnicas utilizadas em diversas áreas assumindo um papel fundamental e necessário para o desenvolvimento de estratégias, mesmo que o resultado da previsão seja inferior ao esperado (DURU, 2010).

Aconselha-se começar a abordagem dos dados por uma simulação, permitindo ao pesquisador a verificação da presença ou ausência de tendência, variação sazonal e valores discrepantes. Essas simulações também revelam evidências de uma mudança na estrutura dos dados, sejam essas temporárias ou permanentes e, conseqüentemente, proporcionam predições mais confiáveis (CHATFIELD, 1988).

Em outras palavras, o estudo de séries temporais tem como um dos seus objetivos a verificação da existência de um padrão no conjunto de dados históricos e, então, a partir

deste padrão prever valores futuros, analisando as características de tendências, sazonalidades, ciclos, entre outras estatísticas descritivas (COMUNELLO; DAMINELLI; BORTOLOTTI, 2013).

Evidencia-se que não existe um melhor método para todas as situações. A escolha do método depende de uma variedade de considerações, incluindo os objetivos e as propriedades do conjunto de dados (CHATFIELD, 1988).

A suavização exponencial foi desenvolvida na década de 1950 e está associada, principalmente, ao seu autor Winters. Posteriormente, muitas variações desses modelos foram desenvolvidas. Várias técnicas relacionadas à melhoria da precisão da previsão são utilizadas, dentre as quais pode ser destacar o alisamento exponencial de Holt-Winters (DURU, 2010; CHATFIELD, 1988).

O modelo de suavização exponencial de Holt-Winters fornece previsões obtidas a partir do cálculo da média móvel exponencialmente ponderada. Neste caso, as observações mais recentes da série temporal recebem maior peso de importância na demanda futura (NARA et al., 2015). O modelo é definido por três parâmetros de suavização exponencial, o nível, a tendência e a sazonalidade (MORETTIN; TOLOI, 2004).

O método de Holt-Winters é dividido em dois modelos: o aditivo e o multiplicativo. O modelo Holt-Winters aditivo é utilizado quando a variação sazonal mantém-se constante ao longo do tempo, ou seja, a variação sazonal permanece constante em relação à média; o modelo Holt-Winters multiplicativo é utilizado quando a variação sazonal aumenta com o tempo, ou seja, quando as variações sazonais variam proporcionalmente com o nível da série (CHATFIELD; YAR, 1988).

As vantagens da utilização do método de Holt-Winters referem-se ao fácil entendimento, aplicação não dispendiosa, adequado para série com padrão de comportamento mais geral. Entretanto, o modelo encontra-se limitado para determinar os valores mais apropriados das constantes de suavização e/ou impossibilidade de estudar as propriedades estatísticas, tais como média, variância da previsão e conseqüentemente, a construção de um intervalo de confiança (MORETTIN; TOLOI, 2004).

Este método é utilizado em diversas áreas do conhecimento, como o estudo realizado pelos autores: Wasik e Chmielowski (2016), que utilizaram o método de Holt-Winters para prever a situação dos esgotos municipais na Polônia; Schrippe et al. (2015) aplicaram na previsão de vendas de produtos cosméticos durante o período de sete anos; Comunello, Daminelli e Bortolotti (2013) utilizaram-no para análise da previsão de demanda da água no município de Medianeira - PR.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de coleta de água analisados na presente pesquisa foram cedidos pelo Instituto das Águas do Paraná. As observações são provenientes de coletas realizadas nos rios Passaúna e Piraquara, pertencentes às cidades de Araucária e Piraquara, respectivamente. Essas cidades estão localizadas na região metropolitana de Curitiba – PR e estão situadas na bacia do Rio Iguaçu.

De acordo com as classificações presentes na Resolução 357/2005 CONAMA, os rios Passaúna e Piraquara são considerados rios de Classe 2 e as estações de tratamento que realizaram as coletas foram Campina das Pedras e Ponte Estrada Piraquara, para as cidades de Araucária e Piraquara, respectivamente.

O banco de dados utilizado contempla uma série histórica dos anos de 1990 a 2009. Os dados foram colhidos trimestralmente, totalizando 95 observações para o rio Passaúna e 81 observações para o rio Piraquara. Os parâmetros analisados foram sólidos totais, turbidez temperatura, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo total, oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico, nitrogênio total e coliformes termotolerantes. Tais parâmetros foram preconizados pela Agência Nacional das Águas (ANA) como indicadores para realização do Índice de Qualidade da Água (IQA).

4.1 Índice de qualidade da água

O valor do IQA é obtido a partir da junção dos nove parâmetros descritos no item 4 para a análise de qualidade da água. Tais valores foram determinados pelo produto ponderado de qualidade da água (Equação 1).

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

em que:

IQ = Índice de Qualidade da Água, que varia de 0 a 100;

q_i = valor do parâmetro (número entre 0 e 100), obtido da respectiva curva média de variação de qualidade, em função a sua concentração ou medida (resultado da análise);

w_i = peso correspondente ao parâmetro.

O valor de q_i é obtido a partir do respectivo gráfico de qualidade em função de sua concentração ou medida. O w_i indica o peso que cada parâmetro analisado possui na equação do IQA, é definido de acordo com a importância de qualidade e é expresso em um número entre 0 e 1, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 Pesos w_i utilizados no cálculo do IQA

Parâmetro	Peso w_i
Oxigênio dissolvido	0,17
Coliformes termotolerantes	0,15
pH	0,12
DBO	0,10
Nitrogênio	0,10
Fósforo	0,10
Temperatura	0,10
Sólidos totais	0,08
Turbidez	0,08

Fonte: ANA (2016).

Com os valores de IQA calculados, empregaram-se as faixas apresentadas na Tabela 3 para se efetuar a classificação da qualidade das águas dos rios Passaúna e Piraquara, avaliados neste trabalho.

Tabela 3 Faixas do IQA preconizadas pela Agência Nacional das Águas

Nível de qualidade	Valor
Excelente	$91 < \text{IQA} \leq 100$
Bom	$71 < \text{IQA} \leq 90$
Médio	$51 < \text{IQA} \leq 70$
Ruim	$26 < \text{IQA} \leq 50$
Muito ruim	$0 < \text{IQA} \leq 25$

Fonte: ANA (2016).

4.2 Análise estatística

Para a realização dos procedimentos estatísticos foi utilizado o *software* Minitab® 16.10, pelo qual foi verificada a normalidade dos dados nos testes de Anderson-Darling, para o nível de significância de 5%. Para os resultados que não se ajustaram à distribuição normal foi realizada uma transformação por BOX-COX para a determinação das medidas de posição: média, moda, máximo, mínimo, n total, variância,

desvio padrão e coeficiente de variação nos dados obtidos durante os dezenove anos de observação.

4.2.1 Gráficos de controle

Montgomery (2004) afirma que, de forma geral, o gráfico de controle é um teste de hipótese em que o processo está em um estado de controle estatístico, ou seja, um ponto de plotagem dentro dos limites de controle é equivalente a não rejeitar a hipótese de controle estatístico e um ponto de plotagem fora dos limites de controle é equivalente à rejeição dessa hipótese.

Os gráficos de controle de Shewhart individual são caracterizados por três linhas: a Linha Central (LC) que é a média; a Linha Superior de controle (LSC) e a Linha Inferior de Controle (LIC), ambas caracterizadas a três desvios-padrões, em relação à média (MONTGOMERY, 2004), obtidas pelas Equações 2, 3 e 4:

$$LSC = \mu + 3 \frac{AM}{d_2} \quad (2)$$

$$LC = \mu \quad (3)$$

$$LIC = \mu - 3 \frac{AM}{d_2} \quad (4)$$

em que:

LC = linha média;

μ = média das observações;

LSC = limite superior de controle;

LIC = limite inferior de controle;

AM = amplitude da amostra;

d_2 = fator para construção do gráfico de controle variável.

O gráfico de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) é definido pela Equação 5.

$$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \quad (5)$$

em que:

Z_i = valores ponderados da i-ésima observação;

x_i = i-ésimo valor observado;

- λ = constante que varia de 0 a 1 ($0 < \lambda \leq 1$);
 Z = valor alvo ou valor médio em controle.

A linha central e os limites de controle superior e inferior (LSC e LIC) do gráfico de MMEP são dados pelas Equações 6, 7 e 8.

$$LSC = \mu_0 + L_{\sigma} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{(2-\lambda)}\right)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}] \quad (6)$$

$$LC = \mu \quad (7)$$

$$LIC = \mu_0 - L_{\sigma} \sqrt{\left(\frac{\lambda}{(2-\lambda)}\right)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}] \quad (8)$$

em que:

- μ_0 = média das observações;
 λ = constante que varia de 0 a 1;
 L_{σ} = número de desvios padrão da média de controle que se quer detectar;
 i = ordem da amostra utilizada.

Para Montgomery (2004), o gráfico de controle de soma cumulativa (CUSUM) é uma boa alternativa quando pequenas alterações são importantes. Esse gráfico incorpora diretamente todas as informações na sequência de valores da amostra, traçando as somas cumulativas dos desvios dos valores da amostra de um valor alvo. O gráfico de CUSUM é definido de acordo com a Equação 9.

$$C_i = \sum_{j=1}^i (X_j - \mu_0) \quad (9)$$

em que:

- X_j = média da j-ésima amostra de tamanho $n \geq 1$;
 C_i = soma cumulativa até a i-ésima amostra.

O CUSUM é a tabulação do acumulado de derivações de μ_0 que estão acima da meta com uma estatística C^+ e acumulando derivações de μ_0 que estão abaixo da meta com outra estatística C^- . Essas estatísticas são chamadas de CUSUM superior e inferior, calculadas pelas Equações 10 e 11.

$$C_i^+ = \text{máx}[0; x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+] \quad (10)$$

$$C_i^- = \text{máx}[0; (\mu_0 + K) - x_i + C_{i-1}^-] \quad (11)$$

em que:

- x_i = observação no tempo;
- C_i = soma cumulativa até a i -ésima amostra, pode ser negativa ou positiva;
- K = valor de compensação ou folga.

4.2.2 Capacidade do processo

Ao utilizar a ferramenta de capacidade do processo, é necessária a verificação de que a estabilidade trará resultados satisfatórios a partir do nível de qualidade que se procura. Os gráficos de controle auxiliam nessa verificação e, caso seja percebida uma instabilidade do processo, então o comportamento da capacidade do processo será instável, não sendo necessária a sua averiguação (GIRON et al., 2013). A verificação da estabilidade do processo é obtida pelo emprego da Equação 12.

$$C_p = \frac{LSE-LIE}{LSC-LIC} \quad (12)$$

em que:

- LSE = limite superior de especificação;
- LIE = limite inferior de especificação;
- LSC = limite superior de controle;
- LIC = limite inferior de controle.

De acordo com Montgomery (2004), o C_p mede a capacidade potencial do processo, enquanto a variável C_{pk} mede a capacidade real do processo permitindo avaliar se o processo será capaz de atingir o valor desejado. A variável C_{pk} é definida de acordo com a Equação 13.

$$C_{pk} = \text{Min}\{C_{pu}, C_{pl}\} \quad (13)$$

$$C_{pu} = \frac{LSE - \mu}{3\hat{\sigma}} \quad (14)$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - LIE}{3\hat{\sigma}} \quad (15)$$

4.2.3 Métodos de previsão

O método multiplicativo de Winters é descrito pelas Equações 16 a 19. A Equação 16 foi utilizada para descrever o nível, a Equação 17 para descrever a tendência, a Equação 18 para descrever a sazonalidade dos dados de qualidade da água e a Equação 19 para prever os próximos 50 valores de IQA, com base nos valores anteriores.

$$L_t = \alpha \left(\frac{Y_t}{S_{t-p}} \right) + (1 - \alpha)[L_{t-1} + T_{t-1}] \quad (16)$$

$$T_t = \gamma[L_t - L_{t-1}] + (1 - \gamma)T_{t-1} \quad (17)$$

$$S_t = \delta \left(\frac{Y_t}{L_t} \right) + (1 - \delta)S_{t-p} \quad (18)$$

$$\hat{Y}_t = (L_{t-1} + T_{t-1})S_{t-p} \quad (19)$$

em que:

- L_t = nível no tempo t;
- α = peso para o nível;
- T_t = tendência no tempo t;
- γ = peso para tendência;
- S_t = componente sazonal no tempo t;
- δ = peso para a componente sazonal;
- P = período sazonal;
- Y_t = valor do dado no tempo t;
- \hat{Y}_t = valor ajustado, ou previsão um período adiante, no tempo t.

O método aditivo é utilizado quando as variações sazonais variam proporcionalmente com o nível da série, ou seja, a variação sazonal permanece constante em relação à média. Este método é descrito pelas Equações 20 a 23, em que a Equação 20 foi utilizada para descrever o nível, a Equação 21 para descrever a tendência, a Equação 22 para descrever a sazonalidade dos dados de qualidade da água e a Equação 23 para prever os próximos 50 valores de IQA, com base nos valores anteriores.

$$L_t = \alpha(Y_t - S_{t-p}) + (1 - \alpha)[L_{t-1} + T_{t-1}] \quad (20)$$

$$T_t = \gamma[L_t - L_{t-1}] + (1 - \gamma)T_{t-1} \quad (21)$$

$$S_t = \delta(Y_t - L_t) + (1 - \delta)S_{t-p} \quad (22)$$

$$\hat{Y}_t = L_{t-1} + T_{t-1} + S_{t-p} \quad (23)$$

4.2.3.1 Erros dos métodos de previsão

Neste trabalho foram utilizados para se verificar a melhor previsão do índice de qualidade da água a média percentual absoluta de erros (MAPE) desvio absoluto médio (MAD) e o desvio quadrático médio (MSD).

A média percentual absoluta de erros (MAPE), calculada para medir a precisão dos valores ajustados da série, expressa uma porcentagem e é obtida pelo emprego da Equação 24.

$$\text{MAPE} = \frac{\sum |y_t - \hat{y}_t| / y_t}{n} \times 100 \quad (24)$$

em que:

y_t = valor real no tempo t;

\hat{Y}_t = igual ao: valor ajustado;

N = número de observações.

O desvio absoluto médio (MAD) que ajuda a conceituar a quantidade de erro foi calculado para medir a precisão dos valores ajustados das séries, expressa na mesma unidade dos dados de entrada utilizados na Equação 25.

$$\text{MAD} = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|}{n} \quad (25)$$

O desvio quadrático médio (MSD) foi calculado para se verificar o erro de previsão extraordinariamente grande, comparado ao MAD, conforme descrito pela Equação 26.

$$\text{MSD} = \frac{\sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t|^2}{n} \quad (26)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise da estatística descritiva

O banco de dados pertencente aos anos de 1990 a 2009 demonstrou como produtivo do Índice de Qualidade da Água, que dois dos rios que banham a região metropolitana de Curitiba mantiveram-se com águas de qualidade média, como se observa nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 Estatística descritiva dos parâmetros analisados pelo índice de qualidade da água no rio Passaúna, em Araucária - PR

Parâmetro	Média	DP	CV (%)	Min.	Máx.	Simetria	Curtose
OD	5,59	1,65	29,51	1,30	8,90	-0,27	-0,60
Cte	58569	248082	423,57	20	1700000	5,94	36,05
pH	7,24	0,31	4,26	6,20	8,10	-0,11	1,40
DBO	4,02	3,79	94,17	1,00	31,00	4,20	26,81
N	2,01	1,60	79,83	0,47	8,00	1,95	3,86
P	0,12	0,12	100,40	0,005	0,78	2,92	12,13
Tur	24,48	39,90	163,01	1,40	308,00	4,76	28,42
ST	124,04	40,00	32,22	5,00	234,00	0,17	0,51
T	18,50	3,11	16,80	13,00	26,00	0,31	-0,63
IQA	60,41	12,04	19,94	23,00	85,00	-0,33	-0,10

Notas: OD: oxigênio dissolvido (mg L^{-1}); Cte: coliformes termotolerantes (NMP); pH: potencial hidrogeniônico; DBO: demanda bioquímica de oxigênio (mg L^{-1}); N: nitrogênio (mg L^{-1}); P: fósforo (mg L^{-1}); Tur: turbidez (UNT); ST: sólidos totais (mg L^{-1}); T: temperatura ($^{\circ}\text{C}$); IQA: índice de qualidade da água.

Tabela 5 Estatística descritiva dos parâmetros analisados pelo índice de qualidade da água no rio Piraquara, em Piraquara - PR

Parâmetro	Média	DP	CV (%)	Min.	Máx.	Simetria	Curtose
OD	8,24	0,76	9,18	6,10	9,70	-0,31	-0,38
Cte	35832	108935	304,02	20	700000	4,52	22,19
pH	6,80	0,42	6,18	5,70	8,00	-0,40	0,62
DBO	2,61	1,96	75,03	1,00	11,00	2,60	7,86
N	0,74	0,43	58,09	0,32	2,46	1,94	4,71
P	0,07	0,08	122,81	0,002	0,62	4,23	22,76
Tur	17,43	14,72	84,47	0,90	120,00	4,60	29,70
ST	77,58	32,58	42,00	25,00	211,00	1,02	2,32
T	17,60	2,83	16,15	10,00	23,00	-0,40	-0,59
IQA	64,86	9,04	13,93	41,00	79,00	-0,53	-0,09

Notas: OD: oxigênio dissolvido (mg L^{-1}); Cte: coliformes termotolerantes (NMP); pH: potencial hidrogeniônico; DBO: demanda bioquímica de oxigênio (mg L^{-1}); N: nitrogênio (mg L^{-1}); P: fósforo (mg L^{-1}); Tur: turbidez (UNT); ST: sólidos totais (mg L^{-1}); T: temperatura ($^{\circ}\text{C}$); IQA: índice de qualidade da água.

Baseando-se nos resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, é possível observar que em média alguns dos parâmetros estão fora dos padrões permitidos pela legislação vigente, mas, de modo geral, o IQA se manteve estável com uma qualidade de água média ao longo dos 19 anos, em ambas as cidades.

Para que se possa entender de uma forma geral o comportamento de quaisquer dados estudados é necessário que se realize uma análise preliminar, observando os valores da média, mediana, máximo e mínimo, desvio padrão, coeficiente de variação além da assimetria e curtose. Ressalta-se a importância de os dados possuírem uma distribuição normal; caso isso não ocorra, deve ser realizada uma transformação BOX-COX (FOLLADOR et al., 2012b). O coeficiente de variação (CV) pode ser classificado em: baixa dispersão com $CV \leq 10\%$; média dispersão quando $10\% < CV \leq 20\%$ / alta dispersão quando $20\% < CV \leq 30\%$ e dispersão muito alta quando $CV > 30\%$ (GOMES, 1985).

A variável oxigênio dissolvido (OD) no rio Passaúna apresentou uma variação de 1,30 a 8,90 mg L⁻¹; para o rio Piraquara a variação ficou entre 6,10 a 9,70 mg L⁻¹. O coeficiente de variação ficou a cima de 15% e, dessa maneira, há uma média variabilidade deste parâmetro para o rio Passaúna. Com relação ao rio Piraquara, o coeficiente de variação ficou abaixo dos 10%, apresentando uma baixa variabilidade para o teste de normalidade em ambos os rios, a hipótese das observações de OD possuírem distribuição normal não é rejeitada, ao nível de 5% de significância, pelo teste de Anderson-Darling, ou seja, os dados possuem uma distribuição normal. A variação média encontrada para a variável oxigênio dissolvido no rio Passaúna ficou abaixo do estabelecido pela Resolução 357/2005 CONAMA (BRASIL, 2005), sendo inferior a 5,0 mg L⁻¹ em 35,79% das amostras.

Jacinto Júnior e Barbosa (2016) ressaltam que a diminuição da variável OD implica a morte de peixes e demais vidas aquáticas, acarretando impactos ambientais. Nesse caso, as amostras que se mantiveram abaixo do estabelecido pela legislação estariam comprometendo o equilíbrio do ecossistema aquático.

Para Moyel e Hussain (2016), o OD é essencial para a vida aquática, uma vez que é necessário para manter os organismos vivos. Entretanto, os autores observaram uma diminuição nas concentrações desse parâmetro em estações a jusante, que atribuem a um possível consumo elevado de microrganismos para mineralizar a matéria orgânica dissolvida, bem como à liberação de escoamento urbano e agrícola.

Para os coliformes termotolerantes (Cte) os valores médios encontrados foram 58569 e 35832 para os rios Passaúna e Piraquara, respectivamente. O coeficiente de variação ficou acima de 200%, indicando uma dispersão muito alta entre os dados. Em relação ao teste de normalidade, a hipótese de os dados possuírem uma distribuição normal é rejeitada, a 5% de significância, pelo teste de Anderson-Darling, ou seja, os dados não possuem uma distribuição normal. Ambos os rios apresentaram os valores médios em

relação à variável Cte, acima do limite máximo estabelecido pela Resolução 357/2005 CONAMA (BRASIL, 2005).

Carvalho et al. (2016) afirmam que bactérias do grupo coliformes são encontradas no intestino de animais com sangue quente e são grandes indicadores de poluição fecal. Para as amostras que estão fora do padrão da legislação nesta pesquisa, a utilização dessa água para consumo primário após tratamento simplificado e irrigação de hortaliças que são consumidas cruas, seria imprópria. Os autores ainda comentam que a alta concentração desses indicadores de patógenos pode estar relacionada a descargas de efluentes.

O uso das bactérias coliformes termotolerantes para indicar poluição sanitária se mostra mais significativo que o uso da bactéria coliforme "total", porque as bactérias fecais estão restritas ao trato intestinal de animais de sangue quente. A determinação da concentração dos coliformes assume importância como parâmetro indicador da possibilidade da existência de micro-organismos patogênicos, responsáveis pela transmissão de doenças de veiculação hídrica, tais como febre tifoide, febre paratifoide, disenteria bacilar e cólera (ANDRADE, 2014).

O pH apresentou uma variação de 6,20 a 8,10 no rio Passaúna e 5,70 a 8,00 no rio Piraquara, em que a maioria dos valores deste parâmetro se apresentaram próximos à neutralidade. O coeficiente de variação ficou abaixo de 10% em ambas as amostras, indicando uma baixa dispersão entre os dados. Para o teste de normalidade, a hipótese dos dados possuírem uma distribuição normal é rejeitada, ou seja, os dados não possuem uma distribuição normal, em ambos os rios. As variações médias de pH encontradas no rio Piraquara estiveram abaixo da margem estabelecida pela legislação vigente, que varia numa faixa de pH de 6 a 9, em 6,25% das amostras (BRASIL, 2005).

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) apresentou uma variação de 1,0 a 31,0 mg L⁻¹ no rio Passaúna e de 1,00 a 11,0 mg L⁻¹ para o rio Piraquara. O coeficiente de variação em ambos os rios ficou acima de 75%, apresentando uma variabilidade muito alta entre os dados. Com relação à normalidade dos dados de DBO, em ambos os rios, a hipótese de os dados possuírem uma distribuição normal é rejeitada, ou seja, os dados não possuem uma distribuição normal. Quanto a faixa encontrada de DBO, em ambos os rios, extrapolou o limite máximo estipulado pela Resolução 357/2005 CONAMA, ultrapassando os 5,0 mg L⁻¹ em 22,10% das amostras e em 5% das amostras nos rios Passaúna e Piraquara, respectivamente (BRASIL, 2005).

Para Carvalho et al. (2016) e Moyel e Hussain (2016), a DBO está relacionada à quantidade de oxigênio que é usada por micro-organismos na oxidação de substâncias orgânicas biodegradáveis. Dessa forma, quando analisados os pontos que estiveram acima do permitido pela legislação, identifica-se que algumas amostras apresentaram contaminação por matéria orgânica biodegradável, entretanto, para Ramos et al. (2016),

altos valores de DBO estão relacionados com áreas densamente povoadas e que recebem altas cargas de matéria orgânica e inorgânica.

O nitrogênio apresentou uma variação de 0,47 a 8,00 mg L⁻¹ no rio Passaúna, e uma variação de 0,32 a 2,46 mg L⁻¹ no rio Piraquara. O coeficiente de variação ficou acima de 50% em ambos os rios, apresentando uma variabilidade muito alta para esse parâmetro. Para o teste de normalidade foi necessária a realização de uma transformação BOX-COX, sendo que após a transformação a hipótese dos dados possuírem uma distribuição normal não foi rejeitada, ou seja, os dados possuem uma distribuição normal, a 5% de significância pelo teste de Anderson-Darling.

O fósforo apresentou uma variação de 0,005 a 0,78 mg L⁻¹ no rio Passaúna, com uma variação de 0,002 a 0,62 mg L⁻¹ no rio Piraquara. O coeficiente de variação ficou acima de 100% em ambos os rios, demonstrando uma variabilidade muito alta entre os dados. Para a realização do teste de normalidade foi necessária uma transformação BOX-COX e, com 5% de significância, a hipótese de que os dados possuem uma distribuição normal não foi rejeitada, ou seja, os dados transformados possuem uma distribuição normal. A Resolução do 357/2005 CONAMA (BRASIL, 2005) determina que para ambientes lóticos a quantidade de fósforo deve ser de no máximo 0,1 mg L⁻¹. A quantidade média encontrada nos rios Passaúna e Piraquara se encontra fora desse padrão em 34,74% e 16,25% das amostras, respectivamente.

A turbidez apresentou uma variação de 1,4 a 308,0 UNT no rio Passaúna, e uma variação de 0,9 a 120,0 UNT para o rio Piraquara. O coeficiente de variação ficou acima dos 80% em ambos os rios, evidenciando uma dispersão muito alta entre os dados. Para realização do teste de normalidade foi necessária uma transformação BOX-COX. A hipótese dos dados possuírem uma distribuição normal não foi rejeitada, ou seja, com 5% de significância os dados transformados possuem uma distribuição normal. Os valores médios encontrados nos rios Passaúna e Piraquara, em relação à turbidez, ficaram acima do limite máximo estabelecido pela Resolução 357/2005 CONAMA em 5,26% e 1,25% das amostras, respectivamente (BRASIL, 2005).

Para Jacinto Junior e Barbosa (2016), a quantidade de turbidez estabelecida nas amostras está diretamente ligada à matéria sólida em suspensão na água, seja de origem orgânica ou inorgânica. Nesse caso, em algumas coletas as quantidades de sólidos nas amostras encontradas aumentaram a turbidez. Moyel e Hussain (2016) afirmam que altas concentrações de turbidez estimulam o crescimento de fitoplâncton e macrófitas quando a penetração da luz dentro da coluna d'água é restrita.

Os sólidos totais apresentaram variação de 5,0 a 234,0 mg L⁻¹ e 25,0 a 211,0 mg L⁻¹ para os rios Passaúna e Piraquara, respectivamente. Ambos os rios, apresentaram um coeficiente de variação acima de 30%, demonstrando uma dispersão muito alta entre os valores dos sólidos totais. Para realização do teste de normalidade, a hipótese de os dados

possuírem uma distribuição normal no rio Passaúna, foi rejeitada a 5% de significância, para o teste de normalidade, a hipótese de os dados possuírem uma distribuição normal no rio Piraquara, foi aceita com 5% de significância pelo teste de Anderson-Darling.

Para a variável temperatura, as variações apresentadas foram de 13 a 26°C e de 10 a 23°C para os rios Passaúna e Piraquara, respectivamente. O coeficiente de variação para os dois rios esteve abaixo dos 20%, evidenciando uma média dispersão entre os dados. Para essa variável, a hipótese que os dados possuem uma distribuição normal nos dois rios foi rejeitada, a 5% de significância.

Para o produtório do índice de qualidade da água, foi encontrado uma variação de 23 a 85 para o rio Passaúna e uma variação de 41 a 79 para o rio Piraquara. Nos dois rios, o valor do coeficiente de variação encontrado ficou abaixo dos 20%, indicando uma média dispersão dos valores de IQA. Segundo a classificação da Agência Nacional das Águas para o Estado do Paraná, no rio Passaúna 21,05% das amostras estiveram classificadas com águas de boa qualidade, 55,80% das amostras como de média qualidade e 23,15% das amostras de ruim qualidade; ainda nesse sentido, para o rio Piraquara 28,35% das amostras estiveram classificadas como águas de boa qualidade, 56,25% das amostras como média qualidade e 8,75% das amostras de ruim qualidade.

5.2 Gráficos de controle para medidas individuais

Quando observado o resultado do IQA para normalidade, a hipótese dos dados possuírem uma distribuição normal não foi rejeitada, ou seja, os dados de IQA dos rios Passaúna e Piraquara possuem distribuição normal, a 5% de significância pelo teste de Anderson-Darling.

Segundo Montgomery (2004), há uma importância na realização dos testes de normalidade de dados como os de Anderson-Darling, Ryan-Joiner e Kolmogorov-Smirnov, para que os gráficos de controle não mostrem resultados enganosos. Por esse motivo, optou-se pela utilização dos gráficos de controle apenas nas variáveis de IQA, já que nem todas as variáveis apresentaram normalidade dos dados.

A Figura 4 (a) apresenta o gráfico de controle de Shewhart individual para a variável IQA do rio Passaúna, na qual se observa que o processo está fora do controle estatístico, pois as variações existentes deixaram um ponto do produtório do IQA abaixo da linha inferior de controle no ano de 2006. Outra característica que demonstra a falta de controle estatístico é a existência de uma configuração do tipo sequência, em que vários pontos consecutivos encontram-se em apenas um dos lados da linha média. Ferreira, Nomelini e

Oliveira (2016) afirmam que processo mostra que está fora do controle estatístico, quando se detectam pontos fora do limite de controle estatístico, quando existe uma sequência de pontos acima ou abaixo da linha média, confirmando as observações já realizadas.

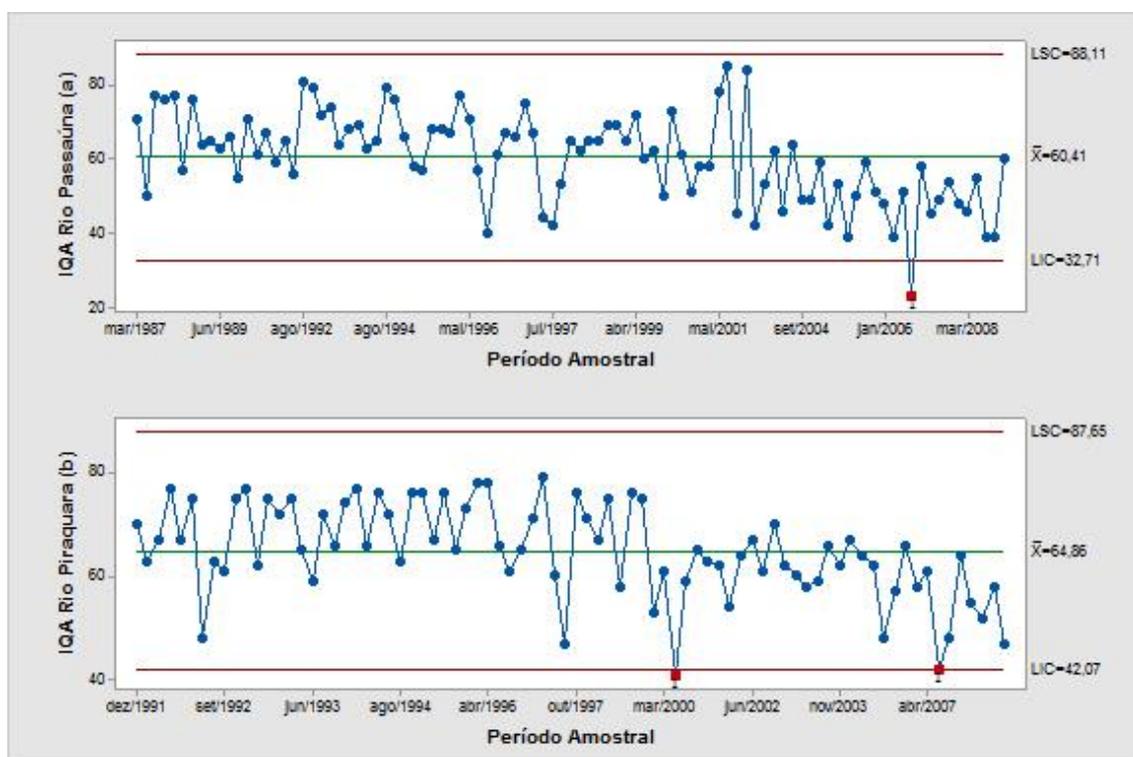


Figura 4 Gráficos de controle Shewhart para IQA, para os rios Passaúna (a) e Piraquara (b).

O fato de alguns pontos estarem dispostos acima da linha média e extrapolarem a linha superior de controle, podem demonstrar uma instabilidade do gráfico, entretanto, para o IQA essa característica é capaz de identificar bons índices de qualidade, de modo que, quanto mais alto for resultado do IQA, melhor estará a qualidade das águas dos rios Passaúna e Piraquara.

Para o rio Piraquara (Figura 4b), o gráfico de controle de Shewhart individual para a variável IQA, apresentou uma configuração do tipo sequência, em que vários pontos estão localizados em apenas um lado da linha média de controle, bem como, a existência de dois pontos fora da linha inferior de controle, nos anos 2000 e 2007. Tais características demonstram a existência de uma variação e a falta do controle estatístico. Portanto, em ambos os rios, foram poucos os pontos verificados fora dos limites de controle, caracterizando uma causa especial por fator externo.

No presente estudo, os fatores externos podem ser atribuídos ao desenvolvimento urbano e industrial existente na região metropolitana de Curitiba, causas essas que influenciam diretamente na qualidade da água, pois a maioria desses corpos hídricos são receptores de descargas de efluentes urbanos e industriais.

Com relação à qualidade de águas de rios, Lee et al. (2013) afirmam que o gráfico de controle de Shewhart individual é muito apropriado para monitorar os níveis de poluição de um rio, entretanto, se o gráfico for insensível para detectar pequenas mudanças, essa poluição pode se alastrar rapidamente por toda a extensão do rio.

Na Figura 5 é apresentado o gráfico de controle de Shewhart individual, identificado com as faixas de referências determinadas pela ANA (2016) para os valores do IQA.

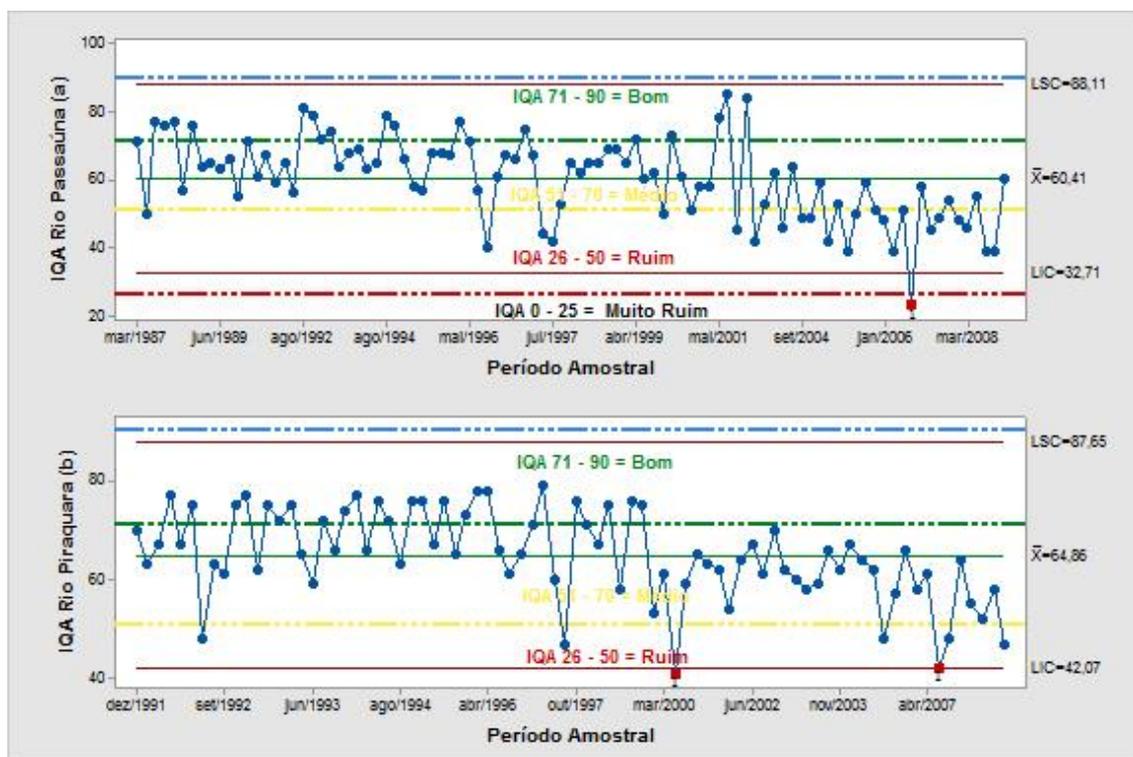


Figura 5 Gráficos de Shewhart para o IQA para os rios Passaúna (a) e Piraquara (b), com linhas de referências da ANA.

Na Figura 5 (a) é possível identificar que alguns pontos do produtório do IQA estão localizados entre $71 < IQA \leq 90$, representando uma água de boa qualidade; entretanto, a maior parte dos pontos localiza-se na porção de $51 < IQA \leq 70$, o que demonstra que na maior parte dos anos estudados, a água se manteve com uma qualidade média; porém, a partir do ano de 2004, é possível visualizar que vários pontos estão localizados entre $26 < IQA \leq 50$, caracterizando uma água de qualidade ruim.

Observa-se, uma discrepância no ano de 2006 em que um ponto se manteve abaixo do $IQA < 25$, caracterizando uma água de péssima qualidade. O fato de apenas um dos produtórios estar fora dos limites de controle chama atenção, destacando a necessidade de averiguação dessa causa especial.

Com a Figura 5 (b) é possível identificar a existência de alguns pontos do produtório entre $71 < IQA \leq 90$, caracterizando uma água de boa qualidade; entretanto, a grande maioria dos dados está localizada na porção $51 < IQA \leq 70$, o que caracteriza que a água se

manteve com qualidade média na maior parte dos anos estudados; existem, ainda, alguns pontos na porção de $26 < IQA \leq 50$, caracterizando uma qualidade ruim, em que dois desses pontos acabam saindo do limite de controle inferior, deixando o processo mais instável por uma causa especial.

Reis et al. (2011) avaliaram a qualidade da água para fins de irrigação em propriedades rurais no município de Salto do Lontra – PR, empregando os gráficos de Shewhart individual. Os autores concluíram que o gráfico foi eficaz no monitoramento de qualidade da água, apesar de apresentar alguns parâmetros fora do controle estatístico, as águas analisadas não possuíram severas restrições ao uso de irrigação. Entretanto, Vilas Boas et al. (2016), ao estudarem os rios no município de Toledo – PR, enfatizaram que as alterações encontradas pelos gráficos individuais, demonstram que os impactos ambientais encontrados são perenes.

Lee et al. (2013) aplicaram os gráficos de controle do tipo individual no seu estudo de monitoramento de poluição do rio Tamsui (Taiwan) e verificaram que o gráfico foi bastante eficaz ao identificar variações nas médias das variáveis e concluíram que não ocorreram mudanças bruscas no gráfico, logo, classificaram a água como de boa qualidade. Apesar de terem identificado uma boa aderência do gráfico aos dados, os autores sugerem que pesquisas futuras abordem outros tipos de gráficos de controle em relação a índices de poluição das águas.

Assim como Freitas (2015) que, ao monitorar a qualidade das águas da bacia do rio Mourão, considerou que os gráficos de controle de Shewhart individual foram eficazes para demonstrar onde estão as causas das variações encontradas no processo. Entretanto, o autor indica que trabalhos complementares com os gráficos de MMEP e CUSUM devem ser realizados, pois são mais eficientes quando o deslocamento na média do processo é pequeno. A Figura 6 representa os gráficos de média móvel exponencialmente ponderada para a variável IQA.

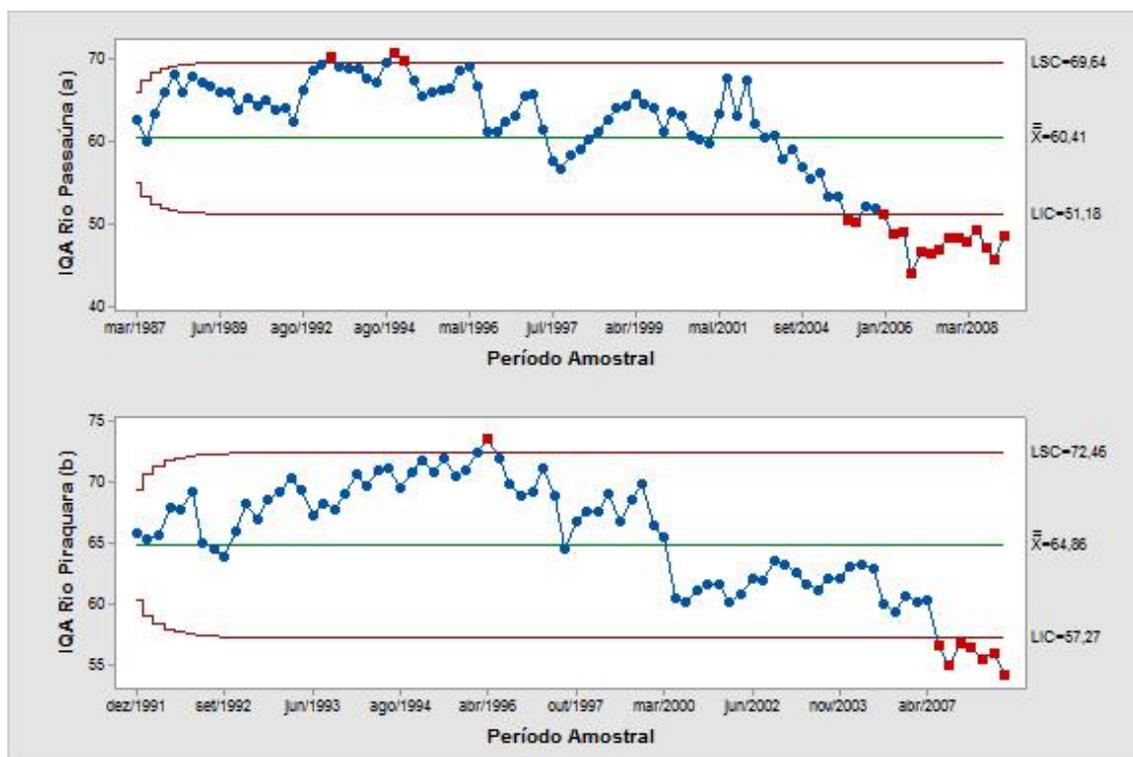


Figura 6 Gráfico de média móvel exponencialmente ponderada para o IQA, para os rios Passaúna (a) e Piraquara (b).

A partir do gráfico de controle MMEP, apresentado na Figura 6 (a), observa-se que o IQA está fora do controle estatístico, pois existem grandes conjuntos sequenciais, tanto abaixo quanto acima da linha média. Nota-se também que, após o ano de 2004, todos os pontos do produtório do IQA estão abaixo da linha inferior de controle, evidenciando a instabilidade do processo. Identifica-se uma caracterização de tendência decrescente no conjunto de dados, de modo que, a partir do ano de 2001, houve um decréscimo na qualidade dos dados, conseqüentemente no IQA.

Para a Figura 6 (b) apesar de existirem menos pontos fora dos limites do controle inferior e superior, identifica-se uma instabilidade no processo de controle, em que, a partir do ano de 2007, os produtórios aparecem todos fora do limite inferior de controle. Outra característica de fácil visualização da instabilidade é o grande conjunto de dados sequenciais acima e abaixo da linha média de controle. A tendência decrescente nesse gráfico é ainda mais evidente que a anterior, demonstrando o declínio a partir do ano de 1999, evidenciando novamente uma diminuição na qualidade do IQA.

Li, Zou e An (2016) perceberam que as águas do rio Qu, em Sichuan na China, em meados 2006, apresentaram uma tendência decrescente na qualidade. Esses pesquisadores atribuem esse fato ao rápido aumento populacional e desenvolvimento industrial, que contribuem com o aumento de descargas residuais nos ecossistemas aquáticos.

Na Figura 7 está o gráfico de média móvel exponencialmente ponderada, identificando-se com as faixas de referências determinadas pela ANA para os valores do IQA.

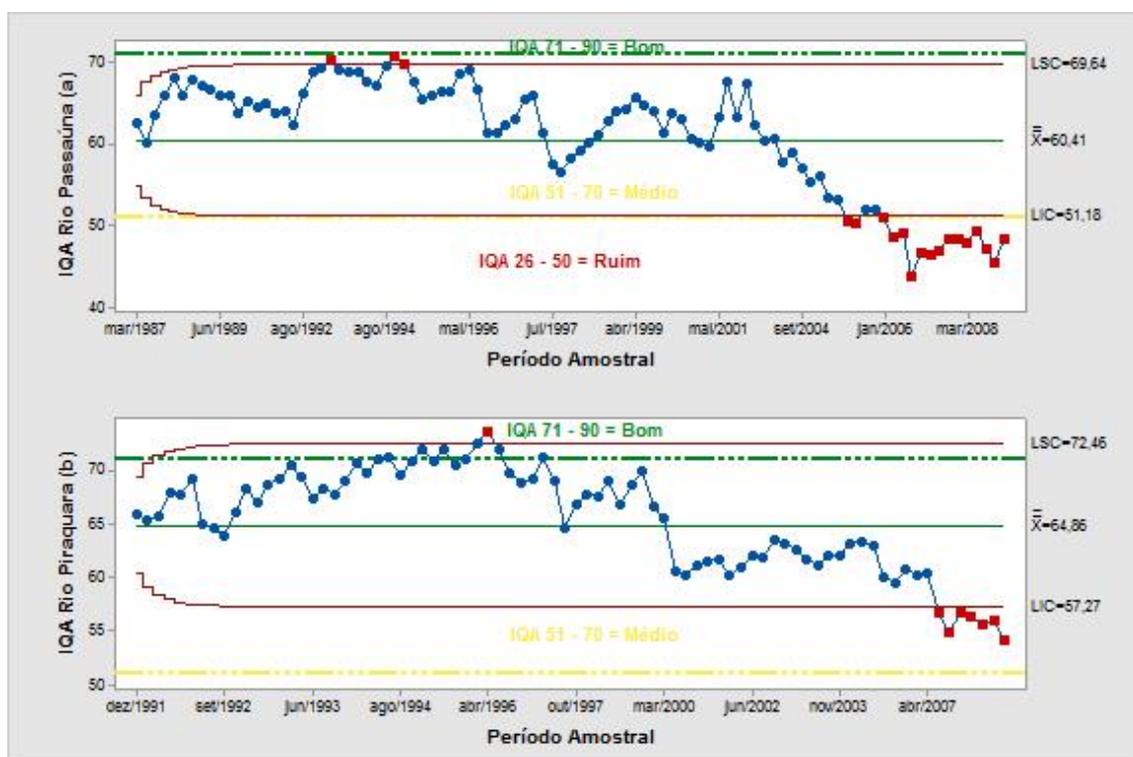


Figura 7 Gráfico de média móvel exponencialmente ponderada para IQA dos rios Passaúna (a) e Piraquara (b), com linhas de referência da ANA.

Na Figura 7 (a) é possível identificar que a maioria dos pontos do produtório se localiza na porção de $51 < IQA \leq 70$, o que demonstra que, até o ano de 2003, a água se manteve com uma qualidade média; porém, a partir do ano de 2004, é possível visualizar que todos os pontos estão localizados entre $26 < IQA \leq 50$, caracterizando uma água de qualidade ruim. Salienta-se que apesar de a grande maioria dos pontos apresentarem uma qualidade média, é possível identificar uma tendência decrescente na qualidade do IQA, a partir de 2001, ainda que muitos pontos permaneçam nessa classificação.

Na Figura 7 (b) é possível identificar que poucos pontos do produtório do IQA estão localizados entre $71 < IQA \leq 90$, representando uma água de boa qualidade; dessa forma o restante dos pontos do produtório localiza-se na porção de $51 < IQA \leq 70$, demonstrando que na maior parte dos anos estudados a água se manteve em média qualidade. Destaca-se ainda que, apesar dessa qualidade média, é possível identificar um decréscimo na qualidade do IQA a partir do ano de 1999. Ainda, em relação à qualidade média, os valores de IQA, a partir do ano de 2007, mantiveram-se abaixo do limite inferior de controle, contribuindo para que esse processo se torne instável.

O estudo realizado por Ramos et al. (2016) demonstrou que as águas dos rios Atibaia e Jaguari em Paulina – SP, extrapolam os limites da legislação vigente em alguns parâmetros e que as classificações encontradas para as águas desses rios variam entre média e ruim. Os autores ainda sugerem que uma intensificação em reflorestamento ripário, bem como a educação sobre a água, possivelmente, possam diminuir os impactos antrópicos sobre esse recurso hídrico.

A Figura 8 representa os gráficos de controle de soma cumulativa para a variável IQA.

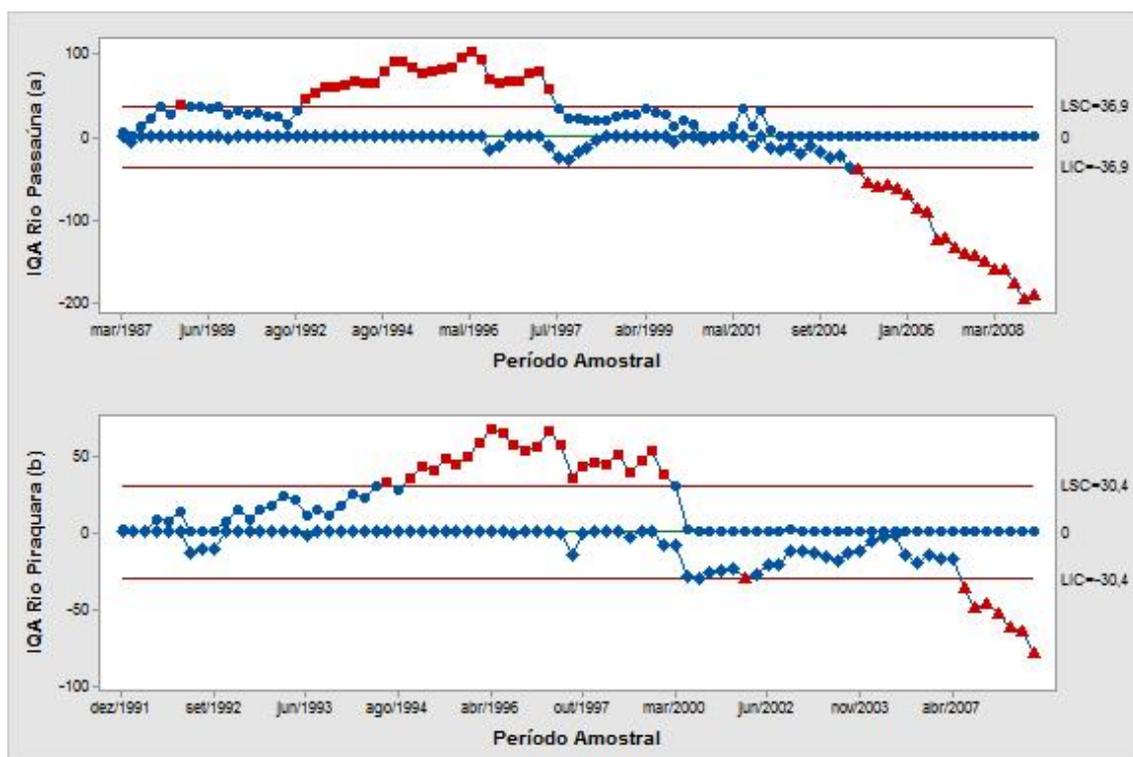


Figura 8 Gráficos de controle de soma acumulada (CUSUM), para IQA dos rios Passaúna (a) e Piraquara (b).

Na Figura 8 (a) é possível observar no produtório do IQA no gráfico de CUSUM uma instabilidade para os valores de IQA, entre os anos de 1994 a 1998, em que os pontos extrapolam o limite superior de controle. Outra evidência de instabilidade é a sequência de pontos que extrapola o limite inferior de controle, a partir do ano de 2005, demonstrando uma tendência decrescente.

Na a Figura 8 (b) é possível identificar que o produtório do IQA também extrapola os limites de controle. A linha de controle superior detecta os pontos fora do controle estatístico entre os anos de 1992 a 1999; após essa data, é possível perceber uma diminuição nos valores do IQA. A linha inferior de controle é extrapolada, a partir do ano de 2007, evidenciando uma tendência decrescente em relação aos valores de IQA. Ambos os rios

analisados demonstraram uma interferência na qualidade da água, a partir dos anos 2000, influenciando a qualidade de suas águas.

Follador et al. (2012a) utilizaram os gráficos de CUSUM para avaliar a qualidade do rio Mandurim e concluíram que essa metodologia é dinâmica para monitorar o processo de qualidade das águas do rio. O gráfico demonstrou que algumas variáveis estavam fora do controle estatístico, por apresentarem alguns pontos fora dos limites de controle, contudo, de modo geral, o rio não demonstrou grandes proporções de contaminação.

Fica evidente que existe uma diminuição na qualidade do IQA, a partir dos anos 2000, em ambas os rios avaliados neste trabalho, porém, fica evidente, também, que há uma qualidade inferior em todos os parâmetros analisados e, conseqüentemente, no IQA do rio Passaúna, o que poderia ser justificado pelo fato de a cidade de Araucária estar localizada a jusante da bacia do rio Iguçu, quando comparada com a cidade de Piraquara.

O mesmo comportamento foi percebido no estudo realizado por Moyel e Hussain (2016), no rio Shatt al-Arab no sul do Iraque, em que a qualidade da água foi classificada como marginal (média) ao longo das estações, entretanto, esses pesquisadores identificaram que essa classificação caiu para pobre (ruim) nas outras estações a jusante do rio. Os autores concluíram que a melhor água estava a montante do rio; para Li, Zou e An (2016), que desenvolveram um índice de poluição da água *fuzzy*, as águas analisadas ao longo das estações a jusante foram caindo na classificação de qualidade.

Ao analisar as variáveis que poderiam estar interferindo na diminuição da qualidade das águas dos rios Passaúna e Piraquara identificadas pelo IQA, percebeu-se a influência do parâmetro de coliformes termotolerantes no cálculo, sendo que, a partir dos anos 2000, essa variável extrapolou inúmeras vezes o limite máximo permitido pela Res. 357/2005 CONAMA. Interferência essa que poderia ser justificada pela crescente demanda populacional das regiões das cidades de Araucária e Piraquara. De acordo com os dados do IBGE (2017), a partir dos meados da década de 1990, ambas as cidades dobraram o número populacional.

Uma melhor eficiência, em relação aos gráficos de MMEP, é identificada para as observações de análise da água desse estudo, quando comparados os gráficos de controle de Shewhart individual e CUSUM. Essa superioridade foi identificada devido ao gráfico de MMEP que apresentou uma maior sensibilidade para expressar exatamente o que aconteceu com o conjunto de dados de qualidade da água, ao longo dos dezenove anos estudados, entretanto, os gráficos de Shewhart individual e CUSUM não demonstraram a mesma sensibilidade para os dados de análise de água desta pesquisa.

A eficiência dos gráficos de MMEP também foram identificadas por Follador et al. (2012b), quando aplicaram gráficos de controle em um conjunto de dados de qualidade da água e observaram que os gráficos de MMEP demonstraram-se mais eficientes, quando comparadas as de Shewhart individual e CUSUM. Para Orssatto, Vilas Boas e Eying (2015)

os gráficos de controle de MMEP também se mostraram eficientes para o monitoramento de estações de tratamento de esgoto, pois dão respostas facilmente observáveis, indicando mudanças e falhas no processo.

Fica evidente que as técnicas de controle estatístico do processo podem ser aplicadas de forma efetiva em outros campos de pesquisa, sendo que essas ferramentas já possuem uma grande aplicabilidade no âmbito industrial. Para a presente pesquisa de análise de qualidade de água, os gráficos de controle estatístico demonstraram-se eficazes para detecção de alterações de qualidade ao longo dos anos estudados, demonstrando serem eficientes, também, para a análise de qualidade de mananciais.

5.3 Análise do índice de capacidade do processo

Os intervalos estabelecidos no índice de capacidade do processo para os dois rios avaliados foram limitados no seu limite inferior de controle (LIC) por IQA - 51, que seria o nível mínimo de qualidade que uma água de consumo primário poderia apresentar, sem causar dano algum à saúde do consumidor; no limite superior de controle (LSC) por IQA - 100, que seria o nível máximo de pureza da água.

A Figura 9 demonstra o histograma realizado para o rio Passaúna no qual é possível observar que a variação da distribuição normal extrapola a faixa dos limites de especificação, classificando o processo insatisfatório. Montgomery (2004) classifica a capacidade do processo como capaz ou adequado, quando o valor de $C_p \geq 1,33$; como estável quando $1,0 \leq C_p < 1,33$ e inadequado quando $C_p < 1,0$. Nesse sentido, C_{pk} é classificado como capaz quando, $C_{pk} \geq 1,33$; é classificado como aceitável quando $1 \leq C_{pk} \leq 1,33$ e é considerado incapaz se $C_{pk} < 1,0$. Os valores obtidos pelos índices de capacidade $C_p = 0,88$ e $C_{pk} = 0,34$ para IQA do rio Passaúna, são inferiores aos mínimos especificados por Montgomery (2004), confirmando o que foi identificado pelos gráficos de controle e pelo histograma.

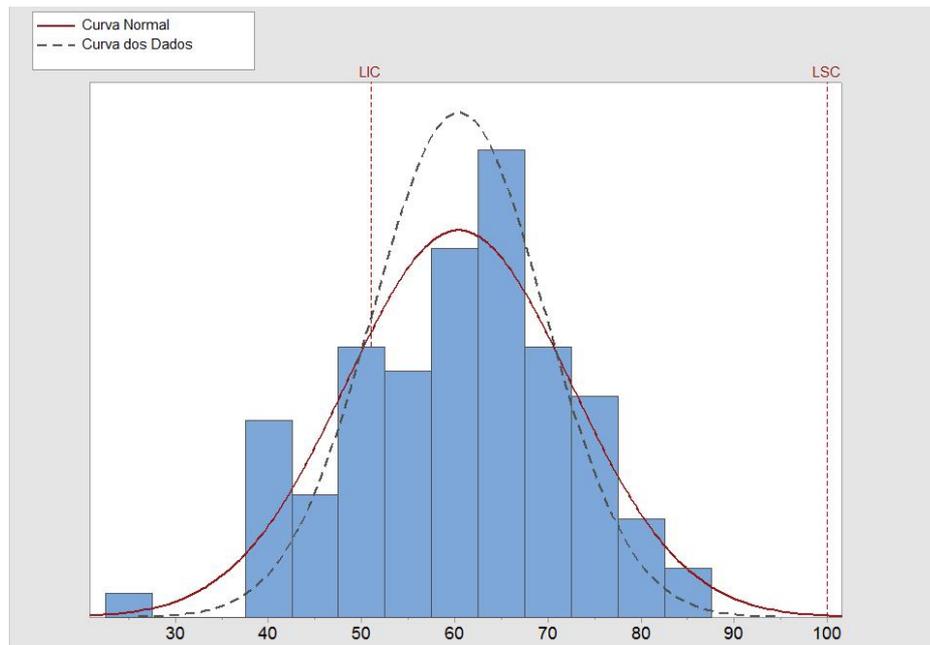


Figura 9 Capacidade do processo para IQA do rio Passaúna.

A Figura 10 apresenta o histograma do rio Passaúna, o qual demonstra uma pequena extrapolação na variação da distribuição normal, em relação à faixa dos limites de especificação, deixando o processo possivelmente capaz. O índice de $C_p = 1,07$ encontrado no rio Piraquara é considerado aceitável e pode atender às especificações de qualidade. Entretanto, com $C_{pk} = 0,61$, esse processo é considerado incapaz, segundo a classificação proposta por Montgomery (2004). Portanto, mesmo que se evidencie que, durante alguns anos, a qualidade da água não se manteve totalmente dentro das especificações da legislação vigente, ressalta-se, novamente, que a qualidade dos índices de capacidade do processo do rio Piraquara foram superiores aos encontrados para o rio Passaúna.

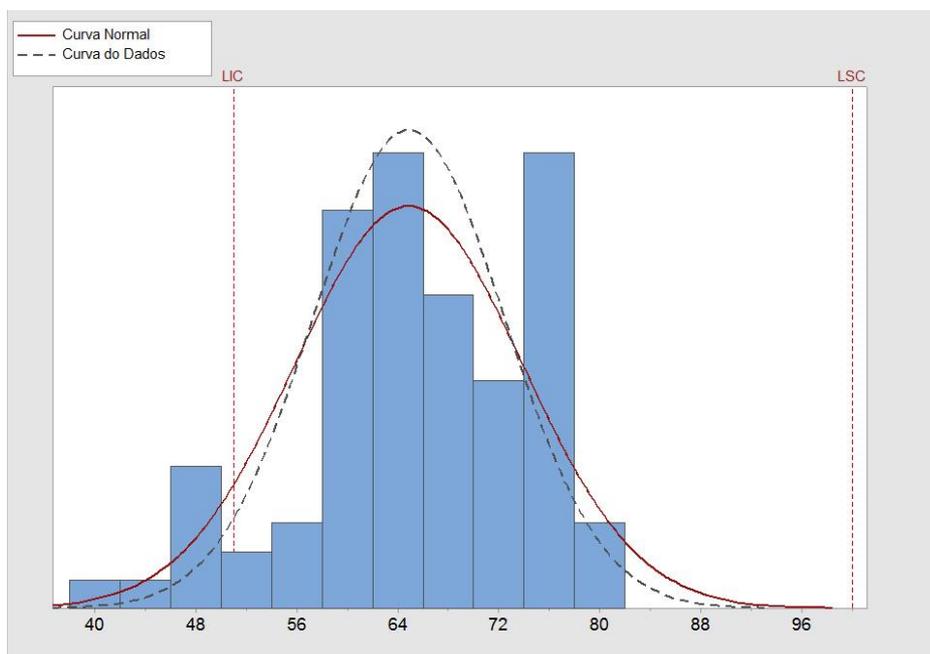


Figura 10 Capacidade do processo para IQA do rio Piraquara.

O controle estatístico do processo e o índice de capacidade do processo são eficientes para diversas áreas do conhecimento, sendo utilizados normalmente pela indústria para verificar a qualidade do processo utilizado. Portanto, com esse estudo pode-se perceber que esses indicadores são eficientes para avaliar os fatores ambientais e podem contribuir também para esta área do conhecimento, conforme evidenciado nos estudos de Tamagi et al. (2016) e Shaban (2014).

Para Tamagi et al. (2016), os gráficos de controle foram eficientes para demonstrar que a uniformidade de distribuição de água por meio de um sistema de irrigação por aspersores compensantes e não compensantes estavam sob controle estatístico. Já o C_p e o C_{pk} indicaram que a distribuição de água estava centrada, entretanto, houve uma variação maior que as faixas limite de especificação.

Shaban (2014) também considera que o índice de capacidade do processo é uma ferramenta versátil, quando estuda uma forma de desenvolver um modelo de gestão para ajudar na reutilização da água e na eliminação de possíveis riscos à saúde do consumidor. Entretanto, ao se aplicar o índice de capacidade do processo, percebeu-se que algumas variáveis estudadas possuíam C_p e C_{pk} inferiores (1,0), identificando que a água não poderia ser reutilizada sem que houvesse algum risco a saúde da população. O estudo do autor citado assemelha-se a este, pois as águas dos rios são utilizadas para abastecer as cidades e, sendo assim, uma água que não seja capaz de atender a legislação vigente poderia colocar em risco a saúde de quem a consumisse.

5.4 Previsão pelo método de Holt-Winters

A previsão do método de Holt-Winters, visualizada nas Figuras 11 e 12, caracteriza-se por uma linha azul que representa a série original dos dados; uma linha vermelha que representa os valores ajustados no modelo de Holt-Winters; linhas roxas que delimitam o intervalo de confiança, ao nível de 95% de significância para a previsão e a linha verde que representa a previsão realizada para os próximos 50 períodos que, pelo histórico dos dados, corresponderia, em média, a uma previsão até dezembro de 2016.

Por apresentar melhor aderência na série temporal, o modelo escolhido foi o de Holt-Winters aditivo. Esse modelo é indicado para dados em que a variação sazonal se mantém constante ao longo do tempo. Neste estudo, as constantes de alisamento exponencial utilizadas foram $\alpha = 0,010$ (nível), $\gamma = 0,001$ (tendência) e $\delta = 0,010$

(sazonalidade). O resultado do método de Holt-Winters aplicado para a previsão dos dados do rio Passaúna pode ser visualizado na Figura 11.

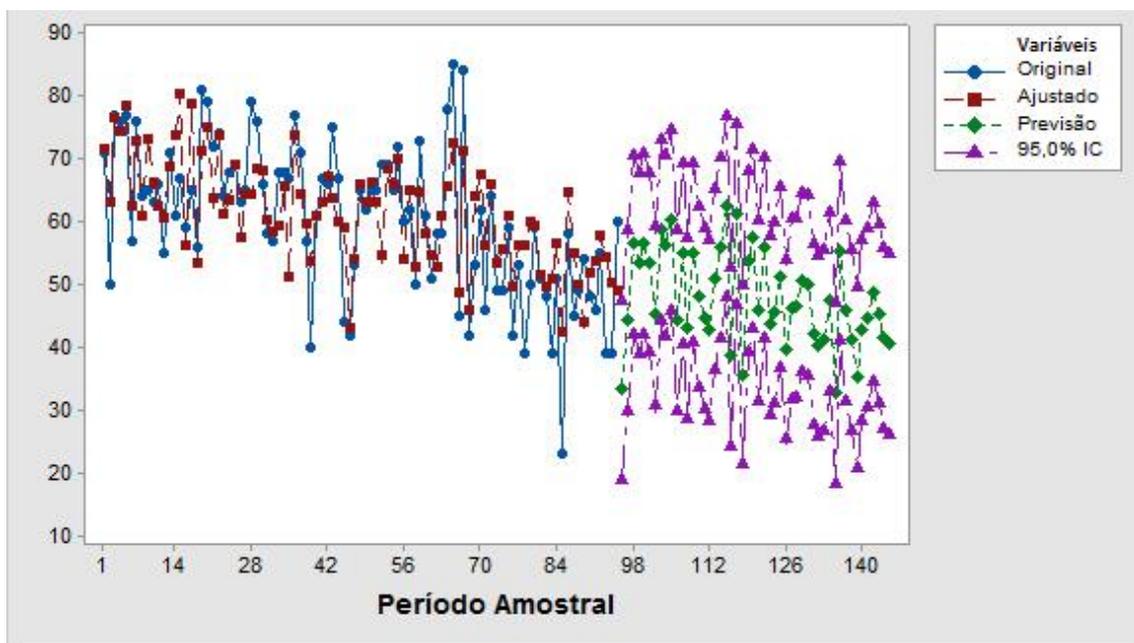


Figura 11 Previsão do IQA para o rio Passaúna, pelo método de Holt-Winters.

Na Figura 11 é possível observar que a previsão feita pelo modelo aditivo de Holt-Winters teve boa aderência ao conjunto de dados, de forma que os valores estimados ficaram próximos aos valores reais. Outro parâmetro que reforça esse resultado é o baixo valor dos erros (MAPE = 10,92%, MAD = 5,86 e MSD = 57,70). De acordo com Lin (1998), o ajuste do modelo pode ser classificado como excelente, bom, aceitável ou ruim, variando de acordo com os valores do MAPE: < 10%, 10% a 20%, 20% a 50% e > 50%, respectivamente. Dessa forma, o valor do MAPE encontrado é considerado bom, indicando que o método é eficiente para previsões.

Evidencia-se que a previsão continua demonstrando uma tendência decrescente nos valores de IQA, indicando que nos próximos anos a qualidade da água do rio Passaúna continuaria decaindo. Esta informação deve ser considerada, pois as águas deste rio já eram consideradas de qualidade de média/baixa e, caso não se faça algum tipo de intervenção, nos próximos anos pode ser que o IQA atinja um nível mais alarmante.

Na Figura 12 estão demonstradas as previsões obtidas pelo emprego do método de Holt-Winters aditivo realizado para o rio Piraquara, as constantes de alisamento exponencial utilizadas foram $\alpha = 0,20$ (nível), $\gamma = 0,05$ (tendência) e $\delta = 0,20$ (sazonalidade).

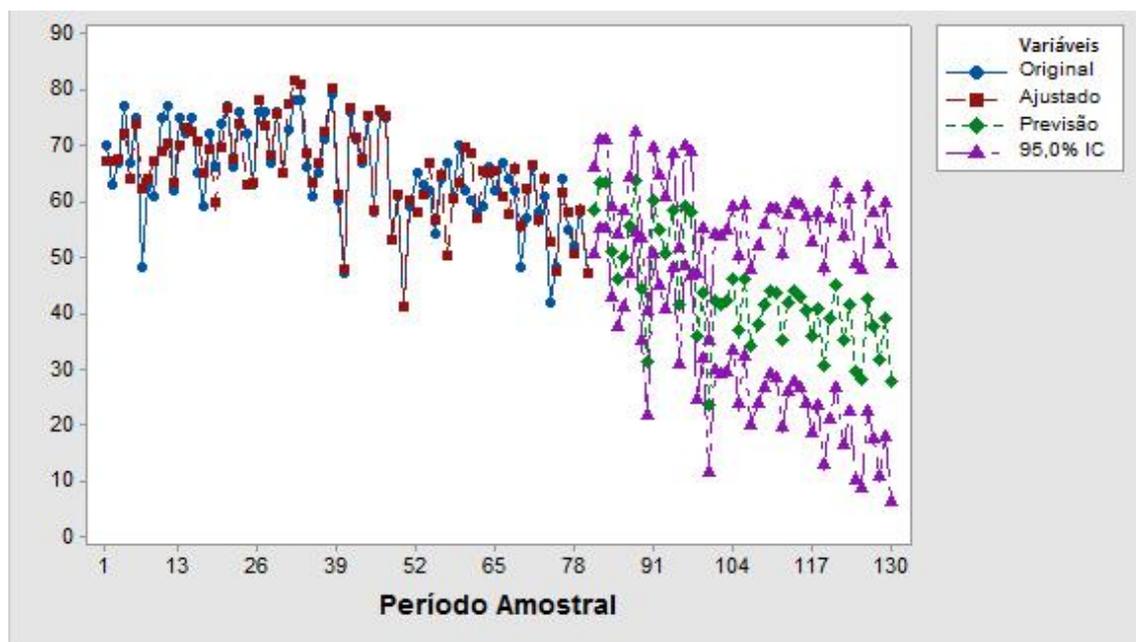


Figura 12 Previsão do IQA para o rio Piraquara, pelo método de Holt-Winters.

Observando-se a Figura 12 é possível perceber que o modelo aditivo de Holt-Winters teve uma boa aderência no conjunto de dados. O modelo estimou valores de IQA próximos aos dados originais. Para reforçar essa afirmação, os valores dos erros obtidos foram baixos (MAPE = 5,09%; MAD = 3,18 e MSD = 2056), demonstrando que a previsão obtida foi excelente.

Novamente é possível identificar uma tendência decrescente nos dados previstos, demonstrando que a qualidade da água do rio Piraquara pode cair. O que chama atenção é que esse rio, ao longo da história, demonstrou uma qualidade melhor das águas, mantendo-se na maior parte do tempo com qualidade boa/média, o fato de a previsão demonstrar um decréscimo diz que, se não tomadas as devidas providências para identificar os possíveis locais de contaminação, o rio pode ter sua qualidade reduzida a montante.

Por meio dos bons resultados obtidos com os erros gerados pela previsão, foi possível verificar que o método de previsão de Holt-Winters é eficiente. Comportamento semelhante ao observado para Birek, Petrovic e Boylan (2014), quando estudaram o desenvolvimento de algoritmos para resolver um problema de vazamento enfrentado por uma empresa de distribuição de água do Reino Unido. Os autores Paraschiv, Tudor e Petrarin (2015) perceberam a eficiência na previsão, quando estudaram a poluição da água por indústrias têxteis em regiões da Europa. Para Barros e Menezes (2012), o método de Holt-Winters também teve aprovação, quando analisaram a produção de água na barragem do João Leite e, a partir desse levantamento, fizeram a previsão do consumo médio de água para os próximos anos para a cidade de Goiânia.

Em relação à escolha do modelo aditivo, o mesmo possuiu uma melhor eficiência, em relação ao multiplicativo, por estimar previsões com MAPE mais baixos. Esse fato

também foi verificado por Comunello, Daminelli e Bortolotti (2013), quando analisaram a previsão da demanda do consumo de água na cidade de Medianeira – PR. Para esses autores, o modelo aditivo teve um melhor ajuste no conjunto de dados e gerou uma melhor previsão. Wasik e Chmielowski (2016) concluíram que o método de Holt-Winters aditivo foi eficiente, no estudo das alterações de quantidades diárias de esgotos que entram em uma estação de tratamento de águas na Polônia.

Neste estudo, após a análise da previsão os dados de IQA foram submetidos ao controle estatístico do processo.

Na Figura 13 são apresentados os gráficos de controle de Shewhart individual (a), MMEP (b) e CUSUM (c) para os valores de IQA previstos da série temporal para o rio Passaúna. Observa-se em todos os gráficos que nenhum dos limites de controle foi extrapolado. No gráfico de CUSUM (c) identificou-se um ponto do IQA em cima do LSC no ano de 2011, podendo ser caracterizado como um descontrole por causa especial, visto que, nenhum dos outros pontos teve esse comportamento.

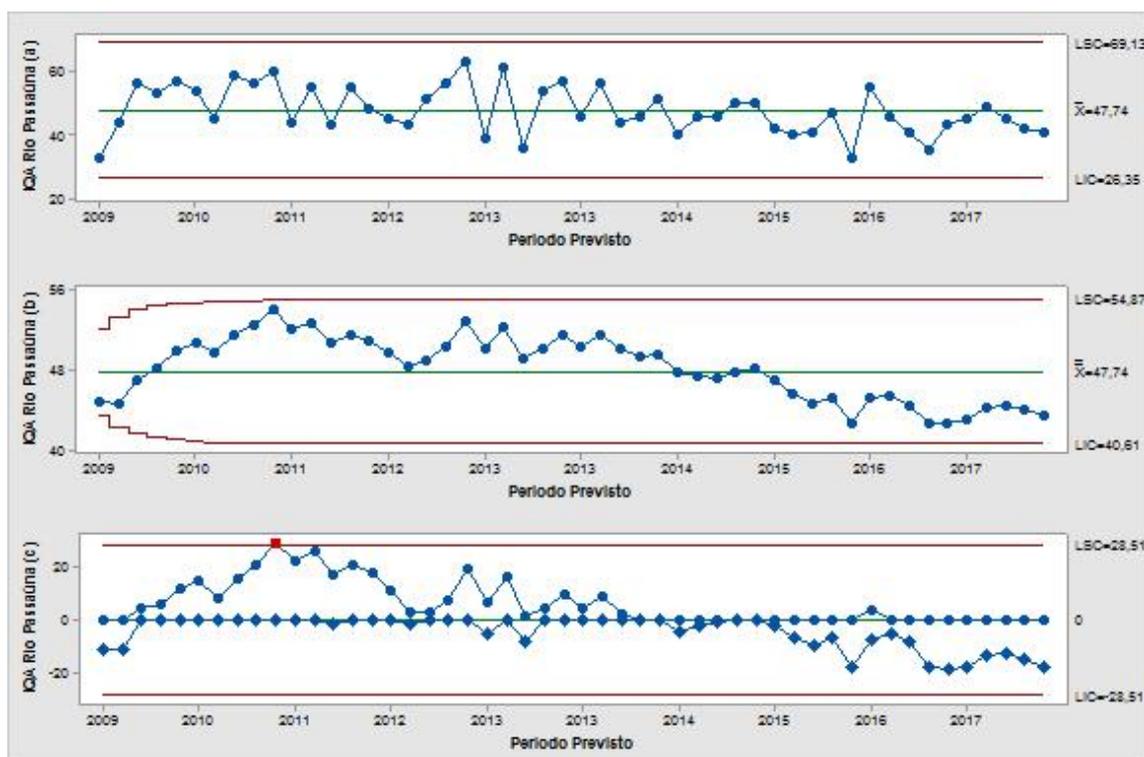


Figura 13 Gráficos de controle (a) Shewhart, (b) MMEP e (c) CUSUM, para a previsão do IQA do rio Passaúna.

Ainda que todos os pontos estejam dentro dos limites de controle, nos gráficos de MMEP (b) e CUSUM (c), percebe-se um descontrole estatístico, pois grandes sequências de pontos apresentam-se acima e abaixo da linha central. Por esses dois modelos, também foi possível identificar um movimento decrescente no conjunto de dados previstos. Esse

movimento demonstra que as águas do rio Passaúna podem ter uma diminuição na qualidade ao longo dos anos.

A Figura 14 demonstra os gráficos de controle de Shewhart individual (a), MMEP (b) e CUSUM (c), para os valores previstos do IQA o rio Piraquara. Diferentemente dos observados para o rio Passaúna, os gráficos MMEP (b) e CUSUM (c) aplicados no rio Piraquara demonstram que grande parte dos pontos extrapola os limites de controle, além de existirem grandes sequências de dados acima e abaixo da linha central de controle, o que caracteriza um descontrole estatístico para a previsão.

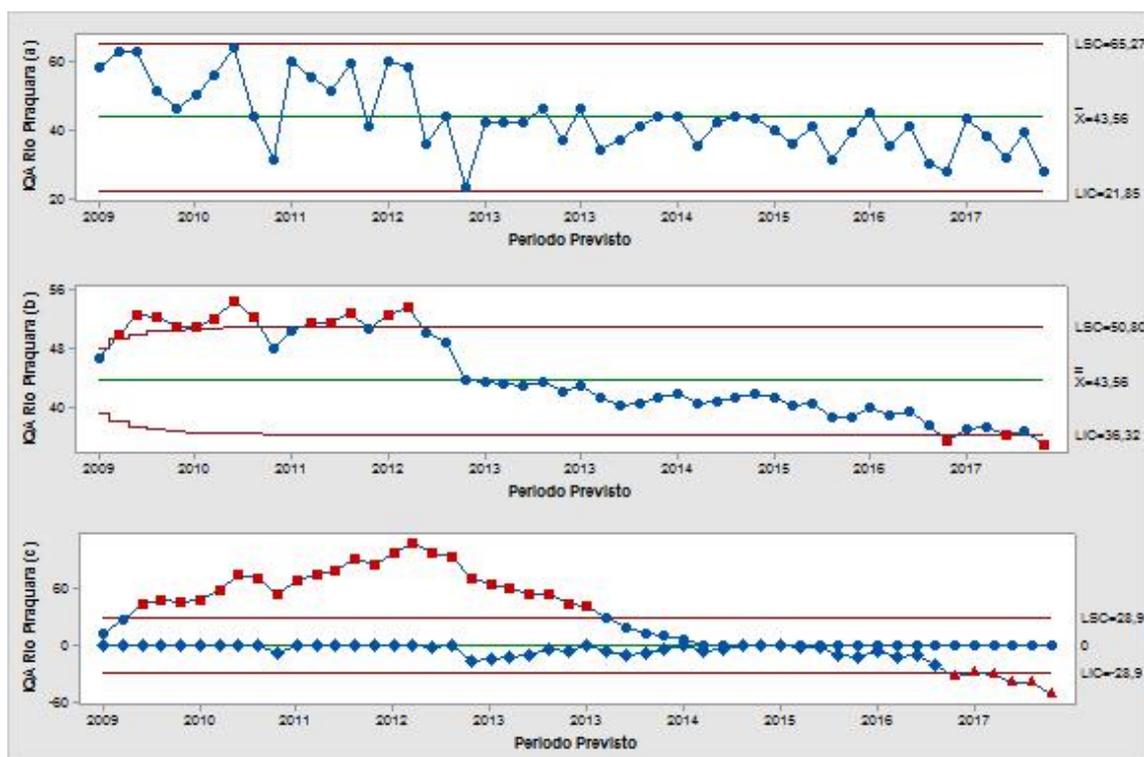


Figura 14 Gráficos de controle (a) Shewhart, (b) MMEP e (c) CUSUM, para a previsão do IQA do rio Piraquara.

Ainda que os gráficos de Shewhart individual não sejam capazes de detectar nenhum ponto fora dos limites de controle, é possível observar nos três gráficos da Figura 14 uma tendência decrescente abrupta nos dados. Essa tendência demonstra que o rio Piraquara pode sofrer deterioração ao longo dos anos.

Ao comparar os dois rios, é possível perceber que a previsão identificou que o rio que possuía as melhores águas, ao longo dos anos 1990 a 2009, é o rio que mais sofreu com os impactos ambientais. Os índices de capacidade do processo determinado na Figura 15 reforçam esta afirmação.

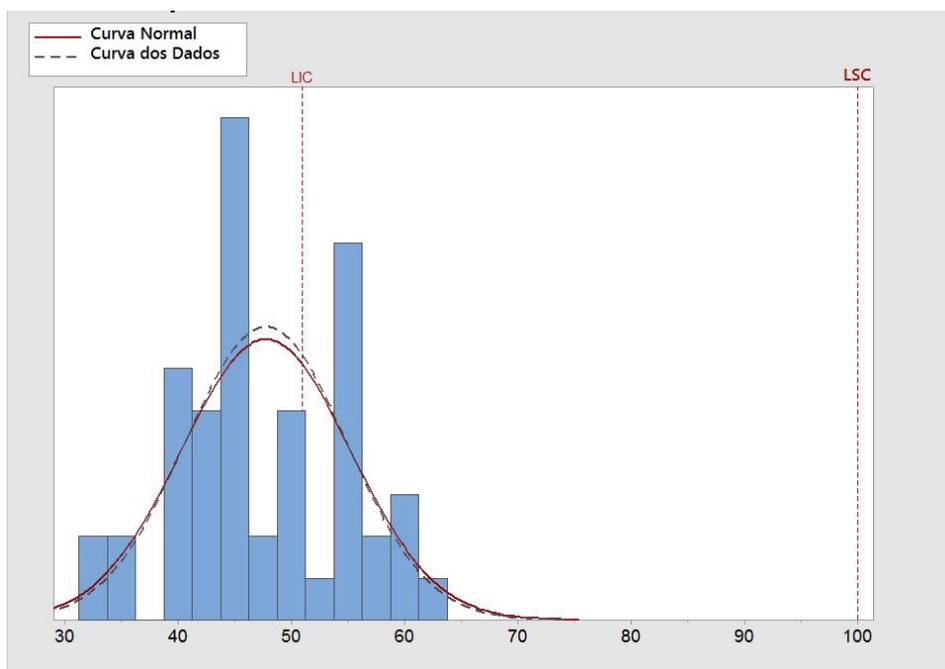


Figura 15 Capacidade do processo para a previsão do IQA do rio Passaúna.

Na Figura 15 o histograma para a previsão da qualidade da água do rio Passaúna demonstra que há uma baixa variação nos valores de IQA, em relação à faixa dos limites de especificação, mas a distribuição não está centrada, tornando o processo incapaz. Pelos índices de capacidade do processo, o valor obtido para $C_p = 1,15$ reforça, na previsão do IQA para o rio Passaúna, que o mesmo poderia possuir uma capacidade aceitável, podendo atender às especificações de qualidades determinadas pela legislação, entretanto, o $C_{pk} = -0,15$, considera o processo incapaz.

Embora o rio Passaúna sempre tenha apresentado qualidade inferior nas séries históricas, a previsão gerada demonstrou por meio dos gráficos de controle e do índice da capacidade do processo que a qualidade das águas deste rio, mesmo que caiam ainda mais, podem ainda atender os limites determinados pela legislação.

Na Figura 16 o histograma para a previsão da qualidade da água do rio Piraquara demonstra que há uma baixa variação, em relação à faixa dos limites de especificação, mas a distribuição não está centrada, deixando o processo incapaz. Reforçando essa afirmação, o índice de $C_p = 1,13$ encontrado na previsão determina que o rio Piraquara possui uma capacidade aceitável, podendo atender às especificações de qualidade, entretanto, o índice de $C_{pk} = -0,34$ determina que o processo é incapaz. O que chama atenção no índice encontrado é que o C_{pk} encontrado para o rio Piraquara é inferior ao encontrado para o rio Passaúna.

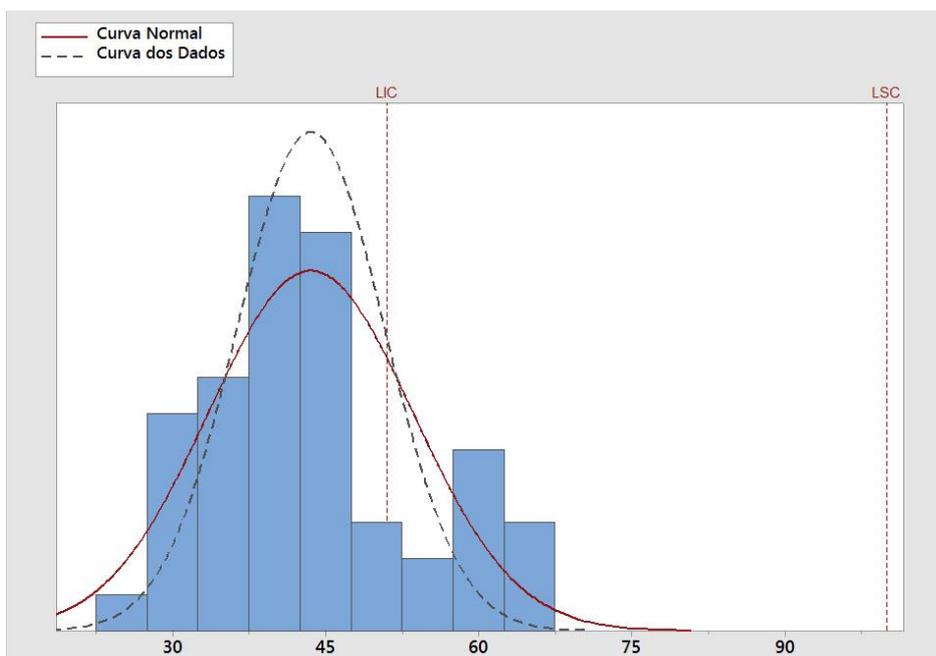


Figura 16 Capacidade do processo para a previsão do IQA do rio Piraquara.

De acordo com o que foi visualizado anteriormente nos gráficos de controle da previsão, o rio Piraquara que sempre demonstrou águas com índices melhores sofre uma diminuição significativa nesse fator de qualidade, deixando-o inferior, quando comparado ao rio Passaúna, diferente de tudo o que foi encontrado até o momento.

Uma das justificativas para que essa característica tenha sido encontrada pode ser a fórmula da previsão, pois o método de Holt-Winters atribui um maior peso nos dados mais recentes e um menor peso aos dados mais antigos, então, a partir desses pesos é gerada uma previsão com média móvel exponencialmente ponderada. Nos dois rios, valores mais antigos possuíam uma qualidade superior em relação aos mais recentes. Entretanto, como o rio Piraquara sempre esteve melhor do que o rio Passaúna, a diminuição na qualidade da água detectada pelo método de Holt-Winters foi mais significativa, interferindo diretamente no índice da capacidade do processo.

Outra justificativa seria o crescimento populacional da região. As cidades de Araucária e Piraquara dobraram o número populacional de meados da década de 1990, até o ano de 2010. A alteração identificada pelo gráfico, poderia ser consequência do aumento do número populacional, que está diretamente ligado a uma das variáveis do índice de qualidade da água, os coliformes termotolerantes. O aumento do crescimento populacional, aliado à diminuição da mata ciliar existente na margem de um rio, que tem a função primordial de proteção do recurso hídrico, acarretaria uma diminuição da qualidade da água do manancial, o que justificaria a interferência identificada pelos gráficos e pelos testes estatísticos utilizados.

Isto posto, fica evidente a necessidade de se investigar os locais de poluição no curso do rio, assim como no estudo realizado por Vilas Boas et al. (2016), em que

perceberam alterações nas concentrações de alguns parâmetros em relação à qualidade da água, concluindo que são as atividades antrópicas que definem a qualidade da água do curso de um rio.

Follador et al. (2012a) sugerem que novas pesquisas sobre o uso de técnicas de controle estatístico de qualidade no monitoramento de qualidade das águas sejam realizadas, pois para essa área, as aplicações dessas técnicas ainda são muito restritas.

6 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos e os resultados alcançados nesta pesquisa, conclui-se que:

- a bacia do rio Iguaçu, na região metropolitana de Curitiba, entre os anos de 1990 a 2009, possui águas de média qualidade, de acordo com o Índice de Qualidade da Água;
- os gráficos de controle são técnicas estatísticas eficientes para o monitoramento de qualidade da água;
- o gráfico com melhor adaptação ao conjunto de dados no controle estatístico do processo é o de média móvel exponencialmente ponderada;
- o controle estatístico do processo e o índice da capacidade do processo demonstraram uma tendência decrescente na qualidade das águas dos rios Passaúna e Piraquara;
- o rio Passaúna evidencia uma qualidade inferior nos parâmetros analisados, quando comparado ao rio Piraquara, conforme o índice de capacidade do processo;
- o método de Holt-Winters demonstrou ser eficiente para a previsão de dados de qualidade de água;

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando-se a necessidade reconhecida nesta pesquisa de se estabelecer um controle da qualidade para água de rios, e que os resultados obtidos indicam a viabilidade do uso de técnicas de controle estatístico para o monitoramento dessa qualidade, sugere-se que pesquisas de controle estatístico do índice de qualidade de água sejam desenvolvidas, para que essa ferramenta possa abranger também o controle de qualidade ambiental.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Portal de qualidade das águas**. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-idade-aguas.aspx>. Acesso em: 15 abr. 2016.
- AHMAD, L.; ASLAM, M.; JUN, C. The design of a new repetitive sampling control chart based on process capability index. **Transactions of the institute of measurement and control**, Jed dah, v. 38, n. 8, p. 971-980, 2016.
- ANDRADE, J. A. **Qualidade das águas da bacia hidrográfica do rio Embu Guaçu, contribuinte do reservatório Guarapiranga – região metropolitana de São Paulo**. 78 f. 2014. Dissertação (Mestrado em Análise Geoambiental) - Universidade Guarulhos, Guarulhos, 2014.
- BARROS, V. F. A.; MENEZES, J. E. Análise da relação entre a produção e o consumo de água na grande Goiânia utilizando o método estatístico de previsão de Holt-Winters. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Goiás, v. 7, n. 7, p. 1272-1282, 2012.
- BAYER, F. M.; SOUZA, A. M. Wavelets e modelos tradicionais de previsão: um estudo comparativo. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 40-61, 2010.
- BIREK, L.; PETROVIC, D.; BOYLAN, J. Water leakage forecasting: the application of a modified fuzzy evolving algorithm. **Applied Soft Computing Journal**, United Kingdom, v. 14, p. 305-315, 2014.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a resolução nº. 357, de 17 de março de 2005. 9 p. **Diário Oficial da União**, Brasília - DF, nº 92, p. 89, 16 maio de 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 25 out. 2016.
- CARVALHO, A. P.; BALDUINO, A. R.; MACIEL, G. F.; PICANÇO, A. P. Avaliação da poluição em rios utilizando índices de qualidade da água: um estudo de caso no ribeirão São João em Porto Nacional – TO. **Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 472-484, 2016.
- CHATFIELD, C. The future of time-series forecasting. **International Journal of Forecasting**, Montreal, n. 4, p. 411-419, 1988.
- CHATFIELD, C.; YAR, M. Holt-Winters forecasting: some practical issues. **The Statistician**, Bath, v. 37, p. 129-140, 1988.
- COMUNELLO, A. C.; DAMINELLI, L. M.; BORTOLOTTI, S. L. V. Análise e previsão de demanda de água no município de Medianeira-PR usando o modelo de Holt-Winters. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, Medianeira, v. 2, n. 8, p. 10-19, 2013.
- DURU, O. A. Fuzzy integrated logical forecasting model for dry bulk shipping index forecasting: an improved fuzzy time series approach. **Expert Systems with Applications**, Louisiana, v. 37, p. 5372-5380, 2010.
- EFFENDI, H. River water quality preliminary rapid assessment using pollution index. **Procedia Environmental Science**, v. 33, p. 562-567, 2016.

FERNANDES, N. C.; SCALIZE, P. S. Comparação entre dois métodos para determinação da qualidade da água tratada. **Ciência & Engenharia**, Uberlândia - MG, v. 24, n. 2, p. 85-39, 2015.

FERREIRA, E. B.; NOMELINI, Q. S. S.; OLIVEIRA, M. S. O controle estatístico do processo na manufatura de autopeças. **Revista da Universidade Vale do rio Verde**, Três Corações, v. 14, n. 1, p. 72-87, 2016.

FREITAS, H. M. B. **Aplicação do controle estatístico do processo na análise da qualidade da água da bacia do rio Mourão**. 2015. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão - PR, 2015.

FRETHEIM, A.; TOMIC, O. Statistical process control and interrupted time series: a golden opportunity for impact evaluation in quality improvement. **Bmj Quality & Safety**, United Kingdom, v. 24, p. 748-752, 2015.

FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, M. A.; FRIGO, J. P.; FRIGO, E. P. Comparação entre gráficos de controle de Shewhart, CUSUM e MMEP no processo de irrigação por aspersão convencional. **Irriga**, Botucatu, ed especial, p. 56-70, 2016.

FOLLADOR, F. A. C.; VILAS BOAS, M. A.; SCHOENHALS, M.; HERMES, E.; RECH, C. Tabular CUSUM control charts of chemical variables applied to the control of surface water quality. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 5, p. 951-960, 2012(a).

FOLLADOR, F. A. C.; VILAS BOAS, M. A.; MALMANN, L.; SCHOENHALS, M.; VILLWOCK, R. Controle de qualidade da água medido através de cartas de controle de Shewhart, CUSUM e MMEP. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 3, p. 183-197, 2012(b).

FU, X.; WANG, R.; DONG, Z. Application of a Shewhart control chart to monitor clean ash during coal preparation. **International Journal of Mineral Processing**, Shanxi, v. 158, p. 45-54, 2017.

GELTING, R. J.; BALOCH, M. Systems analysis of irrigation water quality in environmental assessments related to foodborne outbreaks. **Aquatic Procedia**, New York, v. 1, p. 130-137, 2013.

GIRON E.; OPAZO, M. A. U.; ROCHA JÚNIOR, W. F.; GIMENES, R. M. T. Aplicação do controle estatístico de processo em uma empresa do setor avícola. **Revista de administração e inovação**, São Paulo, v. 10, n.4, p. 38-62, 2013.

GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 12. ed. Piracicaba: Nobel, 1985.

HENNING, E.; KONRATH, A. C.; ZOLDAN, I. M.; MATTOS, V. L. D.; SILVESTRE, E. B. M. Controle estatístico de processos: uma aplicação em características sensoriais. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, Florianópolis, v. 8, n. 15, p. 50-71, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRÁFICA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Evolução populacional**. Disponível em: <http://ibge.gov.br/cidadesat/painel/populacao.php?codmun=410180&search=parana%7Caraucaria%7Cinphographics:-demographic-evolution-and-age-pyramid&lang=>. Acesso em: 28 jul. 2017.

JACINTO JÚNIOR, J. J. F.; BARBOSA, E. C. A. Avaliação da qualidade da água do rio Gramame ao longo do seu percurso no município de João Pessoa – PB. **Revista Ambiental**, João Pessoa, v. 2, n. 1, p. 97-105, 2016.

JUNTUNEN, P.; LIUKKONEN, M.; LEHTOLA, M.; HILTUNEN, Y. Cluster analysis by self-organizing maps: an application to the modelling of water quality in a treatment process. **Applied Soft Computing**, Bedford, v. 13, p. 3191-3196, 2013.

KANE, V. E. Process capability indices. **Journal of Quality Technology**, Atlanta, v. 8, n.1, p. 41-25, 1986.

KAYA, I.; KAHRAMAN, C. Process capability analyses based on fuzzy measurements and fuzzy control charts. **Expert Systems with Applications**, Istanbul, v. 38, p. 3172-3184, 2011.

LEE, P. HUANG, Y. KOU, T. WANG, C. The effect of the individual chart with variable control limits on the river pollution monitoring. **Quality and Quantity**, v. 47, p. 1803-1812, 2013.

LI, R.; ZOU, Z.; AN, Y. Water quality assessment in Qu river based on fuzzy water pollution index method. **Journal of Environmental Sciences**, Beijing, v. 3, n. 30, p. 1-6, 2016.

LIN, J. Feasibility study on prediction of properties of municipal solid waste with time series models. **Journal of Hazardous Materials**, Taiwan, v. 58, p. 47-57, 1998.

MALEKI, M. R.; AMIRI, A.; CASTAGLIOLA, P. Measurement errors in statistical process monitoring: A literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 103, p. 316-329, Jan. 2017.

MINITAB. **User' guide**. Release 17 for Windows. USA, 2017.

MONTGOMERY, C. D. **Introdução ao controle estatístico do processo**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MORETIN, P. A.; TOLOI, C. M. **Análise de séries temporais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MOYEL, M. S.; HUSSAIN, N. A. Water quality assessment of the Shatt al-Arab river. Southern Iraq. **Journal of Coastal Life Medicine**, Basra, v. 3, n. 6, p. 459-465, 2016.

NARA, E. O. B.; FURTADO, J. C.; BENITEZ, G. B.; GOERCK, L. H.; PINTO, J. Análise comparativa de previsões de vendas: o modelo de Holt-Winters x previsão realizada. **Revista Científica Interdisciplinar**, Santa Cruz do Sul, v. 3, n. 1, p. 144-163, 2015.

OBEROI, E. H. S.; PARMAR, M.; KAUR, H.; MEHRA, R. SPC (statistical process control): A quality control technique for confirmation to ability of process. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 3, p. 666-672, 2016.

OLIVEIRA PINTO, C. U.; CARVALHO, A. P.; CAVALCANTI e SILVA, D. G. K. Uso do IQA para a caracterização da água usada como insumo produtivo pela Comunidade Quilombola Malhadinha. **Biota Amazônia**, Macapá, v. 5, n. 4, p. 1-3, 2015.

ORSSATTO, F.; VILAS BOAS, M. A.; EYNG, E. Gráfico de controle da média móvel exponencialmente ponderada: aplicação na operação e monitoramento de uma estação de tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro – RJ, v. 20, n. 4, p. 543-550, 2015.

PARASCHIV, D.; TUDOR, C.; PETRARIN, R. The textile industry and sustainable development: a Holt-Winters forecasting investigation for the eastern European Area. **Sustainability**, Bucharest, v. 7, p. 1280-1291, 2015.

POONAM, T.; TANUSHREE, B.; SUKALYAN, C. Water Quality Indices-Important Tools for Water Quality Assessment: a Review. **International Journal of Advances in Chemistry**, Bremen, v. 1, n. 1, p. 1-14, 2013

RAMOS, M. A. G.; OLIVEIRA, E. S. B.; PIÃO, A. C. S.; LEITE, D. A. N. O.; ANGELIS, D. F. Water quality index (WQI) of Jaguari and Atibaia Rivers in the region of Paulínia, São Paulo, Brazil. **Environ Monit. Assess.**, São Carlos, v. 188, n. 263, p. 2-14, 2016.

REIS, C. F.; VILAS, BOAS, M. A.; HERMES, E.; REISDORFER, M. Avaliação da qualidade da água para irrigação em Salto do Lontra – PR. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal - SP, v. 8, n. 1, p. 69-78, 2011.

SARON, A.; AMARAL, C. L. C. Monitoramento da qualidade de água do córrego Zavuvus: prática aplicada no ensino de química ambiental. **Revista de Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 1-14, 2015.

SHABAN, M. Drainage water reuse: state of control and process capability evaluation. **Water Air Soil Pollut.**, v. 225, n. 2168, p. 1 -15, 2014.

SCHRIPPE, P.; SANTOS, S. R.; VINCENZI, S. L. MOREIRA JÚNIOR, F. J.; IARCZEWSKI, A. M. W. Estratégia empresarial para a natura: análise de correlação e previsão dos lucros por meio do modelo de Holt-Winters. **Reuna**, Belo Horizonte, v. 20, n. 4, p.05-26, 2015.

TAMAGI, J. T.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; VILAS BOAS, M. A. Uniformidade de distribuição de água de irrigação por aspersores compensantes e não compensantes em diferentes alturas. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 631-647, 2016.

TYBAGI, S.; SHARMA, B.; SINGH, P.; DOBHAL, R. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality. **American Journal of Water Recourses**, Newark, v. 1, n. 3, p. 34-38, 2013.

VILAS BOAS, M. A.; POLETO, C.; JUCHEN, R. T.; JUCHEN, C. R. Analysis of urban rivers' water quality using multivariate approach. **International Journal Environmental Engineering**, v. 8, n. 1, p. 30-43, 2016.

WASIK, E.; CHMIELOWSKI, K. The use of Holt-Winters method for forecasting the amount of sewage inflowing into the wastewater treatment plant in Nowy Sacz. **Environmental Protection and Natural Resources**, Nowy Sacz, v. 27, n. 2, p. 7-12, 2016.

ZANINI, R. R.; SOUZA, A. M.; JACOBI, L. F.; PERIPOLLI, A.; DAPPER, S. N.; SILVA, A. C. J. A utilização dos gráficos de controle para acompanhamento de processos de vigilância. **Espacios**, Caracas - Venezuela, v. 37, n. 27, p. 1-5, 2016.