

DAVID VENANCIO DA CRUZ

**Controle estatístico de processo aplicado à qualidade de águas no
abastecimento de Campina Grande - PB.**

RECIFE-PE

JUNHO/2014



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

Controle estatístico de processo aplicado à qualidade de águas no
abastecimento de Campina Grande - PB

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Biometria e Es-
tatística Aplicada como exigência par-
cial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Estatística
Aplicada ao Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Moacyr Cunha
Filho
Co-orientador: Prof^a. Dra. Ana
Patrícia Siqueira Tavares Falcão

RECIFE-PE
JUNHO/2014

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

Controle estatístico de processo aplicado à qualidade de águas no
abastecimento de Campina Grande - PB.

David Venancio da Cruz

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 11/06/2014 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Cláudia Helena Dezotti
Universidade Federal Rural de Pernambuco
DEINFO-UFRPE

Prof. Dr. Lucian Bogdan Bejan
Universidade Federal Rural de Pernambuco
DEINFO-UFRPE

Prof^a. Dra. Ana Patrícia Siqueira Tavares
Falcão
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia - Campus Vitória - PE

*Dedico,
aos meus pais, Antônio Venancio e Maria
Cruz, e ao meu irmão.*

Agradecimentos

Escrever uma dissertação de mestrado é uma experiência enriquecedora e de plena superação. Nos modificamos a cada tentativa de buscar respostas às nossas aflições de ‘mestrando’. Para aqueles que compartilham conosco desse momento, parece uma tarefa interminável e enigmática que só se torna realizável graças a muitas pessoas que participam, direta ou indiretamente, mesmo sem saber realmente o que é para que, nos envolvemos em pesquisa. E é justamente a essas pessoas que gostaria de agradecer:

Preliminarmente, quero agradecer a Deus pelo dom da vida.

Aos Professores Moacyr Cunha Filho e Ana Patrícia Siqueira Tavares Falcão (Orientador e Co-orientador, respectivamente) pela disponibilidade, colaboração, conhecimentos transmitidos e capacidade de estímulo ao longo de todo o trabalho.

As professoras Cláudia Helena Dezotti e Lucian Bogdan Bejan, que aceitaram compor minha banca, pelas sugestões e análises significativas às quais tentarei atender na versão definitiva do texto.

Aos alunos da turma do Mestrado, principalmente aos da turma de probabilidade, pela paciência e companheirismo. A Isys Pryscilla, por ler meus textos, corrigir, por me aconselhar, por ter confiado em mim.

À minha amada Cleudiane dos Santos pelo apoio e paciência nos momentos de inquietação e cansaço. Com você exercito o amor....

Por último, manifesto um sentido e profundo reconhecimento à minha família pelo apoio incondicional ao longo destes anos.

*“Percebi ainda outra coisa debaixo do Sol:
Os velozes nem sempre vencem a corrida;
os fortes nem sempre triunfam na guerra;
os sábios nem sempre têm alimento;
os prudentes nem sempre são ricos;
os instruídos nem sempre têm prestígio;
pois o tempo e o acaso afetam a todos.”*

EC. 9:11

Resumo

A água é fundamental para a manutenção da vida no planeta e à dinâmica da natureza, pois permeia todos os ciclos da natureza. A degradação desse recurso prejudica a saúde, o bem-estar das populações, a flora e a fauna. Na caracterização da qualidade da água são determinados diversos parâmetros que representam as suas características físicas, químicas e biológicas, os indicadores de qualidade da água, que constituem impurezas quando alcançam valores superiores aos estabelecidos para determinado uso. Para obter-se uma avaliação de forma eficiente e rápida dos dados que indicam a qualidade da água potável foram utilizadas técnicas de controle estatístico do processo. Este trabalho preferenciou a utilização de técnicas de controle estatístico do processo na avaliação da qualidade da água potável na cidade de Campina Grande com objetivo de comparar os dados com a resolução de N^o 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), detectar o melhor gráfico de controle para o processo univariado e otimizar o processo através do gráfico multivariado. Para avaliar a qualidade da água em Campina Grande foi realizada uma pesquisa bibliográfica com dados disponibilizados pela Companhia de águas e Esgotos da Paraíba no período de 2011 a 2013 perfazendo 36 amostras. A estação de tratamento está situada no município de Queimadas - PB, responsável pelo abastecimento público de água da cidade de Campina Grande e municípios adjacentes, com vazão da água tratada em média de $5.400m^3/h$. As variáveis escolhidas para a avaliação da água foram: pH, cloro, cor e turbidez, pois são consideradas características relevantes na água distribuída para consumo, por serem padrão de potabilidade. A análise dos dados se deu através de gráficos de controle individuais de Shewhart, média móvel exponencialmente ponderada (EWMA), soma acumulativa (CUSUM), multivariado e índice de capacidade de processo univariado e multivariado. Com exceção da variável pH, as demais variáveis apresentaram elevada variabilidade dos dados. Nos gráficos de Shewhart observaram-se que nas variáveis cor e turbidez existem pontos sequências e pontos acima do limite superior, em que seus processos estão indicados fora do controle estatístico. Nos gráficos de CUSUM e EWMA observou-se as variáveis pH e cloro, ao decorrer do processo tem um aumento na variabilidade indicando uma instabilidade no processo, confirmado através do índice de capacidade do processo, que indicou os processos para variáveis pH e cloro não são capazes de cumprir suas especificações, entretanto permaneceram dentro de controle estatístico. As correlações bivariadas entre as variáveis de qualidade da água, cloro e turbidez, apresentaram-se uma correlação moderada ($r=0.673$). Para o processo univariado, o gráfico de EWMA mostrou-se o melhor no monitoramento da qualidade das águas, devido a sua eficiência, pois é sensível as pequenas variações de ordem de 1.5 desvios-padrão. O gráfico de controle multivariado é proveitoso do ponto de vista do tempo no monitoramento e análise das variáveis simultaneamente. O grau de comprometimento da qualidade da água potável é baixo, pois apenas a variável cloro apresentou-se fora dos limites estipulados pela Resolução da CONAMA, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água.

Palavras-chave: gráficos de controle, qualidade, água.

Abstract

Water is essential for sustaining life on the planet and the dynamics of nature it permeates all the cycles of nature. The degradation of this resource affect the health, well-being of people, flora and fauna. In the characterization of water quality are determined various parameters representing the physical, chemical and biological characteristics, indicators of water quality, which are impurities when they reach values higher than those established for a particular use. For an evaluation of efficient and fast data that indicate the quality of drinking water techniques of statistical process control were used. This work preferenciu the use of techniques of statistical process control in assessing the quality of drinking water in the city of Campina Grande in order to compare the data with the resolution of N^o 357/2005 of the National Environmental Council (CONAMA), detect better control chart for the univariate process and optimize the process through multivariate chart. To assess the water quality in Campina Grande a literature search was performed using data provided by the water company and Sewers of Paraíba in the period 2011-2013 a total of 36 samples. The station treatment in the municipality of Queimadas - PB, responsible for supplying Public water of Campina Grande and adjacent municipalities with the flow treated water averaged $5.400m^3/h$. The variables chosen for the evaluation of water were: pH, chlorine, turbidity and color as they are considered relevant features on the water distributed for consumption to be potability standards. The analysis of data was through graphs of individual control Shewhart, exponentially moving average weighted (EWMA), cumulative sum (CUSUM), and multivariate capability index univariate and multivariate process. Except for the pH variable, the other variables showed high variability in the data. In Shewhart charts observed that the color and turbidity variables exist sequences and points above the upper limit points, where their processes are shown outside the statistical control. In the graphs of CUSUM and EWMA observed pH and chlorine, the course of the process is an increase in variability, indicating an instability in the process, confirmed by the process capability index, which indicated the process variables for pH and chlorine are not able to meet your specifications, however remained within statistical control. The bivariate correlations between the variables of water quality, chlorine and turbidity showed a moderate correlation ($r = 0.673$). For the univariate case, the EWMA chart proved to be the best in the monitoring of water quality due its efficiency as it is sensitive to small variations of the order of 1.5 standard deviations. The multivariate control chart is beneficial from the point of view of time in monitoring and analysis of variables simultaneously. The degree of impairment of quality of drinking water and low, because only variable chlorine introduced himself outside the limits stipulated by Resolution CONAMA, which provides for the classification of water bodies.

Keywords : control charts , quality , water.

Lista de Figuras

1	Diagrama de causa e efeito.	p. 4
2	Representação do sistema 3σ	p. 11
3	Gráfico de controle para medidas individuais.	p. 12
4	Gráfico de controle de CUSUM.	p. 12
5	Gráfico de controle de EWMA.	p. 13
6	Gráfico T^2 de Hotelling.	p. 14
7	Localização de Campina Grande/PB/Brasil.	p. 16
8	Gráfico de autocorrelação entre as amostras.	p. 20
9	Gráficos de autocorrelação (ACF) e (PACF) para a variável pH.	p. 31
10	Gráfico de Shewhart para pH.	p. 31
11	Gráfico de CUSUM para pH.	p. 32
12	Gráfico de EWMA para pH.	p. 32
13	Gráficos de autocorrelação (ACF) e (PACF) para a variável cloro.	p. 34
14	Gráfico de Shewhart para cloro.	p. 34
15	Gráfico de CUSUM para cloro.	p. 35
16	Gráfico de EWMA para cloro.	p. 35
17	Gráficos de autocorrelação (ACF) e (PACF) para a variável turbidez.	p. 37
18	Gráfico de Shewhart para turbidez.	p. 37
19	Gráfico de CUSUM para turbidez.	p. 38
20	Gráfico de EWMA para turbidez.	p. 38
21	Gráficos de autocorrelação (ACF) e (PACF) para a variável cor.	p. 40
22	Gráfico de Shewhart para cor.	p. 40

23	Gráfico de CUSUM para cor.	p. 41
24	Gráfico de EWMA para cor.	p. 41
25	Gráfico de controle multivariado T^2	p. 43
26	Índice de capacidade do pH.	p. 44
27	Índice de capacidade do cloro.	p. 44
28	Resíduo do pH.	p. 54
29	Resíduo do cloro.	p. 54
30	Resíduo do turbidez.	p. 54
31	Resíduo do cor.	p. 54

Lista de Tabelas

1	Grau de Dureza da água.	p.6
2	Estatística descritiva dos parâmetros da qualidade da água (CAGEPA, 2014).	p.29
3	Matriz bivariada de correlação entre variáveis de qualidade da água.	p.42
4	Testes de Normalidade.	p.53
5	Critérios de avaliação, o modelo de melhor adequação.	p.53

Lista de Abreviaturas

ACF - *Autocorrelation Function* (Função de Autocorrelação)

AIC - *Akaike Information Criteria*

ARIMA - Modelo auto-regressivo integrado de média móvel

BIC - *Bayesiano Information Criteria*

CEP - Controle Estatístico de Processo

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CUSUM - Cumulative Sum (soma acumulada)

ETA - Estação de Tratamento da Água

EWMA - Exponentially Weighted Moving Average (média móvel exponencialmente ponderada)

LCL - *Lower Control Limit* (Limite Inferior de Controle)

LIC - Limite Inferior de Controle

LSC - Limite Superior de Controle

PACF - Função de Autocorrelação Parcial

UCL - *Upper Control Limit* (Limite Superior de Controle)

Sumário

1	Introdução	p. 1
2	Revisão Bibliográfica	p. 3
2.1	Fenômeno	p. 3
2.2	Controle estatístico de qualidade	p. 10
2.2.1	Aspectos dos gráficos de controle	p. 10
2.2.1.1	Gráficos de controle univariado	p. 11
2.2.1.2	Gráfico de controle multivariado	p. 13
2.2.2	Interpretação dos gráficos de controle	p. 14
3	Material e Métodos	p. 16
3.1	Área de estudo	p. 16
3.2	Teste de normalidade	p. 17
3.2.1	Teste de Kolmogorov-Smirnov	p. 17
3.2.2	Teste de Anderson-Darling	p. 18
3.2.3	Teste de Shapiro-Wilk	p. 19
3.3	Autocorrelação	p. 19
3.4	Modelo de Séries Temporais	p. 21
3.4.1	Modelo autoregressivo de média móvel - ARIMA	p. 21
3.5	Gráficos de controle	p. 22
3.5.1	Gráfico de controle de medida individual - Shewhart	p. 22
3.5.2	Gráfico de controle de soma acumulada (CUSUM)	p. 23

3.5.3	Gráfico da média movél ponderada exponencial (EWMA)	p. 24
3.5.4	Gráfico de controle multivariado T^2	p. 26
3.6	Índices de capacidade	p. 27
3.6.1	Uso e interpretação do C_p	p. 27
3.6.2	Utilização do índice C_{pk}	p. 28
3.6.3	Utilização do índice Multivariado	p. 28
3.6.4	Valores permitidos dos parâmetros de qualidade da água	p. 28
4	Resultados e discussão	p. 29
4.1	Análise estatística dos parâmetros de qualidade da água.	p. 29
4.2	Gráficos de medidas individuais - Shewhart, CUSUM e EWMA	p. 30
4.3	Matriz de Correlação entre as variáveis	p. 42
4.4	Gráfico Multivariado - Hotelling	p. 42
4.5	Índice de Capacidade de Processo	p. 44
4.5.1	Índice de Capacidade Univariado	p. 44
4.5.2	Índice de Capacidade Multivariado	p. 45
5	Conclusão	p. 46
	Referências	p. 49
	Apêndice A	p. 53
	Apêndice B	p. 54

1 Introdução

A água é fundamental para manutenção da vida no planeta e a dinâmica da natureza, propeli todos os ciclos, sustentando a vida. É o recurso de maior relevância, pois dinamiza todos os ciclos ecológicos, além disto os sistemas aquáticos têm uma enorme diversidade de espécies úteis ao homem e fazem parte ativa dos ciclos biogeoquímicos e da diversidade biológica (TUNDISI, 2003).

Com o aumento das atividades econômicas e o crescimento populacional numa escala mundial, a água de qualidade tem se tornado um recurso natural escasso. Embora o Brasil apresente uma situação confortável, pois detém aproximadamente 11,6% de toda água doce do mundo, existem problemas de distribuição desse recurso, pois o mesmo não se encontra distribuído de forma homogênea: na Amazônia está 70% desse recurso, enquanto apenas 3% está disponível no Nordeste brasileiro. Em outras regiões, a exemplo da Centro-Sul, possui uma disponibilidade homogênea, mas a intensidade da atividade econômica, expansão urbana, indústria, serviços e agropecuária, têm provocado conflitos com relação ao uso da água, considerados graves, levando em conta o diagnóstico elevado do desperdício e falta de tratamento das águas utilizadas (JUNIOR, 2012).

Os ciclos hidrológicos têm sido alterados de maneira significativa em função de atividades antrópicas, tais como mineração, construção de barragens, desvio do curso natural dos rios, lançamento de efluentes domésticos e industriais não tratados, desmatamento e uso inadequado do solo próximo aos leitos, superexploração dos recursos pesqueiros. Como consequência, tem-se observado expressiva queda da qualidade da água e perda da biodiversidade aquática, em função desestruturação dos ambientes físico, químico e biológico (DAVE; GOULART; CALLISTO, 2014)

Segundo Fay e Silva (2006), no semiárido brasileiro o maior problema é a má distribuição espaço-temporal das águas superficiais para o consumo humano no meio rural, o que prejudica a sobrevivência e a qualidade de vida da população. Os maiores potenciais hídricos disponíveis se encontram nos rios perenes e perenizados, lagos, poços tubulares e

nas barragens, das quais a maioria da água armazenada é destinada a irrigação.

A água comporta vários componentes de origem ambiental ou proveniente da atividade humana. A qualidade da água é avaliada a partir de suas características físicas, químicas e biológicas. Estas características são consideradas impurezas quando os valores obtidos são superiores aos valores estabelecidos para determinada utilização (HENNING et al., 2011).

De acordo com Follador (2010), para analisar de forma rápida e eficiente dos dados que indicam a qualidade da água, objeto deste estudo, podem ser praticadas técnicas de controle estatístico do processo. Estas técnicas colaboram de forma eficaz para o monitoramento ambiental. Devido a falta de estabilidade no controle do processo em um processo que permanecesse a eficácia e a precisão foi o que elaborou a proposta destas técnicas. São diversos os tipos de análise estatística que podem se utilizar, dentre elas destacam-se ferramentas, como os gráficos de controle para medidas individuais: Shewhart, gráfico de CUSUM, gráfico de EWMA e índices de capacidade processo univariados e multivariados, devido à sua simplicidade operacional e realista com relação à detecção de problemas, resultando em um bom desempenho no monitoramento da água.

O trabalho neste sentido buscou analisar a qualidade da água no abastecimento da cidade de Campina Grande, comparando os parâmetros encontrados com os estabelecidos pela CONAMA, identificando o melhor gráfico de controle para o processo univariado e otimizar o processo através do gráfico multivariado.

A presente dissertação de mestrado está dividida em 5 Capítulos. No Capítulo 2, pretendeu-se uma revisão bibliográfica se descrevendo sobre o fenômeno e o controle estatístico de qualidade. O Capítulo 3 apresenta área de estudo, com a devida localização da cidade e a definição de métodos relacionados com normalidade, autocorrelação e modelo de séries temporais. O Capítulo 4 aborda os resultados e traz consigo discussões a respeito do comportamento dos gráficos e sua eficiência. No Capítulo 5 é apresentado as conclusões relacionadas ao comprometimento da qualidade da água.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fenômeno

A água é o único recurso natural que está relacionado com todos os aspectos da civilização humana, desde o desenvolvimento agrícola e industrial aos valores religiosos e culturais ligados na sociedade. É um recurso extremamente vital, como componente bioquímico de seres vivos, é meio de vida de várias espécies vegetais e animais, é um elemento que representa valores culturais e até como fator de produção de bens de consumo (GOMES, 2011).

Com o monitoramento dos indicadores de qualidade das águas é possível definir as características durante o período de análise e fornecer informações para detectar as tendências e estabelecer as relações de causa e efeito. Entretanto, a complexidade de certos fatores é que determinam a qualidade da água. Para definir a qualidade da água, devemos entender que o conceito de qualidade está relacionado a expansão das características para as diversas utilidades da água, e a capacidade de seleção de variáveis e interpretação das mesmas, de forma isolada e conjunta (SEABRA, 2013).

Ainda de acordo com Fay e Silva (2006), a qualidade da água na região do Semiárido é afetada diretamente pelos resíduos urbanos nos grandes reservatórios, em seguida pelos resíduos das atividades de mineração e agroindustriais. Os produtos finais dessas atividades resultam nos seguintes tipos de contaminação por óleos, metais, agrotóxicos e fertilizantes químicos. O aumento do uso de agroquímicos devido aos sistemas de produção intensivo elevam consideravelmente os níveis de nitrato, fosfato e concentrações residuais agrotóxicos a que, por sua vez, comprometem a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Devido ao desbalanceamento no equilíbrio natural dessa área ocorrem alterações na microflora do solo e no ciclo da matéria orgânica, com efeitos em relação ao carbono/nitrogênio e na capacidade de troca catiônica do solo. Desta forma se favorecem os fluxos preferenciais para os processos de lixiviação e o escoamento superficial provenientes do manejo inadequado dos recursos hídricos e do próprio solo, afetando a qualidade

da água para o consumo.

A qualidade da água é identificada através da mensuração das características físicas, químicas, biológicas e quantidade de acordo com a figura 1. São identificados por parâmetros de qualidade das águas. As características físicas são constituídas por sólidos (suspensos e dissolvidos na água) e gases. As características químicas são substâncias orgânicas e inorgânicas e as características biológicas são as bactérias coliformes e organismos unicelulares (algas). De acordo com Follador (2010), a qualidade da água esta extremante relacionada com a quantidade devido à qualidade depender da água existente para dissolver, diluir e transportar substâncias benéficas ou maléficas.

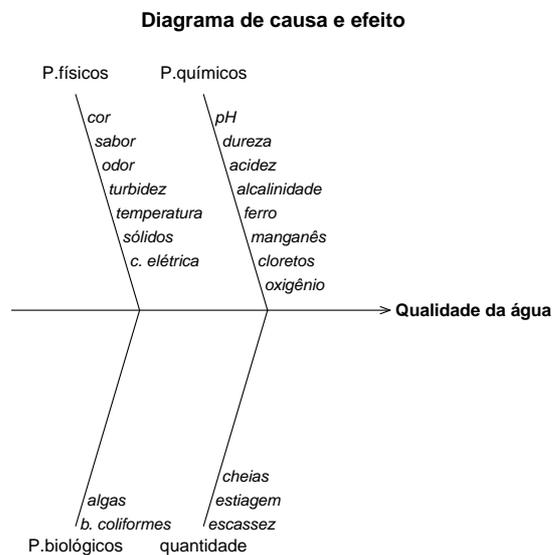


Figura 1: Diagrama de causa e efeito.

A cor da água está associada ao grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la devido à presença de sólidos dissolvidos, principalmente material orgânico e inorgânico. A cor, apesar de ser um atributo estético da água, não está relacionada diretamente com problemas de contaminação. Entretanto, a presença de cor provoca repulsa psicológica pelo consumidor, devido a relação com as descargas de esgotos (CHEN et al., 2010).

De acordo a Resolução nº20 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), órgão encarregado sobre os níveis de disposição e qualidade das águas no território nacional, a cor é tida como parâmetro de qualidade, pois nas águas naturais associa-se problemas de estética as dificuldades na penetração da luz e a presença de compostos recalcitrantes, ou seja, não biodegradáveis, que, geralmente, são tóxicos aos organismos aquáticos.

O sabor e o odor são manifestados em águas eutrofizadas, ou seja, águas em que ocorrem a floração de forma excessiva de algas atribuído a presença de grandes concentrações de nutrientes provenientes de compostos orgânicos biodegradáveis, certos tipos de algas cianofíceas, por exemplo, que produzem compostos odoríficos. No meio anaeróbico, ou seja, no fundo dos rios e reservatórios, em situações críticas, em toda massa líquida ocorre a formação de gás sulfídrico (PERPETUO, 2009).

A turbidez é dada pelo grau de interferência com a passagem da luz através da água apresentando uma aparência turva. A origem dela são os sólidos em suspensão, que podem ser de origem natural, isto é, partículas de rocha, areia e silte, além de algas e outros minerais ou ainda de origem antropogênica, ou seja, despejos industriais, domésticos, microrganismos e erosão. Enquanto sua origem for natural, não apresenta riscos, mas esteticamente é desagradável, servindo de abrigo para microrganismos patogênicos. Nos corpos d'água a turbidez reduz a penetração da luz reduzindo assim a fotossíntese (ARAÚJO, 2010).

A temperatura é a medida da intensidade de calor; é um parâmetro importante, pois, influi em algumas propriedades da água (densidade, viscosidade, oxigênio dissolvido), com reflexos sobre a vida aquática. A temperatura pode variar em função de fontes naturais (energia solar) e fontes antropogênicas (despejos industriais e águas de resfriamento de máquinas). A sua relevância consiste no fato que afeta diretamente a taxa de reações químicas, biológicas e solubilidade de gases: Oxigênio (O_2) e Sulfeto de hidrogênio (H_2S) (SAAD et al., 2007).

Condutividade elétrica é uma medida da habilidade de uma solução aquosa de conduzir uma corrente elétrica devido à presença de íons. Essa propriedade varia com a concentração total de substâncias ionizadas dissolvidas na água, com a temperatura, com a mobilidade dos íons, com a valência dos íons e com as concentrações real e relativa de cada íon. Esse parâmetro não discrimina quais os íons presentes em água, mas é um indicador importante de possíveis fontes poluidoras (MARTINS et al., 2003).

Os sólidos presentes na água estão classificados de acordo com o tamanho, com as características químicas e decantabilidade. Os sólidos são responsáveis pelo aumento da turbidez, impedimento da penetração da luz no corpo d'água, formação de espuma superficial, depósito de lodo, geração de maus odores e diminuição do volume útil nos reservatórios (CAMPOS, 2009).

O pH é uma característica importante devido a sua influência nos processos biológicos que ocorrem no meio aquático. As águas naturais apresentam um pH entre 4 e 9, es-

tando associada pela dissolução de CO_2 que origina baixos valores de pH, enquanto que as reações de HCO_3^- e CO_3^{2-} com água, resulta em maiores pH. Quando o pH aproxima-se de 9 ocorrem absorção de gás carbônico das águas no processo da fotossíntese (ZUIN; LORIATTI; MATHEUS, 2009).

A dureza da água é definida como uma medida e capacidade de precipitar sabão, ou seja, as águas que possuem sabões transformam-se em complexos insolúveis, não formando espuma até que o processo se esgote. Tal fato é causado principalmente pela presença de cálcio e magnésio. Nas águas naturais a dureza é uma condição importante devido a formação de complexos com outros compostos modificando seus efeitos sobre constituintes do ecossistema. A dureza é um parâmetro tradicional utilizado no controle de bioensaios de avaliação, de toxicidade de substâncias ou de efluentes (FOLLADOR et al., 2012).

Existem diversas escalas de dureza, apresentadas na tabela 1, utilizada internacionalmente.

Tabela 1: Grau de Dureza da água.

mg/L $CaCO_3$	Grau de Dureza
0-75	branda e mole
75-150	moderadamente dura
150-300	dura
300	muito dura

Fonte: (CETESB, 1991).

Acidez é a capacidade de reagir quantitativamente com uma base forte até um valor de pH em meio à presença de ácidos fortes ácidos fracos e sais que apresentam um caráter ácido. A acidez em nível elevado provoca corrosão em tubulações e reduz a ação de desinfetantes como a clorexidina e compostos de iodo (MEDRI et al., 2012).

Defini-se alcalinidade da água a capacidade de neutralizar ácidos. A alcalinidade sendo oriunda de sais de ácidos fracos. Assim como acidez, a alcalinidade no ponto de vista de saúde pública não apresenta riscos. Entretanto, as águas alcalinas possuem hidróxidos que conferem um sabor desagradável (PERPETUO, 2009).

De acordo com Sperling (2005), o ferro e o manganês estão presentes em vários tipos de solos e na água de forma insolúveis (Fe^{3+} e Mn^{4+}), sua origem natural é dissolução de compostos do solo e sua origem antropogênica é despejos industriais, tendo sua importância no fato de que as pequenas concentrações alteram a cor da água.

Os cloretos são íons resultantes da dissolução de minerais presente em todas as águas,

em menor ou maior escala. Em certas concentrações determina um sabor salgado a água. (DAVE; GOULART; CALLISTO, 2014).

O oxigênio dissolvido na água mantém a atividade metabólica que produz energia para o crescimento e produção. A solubilidade do oxigênio depende de diversos fatores, sendo a solubilidade inversamente proporcional à temperatura e à salinidade e diretamente proporcional à pressão atmosférica. O baixo índice de solubilidade do oxigênio acarreta uma subtração na capacidade de auto-depuração das águas o que faz necessário o tratamento das águas residuais antes de serem despejadas no meios receptores (FIORUCCI; FILHO, 2005).

Segundo Zuin, Loriatti e Matheus (2009), as reduções nas taxas de oxigênio dissolvido provocam o aumento da população de microrganismos em consequência a um aumento na emissão de gás carbônico proveniente da respiração aeróbica desses microrganismos.

As bactérias desenvolvem um papel fundamental na decomposição da matéria orgânica, entretanto as bactérias coliformes são indicadores de poluição de origem fecal. Segundo Follador (2010) as bactérias coliformes são indicadores da possível presença de seres patogênicos. As algas são um risco para águas encontradas na superfície, pois em condições favoráveis ao seu crescimento se desenvolvem rapidamente cobrindo toda superfície, isso caracteriza lagos denominados de eutróficos, ou seja, apresentam enormes quantidades de compostos favoráveis ao crescimento biológico.

A legislação ambiental vigente - Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 357/2005 - classifica as águas do território brasileiro, de acordo com sua salinidade: doce - águas com salinidade igual ou inferior a 0,5%, salobra - águas com salinidade superior a 0,5 % e inferior a 30% e salinas - águas com salinidade igual ou superior a 30%. Segundo seus usos preponderantes, são distribuídas em nove classes, as águas doces, salobras e salinas do território nacional:

Águas Doces

I - Classe Especial - águas destinadas:

- a) ao abastecimento doméstico sem prévia ou com simples desinfecção;
- b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.

II - Classe 1 - águas destinadas:

- a) ao abastecimento doméstico após tratamento simplificado;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho);
- d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam

rentes ao solo e que ingeridas cruas sem remoção de película;

e) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

III - Classe 2 - águas destinadas:

a) ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional;

b) à proteção das comunidades aquáticas;

c) à recreação de contato primário (esqui aquático, natação e mergulho);

d) à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas;

e) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana;

IV - Classe 3 - águas destinadas:

a) ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional;

b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;

c) à dessedentação de animais.

V - Classe 4 - águas destinadas:

a) à navegação;

b) à harmonia paisagística;

c) aos usos menos exigentes.

Águas Salinas

VI - Classe 5 - águas destinadas:

a) à recreação de contato primário;

b) à proteção das comunidades aquáticas;

c) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

VII - Classe 6 - águas destinadas:

a) à navegação comercial;

b) à harmonia paisagística;

c) à recreação de contato secundário.

Águas Salobras

VII - Classe 7 - águas destinadas:

a) à recreação de contato primário;

b) à proteção das comunidades aquáticas;

c) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação

humana.

IX - Classe 8 - águas destinadas:

- a) à navegação comercial;
- b) à harmonia paisagística;
- c) à recreação de contato secundário.

As águas até a classe 3 podem ser utilizadas para abastecimento humano (potável) após o tratamento adequado uma vez realizado este tratamento, ela deve atender as normas e o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano.

As empresas responsáveis pelo abastecimento público e abastecimento têm a responsabilidade de manter um controle preventivo, sob vigilância constante da potabilidade da mesma, desde de sua saída da Estação de Tratamento de Água (ETA) até a sua entrada nas ligações domiciliares, uma vez que o consumo humano pode constituir um risco potencial para a saúde, quando estiverem presentes agentes nocivos.

Há vários fatores que podem degradar a qualidade da água, tais como: a intermitência no sistema de abastecimento, que gera pressões negativas na rede; as variações de velocidade de escoamento; os vazamentos; e os rompimentos.

Os problemas da qualidade da água, em sistemas de distribuição, são fortemente influenciados por diversos fatores, que incluem: o decaimento do cloro residual; o pH; cor e turbidez. Para garantir a qualidade da água produzida e distribuída, a empresas responsáveis por esse serviço, fazem o monitoramento mensal destas características.

A desinfecção é uma das etapas mais importantes no tratamento de uma água potável, visto que permite a eliminação de todo o tipo de germes, susceptíveis de provocarem e transmitirem as mais variadas doenças. A desinfecção é normalmente realizada através da dosagem de hipoclorito de sódio. Enquanto que uma insuficiente dosagem pode não garantir a desinfecção da água, uma excessiva dosagem é responsável por cheiros e sabores desagradáveis numa água potável, a qual não se pode forçosamente considerar de boa qualidade. Desta forma é importante e imprescindível que se proceda à desinfecção de qualquer água de abastecimento público através de sistemas volumétricos de dosagem de hipoclorito de sódio, ou sistemas automáticos de controle do teor de cloro livre fiáveis, que, no primeiro caso permitem a injeção de hipoclorito proporcionalmente ao caudal de água consumido, e, no segundo caso possibilitam o controle e manutenção do teor de cloro livre na água, dentro dos valores pretendidos e desejáveis (MEDRI et al., 2012).

2.2 Controle estatístico de qualidade

Segundo Araújo (2010), os métodos estatísticos na melhoria da qualidade tiveram início com o Dr. Walter A. Shewhart na *Bell Telephone Laboratories* em 1920 que formulou o conceito estatístico de gráfico de controle. Houve uma grande expansão e aceitação do controle estatístico de qualidade na Segunda Guerra Mundial quando tornou-se necessário para melhoria e controle na qualidade do produto. O Japão foi o primeiro país a absorver e adotar em larga escala os conceitos próprios do controle estatístico.

O controle estatístico de qualidade compõe-se de um conjunto de técnicas que permitem a inspeção, identificação, monitoramento, intervenção e aprimoramento das características que refletem a qualidade na produção de bens e serviços. A sua aplicação proporciona uma melhoria contínua em diversos empreendimentos colaborando para que as informações sobre o sistema, ou seja, o estado de equilíbrio e a capacidade de gerar itens possam atender as especificações propostas (FERREIA, 2010).

O monitoramento é uma forma de avaliar a qualidade da água e prevê um levantamento de dados em pontos de amostragem, de modo a acompanhar a evolução das condições da qualidade de água ao longo do tempo (FOLLADOR et al., 2012).

2.2.1 Aspectos dos gráficos de controle

O controle estatístico de qualidade é operacionalizado por meio de gráficos de controle que são utilizadas para monitorar o desempenho de um processo a partir da definição de uma área de controle aceitável. Os gráficos de controle são utilizadas para analisar tendências e detectar padrões que venham a se repetir em um período de tempo, tendo como objetivo principal fazer distinções verificando se o processo estatístico de qualidade está sob a faixa de variação (HENNING et al., 2011).

Os gráficos de controle de qualidade são elementos visuais para o monitoramento de processos, pois conseguem detectar rapidamente alterações desproporcionais e causas especiais, sinalizando a necessidade de intervir no processo (ARAÚJO, 2010). De acordo com Montgomery (2004) são dois tipos de causas: causas especiais e causas comuns. Causas especiais são eventos que ocorrem casualmente, em períodos irregulares, e que devem ser eliminadas e reduzidas. As causas comuns são relativamente pequenas, em sua maioria alteram a variabilidade do processo, apesar de sua ocorrência a variação é inerente ao processo e são praticamente inevitáveis.

Segundo Werkema (1995), a distribuição normal é indispensável no controle de qualidade, pois os limites de controle são determinados através do denominado sistema 3σ , em que a variável de interesse segue uma distribuição normal, $\bar{x} \approx N(\mu, \sigma/\sqrt{n})$, em que 99,73% das observações estarão no intervalo $\mu \pm 3\sigma/\sqrt{n}$, quanto às observações fora deste intervalo, 0,27% são consideradas causas especiais, de acordo com a figura 2.

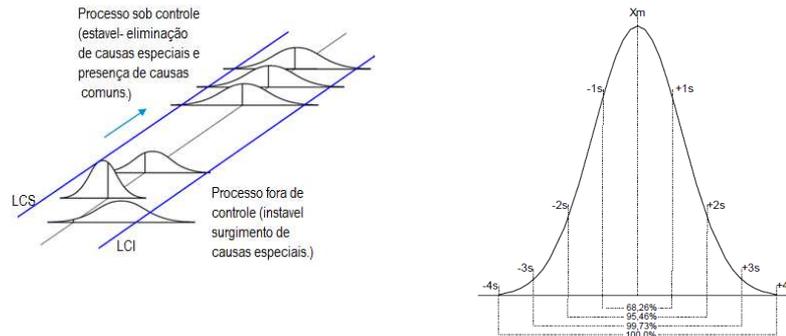


Figura 2: Representação do sistema 3σ .

2.2.1.1 Gráficos de controle univariado

De acordo com Follador (2010), os gráficos de controle univariados fazem apenas o monitoramento de uma única característica quantitativa por vez. Logo, quando existe duas ou mais características a monitorar há a necessidade de aplicar gráficos de controle para cada uma das características.

Os gráficos de controle tradicionais de Shewhart absorvem pequenas mudanças no processo, ou seja, se tornam insensível a pequenas mudanças da ordem até 1,5 desvios, em que o número de alarmes falsos aumenta, perdendo a credibilidade do monitoramento (ARAÚJO, 2010; FOLLADOR, 2010). Para essas situações Montgomery (2004) aconselha a utilização de gráficos de controle para medidas individuais, conforme ilustrado na figura 3, o gráfico de controle para medidas individuais de Shewhart.

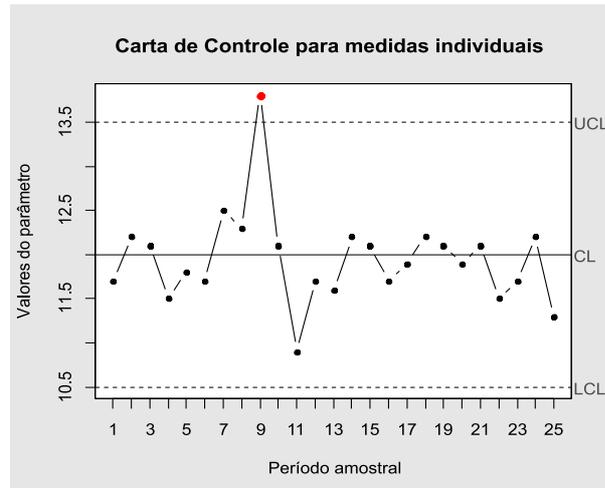


Figura 3: Gráfico de controle para medidas individuais.

Ainda segundo Araújo (2010), os gráficos de Shewhart utilizam apenas uma única informação esta concedida pelo último valor observado. Ao ignorar outras informações, que estejam contidas anteriormente, limitação tipo de gráfico, tornam-se menos eficazes para detectar pequenas mudanças no processo. Uma alternativa é a utilização de gráficos mais robustos como soma acumulativa (CUSUM) e média móvel exponencial ponderada (EWMA).

Os gráficos de CUSUM foram propostos pela primeira vez por E. S. Page em 1954 na Inglaterra tendo como objetivo principal o monitoramento da variabilidade. Desenvolvido por S. Roberts no ano de 1959, atualmente os dois são difundidos no meio acadêmico. Estes gráficos são um aperfeiçoamento do gráfico de Shewhart e utilizados para detectar de forma mais rápida as alterações nos processos (VALLE, 2011), de acordo com a figura 4.

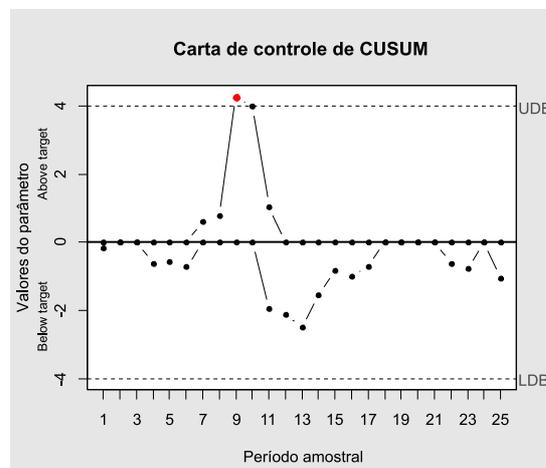


Figura 4: Gráfico de controle de CUSUM.

Segundo Alves et al. (2012), E. S. Roberts em 1959 introduziu o gráfico de controle da média móvel exponencial ponderada (EWMA), sendo uma alternativa ao gráfico de Shewhart capaz de detectar mudanças nas características de qualidade. A principal diferença entre os gráficos EWMA e CUSUM é a forma como se dispõe os dados em relação aos pesos das observações. O gráfico de CUSUM atribui peso igual para todas as observações, enquanto o gráfico de EWMA acumula informações sucessivas ponderando de forma que as observações mais recentes possuem um peso maior em relação às observações mais antigas, ou seja, o peso é concebido em ordem decrescente geometricamente da primeira até a última observação. O gráfico EWMA é de fácil aplicação em várias situações em que as observações estão correlacionadas, ilustrado na figura 5.

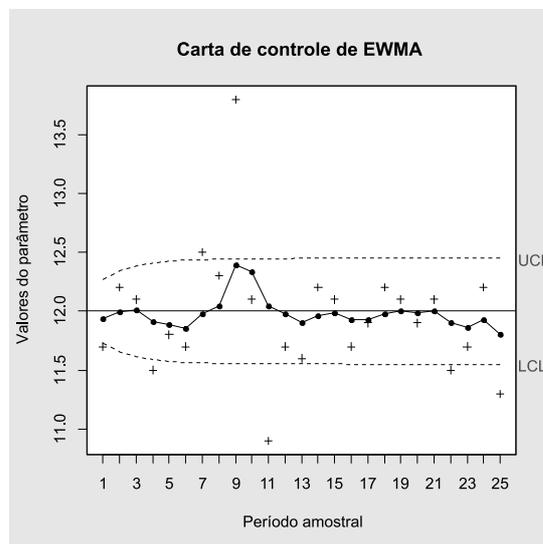


Figura 5: Gráfico de controle de EWMA.

2.2.1.2 Gráfico de controle multivariado

Segundo Konrath (2002), a utilização dos gráficos de controle multivariados estão cada vez mais difundidos no meio industrial. Esse tipo de monitoramento vem crescendo de acordo com o avanço tecnológico relacionado a manipulação de dados. Consequentemente existiu a necessidade de desenvolver ferramentas estatísticas com capacidade de absorver um maior número de informações. Os gráficos de controle multivariados tem como finalidade monitorar duas ou mais variáveis do processo. Nestes gráficos os pontos p-dimensionais são apresentados de forma unidimensional e plotados em gráficos semelhantes aos gráficos de Shewhart, conforme ilustrados na figura 6, em que reduz o trabalho de controle simultâneo das variáveis.

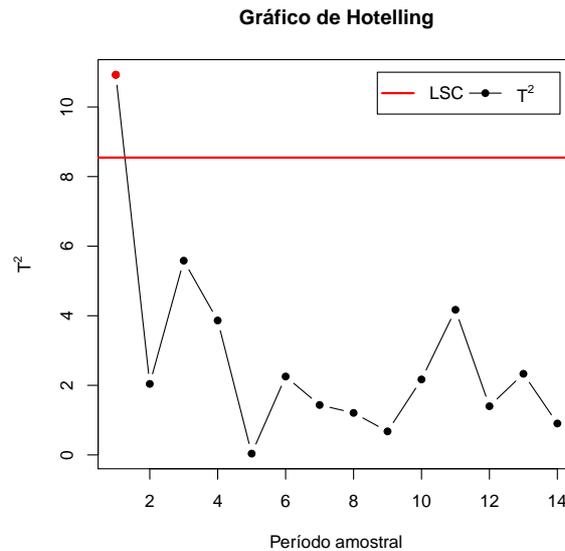


Figura 6: Gráfico T^2 de Hotelling.
 Fonte: adaptado de Mason Tracy N. & Young (1995).

O gráfico T^2 foi introduzido por H. Hotelling em 1947 em uma pesquisa pioneira sobre gráficos de controle multivariados aplicados a dados relacionados sobre a localização de bombardeios na Segunda Guerra Mundial (KONRATH, 2002).

2.2.2 Interpretação dos gráficos de controle

Segundo Werkema (1995), existem critérios que indicam a possível falta de controle dentro do processo. Quando se encontra pontos fora dos limites de controle é a indicação que há necessidade de uma imediata investigação para identificar a causa responsável de suas ocorrências. A periodicidade é a repetição de uma tendência para cima e para baixo em determinados intervalos de tempo e de amplitudes semelhantes.

A sequência é uma caracterização em vários pontos consecutivos do gráfico de controle que se apresentam em apenas um dos lados das linha da média. De acordo com Nomelini, Ferreira e Oliveira (2009) as sequências são consideradas anormais são:

- Sete ou mais pontos consecutivos.
- Uma sequência com menos de sete pontos consecutivos, em que pelo menos dez de onze pontos consecutivos se apresentem do mesmo lado da linha média.
- Pelo menos doze de quatorze pontos consecutivos se apresentarem do mesmo lado da linha média.

- Pelo menos dezesseis de vinte pontos consecutivos se apresentarem em um mesmo lado da linha da média.

A tendência é caracterizada por um comportamento contínuo dos pontos do gráfico de controle em uma direção ascendente ou descendente.

Mistura ou aproximação dos limites de controle é a ocorrência de dois ou mais pontos que tendem a cair fora dos limites 2σ mesmo em que pontos se apresentem dentro dos limites de controle 3σ (WERKEMA, 1995).

Estratificação ou aproximação da linha média é caracterizada quando os pontos, na sua maioria, estão distribuídos próximos a linha média apresentando-se dentro das linhas centrais 1.5σ , sendo a variabilidade menor que a esperada, logo, a aproximação da linha média não significa que o processo está sobre controle, mas a mistura de dados provenientes de populações distintas (WERKEMA, 1995; NOMELINI; FERREIRA; OLIVEIRA, 2009).

3 Material e Métodos

3.1 Área de estudo

O objeto desse trabalho foi desenvolvido no sistema de abastecimento de Campina Grande cidade paraibana de aproximadamente 400 mil habitantes, um dos mais importantes centros urbanos e renomado núcleo de tecnologia do interior do Nordeste. Esse sistema de abastecimento urbano é administrado pela CAGEPA - Companhia de Águas e Esgotos do Estado da Paraíba, empresa pública estadual.

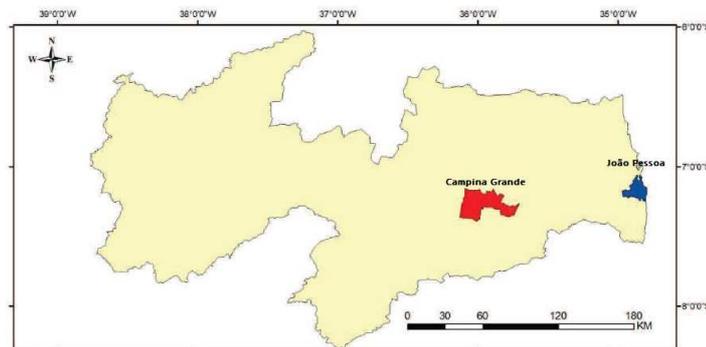


Figura 7: Localização de Campina Grande/PB/Brasil.

O sistema inicia com a captação na Barragem Epitácio Pessoa, mais conhecido como Boqueirão, onde através de uma junção partem duas adutoras de água bruta de 1100 e 900mm por gravidade até duas estações elevatórias de água bruta de onde saem duas adutoras de 900mm e 800mm fornecendo água para a ETA (Estação de Tratamento e Abastecimento) em Gravatá com comprimento de 21km e vazão máxima de $61000m^3/\text{dia}$. A ETA de Gravatá tem a capacidade de tratamento máxima de $5344,56m^3/h$. A localização da estação de tratamento é no Município de Queimadas-PB, às margens da rodovia PB-148.

O reservatório localizado no bairro de Santa Rosa em Campina Grande tem capacidade de armazenamento de água tratada de $40.000m^3$. É o principal centro de reserva e distribuição de água tratada para os demais reservatórios existentes em todo o sistema

de abastecimento de Campina Grande, num total de 29 reservatórios elevados e semi-enterrados, que vão abastecer uma malha de 450 km de rede de distribuição de água com um total de 83.500 ligações domiciliares e uma demanda média de $60890,4m^3/\text{dia}$ (ALBUQUERQUE; FIRMINO; CURI, 2004).

A avaliação da água no abastecimento da cidade de Campina Grande foi realizada por meio de uma pesquisa bibliográfica, com os dados disponibilizados pela CAGEPA no site <http://www.cagepa.pb.gov.br>, no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2013 perfazendo 36 amostras. A companhia - CAGEPA possui para controle da qualidade da água distribuída, Pontos de Controle de Qualidade P.C.Qs, que são pontos distribuídos no residencial, principalmente em pontos finais de rede e têm como objetivo de favorecer a coleta de amostra de água, para o controle de qualidade da água na rede de abastecimento. Também possibilita a imediata detecção de quaisquer problemas existentes. Nestes pontos são avaliados cloro residual, pH, turbidez e cor. Mensalmente é escolhido um ponto da rede para realização de análises de potabilidade por laboratório externo.

3.2 Teste de normalidade

Os testes paramétricos devem atender a uma pressuposição de normalidade, sendo por isto importante verificar antes da análise se os dados amostrais são aproximadamente normais para decidir-se pela utilização de um teste paramétrico.

3.2.1 Teste de Kolmogorov-Smirnov

O objetivo desse teste é verificar o grau de concordância entre distribuição de um conjunto de valores e uma distribuição teórica, por exemplo, verificar se os dados seguem uma distribuição normal. O teste de Kolmogorov-Smirnov admite que a distribuição da variável que está sendo testada seja contínua. A distribuição teórica representa o que seria esperado sob H_0 . Então se verifica, as distribuições teórica e observada mostram concordância (SCUDINO, 2008).

Seja $F_0(X)$ uma função especificada de distribuição de frequências relativas acumuladas a distribuição teórica sob H_0 . Para qualquer valor de X , o valor de $F_0(X)$ é a proporção de casos esperados com escores menores ou iguais a X .

Seja a distribuição de frequências relativas acumuladas observada, S_n , de uma amostra aleatória de N observações. Seja um escore qualquer possível, X_i , então $S_n(X_i) = \frac{F_i}{N}$, onde

F_i é o número de observações menores ou iguais a X_i . As hipóteses do teste são descritas como:

H_0 : A amostra é proveniente de uma distribuição teórica específica;

H_1 : A amostra não é proveniente de uma distribuição teórica específica.

Quando H_0 é verdadeira, espera-se que as diferenças entre $S_n(X_i)$ e $F_0(X_i)$ sejam pequenas e estejam dentro do limite dos erros aleatórios. A estatística do teste, expressa na equação 3.1, focaliza o maior dos desvios denominados de desvio máximo:

$$D = \max |F_0(X_i) - S_n(X_i)|, \quad (3.1)$$

em que $i = 1, 2, \dots, N$, verificando-se a hipótese do poder do teste p – *valor*, então a normalidade da amostra é verificada. Se $D < D_{(N,\alpha)}$ não rejeita-se a H_0 , ou seja, a amostra é proveniente de uma distribuição normal. Caso contrario $D > D_{(N,\alpha)}$ é rejeita-se H_0 , ou seja, a amostra não é proveniente de uma distribuição normal.

3.2.2 Teste de Anderson-Darling

O teste de Anderson-Darling é um teste amplo de função e de distribuição empírica para a hipótese nula de normalidade. A estatística do teste é definida de acordo com a equação 3.2:

$$A^2 = -N - S, \quad (3.2)$$

em que S é expresso de acordo com a equação 3.3,

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad (3.3)$$

em que F é a distribuição cumulativa dos dados.

As hipóteses do teste são descritas como:

H_0 : Os dados seguem uma distribuição teórica específica;

H_1 : Os dados não seguem uma distribuição teórica específica.

Os valores críticos para o teste Anderson-Darling são dependentes da distribuição específica, sendo testada. Testar a hipótese da distribuição é feita de uma forma específica é rejeitada se a estatística de ensaio, A^2 for superior ao valor crítico.

3.2.3 Teste de Shapiro-Wilk

O teste de Shapiro-Wilk é baseado na estatística w da seguinte equação 3.4.

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.4)$$

em que x_i são valores da amostra ordenados ($x_{(1)}$ é o menor). Pequenos valores de W são evidências de que os dados seguem uma distribuição normal. E a_i são constantes geradas das médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra aleatória de tamanho n de uma distribuição normal.

Sendo X a variável em estudo, então formula-se as hipóteses:

H_0 : X tem uma distribuição Normal.

H_1 : X não tem uma distribuição Normal.

3.3 Autocorrelação

Para a aplicação dos gráficos de controle é necessário que os dados atendam a suposição de independência entre si, sendo de extrema importância a investigação da autocorrelação do grupo de informações. A presença da autocorrelação compromete o desempenho dos gráficos de controle, no sentido em que se podem confundir as causas especiais e comuns processo.

Segundo Montgomery (2004), para contornar o problema da autocorrelação pode-se utilizar uma amostra menos frequente acarretando um aumento no tempo para detectar uma variação real do processo.

Dentro do controle estatístico de processo existem dois princípios básicos para contornar autocorrelação. O primeiro determina uma abordagem dos dados originais, mas devem-se ajustar os limites de controle para absorver a autocorrelação, sendo denominado de alargamento dos limites. O segundo princípio defende uma abordagem de plotagem dos resíduos do modelo de série temporal no gráfico de controle (ARAÚJO, 2010). Esse modelo será adotado neste trabalho, devido a seu desempenho superior, para evitar alarmes falsos e remover a autocorrelação dos dados.

De acordo com Follador (2010), a autocorreção é definida como a medida de dependência de uma observação num estante t , em relação aquela tomada num estante $t - k$, em que k é a defasagem (*lag*) considerada, isto é, a distância entre duas observações.

Para mensurar a autocorrelação ao longo de uma série de observações distribuídas no tempo tem-se uma característica longitudinal, ou seja, uma série temporal. O coeficiente linear é dado pela equação 3.5, chamada função de correlação.

$$\rho_k = \frac{cov(x_t, x_{t-k})}{V(x_t)} \quad (3.5)$$

em que $cov(x_t, x_{t-k})$ é a covariância de observações separadas por K períodos de tempo e a variância constante é dada por $V(x_t)$. De forma geral estima-se os valores de ρ_k com a função de autocorrelação explicitada na equação 3.6.

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t-k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})^2} \quad (3.6)$$

em que x_t é observação ou média dos subgrupos no tempo t , \bar{x} é a média das amostras e $k = 1, 2, 3, \dots, .$

De acordo com a figura 8, as linhas tracejadas são os limites de dois desvios-padrão, enquanto as linhas vermelhas correspondem às amostras coletadas. Quando excede aos limites significa que os dados apresentam autocorrelação. Neste caso as amostras 1 e 6 apresentam correlação.

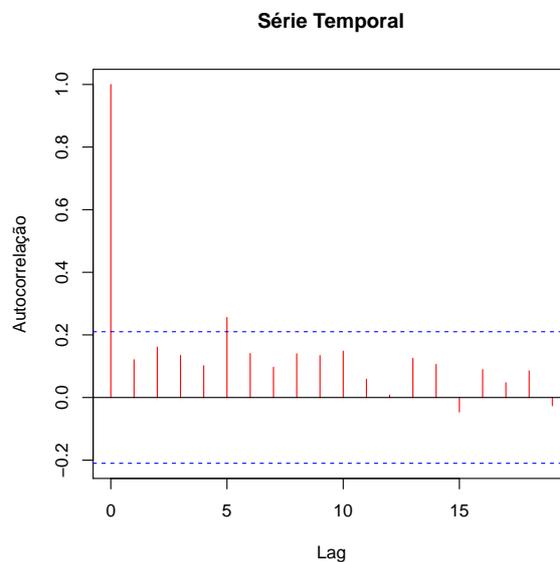


Figura 8: Gráfico de autocorrelação entre as amostras.

3.4 Modelo de Séries Temporais

Se as observações violam a suposição de independência, ocorrem alterações no ajuste das variáveis no controle de processo, pois existindo dependência entre as características de qualidade e as variáveis de controle o modelo assumido não será verdadeiro para os dados que originam do processo.

Nestas situações ocorrem um aumento considerável no número de alarmes falsos que produz conclusões erradas em relação à estabilidade do processo. Os modelos de regressão ou de séries temporais têm se revelado úteis para modelar processos que demonstrem uma estrutura correlacional, posteriormente, na utilização de gráficos de controle para os resíduos dos modelos. Se existir um conjunto de variáveis dentro de um modelo de regressão os seus resíduos não serão correlacionados mesmo que a variável resposta esteja correlacionada (PEDRINI; CATEN, 2008).

3.4.1 Modelo autoregressivo de média móvel - ARIMA

De acordo com Follador (2010), o modelo ARIMA é uma generalização do modelo auto - regressivo de média móvel (ARMA). A apresentação $ARIMA(p, d, q)$ refere-se, respectivamente, às ordens de auto regressão, de integração e de média móvel: p é o operador de autoregressivo, d é o número de diferenças, q é o números de termos da média móvel. A escolha do modelo adequado será feito mediante as estatísticas de Akaike Information Criteria (*AIC*) e Bayesiano Information Criteria (*BIC*). Logo após o modelo ajustado ARIMA, verifica-se que os resíduos do modelo são independentes, denominados de ruído branco.

Denomina-se de modelo Autoregressivo de ordem $AR(p)$ o modelo dado pela equação 3.7.

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + a_t \quad (3.7)$$

em que os termos $Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-p}$ são independentes de a_t , ϕ_1 é o parâmetro (peso) que descreve como Z_t se relaciona com o valor para Z_{t-1} (a série de dados) e a_t é o erro aleatório. ARIMA A versão mais clássica é o modelo de ordem 1 ou $AR(1)$, dado pela expressão 3.8.

$$Z_t = \phi Z_{t-1} + a_t \quad (3.8)$$

A metodologia implantada de Box e Jenkins para construção de modelos ARIMA é composta por três passos:

1. Identificação;
2. Estimação;
3. Verificação.

Logo, o passo 1 é mais relevante pois nele se determina os valores de p , d e q . Esta determinação é feita mediante as autocorrelações e autocorrelações parciais estimadas, as quais espera-se que represente adequadamente as verdadeiras quantidades teóricas que são desconhecidas.

3.5 Gráficos de controle

De acordo com Montgomery (2004), diversas características de qualidade podem ser mensuradas. Como uma característica de qualidade é uma variável, que em geral se faz necessário monitorar tanto o valor médio da característica de qualidade como sua variabilidade, para isso, gráficos de controle são amplamente utilizados.

3.5.1 Gráfico de controle de medida individual - Shewhart

O gráfico de controle, numa visão geral, é composto por LIC e LSC , limites inferior e superior de controle, respectivamente, determinados estatisticamente, a partir da média, e as amplitudes das amostras são função da variabilidade do processo. Em seguida, as equações 3.9, 3.10 e 3.11, que mostram os limites superior, linha média e limite inferior de controle (MONTGOMERY, 2004):

$$LSC = \mu + 3\frac{\overline{AM}}{d_2} \quad (3.9)$$

$$LC = \mu \quad (3.10)$$

$$LIC = \mu - 3\frac{\overline{AM}}{d_2} \quad (3.11)$$

em que:

- LC - linha média;
- μ - média;
- LIC - limite inferior de controle;

- AM - amplitude da amostra;
- d_2 - fator de construção de gráficos de controle para variáveis encontrado em Montgomery (2004);
- LSC - limite superior de controle.

Em muitas aplicações dos gráficos para unidades individuais usa-se a amplitude móvel de duas observações consecutivas como base para estimar a variabilidade do processo. A amplitude móvel é definida segundo a equação 3.12.

$$A = |x_i - x_{i-1}| \quad (3.12)$$

Os gráficos de controle de Shewhart fornecem uma análise simples dos dados, sendo de fácil adaptação e integração com práticas de controle já existentes nos laboratórios (SILVA et al., 2006). Nestes gráficos há baixa probabilidade de falsos alarmes e melhor capacidade de identificação de erros analíticos, por esse motivo são utilizados para uma grande gama de processos (FOLLADOR et al., 2012).

3.5.2 Gráfico de controle de soma acumulada (CUSUM)

Os gráficos de controle de soma acumulada (CUSUM) são alternativas viáveis aos gráficos de controle de Shewhart. Estes gráficos guardam informações acumuladas das amostras de um processo ponderando-as de forma equivalente, fazendo com que as amostras tenham o mesmo peso. Por esse motivo, esses gráficos se tornam sensíveis para detectar pequenas mudanças na média de um processo (LU; JR, 2001).

A técnica de soma acumulada pode ser aplicada na construção do gráfico CUSUM para observações individuais. Neste caso, a estatística utilizada é a soma acumulada dos desvios de cada valor individual com relação à medida dada pela hipótese que está sendo testada. Esta prática estabelece a hipótese que irá se testar, ou seja, conhecer-se o valor nominal, μ_0 . Conhecido este desvio, a soma acumulada é iniciada. A soma acumulada C_i , para o i -ésimo período é a soma de todos os desvios do valor nominal desde o período 1 até o período i , dada pela equação 3.13:

$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0) = (x_i - \mu_0) + C_{i-1}, \quad (3.13)$$

em que x_j é a j -ésima observação individual. O método da soma acumulada pode ser

representado de duas maneiras pelo CUSUM Tabular ou pela Máscara V.

O gráfico de CUSUM Tabular é um plano de controle de decisão intervalar bilateral simétrico que utiliza duas estatísticas unilaterais C_i^+ (plano superior) equação 3.14, para detectar mudanças positivas e C_i^- (plano inferior) equação 3.15, para detectar mudanças negativas:

$$C_i^+ = \max [0, x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+], \quad (3.14)$$

$$C_i^- = \max [0, (\mu_0 - K) - x_i + C_{i-1}^-], \quad (3.15)$$

em que K é um valor de referência (valor de tolerância ou folga) é aproximadamente a metade do valor que se tem interesse em detectar rapidamente determinado valor entre o valor pretendido μ_0 e o valor da média fora do controle μ_1 .

Esta mudança é expressa em unidades de desvio padrão como $\mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma$, logo K é metade da magnitude dessa mudança segundo a equação 3.16:

$$K = \frac{\delta}{2}\sigma = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2} \quad (3.16)$$

em que δ é o valor da mudança que se deseja detectar em unidades de desvios padrão, σ é o desvio padrão, μ_0 o valor pretendido e μ_1 o valor da média fora de controle (HAWKINS; OLWELL, 1993). Quanto menor for este fator, menor será a faixa de variação que o gráfico será capaz de detectar e maior será a sensibilidade do gráfico. Em geral, usa-se $K = 1/2$.

O sistema estará sob controle se os valores plotados de C_i^+ e C_i^- estiverem no intervalo de decisão H . Um valor razoável para H é quatro ou cinco vezes o valor do desvio padrão σ , isto é, $H = 4\sigma$ ou 5σ .

3.5.3 Gráfico da média móvel ponderada exponencial (EWMA)

Segundo Montgomery (2004), uma alternativa para o gráfico de Shewhart quando está interessado em detectar pequenas mudanças é o gráfico de controle da média exponencial ponderada. O gráfico de controle EWMA apresenta desempenho semelhante ao do gráfico de controle somas acumulativas, e de certa forma, mais fácil de estabelecer e efetuar podendo ser utilizado com amostras de tamanho unitário.

O gráfico da média móvel exponencial ponderada é definido na seguinte equação 3.17,

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) z_{i-1} \quad (3.17)$$

em que z_i são valores ponderados da observação i e x_i é o i -ésimo valor observado, o parâmetro λ é uma constante ($0 < \lambda \leq 1$) e o valor inicial z_i é o valor alvo da média do processo, de modo que, $z_0 = \mu_0$.

Ainda a demonstração do modelo 3.17 constitui uma média ponderada, as amostras pode ser obtida desenvolvendo recursivamente a equação 3.17. Substituindo o valor de z_{i-1} , tem-se a equação 3.18.

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) [\lambda x_{i-1} + (1 - \lambda) z_2] \quad (3.18)$$

ou desta forma:

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) \lambda x_{i-1} + (1 - \lambda)^2 z_{i-2} \quad (3.19)$$

substituindo z_{i-2} pelo valor dado pela seguinte equação 3.17, tem-se que:

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) \lambda x_{i-1} + (1 - \lambda)^2 [\lambda x_{i-2} + (1 - \lambda) z_{i-3}] \quad (3.20)$$

A expressão 3.20 aponta a característica de qualidade real x_i que está presente em todas as expressões de característica da qualidade prevista para um período qualquer i , indicando que para as amostras mais remotas, a característica de qualidade real exponencialmente será menor o peso com que aparece na expressão z_i . Caso seja desenvolvido toda expressão, apenas o valor da característica prevista z_0 , que foi adotado, irá aparecer ao lado de todas as características da qualidade real. De acordo com a equação 3.21 (SILVA, 2004).

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) \lambda x_{i-1} + (1 - \lambda)^2 \lambda x_{i-2} + (1 - \lambda)^3 \lambda x_{i-3} + \dots + (1 - \lambda)^{i-1} \lambda x_0 + (1 - \lambda)^i z_0 \quad (3.21)$$

De forma geral, ou seja, generalizando a expressão 3.21 supracitada, obtém-se a seguinte expressão 3.22 :

$$z_i = (1 - \lambda)^i z_0 + \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda) x_{i-j} \quad (3.22)$$

Como a média movél exponencial ponderada (EWMA) considera como uma média ponderada todas as amostras ($n = 1$) remotas e correntes, o gráfico EWMA é insensível à hipótese de normalidade, ou seja, torna o gráfico ideal para ser usado em medidas individuais (MONTGOMERY, 2004).

Se as amostras são variáveis aleatórias independentes com variância σ^2 então a variância

de z_i , de acordo com a equação 3.23.

$$\sigma_{z_i}^2 = \sigma^2 \left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}] \quad (3.23)$$

O gráfico EWMA pode ser construído pela plotagem de z_i versus o número de amostras i . A linha central e os limites de controle para o gráfico de controle EWMA são apresentados pelas equações 3.24, 3.25 e 3.26.

$$LSC_s = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2 - \lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad (3.24)$$

$$LC = \mu_0 \quad (3.25)$$

$$LSC_i = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2 - \lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad (3.26)$$

Nas equações 3.24 e 3.26, L representa a largura ou múltiplos de sigma utilizado nos limites de controle, sendo usualmente $L = 3$. Segundo Montgomery (2004), valores de λ , no intervalo $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$, funcionam bem na prática, sendo o mais recomendável $\lambda = 0,2$.

3.5.4 Gráfico de controle multivariado T^2

Tendo o caso de p , características são medidas simultaneamente e haver a necessidade de controle. Adota-se que essas p características seguem uma distribuição normal multivariada com vetor de médias $\mu' = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)$ e a matriz de covariância Σ , onde μ_i é a média da i -ésima característica e Σ é uma matriz $p \times p$ que contém as variâncias e as covariâncias das p características.

Pode-se estimar com m observações a média μ por \bar{x} e Σ por S , onde \bar{x} é o vetor de médias amostrais das p características e S é a matriz de covariâncias amostrais para as p características (WERKER, 1997).

Ao construir o gráfico multivariado utilizando a seguinte estatística T^2 para as observações x_i , plota-se a estatística de acordo com a equação 3.27.

$$T^2 = (x_k - \bar{x})' S^{-1} (x_k - \bar{x}) \quad (3.27)$$

A distribuição da equação dada em 3.27 não é amplamente conhecida, entretanto algumas aproximações foram propostas. De acordo com Mason Tracy N. & Young (1995),

temos os limites de controle para as m observações individuais e as p características são dadas pelas seguintes equações 3.28 e 3.29,

$$LSC = \frac{(m-1)^2}{m} \beta(\alpha; p/2; (m-p-1)/2) \quad (3.28)$$

$$LIC = 0 \quad (3.29)$$

em que $\beta(\alpha; p/2; (m-p-1)/2)$ é o percentil de uma distribuição beta com parâmetros $p/2$ e $(m-p-1)/2$.

3.6 Índices de capacidade

A capacidade de um processo consiste no cálculo dos denominados índices de capacidade. Os mesmos são adimensionais que permitem quantificar o desempenho dos processos. Sendo necessário que o processo esteja sob controle estatístico e a variável de interesse tenha uma distribuição aproximadamente normal (WERKEMA, 1995).

3.6.1 Uso e interpretação do C_p

O C_p é definido de acordo com a equação 3.30, quando a variável de interesse tem uma especificação bilateral:

$$C_p = \frac{LSC - LIC}{6\sigma} \quad (3.30)$$

Em que o índice C_p relaciona aquilo que se deseja produzir ($LSC - LIC$), que corresponde à variabilidade permitida ao processo, com variabilidade natural do processo. Como σ não é conhecido, substitui-se por uma estimativa. Em geral utiliza-se $\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2$ como estimativa de σ , resultante em uma estimativa \hat{C}_p de C_p .

De acordo com Montgomery (2004), o C_p ainda pode ser interpretado da seguinte forma, explícita na equação 3.31.

$$P = \left(\frac{1}{C_p} \right) 100\% \quad (3.31)$$

em que a percentagem da faixa de especificação utilizada pelo sistema.

3.6.2 Utilização do índice C_{pk}

Segundo Werkema (1995), o índice C_{pk} avalia o processo tem capacidade de alcançar o valor nominal da especificação, pois leva em consideração a média do processo. O índice C_{pk} é interpretado como a medida da capacidade real do processo definido pela seguinte expressão 3.32.

$$C_{pk} = \text{MIN} \left[\frac{LSC - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIC}{3\sigma} \right] \quad (3.32)$$

Como μ e σ não são conhecidos, substitui-se por estimativas. Em geral, utiliza-se \bar{x} e $\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2$, respectivamente, resultando em uma estimativa \hat{C}_{pk} de C_{pk} .

3.6.3 Utilização do índice Multivariado

A avaliação da capacidade de processos multivariados é feita através da junção das informações provenientes dos índices de capacidade univariados calculados a partir de cada variável X_i , $i = 1, 2, \dots, p$, de forma separada (MINGOTI; OLIVEIRA; M.M.C, 2011). Essa junção pode ser feita via média geométrica, sendo definidos os índices multivariados de acordo com as equações 3.33 e 3.34:

$$C_{pgeom} = \left(\prod_{i=1}^p C_p(X_i) \right)^{1/p} \quad (3.33)$$

$$C_{pkgeom} = \left(\prod_{i=1}^p C_{pk}(X_i) \right)^{1/p} \quad (3.34)$$

em que C_p e C_{pk} são os índices de capacidade univariados definidos anteriormente nas equações 3.30 e 3.32.

3.6.4 Valores permitidos dos parâmetros de qualidade da água

De acordo com Júnior et al. (2007), a classificação para o reservatório Épitacio Pessoa que abastece a cidade de Campina Grande é classe II. Os valores permitidos dos parâmetros para água tratada, considerados parâmetros de potabilidade estipulados pela Resolução CONAMA 357/2005 são respectivamente: 6 a 9 para o pH, cloro residual no mínimo 0,2 mg/L em qualquer ponto da rede de distribuição e o valor máximo permitido na água potável é de 5,0 mg/L, para turbidez até 5 UT e cor o máximo é de 15uH Pt-col/L.

4 Resultados e discussão

4.1 Análise estatística dos parâmetros de qualidade da água.

A aplicação da metodologia utilizada desenvolveu-se com o uso da estatística básica, tabela 2, observando-se os parâmetros da qualidade da água considerados mais importantes, considerando a utilização da água para o consumo humano, tanto do ponto de vista estético como sanitário. Esses parâmetros foram: pH, cloro residual, cor e turbidez. Compreendido entre o período entre janeiro de 2011 a dezembro de 2013, perfazendo 36 amostras disponibilizados pela CAGEPA - Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba, na cidade de Campina Grande. A escolha destes parâmetros analisados mensalmente pela ETA (Estação de Tratamento da Água), devido a portaria 518 do Ministério da Saúde.

Todo tratamento estatístico dos dados foi realizado com ambiente GNU R (Versão 2.15.1) com auxílio dos pacotes *qcc* - Quality Control Charts, para construção dos gráficos de controle, e *forecast* para estimação do modelo ARIMA. O pacote *forecast* dispõe de procedimentos automáticos de escolha de um modelo, de acordo com o menor AIC (*Akaike Information Criteria*) encontrado.

Tabela 2: Estatística descritiva dos parâmetros da qualidade da água (CAGEPA, 2014).

Estatísticas	Variáveis			
	pH	cloro	turbidez	cor
Mínimo	6.9	0.90	0.73	1.4
Máximo	7.9	2.20	5.0	15.5
Média	7.35	1.37	1.48	6.06
Mediana	7.35	1.35	1.18	5.55
Variância	0.059	0.078	0.916	11.92
Desvio Padrão	0.243	0.280	0.957	3.45
Assimetria	0.368	0.866	2.374	0.622
Curtose	-0.743	0.526	5.332	-0.284
CV(%)	3.31	20.43	64.58	56.96

Observando-se na análise descritiva com relação ao desvio-padrão as estimativas referentes às variáveis cloro, turbidez e cor, obteve-se desvios-padrão elevados que, por consequência resulta em elevados índices de Coeficientes de Variações. Apenas para variável pH (potencial de Hidrogênio) apresentou-se de forma homogênea, logo, apresenta um Coeficiente de Variação inferior a 10%. De acordo com Pimentel (1985), isso indica uma baixa variabilidade dos dados de pH, em torno da média.

De acordo com os critérios utilizados por Pimentel (1985), Coeficientes de Variações acima de 20% indicam grande variabilidade dos dados, isto é, distribuídos de forma heterogênea os dados estão dispersos em torno da média assim como as variáveis cloro, turbidez e cor podem ser examinadas através da amplitude total, compreendido entre os valores de mínimo e de máximo. Este comportamento é explicado pelos longos períodos de estiagem nessa região, que leva os corpos d'água a saturação, ou seja, a capacidade de dissolver solução é reduzida devido a quantidade de água existente.

Com relação a assimetria e a curtose dos dados, segundo Silva et al. (2006), indicam simetria na distribuição dos dados observados, nas variáveis: pH, cloro, turbidez e cor, pois existe uma aproximação em relação à média e a mediana no caso da variável pH a média e a mediana coincidem mostrando uma simetria. Quanto a variável pH, cloro, turbidez e cor o valor da assimetria é positivo, o que mostra que a distribuição destas variáveis estão desviada para direita. Uma distribuição considerada razoavelmente simétrica tem seu coeficiente variando entre -1 e 1.

4.2 Gráficos de medidas individuais - Shewhart, CUSUM e EWMA

Os gráficos individuais para o monitoramento dos parâmetros na qualidade da água potável em Campina Grande estão representados a seguir. Os gráficos tipos Shewhart serão convencionais, com limites 3σ . O gráfico CUSUM tem limite de decisão igual a $H = 5$ e $K = 0,5$. O gráfico EWMA tem $\lambda = 0,2$ e $L = 3,0$.

Os dados originais com relação ao pH (potencial de Hidrogênio) apresentaram uma distribuição normal, ao nível de 5% significância para os testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk. Na Figura 9 estão os gráficos das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial amostral (PACF). Verifica-se que os dados são autocorrelacionados, não atendendo a suposição de independência das amostras. De acordo com Morais (2006), a suposição de independência das amostras é a mais relevante,

pois mesmo que não apresentem normalidade em grau moderado, esses gráficos ainda mostram um desempenho razoável, ao contrario da suposição de independência.

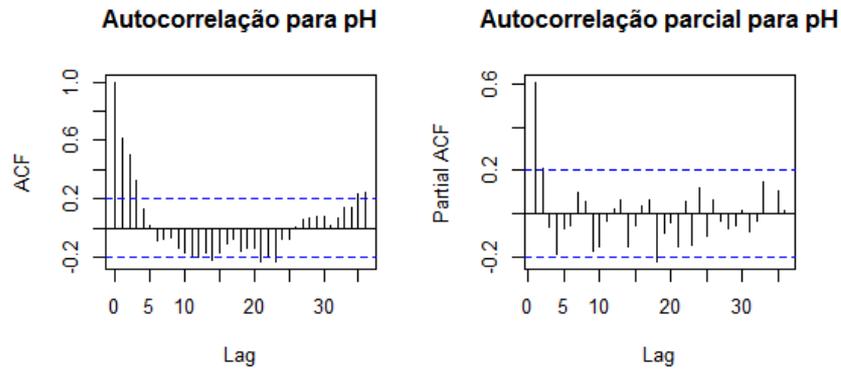


Figura 9: Gráficos de autocorrelação (ACF) e (PACF) para a variável pH.

Ajustou-se um modelo ARIMA (2,0,0), com um σ^2 estimado de 0.03821 e critério de seleção AIC= 7,47. O modelo mostrou-se adequado, pois os resíduos apresentaram uma distribuição normal e não autocorrelacionados. Continua-se o desenvolvimento do controle estatístico de processo para o monitoramento da variável pH, sem que os resultados sejam alterados pela quebra das suposições iniciais, na figura 10, encontra-se um gráfico do tipo Shewhart, na figura 11, um gráfico CUSUM e ,na figura 12, um gráfico EWMA. Estes gráficos foram aplicados aos resíduos do modelo.

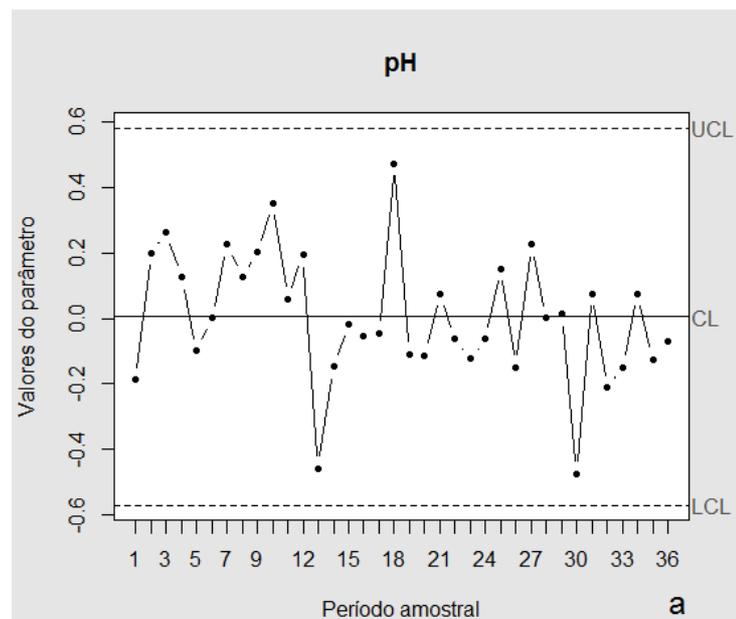


Figura 10: Gráfico de Shewhart para pH.

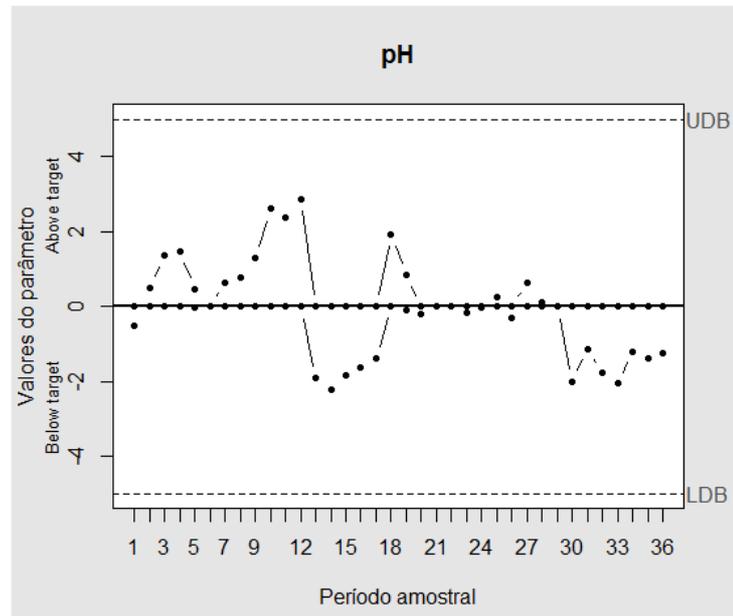


Figura 11: Gráfico de CUSUM para pH.

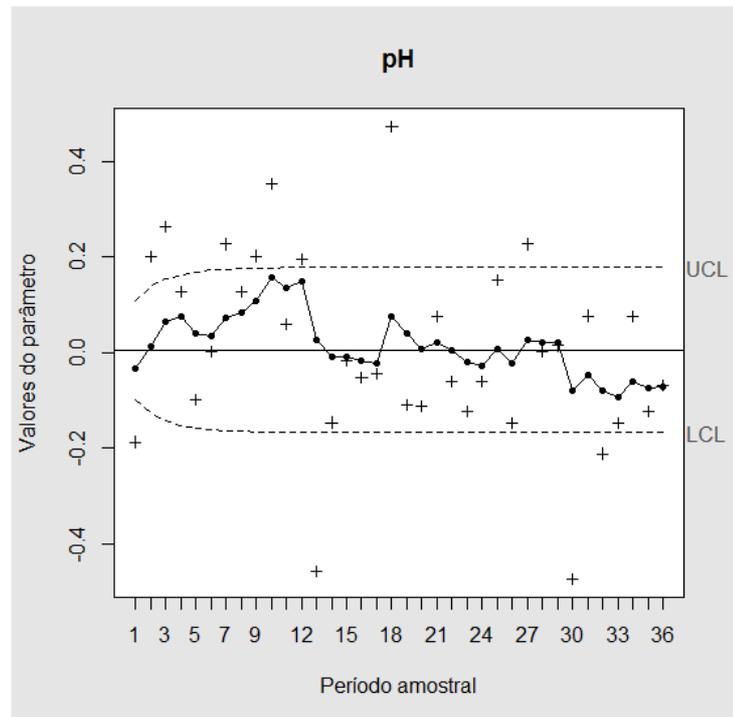


Figura 12: Gráfico de EWMA para pH.

Observa-se que os valores do parâmetro no gráfico de Shewhart se encontram dentro dos limites de controle, não caracterizando periodicidade e tendências para cima ou para baixo. Os gráficos de Cusum e EWMA não detectaram mudanças bruscas na variabilidade no decorrer do processo. Observando a tabela 2, os valores de mínimo e de máximo para pH não estipulam os padrões estabelecidos pela CONAMA que está no intervalo entre 6 e 9 para águas classe II.

Pode-se afirmar que os gráficos de pH com relação ao controle de processo estão sob o controle estatístico e não apresentam comportamento sistemático ou não-aleatório, entretanto podem apresentar descontrole devido a existência de alguns pontos sequenciais acima da linha média no gráfico de Shewhart para pH do ponto 7 ao 12.

No gráfico de CUSUM para pH, verifica-se alguns valores próximos de zero entre as amostras 21 e 30. Atribuindo-se ao fato da média não sofrer alterações, ou seja, os desvios negativos são balanceados pelos positivos, provocando uma pequena oscilação em torno do zero. De acordo com Montgomery (2004), nos gráficos de CUSUM se existe tendência para se desenvolverem acima ou abaixo, é evidência de que a média do processo mudou e deve-se procurar a causa atribuível a esse fato é observado, na figura 11, onde encontra-se alguns pontos sequenciais acima e abaixo da linha zero.

Com relação ao gráfico de EWMA para pH, este apresenta pontos que tem o desempenho que indicam uma possível instabilidade no processo, uma vez que as amostras a partir de 3 a 12 são sequenciais no intervalo de tolerância acima da linha média, em seguida, a partir do ponto 30 a 36, abaixo do intervalo de tolerância.

Os valores do parâmetro pH podem sofrer alterações devido às decomposições ácidas da poluição atmosférica, gás carbônico liberado de forma natural pelo meio ambiente ou oriundos de ações antropogênicas, que, decompostos na água, formam o ácido carbônico que conduz à redução do pH (FOLLADOR, 2010). Entretanto, nesse estudo, os valores do parâmetro pH estiveram dentro da faixa esperada, não havendo alterações significativas.

Na figura 13, apresentam-se os gráficos de autocorrelação para a variável cloro.

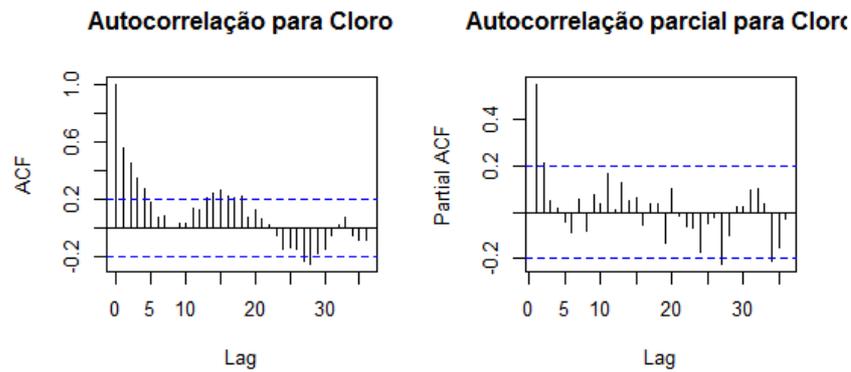


Figura 13: Gráficos de autocorrelação (ACF) e (PACF) para a variável cloro.

Os dados originais com relação ao cloro apresentaram uma distribuição normal ao nível de 5% de significância para os testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Shapiro- Wilk. Na figura 13 estão os gráficos das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial amostral (PACF). Verifica-se que os dados são autocorrelacionados. Para adquirir uma estrutura de dados com distribuição normal e não correlacionados, ajustou-se o modelo ARIMA (1,0,0) com σ^2 estimado de 0.05488 e critério de seleção AIC= 4,02. Em seguida, na figura 14, encontra-se um gráfico do tipo Shewhart, na figura 15 um gráfico CUSUM, e, na figura 16, um gráfico EWMA. Estes gráficos foram aplicados aos resíduos do modelo.

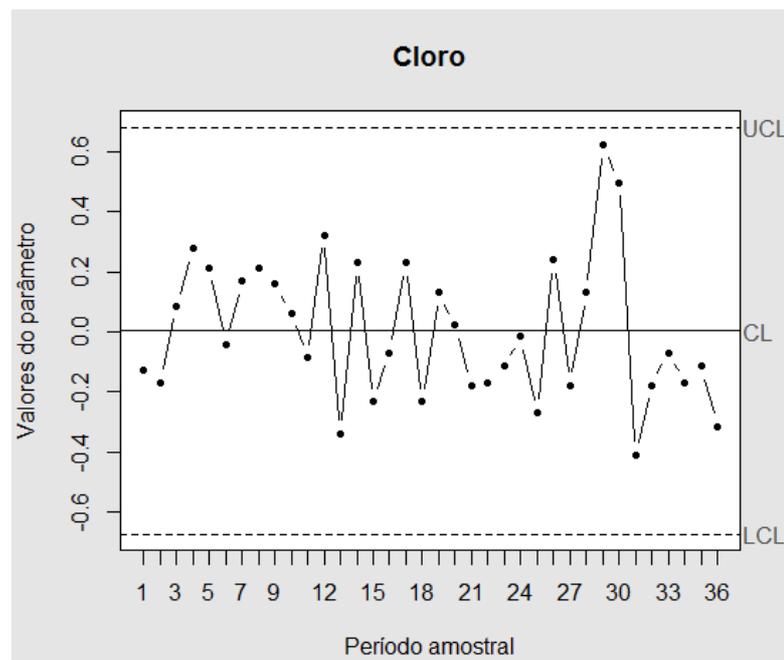


Figura 14: Gráfico de Shewhart para cloro.

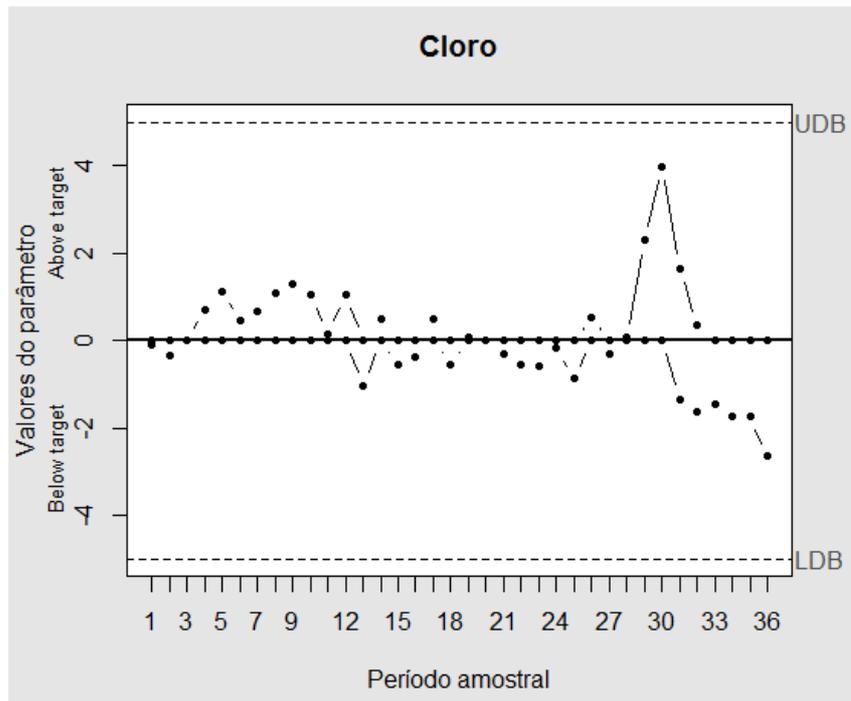


Figura 15: Gráfico de CUSUM para cloro.

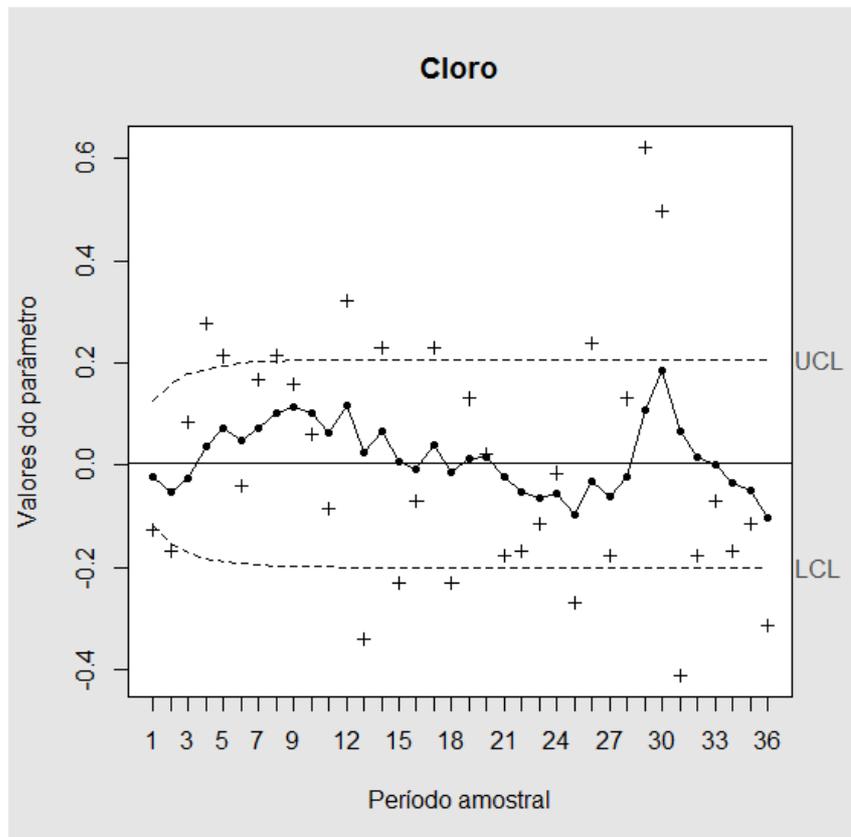


Figura 16: Gráfico de EWMA para cloro.

De acordo com os valores estipulados pela CONAMA, o cloro deve ser encontrado no intervalo de 0,5 a 2 mg/L. De acordo com a tabela 2, observa-se que o valor máximo superou 2mg/L, referente a amostra 29. Os valores do parâmetro no gráfico de Shewhart se encontram dentro dos limites de controle não caracterizando periodicidade e tendências para cima ou para baixo.

Observa-se que no gráfico de Shewhart para a variável cloro não houve a existência de pontos sequências segundo Montgomery (2004), ou seja, uma sequência de 7 pontos ou mais, acima ou abaixo da linha da média. Com relação ao controle de processo, estão sob o controle estatístico e não apresentam comportamento sistemático ou não-aleatório.

Verifica-se no gráfico de CUSUM para a variável cloro entre os pontos 15 e 24 valores próximos de zero. Por outro lado, o ponto 29 se elevou de forma brusca podendo indicar que o processo pode ter sofrido alguma mudança e estar sob a ação de causas especiais, cabendo a investigação da causa desta perturbação no processo (podendo ser atribuído a falha do analista, duplicata da amostra, entre outros fatores), levando à necessidade de ações corretivas com objetivo de levar o processo à estabilidade, em seguida, o ponto 31 em diante caracteriza uma sequência já que estes pontos se encontram abaixo da linha média.

Com relação ao gráfico de EWMA para a variável cloro, apresentam-se pontos sequenciais do ponto 4 ao 14 que se encontram no intervalo de tolerância superior, por outro lado, do ponto 21 ao 28 é encontrado no intervalo inferior, o que indica uma possível instabilidade no processo. Já a amostra no ponto 29 altera o processo aproximando do limite superior.

O cloro e seus compostos são agentes oxidantes. De forma geral, a reatividade do cloro aumenta com a redução do pH, ou seja, a reação do Cloro é inversamente proporcional ao pH. E sua velocidade de reação aumenta de acordo com a elevação da temperatura (GREEN; STUMPF, 1946). O cloro é utilizado para potabilizar a água de consumo e para eliminar agentes patogênicos causadores de doenças, tais como bactérias, vírus e protozoários que geralmente crescem nos reservatórios de abastecimento de água. Entretanto, em doses elevadas causa a redução da atividade cerebral normal, que se manifesta por sintomas como sonolência ou sedação entre outros.

Na figura 17, apresentam-se os gráficos de autocorrelação para a variável turbidez.

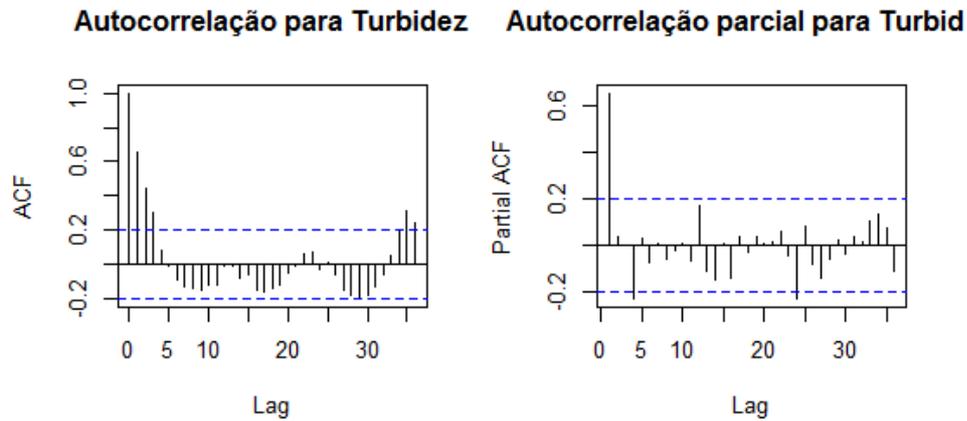


Figura 17: Gráficos de autocorrelação (ACF) e (PACF) para a variável turbidez.

Os dados originais com relação a variável turbidez não apresentaram uma distribuição normal ao nível de 5% de significância para os testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Shapiro- Wilk. Na figura 17 estão os gráficos das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial amostral (PACF). Verifica-se que os dados são autocorrelacionados. O modelo de maior adequacidade foi ARIMA(1,0,0) com um σ^2 estimado de 0.3982 e critério de seleção AIC=75,78. Na figura 18 encontra-se um gráfico do tipo Shewhart, na figura 19, um gráfico CUSUM e, na figura 20, um gráfico EWMA. Estes gráficos foram aplicados aos resíduos do modelo.

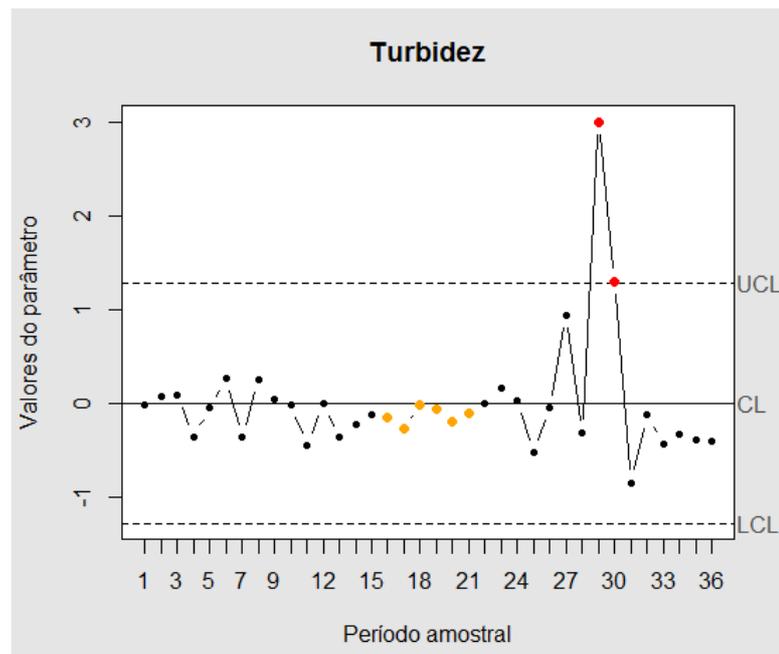


Figura 18: Gráfico de Shewhart para turbidez.

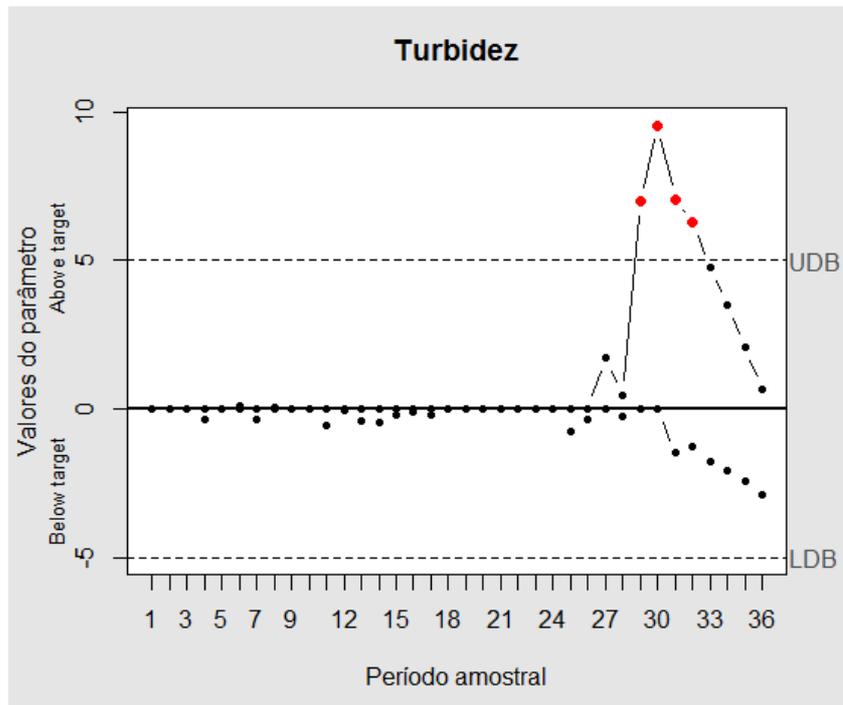


Figura 19: Gráfico de CUSUM para turbidez.

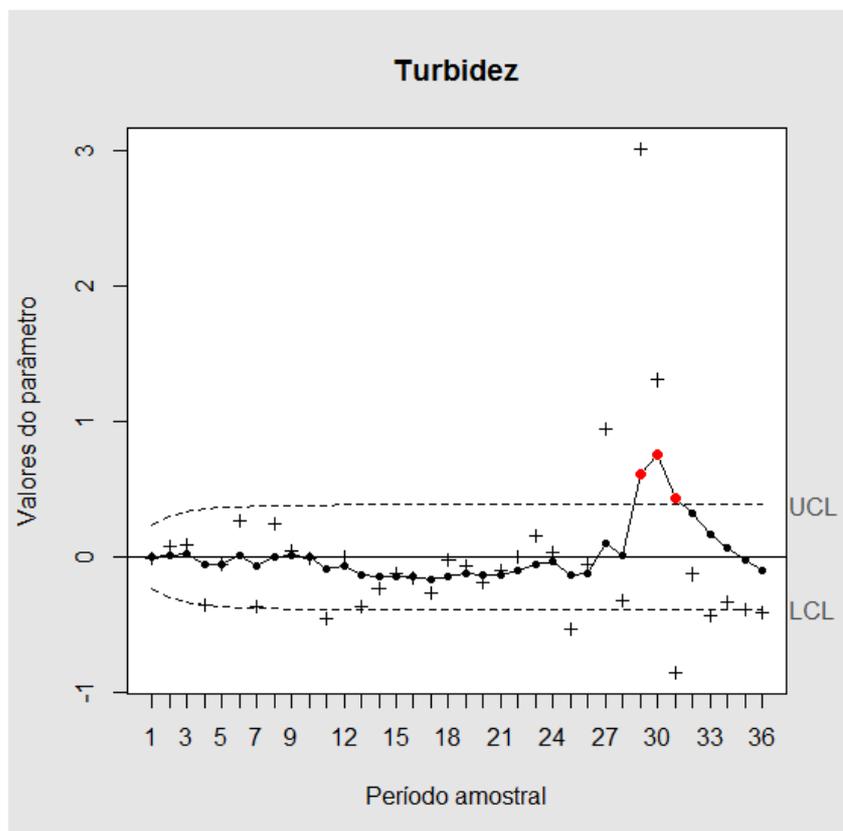


Figura 20: Gráfico de EWMA para turbidez.

No gráfico de Shewhart para turbidez foram encontrados dois pontos acima do limite superior, evidenciando diferenças de valores de alguns pontos em relação a média do processo, principalmente a partir de amostras coletadas em maio de 2011, caracterizando uma possível falta de controle no processo. Verifica-se que estes pontos acima do limite superior, ou seja, acima de 3 desvios-padrão, podem estar ligado à heterogeneidade dos dados coletados. De acordo com a tabela 2, o coeficiente de variação é de 64.58%, que, segundo Pimentel (1985), indica uma alta heterogeneidade. Nos Gráficos de controle quando verifica-se algum ponto fora do limite de controle, principalmente situado acima do limite de controle superior, deve-se uma atenção especial, pois é motivo de investigação (QUESENBERY, 1993). Os dois pontos 29 e 30 (correspondente aos meses de maio e junho de 2011), acima do limite superior corresponde respectivamente aos valores 4.53 UT e 5 UT, que conforme a determinação da CONAMA, para água potável o máximo é de 5 UT, que coincide com a amostra de número 30.

Com relação ao gráfico de Shewhart, apresentam-se pontos sequenciais abaixo da linha média, uma sequência que se encontra entre os pontos 13 e 21, o que caracteriza de acordo com Werkema (1995) uma indicação de falta de controle, com a necessidade imediata de investigação.

A Variável turbidez é caracterizada com relação a qualidade da água, a suspensão de materias, ou seja, partículas e algas dissolvidas, dificultando a penetração da luz. Neste estudo, dois valores da Turbidez estiveram fora do limite superior do controle, entretanto não se apresentou valores acima do estipulado pela CONAMA, ou seja, com relação a qualidade desta água não há problemas relacionados a materias em suspensão.

Em estudo realizado por Oliveira (2004), com relação a qualidade da água em Palmas-TO, foi encontrado valores que alcançaram até 20 UT, em períodos de maior precipitação. De acordo com Sousa et al. (2012), os meses de março a junho são os mais chuvosos, podendo ter uma relação com a turbidez devido ao processo erosivo.

Com relação ao gráfico de CUSUM para a Turbidez, observa-se que nos pontos 29 a 32 os valores tiveram uma mudança súbita de comportamento, ou seja, uma causa especial está agindo no processo. Com relação ao Gráfico de EWMA para Turbidez, verifica-se pontos sequenciais de 11 a 26, o que revela uma mudança no padrão de variação, deixando os pontos de um mesmo lado da linha.

Na figura 21, estão apresentados os gráficos de autocorrelação para a variável cor.

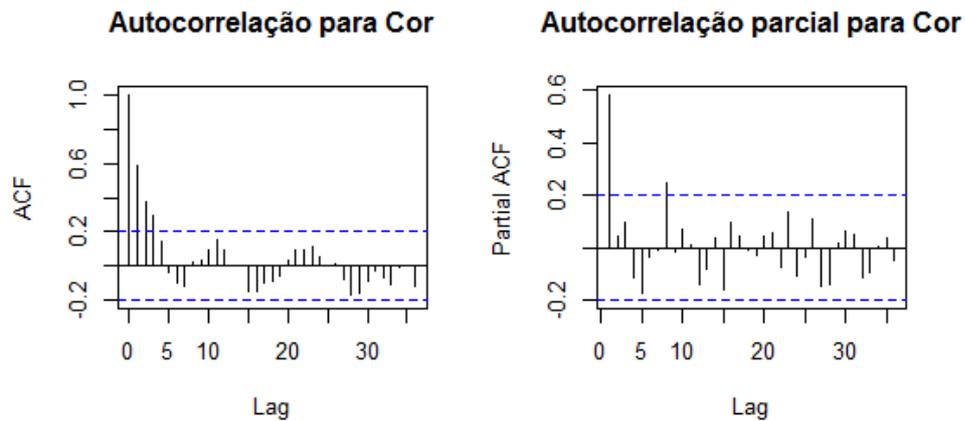


Figura 21: Gráficos de autocorrelação (ACF) e (PACF) para a variável cor.

Seguindo a metodologia proposta, foram empregados dados do resíduo ARIMA (2,0,1) com σ^2 estimado de 8.549 e critério de seleção AIC= 180.78 para a construção dos gráficos para a variável cor, para que não fosse gerado nenhum alarme falso e para que os limites fossem calculados de forma correta (ROTHSCHILD; ROTH, 1986). A suposição de normalidade foi violada nos seguintes testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Shapiro- Wilk para o nível de significância de 5%. Alguns autores afirmam que a suposição de normalidade é violada e que os gráficos de Shewhart e EWMA ainda funcionam de forma razoável (MONTGOMERY, 2004), porém não foram usados dessa maneira devido a autocorrelação existentes no mesmos visualizado na figura 21.

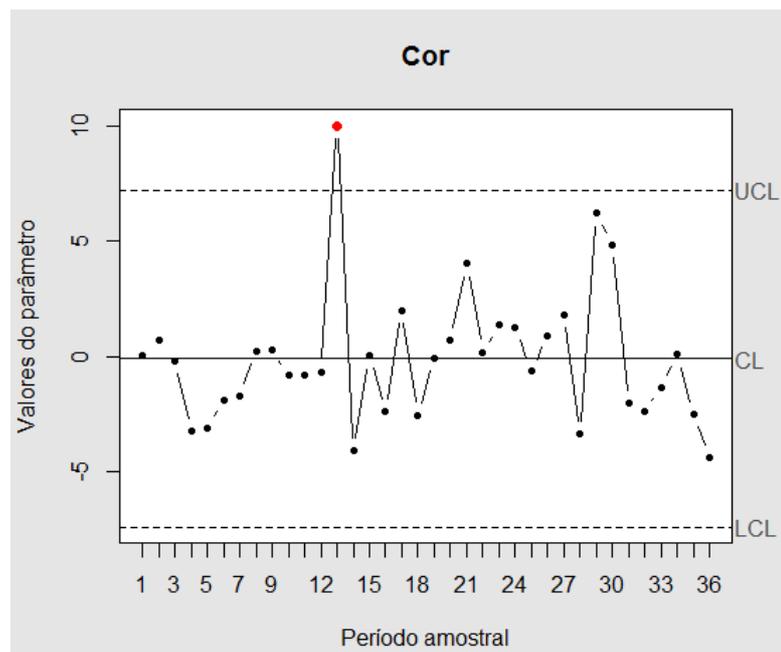


Figura 22: Gráfico de Shewhart para cor.

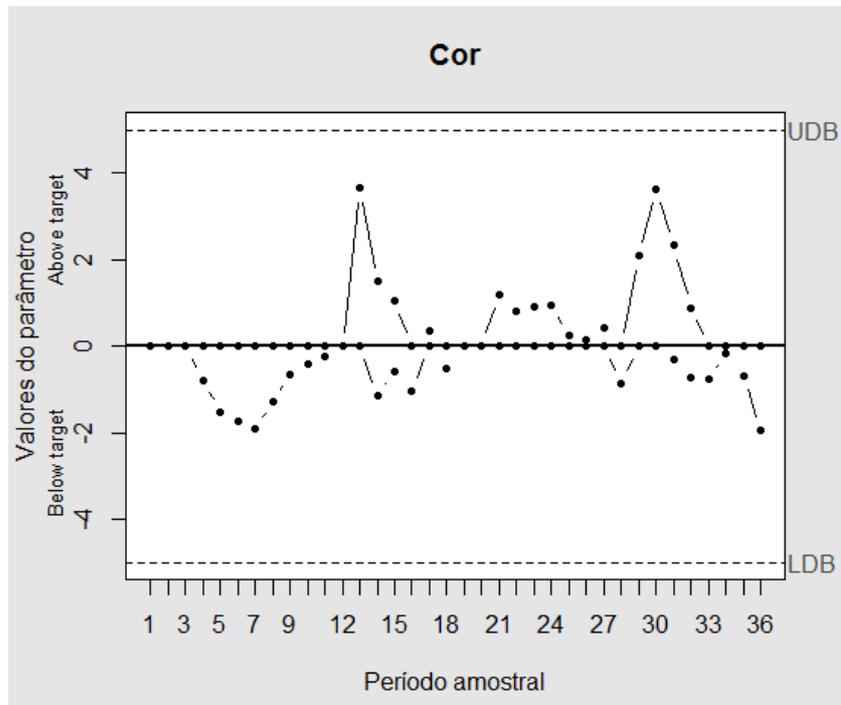


Figura 23: Gráfico de CUSUM para cor.

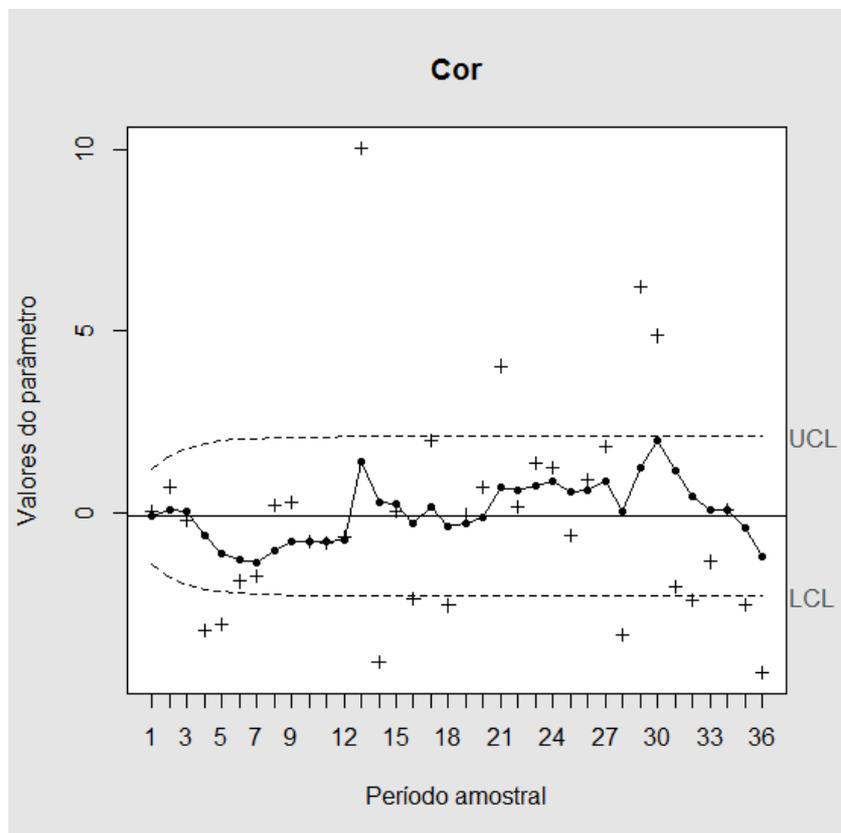


Figura 24: Gráfico de EWMA para cor.

Na figura 22, o gráfico de Sherwart ocorreu um ponto acima do limite superior, amostra de número 13. De acordo com os valores estipulados pela CONAMA o máximo é de 15uH Pt-col/L, mas a amostra não extrapola esse valor. Entretanto, não há existência de pontos sequenciais tendências ou corpotamento que indica periodicidade.

A cor é um parâmetro físico que resulta da existência, na água, de substâncias em solução; podendo ser causada pelo ferro ou manganês, pela decomposição da matéria orgânica da água, pelas algas pela introdução esgotos e industriais e domésticos.

No gráfico de CUSUM, apresentado na figura 23, verifica-se uma sequência de 7 pontos abaixo da linha média. O gráfico de EWMA, na figura 24 do ponto 4 ao 13 caracteriza uma sequência abaixo no intervalo de tolerância inferior e no superior uma sequência de 5 pontos, o que indica uma possível instabilidade no processo.

4.3 Matriz de Correlação entre as variáveis

Na tabela 3, é apresentada a matriz de correlação bivariada das variáveis de qualidade da água avaliadas nesta pesquisa.

Tabela 3: Matriz bivariada de correlação entre variáveis de qualidade da água.

	pH	cloro	turbidez	cor
pH				
cloro	-0.6266792			
turbidez	-0.2543121	0.673017083		
cor	0.2252199	-0.002117655	0.5579537	

Observa-se que a correlação entre o pH e as variáveis cloro e turbidez são negativa indicando que essas variáveis em relação ao pH são inversamente proporcionais, ou seja, na medida que a variável pH, cresce as outras variáveis (cloro, turbidez) decrescem, embora os valores encontrados estejam distantes de 1. Entretanto, as variáveis cloro e turbidez apresentaram uma correlação moderada ($r=0.673$).

4.4 Gráfico Multivariado - Hotelling

Na figura 25 é mostrado o gráfico de controle multivariado das quatro variáveis (pH, cloro, turbidez e cor) de qualidade da água potável em Campina Grande.

Observando o gráfico abaixo, percebe-se dois pontos acima do limite superior de controle em que os pontos 13 e 30 apresentam valores respectivamente de 15.84 e 22.17 sendo o limite superior de controle aproximadamente, 12.71.

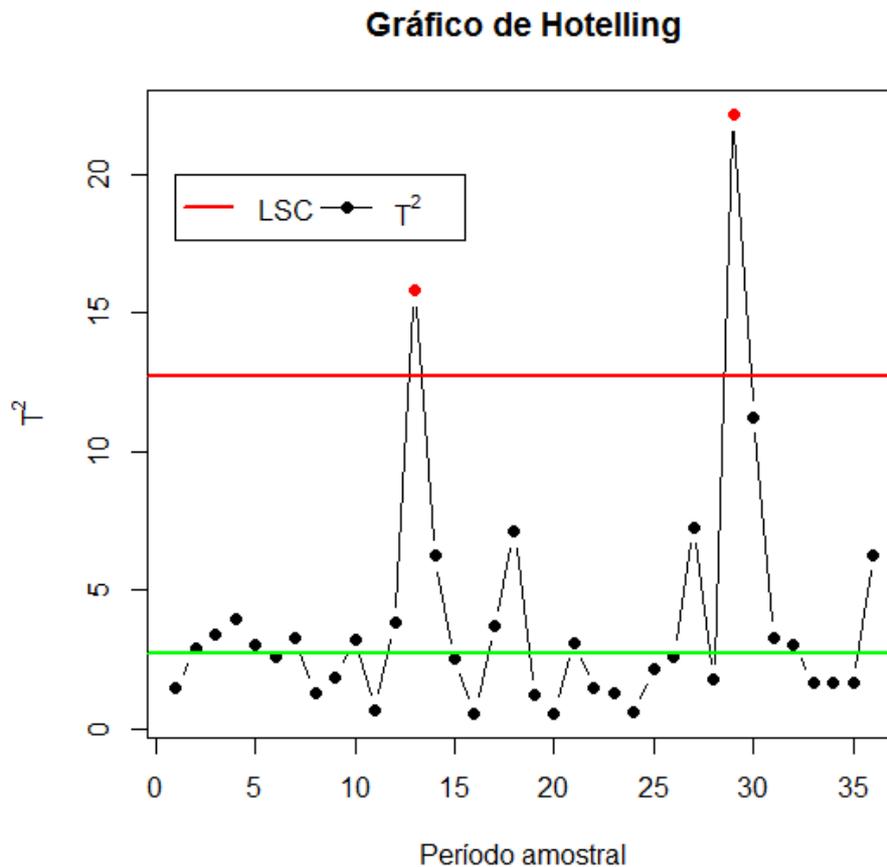


Figura 25: Gráfico de controle multivariado T^2 .

De acordo com (HAWKINS, 1991), os gráficos de Hotelling possuem uma dificuldade, eles não são imediatamente interpretáveis, pois envolvem todas as variáveis de uma única vez. Para detectar a variável ou variáveis que estão fora de controle é necessário um trabalho extra. Muitos autores, como Montgomery (2004), têm discutido formas de diagnosticar os sinais fora de controle mostrados nos gráficos de T^2 para encontrar as variáveis que levam à instabilidade do processo. Em sua maioria, sugerem usar conjuntamente p gráficos univariados, mas autores a exemplo de Mason Tracy N. & Young (1995), defendem a decomposição da estatística T^2 , pois o sinal fora de controle pode ser gerado por um efeito conjunto de variáveis.

A utilização de gráficos univariados separadamente pode contribuir para uma falsa expectativa dos valores, ao fato de que as variáveis estejam correlacionadas, pois elas

conjuntamente afetam o processo, ou seja, existe uma situação multivariada e dessa forma ocorre o erro denominado de tipo I. A probabilidade de pontos de plotagem estarem fora de controle e com valores incorretos (MONTGOMERY, 2004).

Comparado-se alguns dos valores plotados nos gráficos de controle de Shewhart, justificam-se algumas semelhanças com os pontos observados no gráfico multivariado, tendo como exemplo o ponto 30 da variável turbidez, e, também para o cloro, que no gráfico de Shewhart para essa variável a amostra é a que representa maior valor.

4.5 Índice de Capacidade de Processo

4.5.1 Índice de Capacidade Univariado

De acordo com Montgomery (2004), o cálculo da capacidade do processo para executar algumas suposições devem ser levadas em consideração, a saber, os dados devem aproximar-se de uma distribuição normal, a média do processo deve estar localizada no centro entre os limites de especificação inferior e superior do processo e o processo deve está sob o controle estatístico, neste estudo todas essa suposições foram observadas, entretanto, as variáveis turbidez e cor estão com seus processos fora de controle estatístico. Logo, não faz sentido avaliar a capacidade de processos fora do estado de controle estatístico. Assim, a capacidade de um processo só deve ser avaliada se a variação do processo for devida apenas às causas comuns.

As figuras 26 e 27 apresentam os resultados dos índices de capacidade do processo respectivamente para o pH e cloro.

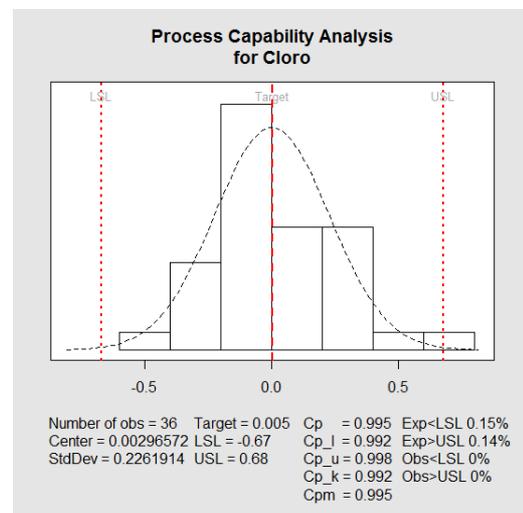
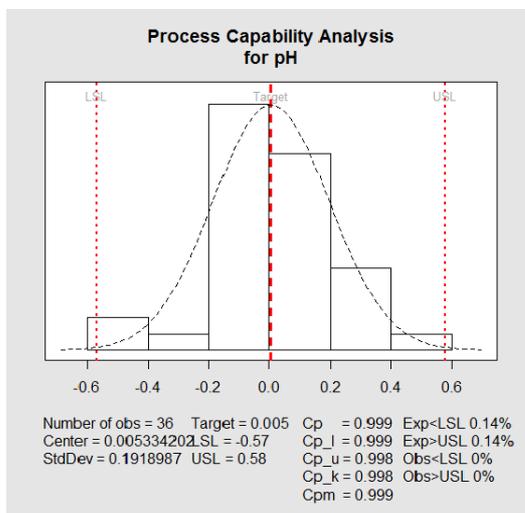


Figura 26: Índice de capacidade do pH.

Figura 27: Índice de capacidade do cloro.

Observou-se que os índices de capacidade calculados apresentaram um resultado próximo a 1 (um). Significando que o processo referente a cada variável apresenta-se incapaz, ou seja, fora dos limites especificados (MONTGOMERY, 2004), portanto, os gráficos apresentam a existência de deslocamentos na concentração dos dados colhidos em relação aos limites especificados lateralmente à esquerda e à direita da média dos valores.

Segundo Follador (2010), quando a variação do processo é muito grande, o valor da capacidade de processo é pequeno e representando baixa capacidade de processo. As variáveis, embora não apresentem nenhuma amostra fora dos valores especificados pelos limites inferiores e superiores de especificação, nos gráficos de CUSUM e EWMA, observam-se valores com grande variabilidade, tornando o processo incapaz.

Em estudos apresentados (ORSSTATTO, 2010), a partir da análise da qualidade da água no Paraná, calculando os índices de capacidade do processo para essas variáveis, encontrou-se valores para os coeficientes de pH, menores que 1, a semelhança dessa pesquisa que encontrou para esta variável valor de processo incapaz.

De acordo com a equação 3.32, para as variáveis pH e cloro a faixa de especificação é utilizada 100% por ambos os processos.

4.5.2 Índice de Capacidade Multivariado

Os valores encontrados para C_{pgeom} e C_{pkgeom} são, respectivamente, 0.497 e 0.490, salientando-se que o processo multivariado se encontra fora de controle estatístico (veja a figura 25). De acordo com Follador (2010), na literatura ainda se desconhece valores específicos para índices multivariados.

Segundo Mason Tracy N. & Young (1995), um único valor não consegue por si só avaliar se um processo está operando em conformidade com os limites de especificação determinados para o mesmo. O que faz surgir a necessidade de maiores estudos específicos a esse domínio para garantir o êxito na utilização dessa técnica. Essa ideia é defendida por vários autores estimam que o índice o índice multivariado não seja o mesmo valor do univariado, mas a tendência é que seja, todavia, menor.

O limite do estudo está no índice de capacidade multivariado, pois ainda pouco pesquisado em relação aos índices univariados, visto que a uma dificuldade em avaliar a capacidade de um processo multivariado por meio de um único valor, ou seja, índice multivariado.

5 Conclusão

Os resultados obtidos na avaliação da qualidade da água potável em Campina Grande permitem concluir que:

1. O grau de comprometimento da qualidade da água no abastecimento da cidade de Campina Grande é baixo, pois apenas a variável cloro apresentou uma única amostra superior ao limite estipulado pela Resolução 357/2005 - CONAMA, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água.

2. As variáveis apresentam em todos os pontos de controle elevada variabilidade dos dados (Tabela 2), com exceção do pH.

3. A variável pH apresentou uma distribuição normal ao nível de 5% de significância. As variáveis ph, cloro, cor e turbidez apresentaram-se amostras autocorrelacionadas, não atendendo as suposições de independência das amostras.

4. Para tratar a autocorrelação foi aplicado um modelo ARIMA e posteriormente gráficos de controle aos resíduos do modelo. A metodologia utilizada permitiu definir algumas considerações importantes, tais como uma proposta de monitoramento do nível do ph, cloro, cor e turbidez da água da cidade de Campina Grande, através do Controle Estatístico de Processo. Além disso, comparou-se a sensibilidade existente entre os gráficos de controle de Shewhart, CUSUM e EWMA na detecção de pequenas mudanças na variáveis relacionadas a qualidade da água e verificando se realmente estão dentro das especificações impostas.

5. Os gráficos CUSUM como EWMA tem como pontos positivos detectar mais rapidamente pequenos desvios e dão informações sobre a tendência do processo, sendo indicados para o monitoramento deste processo. O gráfico EWMA ainda tem uma vantagem adicional: a de ser robusto à hipótese de normalidade.

6. Dentre os gráficos utilizados Shewart, CUSUM e EWMA. O mais eficiente é o EWMA, pois se mostra maior sensibilidade às pequenas variações.

7. Nos gráficos de Shewhart, observou-se que, para as variáveis turbidez e cor os processos mostraram-se fora de controle estatístico, por apresentarem mais de dois pontos acima ou abaixo dos limites do gráfico, indicando a presença de causas especiais.

8. Nos gráficos de Shewhart, CUSUM e EWMA, para a variável turbidez verificou-se uma pequena variação inicial em torno da linha central, que a partir do ponto 28 apresentou-se uma mudança brusca de comportamento atribuído a causa especial, podendo ter relação com o processo erosivo.

9. As variáveis pH e cloro apresentaram-se dentro de controle estatístico de processo, entretanto verificou-se que os gráficos de CUSUM e EWMA indicam uma possível instabilidade para ambos os processos.

10. As correlações bivariadas entre as variáveis pH, cloro, cor e turbidez observou-se uma relação negativa entre o pH e o cloro, logo e a reação do cloro e inversamente proporcional ao pH, entre a variável pH e as variáveis turbidez e cor apresentou-se uma correlação negativa fraca. Entre as variáveis cor e turbidez apresentou-se uma correlação positiva moderada e entre as variáveis cor e turbidez uma correlação positiva.

11. Com relação ao gráfico multivariado este apresentou-se proveitoso no ponto de vista da redução do tempo no monitoramento e análise de vários parâmetros simultaneamente.

12. Para o índice de capacidade do processo observou-se que, os processos para variáveis pH e cloro não são capazes de cumprir suas especificações. As variáveis pH e cloro em ambos os processos, utilizou-se 100% da faixa de especificação.

13. O estudo limitou-se no índice de capacidade multivariado, visto que a uma dificuldade em avaliar a capacidade de um processo multivariado por meio de um único valor, ou seja, índice multivariado.

Consideração Final

Aconselha-se novas pesquisas sobre o uso das técnicas de controle estatístico, principalmente aperfeiçoamento do índice de capacidade multivariado, proporcionando, assim, uma redução de tempo no monitoramento da qualidade da água.

É importante salientar que a utilização de métodos de previsão, como, ARIMA, aplicação de gráficos de controle estatístico aos resíduos, são sofisticados, e, portanto, podem ser de difícil interpretação, necessitando de pessoas especializadas para tal fim. Para o monitoramento futuro aconselha-se também a análise da utilização de outras técnicas para tratar a autocorrelação, como limites de controle alargados ou diminuir a frequência de retirada de amostras.

Referências

ALBUQUERQUE, A. A.; FIRMINO, M. B. M.; CURI, W. F. Uso racional de energia no bombeamento de água em sistemas de abastecimento, via programação não-linear. **Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água**, IV SEREA, 2004.

ALVES, C. d. C. et al. A estatística média móvel exponencial ponderada para o controle preditivo, monitoramento e ajuste de processos. **Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa**, Rio de Janeiro, 2012.

ARAÚJO, N. G. A. d. **Aplicação de gráficos de controle para monitoramento estatístico da turbidez da água potável**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências e Tecnologia, Curso de Engenharia de Produção, Joinville, SC, 2010.

CAGEPA. **Companhia de Águas e Esgotos do Estado da Paraíba**. 2014. Disponível em: <http://www.cagepa.pb.gov.br/portal/>. Acessado em: 02/01/2014.

CAMPOS, C. R. **Monitoramento da microbiota e dos parâmetros físico-químicos em vinhoto**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola, Lavras - Minas Gerais, 2009.

CETESB. Legislação estadual, controle da poluição ambiental. **Série Legislação**, São Paulo, 1991.

CHEN, X. et al. Caracterização da qualidade da água do açude buri - frei paulo/se. **SCIENTIA PLENA**, v. 6, n. 9, 2010.

DAVE, M.; GOULART, C.; CALLISTO, M. **Bioindicadores de qualidade de água como ferramenta em estudo de impacto ambiental**. 2014. Disponível em: <http://www.icb.ufmg.br>. Acessado em: 09/02/2014.

FAY, E. F.; SILVA, C. M. M. S. Índice de Uso sustentável da água (ISA-ÁGUA) na região do sub-médio São Francisco. **Embrapa Meio Ambiente**, p. 157, Jaguariúna, 2006. ISSN 85-85771-42-9.

FERREIA, G. U. A. **Estudo de testes estatísticos para o vetor de médias em controle de processos multivariados sob amostragem dupla**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Curso de Pós-graduação em Estatística, Belo Horizonte, 2010.

FIORUCCI, A. R.; FILHO, E. B. A importância do oxigênio dissolvido em ecossistemas aquáticos. **Química e Sociedade**, 2005.

FOLLADOR, F. et al. Controle de qualidade da água medido através de cartas de controle de Shewart, CUSUM e MMPE. **Engenharia Ambiental**, v. 9, p. 183–197, Espírito Santo do Pinhal 2012.

FOLLADOR, F. A. C. **Controle estatístico de processo aplicado à qualidade de águas superficiais**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Cascavel-Paraná, 2010.

GOMES, M. A. F. Água: sem ela seremos o planeta Marte de amanhã. **Embrapa Meio Ambiente**, 2011.

GREEN, D. E.; STUMPF, P. K. A note on the enzymatic method of estimating chlorine. **Journal of American Waterworks Association**, 1306, v. 38, 1946. ISSN 1104-4023.

HAWKINS, D. Multivariate quality control based on regression-adjusted variables. **Technometrics**, v. 33, p. 61–75, 1991.

HAWKINS, D.; OLWELL, D. Cumulative sum control charting: An underutilized spc tool. **Quality Engineering**, v. 5, n. 3-4, p. 463–477, 1993.

HENNING, E. et al. Um estudo para a aplicação de gráficos de controle estatístico de processo em indicadores de qualidade da água potável. **VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**, 2011. ISSN 1984-9354.

JUNIOR, A. C. S. S. Myxosporidiose em peixes de água doce. **Estação Científica (UNIFAP)**, Macapá, n. 2, p. 25–39, 2012. ISSN 2179-1902.

JÚNIOR, W. R. S. et al. Modelagem da eficiência do tratamento de água para abastecimento público urbano através de análise de regressão multivariada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVII. João Pessoa, 2007.

KONRATH, A. C. **Decomposição da estatística do gráfico de controle multivariado T^2 de hotelling por meio de um algoritmo computacional**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação, Engenharia de Produção e Sistemas, Florianópolis, SC, 2002.

LU, C. W.; JR, M. R. R. CUSUM charts for monitoring an autocorrelated process. **Journal of Quality Technology**, April, v. 33, p. 1–22, 2001. ISSN 2317-3297.

MARTINS, C. R. et al. Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre: uma importância na queda atmosfera. p. 5, 2003. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola.

MASON TRACY N. & YOUNG, J. Decomposition of T^2 for Multivariate Control Chart Interpretation. **Journal of Quality Technology**, v. 27, p. 99 – 108, 02 1995. ISSN 0103-4014.

MEDRI, W. et al. Probabilistic sampling in the control of quality for human consumption. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 33, n. 1, p. 49–56, 2012.

MINGOTI, S.; OLIVEIRA, F.; M.M.C, C. cão. Índice de capacidade para processos multivariados independentes: extensões dos índices de Niverthi e Dey e Mingoti e Glória. **Produção**, Scielo, v. 21, p. 94–105, Belo Horizonte 2011. ISSN 0103-6513.

- MONTGOMERY, D. **Introduction to statistical quality control**. [S.l.]: LTC, 2004. ISSN 2317-3297.
- MORAIS, M. C. E. P. A. **Combined CUSUM-Shewhart schemes for binomial data**. [S.l.: s.n.], 2006. 43-57 p.
- NOMELINI, Q. S. S.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. Estudos dos padrões de não aleatoriedade dos gráficos de controle de Shewhart: um enfoque probabilístico. **Gest. Prod.**, Scielo, v. 16, p. 414–421, 2009.
- OLIVEIRA, D. A. Avaliação do teor de ferro em águas subterrâneas de alguns poços tubulares, no plano diretor de palmas. **Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, Bvsde, v. 29, p. 22–27, 2004.
- ORSSTATTO, F. **Monitoramento de uma estação de tratamento de esgoto por meio de técnicas estatísticas de controle de qualidade**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavél, Paraná, Brasil, 2010.
- PEDRINI, D. C.; CATEN, C. S. Comparação entre gráficos de controle para resíduos de modelos. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Porto Alegre-RS, v. 4, p. 123 – 140, 2008.
- PERPETUO, E. A. Characterization of the phenol monooxygenase gene from *Chromobacterium violaceum*: potential use for phenol biodegradation. **CEPEMA - Centro de Capacitação e Pesquisa em Meio Ambiente, USP**, 2009.
- PIMENTEL, G. F. **Curso de Estatística Experimental**. [S.l.]: Livraria Nobel, 1985. 467 p.
- QUESENBERRY, C. P. The effect of sample size on estimated limits for mean and x control charts. **Jornal of Quality Technology**, v. 25, 1993.
- ROTHSCHILD, B. F.; ROTH, S. R. Statistical process control of plating solutions with regression control charts. **The SAMPE Journal**, v. 22, n. 5, p. 37–41, 1986.
- SAAD, A. R. et al. Índice de qualidade da água : IQA do reservatório do tanque grande, município de guarulhos, estado de São Paulo, Brasil: 1990-2006. **Revista UnG**, Geociências, v. 6, p. 118 – 133, 01 2007.
- SCUDINO, P. A. **A utilização dos alguns testes estatísticos para Análise da variabilidade do preço do mel no municípios de Angra dos Reis e Mangaratiba, Estado do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Ciências Exatas, Curso de Graduação em Matemática, Seropédica-RJ, 2008.
- SEABRA, G. **Terra: [livro eletrônico]: Qualidade de Vida, Mobilidade e Segurança nas Cidades**. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2013. ISBN 978-85-237-0630-2.
- SILVA, W. Aplicação do gráfico de controle EWMA no processo produtivo de uma indústria de alumínio: Um estudo de caso. **XI SIMEP**, Brasil 2004.

SILVA, W. et al. Aplicação do gráfico de controle de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) para monitorar a variabilidade de um processo produtivo. **Simpósio de excelência em gestão e tecnologia**, 2006.

SOUSA, E. D. et al. A teoria da entropia na análise da precipitação no estado da paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 386–399, 2012. ISSN 1984-2295.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. [S.l.]: Editora UFMG, 2005. 25-50 p. ISSN 85-7041-114-6.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. Cienc. Cult. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Scielo, v. 55, p. 31–33, 2003. ISSN 0009-6725.

VALLE, A. M. **Aplicação de cartas de controle de médias móveis exponencialmente ponderadas (MMPE) no monitoramento de processos: um estudo de caso numa montadora de automóveis**. Dissertação (Graduação) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Curso de Engenharia de Produção Civil, CURITIBA, 2011.

WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. [S.l.]: Fundação Christiano Ottoni, UFMG, 1995. 287 p. ISSN 85-85477-15-X.

WERKER, L. Controle estatístico do processo: Abordagem multivariada para medidas individuais. **ABEPRO- Associação Brasileira de Engenharia de Produção**, 1997. ISSN 0103-4014.

ZUIN, V. G.; LORIATTI, M. C. S.; MATHEUS, C. E. O emprego de parâmetros Físicos e Químicos para a avaliação da qualidade das águas naturais: um proposta para educação química e ambiental na Perspectiva CTSA . **Química e Sociedade**, v. 31, p. 3–7, 2009.

APÊNDICE A

Tabela 4: Testes de Normalidade.

Teste	Variáveis	Valor	p-valor	Normalidade
Kolmogorov-Smirnov	pH	0.9563	0.1652	Normal
	cloro	0.0765	0.6287	Normal
	turbidez	0.2301	7.723e-05	Não-Normal
	cor	0.0807	0.5595	Normal
Anderson-Darling	pH	0.7312	0.0516	Normal
	cloro	0.6825	0.07242	Normal
	turbidez	9.398	2.2e-16	Não-normal
	cor	0.6993	0.06576	Normal
Shapiro-Wilk	pH	0.1775	0.207	Normal
	cloro	0.9687	0.02122	Não-normal
	turbidez	0.705	1.361e-12	Não-normal
	cor	0.97597	0.07333	Normal

Tabela 5: Critérios de avaliação, o modelo de melhor adequação.

Variáveis	Modelo ARIMA			
	(p,d,q)	AIC	AICc	BIC
pH	(2,0,0)	7.47	7.91	17.73
	(2,0,1)	9.29	9.95	22.11
	(2,1,0)	16.73	16.99	24.39
	(2,1,1)	18.17	18.61	28.38
cloro	(1,0,0)	4.02	4.77	8.77
	(1,0,1)	5.98	7.27	12.32
	(1,1,0)	4.02	4.77	8.77
	(1,1,1)	7.06	7.83	11.72
turbidez	(1,0,0)	75.78	76.53	80.53
	(1,0,1)	76.76	78.05	83.09
	(1,1,0)	76.53	76.91	79.64
	(1,1,1)	76.65	77.43	81.32
cor	(2,0,0)	185.64	186.93	191.98
	(2,0,1)	186.83	188.83	194.75
	(2,1,0)	180.78	181.56	185.45
	(2,1,1)	182.26	183.6	188.49

APÊNDICE B

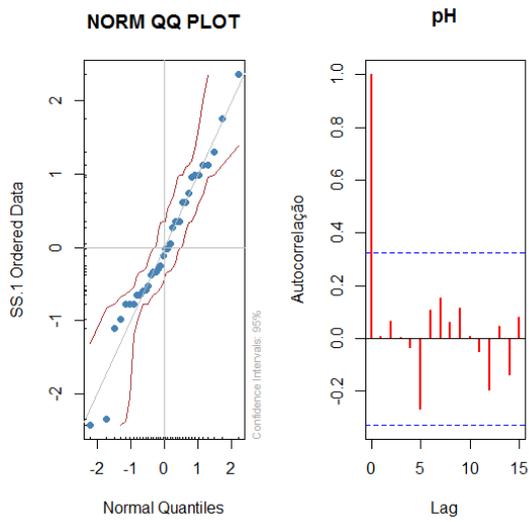


Figura 28: Resíduo do pH.

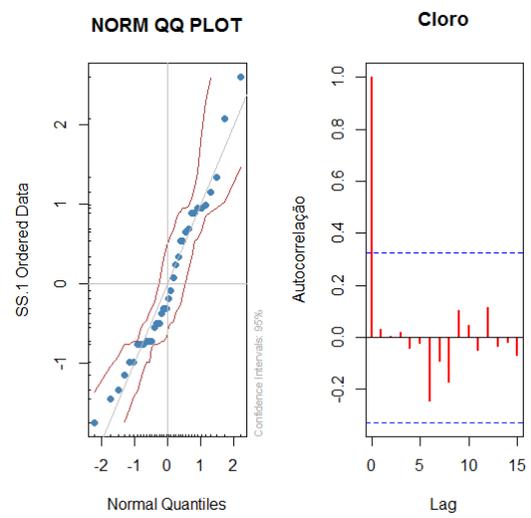


Figura 29: Resíduo do cloro.

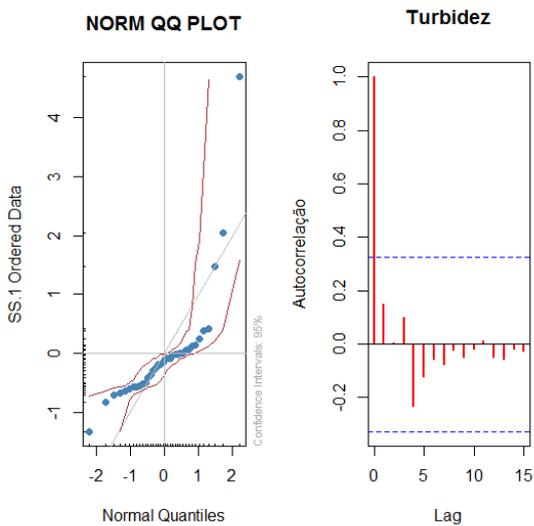


Figura 30: Resíduo do turbidez.

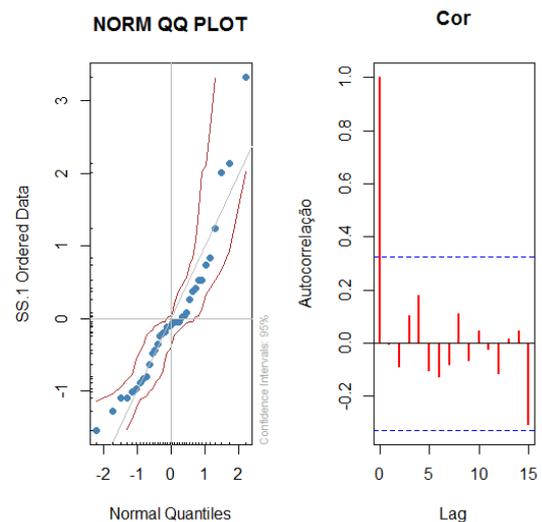


Figura 31: Resíduo do cor.