

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO APLICADO À QUALIDADE DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS

FRANCIELE ANÍ CAOVIALLA FOLLADOR

CASCADEL – Paraná – Brasil.

Julho - 2010

FRANCIELE ANÍ CAOVILO FOLLADOR

**CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO APLICADO À QUALIDADE DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração em **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas.

CASCADEL – Paraná - Brasil

Julho – 2010

Ficha catalográfica
Elaborada pela Biblioteca Central do Campus de Cascavel - Unioeste

F695c Follador, Franciele Aní Caovilla
Controle estatístico de processo aplicado a qualidade de águas superficiais / Franciele Aní Caovilla Follador— Cascavel, PR: UNIOESTE, 2010.
118 f. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas
Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Água - Qualidade. 2. Gestão ambiental – Cartas de controle. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21ed. 628.16

Bibliotecária: Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

FRANCIELE ANÍ CAOVIŁLA FOLLADOR

**CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO APLICADO À QUALIDADE DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento, aprovada pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE – Cascavel

Prof. Dr. Ricardo Nagamine Constanzi

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR – Londrina – PR

Prof. Dr. Marcelo Silva de Oliveira

Universidade Federal de Lavras, UFLA – Lavras – MG

Prof. Dr. Benedito Martins Gomes

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE – Cascavel

Profa. Dra. Simone Damasceno Gomes

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE – Cascavel

Cascavel, Julho de 2010.

BIOGRAFIA

Franciele Aní Caovilla Follador, nascida em Renascença – PR, em 17/07/1977, onde cursou o ensino fundamental terminando em 1991. Fez o ensino médio (Auxiliar de patologia clínica) no Colégio Madre Tereza em Francisco Beltrão – PR entre os anos de 1992 e 1995. É licenciada em Química pela UNICS de Palmas – PR (1995-99), onde recebeu o título de melhor aluna da turma. Especialista em Química pela mesma instituição (2000). É mestre em Engenharia Agrícola pela UNIOESTE – Cascavel (2003-05). Atualmente é doutoranda em Eng. Agrícola na UNIOESTE, *Campus* de Cascavel –PR (2006 – atual). Foi professora de escolas e colégios ministrando disciplinas de Ciências, Química e Física. Concursada na UNIOESTE, *Campus* de Francisco Beltrão, no cargo de professora desde 2002, onde ministra as disciplinas de Química e Bioquímica no Curso de Economia Doméstica. Desenvolve pesquisa na área ambiental, principalmente relacionada à qualidade da água, onde já teve trabalho premiado (Prêmio Gerdau Melhores da Terra, edição 2008, categoria estudante).

A MEUS PAIS

Luiz Caovilla,
Iolanda Dallagnol Caovilla

A MEU QUERIDO
Crysthian Henrique Caovilla

AO MEU MARIDO
Vanderlei José Follador

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela presença constante em minha vida.

Aos meus pais e sogros, Luiz e Iolanda Dallagnol Caovilla e Gelindo e Isabel Follador pela compreensão, amor, carinho, incentivo e companheirismo.

Ao meu querido filho-irmão Crysthian Henrique Caovilla e minha tia Inês pelo amor, amizade, e companheirismo durante a realização deste trabalho.

Ao meu marido Vanderlei José Follador, que está ao meu lado há muitos anos, acompanhando meu crescimento pessoal e acadêmico, aconselhando, tendo paciência, amor, carinho e incentivo.

Ao Professor Dr. Marcio Antonio Vilas Boas, pela orientação, dedicação, apoio, amizade, ensinamentos, auxílio e companheirismo em todos os momentos.

A amiga e colega de trabalho Rosangela, que teve paciência, dividindo angústias e compartilhando conhecimentos comigo, durante a realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas Clóvis, Eliane, Cláudia, Marlise, Marciane, Mariza, Ricardo, Marcelo, Fábio, Larissa, Morgana, Juliana, Mara Regina, Nichelle, Taísa, Juliano Andres que foram colaboradores e companheiros durante a realização deste trabalho.

A todos os funcionários e professores que, ao longo do curso, dedicaram-se a transmitir conhecimentos e pela amizade adquirida.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, *Campus* de Cascavel, pela oportunidade oferecida para a realização do doutorado.

CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO APLICADO À QUALIDADE DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

RESUMO

A água é um recurso natural, componente bioquímico, meio de vida de todas as espécies, componente de valores sociais e culturais, fator de produção. Sua poluição prejudica a saúde humana e o ambiente natural. Na caracterização da qualidade da água, utilizam-se algumas variáveis que representam suas características físico-químicas e biológicas, os indicadores de qualidade da água, que representam impurezas quando ultrapassam a certos valores estabelecidos. Para avaliar de forma rápida e eficiente esses dados que indicam a situação ambiental, principalmente a qualidade da água, utilizam-se técnicas de controle estatístico do processo. Desta forma, este trabalho buscou utilizar as ferramentas de controle estatístico do processo na avaliação da qualidade da água do rio Mandurim, a fim de comparar dados com a Resolução 357/2005 do CONAMA, além de identificar qual a melhor carta de controle para tal processo e calcular o Índice de Qualidade da Água - IQA, índice trófico e índice de capacidade do processo univariado e multivariado. Para avaliar a qualidade da água do rio Mandurim foi realizada pesquisa bibliográfica, bem como pesquisa de campo com dados de coletas realizadas de 2003 a 2009, perfazendo 30 amostras. O 1º ponto, situado a montante, localiza-se nas coordenadas geográficas de Latitude: 26° 11' 11" Sul e Longitude: 53° 06' 01" Oeste, a uma altitude de 637m. O 2º ponto, situado a jusante, próximo da foz do rio Mandurim, no Rio Marrecas, está localizado nas coordenadas geográficas de Latitude: 26° 08' 03" Sul e Longitude: 53° 06' 08" Oeste, e altitude de 563m. As variáveis escolhidas para avaliação da qualidade da água foram: oxigênio dissolvido, temperatura da água, coliformes fecais, coliformes totais, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, fósforo, potencial hidrogeniônico, nitrogênio, sólidos totais e turbidez. A análise dos dados se deu através de cartas de controle individuais de Shewhart, média móvel exponencialmente ponderada, soma acumulativa, multivariada e índice de capacidade de processo univariado e multivariado, índice de qualidade da água e índice trófico. Com exceção da variável pH, as demais variáveis verificadas em todos os pontos de controle apresentaram elevada variabilidade dos dados. Nas cartas de CUSUM observaram-se os parâmetros: pH, nitrogênio, DBO, sólidos totais, temperatura a jusante e OD, fósforo, turbidez a montante, em que seus processos mostraram-se fora de controle estatístico por apresentarem mais de dois pontos acima ou abaixo dos limites do gráfico. Dentre as cartas MMEP, o parâmetro OD montante e os parâmetros nitrogênio e sólidos totais jusante mostraram-se com pontos acima ou abaixo dos limites de controle, tendo sido estas cartas, seguidas pela Shewhart e CUSUM, mais eficazes quando se trabalha com qualidade de água. O gráfico de controle multivariado é vantajoso do ponto de vista do tempo no monitoramento e da análise de vários parâmetros ao mesmo tempo. As correlações bivariadas entre as variáveis de qualidade da água mostraram alta correlação entre as variáveis DQO e DBO, além de valores maiores de 0,05 na maioria dos parâmetros, justificando correlação entre as variáveis. O IQA teve como resultado a montante 91 e a jusante 86, sendo considerado de qualidade ótima. O índice de estado trófico foi considerado bom, pois abaixo de 44 apresenta baixa quantidade de matéria orgânica. Para o índice de capacidade do processo, observou-se que, com exceção do pH, nitrogênio, temperatura, sólidos a montante e jusante, os processos das outras variáveis não são capazes de cumprir as especificações. O índice multivariado apresentou como resultados 0,52 a montante e 0,41 a jusante, acompanhando o IQA, ou seja, quando o IQA aumenta o índice de capacidade de processo também aumenta.

Palavras-chave: água, capacidade de processo, cartas de controle.

STATISTICAL PROCESS CONTROL APPLIED SURFACE WATER QUALITY

ABSTRACT

Water is a natural resource, biochemical component, a way of life of all species, a source for social and cultural values, a factor of production. The water pollution harms human health and the natural environment. In the characterization of water quality, we use variables that represent physical-chemical and biological indicators of water quality, which represent impurities when they exceed established values. To assess quickly and efficiently these data that indicate the environmental situation, especially the water quality, it can use technical tools of statistical process control. Thus, this study sought to evaluate the tools of statistical process control in assessing the water quality of Mandurim water to compare with CONAMA Resolution 357/2005, and identify which is the best control chart for such a process and calculate the Index of Water Quality (WQI), trophic index, univariate and multivariate process capability index. To assess the water quality of Mandurim river it was performed a literature search and a field research with data from collections made from 2003 to 2009 totaling 30 samples. The 1st point was located upstream, in the geographic coordinates Latitude: 26 ° 11 '11 "South and Longitude: 53 ° 06' 01" West, at an altitude of 637m. The 2nd point is downstream, near the mouth of Mandurim River, Rio Marrecas, located in the geographic coordinates Latitude: 26 ° 08 '03 "South and Longitude: 53 ° 06' 08" West, and altitude of 563m. The parameters chosen to evaluate water quality were: dissolved oxygen (DO), temperature of the water, total and fecal coliforms, biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand, phosphorus, hydrogen potential, nitrogen, total solids, turbidity. The analysis of the data was through individuals Shewhart control charts, exponentiated weighted moving average (EWMA), cumulative sum (Cusum), univariate and multivariate process capability index, index of water quality, trophic index. With the exception of variable pH, the variables at all control points showed high variability in the data. In the CUSUM chart, it was observed the variables of pH, nitrogen, BOD, total solids, temperature and downstream DO, phosphorus, turbidity upstream, which processes showed to be out of statistical control by submitting more than two points above or below the limits of the chart. Among the EWMA chart, the upstream OD parameter and the nitrogen and total solids downstream parameters showed with points above or below of the control limits, and this chart was more effective when working with water quality, followed by Shewhart and CUSUM. The multivariate control chart is advantageous from the standpoint that it saves time in tracking and analyzed several parameters simultaneously. The bivariate correlations between variables of water quality showed a high correlation between the COD and BOD, beyond values greater than 0.05 in most parameters, justifying the correlation between variables. The WQI has resulted upstream 91 and downstream 86, considered as excellent quality. The TSI was considered good, since is below 44 shows a very low amount of organic matter. For the process capability index, it was observed except for pH, nitrogen, temperature, solids upstream and downstream, that the processes of the other variables are not able to meet the specifications. The results presented as a multivariate index 0.52 to 0.41 upstream and downstream, following the WQI. In the other words, when the WQI increases the capability index process also increase.

Key-words: water, process capability, control charts.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Qualidade da água	3
2.2 Índice de qualidade da água e estado trófico.....	8
2.3 Controle estatístico da qualidade.....	10
2.3.1 Monitoramento e controle estatístico de processo univariado.....	11
2.3.2 Monitoramento e controle estatístico de processo multivariado.....	18
2.3.3 Análise da capacidade de processos.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Localização e caracterização da área de estudo	25
3.2 Análise qualitativa da água.....	26
3.3 Análise estatística.....	28
3.3.1 Teste de normalidade.....	28
3.3.2 Transformação box-cox	29
3.3.3 Estudo da correlação.....	29
3.3.4 Modelo autoregressivo de média móvel (ARIMA).....	31
3.4 Gráficos de controle.....	32
3.4.1 Gráfico de controle de medida individual - Shewhart	32
3.4.2 Gráfico de controle por soma cumulativa - CUSUM.....	33
3.4.3 Gráfico da média móvel ponderada exponencial – MMEP.....	34
3.4.4 Análise bivariada	35
3.4.5 Gráfico de controle multivariado	36
3.4.6 Índice de capacidade de processo.....	38
3.4.7 Limites de especificação.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 Análise da estatística descritiva dos parâmetros de qualidade da água.....	40
4.2 Gráficos de controle - Gráficos de medidas individuais – Shewhart, CUSUM e MMEP.....	41
4.3 Matriz de correlação entre as variáveis estudadas	64
4.4 Gráfico de controle multivariado das variáveis de qualidade da água.....	66

4.5	Índice trófico, índice de qualidade da água e índice de capacidade de processo univariado e multivariado	69
5	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICES	83
	APÊNDICE A – DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO MANDURIM	84
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DE NORMALIDADE E AUTOCORRELAÇÃO	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação do estado trófico, segundo o índice de Carlson modificado	9
Tabela 2	Valores recomendados para a razão de capacidade do processo	21
Tabela 3	Pesos dos parâmetros avaliados	27
Tabela 4	Análise dos dados de estatística descritiva dos parâmetros estudados	40
Tabela 5	Comparativo entre gráficos de controle estudados	63
Tabela 6	Matriz bivariada de correlação entre variáveis de qualidade da água a montante	65
Tabela 7	Matriz bivariada de correlação entre variáveis de qualidade da água a jusante.	65
Tabela 8	Comparativo entre índices de controle univariados estudados	71
Tabela 9	Valores entre IQA e capacidade de processo	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Exemplo de gráfico de Shewhart para medidas individuais.	13
Figura 2	Exemplo de gráfico de controle MMEP.	16
Figura 3	Exemplo de gráfico de controle CUSUM.	17
Figura 4	Exemplo de gráfico de controle multivariado.	19
Figura 5	Bacia do Rio Marrecas, microbacia do Rio Mandurim e o ponto de captação de água da cidade de Francisco Beltrão.	25
Figura 6	Exemplo de gráfico de autocorrelação entre dados.	30
Figura 7	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para o pH a montante e a jusante do rio.	42
Figura 8	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM e MMEP para o OD a montante e a jusante do rio.	44
Figura 9	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para o nitrogênio a montante e a jusante do rio.	47
Figura 10	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para o fósforo a montante e a jusante do rio.	50
Figura 11	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para a DBO a montante e a jusante do rio.	51
Figura 12	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para a DQO a montante e a jusante do rio.	54
Figura 13	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para os coliformes termotolerantes a montante e a jusante do rio.	55
Figura 14	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para os coliformes totais a montante e a jusante do rio.	56
Figura 15	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para a turbidez a montante e a jusante do rio.	58
Figura 16	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para os sólidos totais a montante e a jusante do rio.	59
Figura 17	Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para a temperatura a montante e a jusante do rio.	60
Figura 18	Gráfico de controle multivariado T^2 a montante e a jusante do rio.	66

1 INTRODUÇÃO

A água está relacionada aos múltiplos aspectos da vida da civilização humana, pois o seu desenvolvimento está interligado a ela através da produção agrícola, industrial, de valores culturais e religiosos, entre outros. É um recurso natural, componente bioquímico, meio de vida de todas as espécies, componente de valores sociais e culturais, fator de produção, cobrindo 70% da superfície terrestre. A poluição da água prejudica a saúde humana e o ambiente natural (MERTEN & MINELLA, 2002; KAHRAMAN & KAYA, 2009; BACCI & PATACA, 2008).

A sociedade contemporânea vivencia diversos problemas relacionados à desuniformidade na distribuição de água no planeta, à sua utilização inadequada e às contaminações provenientes das mais diversas fontes. A poluição da água é um problema sério no contexto global. No Brasil, a poluição dos rios já é detectada em mais de 30% das cidades (BRASIL - IBGE, 2008; BRITTO & RANGEL, 2008). Segundo KAHRAMAN & KAYA (2009), cerca de 14.000 pessoas morrem diariamente no mundo vítimas de doenças veiculadas pela água contaminada.

O equilíbrio no ciclo hidrológico encontra-se ameaçado pela interferência do homem, pois são constantes os processos de degradação que acarretam mudanças nos fatores ambientais e que acabam afetando os seres vivos, como a degradação dos mananciais, o uso intensivo do solo, a aplicação direta de defensivos agrícolas, que são lixiviados para os rios, a derrubada de árvores e o assoreamento (PINTO *et al.*, 2009; KONIG *et al.*, 2008). Neste sentido, o problema de pesquisa abordado nessa tese são os impactos ambientais vivenciados, principalmente, na região Sudoeste do Paraná, onde, ao longo das últimas décadas, perceberam-se situações de degradação ambiental, no que diz respeito ao solo, à qualidade da água, à cobertura vegetal e à vida animal.

Na caracterização da qualidade da água, utilizam-se parâmetros que representam suas características físico-químicas e biológicas. Os indicadores de qualidade da água destacam impurezas quando as variáveis ultrapassam a certos valores estabelecidos (PINTO *et al.*, 2009). Neste trabalho, os valores são comparados aos parâmetros estabelecidos pelo CONAMA, e o Índice de Qualidade da Água (IQA) apresenta-se como um indicativo de qualidade.

Segundo CORBETT & PAN (2002), para avaliar de forma rápida e eficiente os dados que indicam a situação ambiental, principalmente a qualidade da água, objeto deste estudo, podem ser utilizadas técnicas de controle estatístico do processo. Estas técnicas trazem eficácia para o monitoramento ambiental. A falta de equilíbrio no controle do processo e um processo que mantivesse a eficiência e a precisão foi o que criou a proposta destas

técnicas. São muitos os tipos de análise estatística que se podem utilizar, dentre elas destacam-se a carta de controle individual (Shewhart), a carta MMEP, a carta de CUSUM e o índice de capacidade de processo univariado e multivariado, que passou a ser estudado a partir de 1993. De acordo com MICHEL & FOGLIATTO (2002), as cartas de controle são ferramentas simples e eficazes e são muito utilizadas na prática do controle de qualidade.

Com relação ao índice de capacidade de processo, que representa uma técnica de análise de um processo, estudado por CHEN, HSU & WU (2006), neste trabalho buscou-se relacioná-lo com dados de qualidade da água, enfatizando que a importância do uso do índice está na contribuição para implementação de ações que melhorem a qualidade da água, tornando os processos satisfatórios.

Neste sentido, este trabalho buscou utilizar as ferramentas de controle estatístico do processo na avaliação da qualidade da água do rio Mandurim, a fim de comparar dados de qualidade da água com a Resolução 357/2005 do CONAMA e identificar qual a melhor carta de controle para tal processo, além de calcular o IQA, índice do estado trófico e índice de capacidade do processo univariado e multivariado, preconizando que este trabalho possa contribuir para a gestão ambiental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade da água

A água encontra-se sob várias formas na natureza, cobre 70% da superfície do planeta, e é renovável através do ciclo hidrológico. Todos os organismos necessitam de água para sobreviver, implicando a disponibilidade deste recurso para suprir a necessidade da biota. A qualidade e quantidade (escassez, estiagem, cheias) são fatores intimamente relacionados, pois qualidade depende diretamente da quantidade de água existente para dissolver, diluir e transportar as substâncias benéficas e malélicas (BRAGA *et al.*, 2005). A alteração da qualidade agrava o problema da escassez (RIBEIRO *et al.*, 2005). O uso incorreto do solo, a poluição de origem agrícola, o desmatamento, a urbanização, e as alterações climáticas causadas por gases de estufa e o regime de precipitações alteram o ciclo hidrológico e afetam a disponibilidade da água (BRAGA *et al.*, 2002; STIGTER, RIBEIRO & CARVALHO DILL, 2006).

A degradação preocupa, inclusive por que a distribuição da água sobre a terra não ocorre de maneira uniforme. A água doce representa somente 0,6% em águas superficiais, subterrâneas e na forma de vapor. Na fase sólida está presente em geleiras e glaciares, totalizando 2,1%. A água salgada de mares e oceanos representa todo o restante: 97,3%. Quanto ao uso, o maior vem ocorrendo no setor agrícola, seguido pelo industrial e atividades domésticas. Além disso, é usada na geração de energia elétrica, navegação, recreação, entre outras atividades e serviços (LIBÂNIO, 2008).

A qualidade da água é representada por características de natureza física, química e biológica. Essas características, dentro de certos limites, viabilizam determinados usos. Os limites constituem critérios, padrões de qualidade. A qualidade é resultante de fenômenos naturais e da atuação do homem. Nas bacias hidrográficas, a qualidade da água é determinada em função do uso e ocupação do solo. (DERISIO, 2007).

Conforme MERTEN & MINELLA (2002, p. 34), é necessário compreender que o termo qualidade de água “não se refere, necessariamente, a um estado de pureza, mas simplesmente às características químicas, físicas e biológicas e que essas características são estipuladas para as diferentes finalidades da água”.

O monitoramento é uma das formas de avaliar a qualidade da água e prevê um levantamento de dados em pontos de amostragem, de modo a acompanhar a evolução das condições de qualidade de água ao longo do tempo. Alguns países adotam inventários de qualidade, ou seja, avaliam a cada cinco anos a qualidade. No estado de São Paulo ocorre

monitoramento mensal ou bimestral da qualidade dos recursos hídricos de superfície (DERÍSIO, 2007).

O uso de indicadores de qualidade de água consiste no emprego de variáveis que se correlacionam com as alterações ocorridas na microbacia, sejam estas de origem antrópicas ou naturais (TOLEDO & NICOLELLA, 2002).

Os parâmetros químicos, físicos e biológicos, usualmente utilizados para analisar a qualidade da água, estão relacionados a seguir: pH – que está relacionado à poluição em geral e expressa a relação entre íons. A sua faixa de variação é de 0 a 14, sendo 7,0 considerado um valor para pH neutro. Quando ocorre predominância de íons H^+ , os valores de pH são menores que 7,0, ou seja, o pH é ácido. Quando predominam íons OH^- , o pH será maior que 7,0 e tem-se pH básico. As águas superficiais apresentam pH variando entre 6,0 e 8,5, intervalo adequado à manutenção da vida aquática (BRAGA *et al.*, 2005; LIBÂNIO, 2008).

A turbidez mede o material em suspensão na água que dificulta e pode chegar a impedir a passagem de luz e é expressa em unidade nefelométrica - NTU. Pode ter origem natural, advindo de rochas, argila, silte, algas e microorganismos ou ter origem antropogênica, em despejos domésticos, industriais, erosão ou microorganismos (LIBÂNIO, 2008).

Sólidos Totais expressam a quantidade de matéria sólida, dos minerais dissolvidos ou em suspensão na água. É medido em mg/L^{-1} e podem ser oriundos de despejos domésticos ou industriais (PIVELI & KATO, 2006).

Os coliformes são parâmetros biológicos que indicam a possível presença de seres patogênicos. No caso dos coliformes termotolerantes, são medidos habitualmente em número mais provável por 100 ml e são oriundos de matéria fecal (PIVELI & KATO, 2006).

A temperatura é uma característica física da água, uma medida de intensidade de calor. Pode ter origem natural através de radiação, condução ou convecção e também está relacionada à poluição em geral. A alteração momentânea de valor da temperatura nos corpos d'água superficiais é promovida, principalmente, por despejos industriais. Sua importância está associada ao fato de que elevações de temperatura geram aumentos de taxas de reações químicas e biológicas, diminuem a solubilidade dos gases e aumentam a taxa de transferência de gases (podendo gerar mau cheiro) (BRAGA *et al.*, 2005).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO é a quantidade de oxigênio necessária à oxidação da matéria orgânica que está em suspensão ou dissolvida, pela ação de bactérias. A Demanda Química de Oxigênio – DQO é um indicador da presença de matéria orgânica, podendo ser definida como a quantidade de oxigênio necessária à oxidação da matéria orgânica por um agente químico. A origem natural deve-se à matéria orgânica de origem

animal e vegetal. O aumento da concentração deste parâmetro no corpo hídrico se deve, principalmente, a despejo de origem industrial e doméstica (DERÍSIO, 2007).

O Oxigênio Dissolvido – OD varia com a temperatura e a altitude. A redução deste parâmetro nos corpos d'água deve-se, principalmente, ao despejo de origem orgânica. É medido em mg/L^{-1} , encontra-se sob a forma de gás dissolvido e é importante para os organismos aeróbios. A origem natural deste parâmetro deve-se à dissolução do oxigênio atmosférico, produção pelos organismos fotossintéticos e a origem não-natural deve-se à fonte de poluição por despejos orgânicos (PIVELI & KATO, 2006).

O nitrogênio apresenta-se na água na forma de sólido em suspensão ou dissolvido. A origem natural deste elemento está na constituição de proteínas e clorofila, entre outros componentes biológicos. A origem antropogênica deve-se a despejos domésticos, industriais, excrementos de animais e fertilizantes. A importância de sua medição está associada a processos de eutrofização, toxicidade a peixes, quando presente na forma de amônia e por causar a doença metahemoglobinemia em bebês, quando presente na forma de nitrato. Este parâmetro é medido em mg/L^{-1} (BRAGA *et al.*, 2005).

O fósforo apresenta-se na água, principalmente, sob as formas de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico, estando na forma de sólido em suspensão ou dissolvido. Ocorre naturalmente pela dissolução de compostos do solo e decomposição da matéria orgânica. Suas outras formas de origem são oriundas de despejos domésticos, industriais, detergentes, excrementos animais e fertilizantes. Está ligado ao processo de eutrofização e também é nutriente essencial para o crescimento de microorganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. É medido em mg/L^{-1} (BRAGA *et al.*, 2005).

De acordo com CONSTAN-LONGARES *et al.* (2008), coliformes totais e *E. coli* (que pode ser considerada coliforme termotolerante) são parâmetros que mostram a contaminação biológica e são os mais eficientes no sentido de indicar patógenos presentes na água. Nesse trabalho não foi utilizado o indicador *E. coli*, mas os coliformes termotolerantes, que também têm representatividade na indicação de contaminações.

A poluição da água é entendida, portanto, como alterações de suas características por quaisquer ações ou interações, sejam naturais ou provocadas pelos homens. Estas alterações produzem impactos estéticos, fisiológicos e ecológicos. A noção de poluição deve estar associada ao uso que se faz da água e não implica necessariamente riscos à saúde dos organismos que fazem uso deste recurso afetado. Já a contaminação refere-se à transmissão de substâncias ou microorganismos nocivos à saúde pela água e não implica, necessariamente, desequilíbrio ecológico (PIVELI & KATO, 2006).

No meio rural, por exemplo, a contaminação dos rios deve-se principalmente a poluição chamada difusa, ou seja, cargas difusas, pois normalmente ocorrem despejos ao longo das margens, sendo mais difícil sua identificação e controle (BRAGA *et al.*, 2005).

Os poluentes são classificados de acordo com sua natureza e com os principais impactos causados pelo seu lançamento no meio aquático. Os poluentes orgânicos biodegradáveis são degradados pelos microorganismos presentes no meio. Se houver oxigênio dissolvido ocorrerá por bactérias aeróbicas; se não houver pelas anaeróbicas com formação de gases como o metano e sulfídrico. Quanto ao impacto de poluentes orgânicos recalcitrantes ou refratários, observa-se: compostos não biodegradáveis ou lentamente biodegradáveis encontram-se no meio aquático normalmente em concentrações não tóxicas, porém, devido à bioacumulação sua concentração nos tecidos dos organismos vivos pode ser alta, caso não possuam mecanismos metabólicos que eliminem tais compostos. Alguns exemplos são: defensivos agrícolas, detergentes sintéticos e petróleo (BRAGA *et al.*, 2005).

Os metais podem ser solubilizados pela água, podendo gerar danos à saúde, em função da quantidade ingerida. São exemplos: arsênio, bário, cádmio, cromo, chumbo e mercúrio. Um exemplo típico deste tipo de contaminação ocorreu em 1953, na baía de Minamata, Japão, onde acúmulos de compostos organomercuriais advindos de despejos industriais, no sistema nervoso humano, principalmente no cérebro e medula, devido ao consumo de peixes contaminados, causou mortes e deformações genéticas. Existem, ainda, alguns metais que, por vezes, são difíceis de serem detectados em análises, devido à profundidade em que se encontram depositados na água ou em função de concentrações diminutas, porém que podem alterar cor, sabor e odor da água para consumo. São exemplos: cálcio, sódio, ferro, manganês, alumínio, cobre e zinco (LIBÂNIO, 2008).

Os nutrientes em excesso nos corpos d'água podem levar ao crescimento excessivo de organismos aquáticos, acarretando prejuízos a determinados usos dos recursos hídricos. Chegam ao corpo d'água através de erosão do solo, fertilização artificial e decomposição de matéria orgânica. Os organismos patogênicos causam doenças em pessoas e podem levar a morte. São exemplos: bactérias, vírus, protozoários, helmintos (PIVELI & KATO, 2006).

Os sólidos em suspensão aumentam a turbidez da água, diminuindo sua transparência, reduzindo a taxa de fotossíntese e prejudicando a reprodução de peixes. Quanto ao calor, a temperatura da água afeta características físicas, químicas e biológicas do meio aquático como a densidade da água, solubilidade de gases, taxa de sedimentação do fitoplâncton, tensão superficial, reações químicas e metabolismo dos organismos aquáticos (LIBÂNIO, 2008).

Quanto à radioatividade, esta ocorre devido à presença de substâncias radioativas e de radiação que vêm do exterior, podendo ser bioacumulada nos organismos através do contato com ar, água, alimento e solo, podendo causar danos à saúde ou levar a morte (BRAGA *et al.*, 2005).

No meio aquático os poluentes sofrem diversos mecanismos físicos, químicos e biológicos que alteram o comportamento do meio e suas respectivas concentrações. Os físicos são: diluição, em que a concentração sofre diminuição; ação hidrodinâmica: comportamento não-estático do corpo d'água transportando despejos para outras regiões, variando a concentração no tempo e no espaço. A velocidade da água implica o afastamento do despejo do ponto onde foi lançado (advecção); gravidade, cuja ação altera a qualidade pela sedimentação de substâncias poluidoras em suspensão. É usada em etapas do tratamento da água; luz, sua presença é condição necessária para existência de algas, fonte de alimento no meio aquático. Responsável pela produção endógena de oxigênio, limita a fotossíntese à camada superficial. O aumento da turbidez diminui a penetração da luz; temperatura, que altera a solubilidade dos gases, cinética de reações e faz que a interação entre poluentes e ecossistema aquático seja influenciada por sua variação (BRAGA *et al.*, 2005).

Os mecanismos químicos podem ser afetados por fatores como radiação solar, temperatura, pH, catalisadores e outros. Os mecanismos biológicos são afetados pela quantidade de nutrientes disponíveis, temperatura, entre outros fatores. A ocorrência de mudanças na estrutura populacional do ecossistema pode levar a alterações na qualidade da água, como teor de oxigênio disponível, pH e outros (BRAGA *et al.*, 2005).

Os mecanismos bioquímicos tratam do equilíbrio natural entre produção e consumo, entre seres consumidores e produtores, entre reação da fotossíntese e respiração. O parâmetro oxigênio dissolvido é um dos mais importantes a ser observado para associar a característica do despejo, características do corpo d'água e produção de oxigênio. A temperatura é outro fator que intensifica os processos bioquímicos, aumentando a velocidade da decomposição (BRAGA *et al.*, 2005).

A autodepuração é um processo natural de recuperação de um corpo d'água poluído por lançamentos de matéria orgânica biodegradável. Realiza-se por meio de processos físicos (diluição, sedimentação), químicos (oxidação) e biológicos (decomposição matéria orgânica) (BRAGA *et al.*, 2005).

Vários autores realizaram trabalhos semelhantes analisando a qualidade da água de rios como CARVALHO, FERREIRA & STAPELFELDT (2004), KONIG *et al.* (2008), SANCHEZ *et al.* (2006), BUENO, GALBIATTI & BORGES (2005), GONÇALVES *et al.* (2005), PINTO *et al.* (2009), SARDINHA *et al.* (2008), ROCHA *et al.* (2006), LIU *et al.* (2008) e MENEZES *et al.* (2009).

2.2 Índice de qualidade da água e estado trófico

Um índice de qualidade da água é projetado de maneira adequada para possibilitar ao usuário comparar diferentes locais e ocasiões no tempo, em termos de degradação de qualidade (DERÍSIO, 2007). Existem vários índices que são usados como requisitos de qualidade sejam eles para a qualidade da água, planejamento, usos específicos, desenvolvidos segundo abordagens estatísticas. O índice de qualidade da água - IQA, por exemplo, foi apresentado pela 1ª. vez na literatura em 1965 por Horton, um pesquisador alemão, que utilizou esta ferramenta para avaliação de programa de redução de poluição e para a informação pública. No Brasil, o IQA mais utilizado é o desenvolvido pela CETESB que é um produtório ponderado de qualidade de água correspondente às variáveis: oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, coliformes termotolerantes, temperatura, pH, nitrogênio total, fósforo total, turbidez e resíduo total. A qualidade da água indicada pelo IQA obedece a uma escala, assim classificada: 80 a 100 – ótima; 52 a 79 – boa; 37 a 51 – aceitável; 20 a 36 – ruim; 0 a 19 – péssima. É importante destacar o uso a que o manancial será submetido, pois diante do uso é que se analisa o IQA, pois ele é considerado em função de múltiplos usos (DERÍSIO, 2007; LERMONTOV *et al.*, 2009).

Os IQAs apresentam vantagens como: sintetizar a informação, utilização de parâmetros físico-químicos, orientação de ações de gestão da qualidade da água, facilidade de comunicação com o público não técnico sobre o resultado, representa uma média de diversas variáveis em um único número que caracterize a qualidade (CETESB, 2010), deve ser considerado/analísado em função do uso do corpo hídrico analisado. As variáveis que compõem o IQA devem refletir as alterações potenciais ou efetivas e naturais ou antrópicas (TOLEDO & NICOLELLA, 2002).

Não há um indicador de qualidade de água único e padronizável para qualquer sistema hídrico. Uma forma de avaliar objetivamente essas variações é a combinação de parâmetros de diferentes dimensões, em índices que os reflitam conjuntamente, em uma distribuição amostral no espaço e no tempo (TOLEDO & NICOLELLA, 2002), dessa forma o IQA surge como alternativa de estudo para a qualidade da água.

Vários autores realizaram estudos semelhantes, calculando diversos tipos de índices de qualidade da água, como CARVALHO, SCHLITTER & TORNISIELO (2000), PINTO *et al.* (2009), KONIG *et al.* (2008), CORDOBA, MARTÍNEZ & FERRER (2010), PIASENTIN *et al.* (2009), BONNET, FERREIRA & LOBO (2008), LERMONTOV *et al.* (2009), RAMESH *et al.* (2010) e FOY, LENNOX & SMITH (2001).

Outro índice estudado é o Índice de Estado Trófico - IET. Este índice funciona como um registro das atividades humanas nas várias bacias hidrográficas, além de se constituir como uma base para o planejamento, controle da eutrofização e dos usos de bacias

hidrográficas. Trata-se de uma forma simples de analisar um conceito multidimensional que envolve critérios de oxigenação, de transparência, de nutrientes eutrofizantes, de biomassa, de composição e concentração de fitoplâncton, entre outros dados (BRAGA *et al.*, 2005).

O Índice do Estado Trófico tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas. Nesse índice, os resultados correspondentes ao fósforo - IET(P), devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo (CETESB, 2010).

De acordo com FIA *et al.* (2009), o crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas, causado pelo lançamento de grandes quantidades de nutrientes nos corpos de água, em especial nitrogênio e fósforo, é denominado eutrofização. Esse excesso de nutrientes, associado às boas condições de luminosidade, favorece o crescimento das algas e outras plantas aquáticas. A temperatura e a radiação solar podem intensificar a eutrofização.

Vários autores realizaram estudos semelhantes ao desta pesquisa calculando IET como FIA *et al.* (2009), GONZALÉZ *et al.* (2008) e LIU *et al.* (2008).

De acordo com os diferentes valores de IET, as águas podem ser classificadas como: oligotrófica, mesotrófica, eutrófica e hipereutrófica, para os quais são dados valores de classes de IET de 1 a 4, respectivamente. A Tabela 1 apresenta a classificação do índice de estado trófico.

Tabela 1 Classificação do estado trófico, segundo o índice de Carlson modificado

Critério	Estado trófico	Classes do IET
IET≤44	Oligotrófico	1
44<IET≤54	Mesotrófico	2
54<IET≤74	Eutrófico	3
IET>74	Hipereutrófico	4

Fonte: CETESB (2010).

Assim, de acordo com a produtividade biológica, classificam-se os estados tróficos conforme indicados na tabela acima. O oligotrófico significa baixa produtividade biológica e baixa concentração de nutrientes; mesotrófico: características intermediárias entre oligotrófico e eutrófico; Eutrófico: produção vegetal excessiva e alta concentração de nutrientes; hipertrófico: estado acima do eutrófico (BRAGA *et al.*, 2005).

Os impactos causados pela eutrofização sobre o ecossistema e a qualidade da água estão ligados à diminuição da diversidade biológica, crescimento de algas azuis, baixos teores de oxigênio dissolvido que alteram a composição de espécies de peixes no meio, concentração de compostos orgânicos dissolvidos que provoca sabor, odor desagradável e

diminui a transparência da água, alterações de condições químicas como pH, em função da liberação de metano, e gás sulfídrico pela decomposição anaeróbica (LIBÂNIO, 2008).

Em relação aos impactos causados quando da utilização dos recursos hídricos, devem ser observados: o controle de pH, controle de odor e sabor, algas azuis, que têm correlação com distúrbios gastrointestinais, uso recreacional prejudicado, dificuldade de acesso de barcos, comprometido uso na irrigação, perda de valor comercial das propriedades localizadas nas margens do rio (BRAGA *et al.*, 2005).

As formas de controle para diminuição da poluição são: reduzir carga de nutrientes, tratamento de efluentes, redução de uso de fertilizantes agrícolas, recomposição matas ciliares, controle de drenagem urbana, aeração de camadas inferiores, precipitação química do fósforo, redução de biomassa vegetal e redução de sedimento do fundo (LIBÂNIO, 2008).

2.3 Controle estatístico da qualidade

A qualidade sempre foi uma preocupação, desde a época da produção artesanal, quando já se procurava atender da melhor forma os anseios dos consumidores. Adquiriu ainda maior importância na produção em massa, com a inspeção do produto no final do processo produtivo. Com o desenvolvimento de novos modelos gerenciais, a qualidade foi sendo focalizada ainda durante o processo produtivo, principalmente através de técnicas estatísticas (VARGAS, LOPES & SOUZA, 2004).

A qualidade tem tomado parte em todos os produtos e serviços. A consciência de sua importância e a introdução de métodos formais para o controle e a melhoria de qualidade passou por um processo de desenvolvimento evolutivo. Entre os anos de 1700 e 1900, a qualidade era determinada pelo esforço individual do profissional. Somente mais tarde aparece a introdução de novos conceitos, entre eles o da metodologia estatística para a melhoria da qualidade (VARGAS, LOPES & SOUZA, 2004).

O controle de qualidade teve início na década de 1930, nos Estados Unidos por meio do gráfico de controle inventado por Shewhart, que os aplicou industrialmente, prevendo problemas relacionados à qualidade (MONTGOMERY, 2004).

O controle de qualidade num sistema de produção, por exemplo, começa a partir da entrada da matéria-prima no fluxo produtivo, atua durante a transformação e faz a avaliação final do produto acabado (MONTGOMERY, 2004). Esse tipo de controle consiste num conjunto de testes e operações com a finalidade de manter a qualidade (que nesta tese é sinônimo de confiabilidade, credibilidade e segurança) dentro dos padrões fixados, para que satisfaça as necessidades do processo em estudo, sempre com menor custo possível.

Para MONTGOMERY (2004), uma das definições aceitas para qualidade é o inverso da variabilidade (variabilidade inadequada é sinônimo de desperdício de dinheiro, tempo e esforços), melhorando a aceitação do produto. A variabilidade pode ser determinada com base em medidas específicas, entre as quais se sobressai o desvio-padrão.

Segundo COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI (2004), o controle permanente dos processos é condição básica para a manutenção da qualidade de bens. O termo qualidade significa atender às especificações. Quando se elabora uma especificação constitui-se uma fase inicial de um ciclo de controle de qualidade. A especificação indica aquilo que é desejado, a norma de qualidade.

Num processo existem inumeráveis fatores que podem afetar suas características de qualidade. Sob o ponto de vista da variação de qualidade, observamos causas de variação que explicam as mudanças nas características de qualidade. Quando as características de qualidade satisfazem certa especificação o processo é considerado bom (MONTGOMERY, 2004).

O controle de qualidade é vital por permitir que falhas sejam detectadas. Mais do que isso, sua função é importante ao possibilitar informações para não somente detectar os defeitos, como também para enfatizar a necessidade de melhoria no processo. Ou seja, terá a função de identificar as falhas no processo, definir suas causas e apontar formas para que estas não se repitam (MONTGOMERY, 2004).

2.3.1 Monitoramento e controle estatístico de processo univariado

As cartas de controle do tipo Shewhart, introduzidas por volta de 1930, continuam a ser uma das ferramentas mais utilizadas em controle de qualidade. Shewhart, naquela época, preocupou-se em avaliar a qualidade, observando apenas uma característica do produto de cada vez. Na sua concepção e utilização é necessário ter em conta, para além da escolha de subgrupos racionais (quando se tem tamanho de amostras maior que um), três aspectos fundamentais: os instantes de amostragem (pontos amostrados no tempo), os tamanhos das amostras e os limites de controle (INFANTE & DIAS, 2006).

A determinação do tamanho da amostra e da frequência da amostragem são indispensáveis no planejamento de uma carta de controle. Tais parâmetros são definidos tendo-se em vista o tamanho da mudança no processo a ser detectada pela carta de controle e a rapidez com que se deseja detectar esta mudança. Pequenas mudanças no processo são rapidamente detectadas, utilizando-se grandes amostras tomadas frequentemente, o que se torna economicamente inviável (MICHEL & FOGLIATTO, 2002).

A carta de controle de Shewhart é um instrumento para ser usado na especificação, produção e inspeção de um processo e, quando usado, traz três fases deste dentro de uma

interdependência completa (VARGAS, LOPES & SOUZA, 2004). Usando uma carta de controle para a média, utilizam-se usualmente os limites “3- sigma” (INFANTE & DIAS, 2006).

Cartas de controle estatístico são ferramentas de monitoramento do desempenho de processos. Elas utilizam dados de medições de variáveis que influenciam na qualidade. As medições são realizadas em pontos espaçados no tempo e registradas nas cartas. Esses registros resultam em gráficos que apresentam os valores da medição da variável no eixo vertical e os pontos no tempo nos quais as medições são efetuadas, no eixo horizontal. Cada medição é comparada com limites de controle. Medições fora dos limites indicam a presença de causas especiais de variabilidade, anômalas ao processo, que prejudicam a qualidade do produto (MICHEL & FOGLIATTO, 2002). Segundo COSTA & MACHADO (2007), as cartas de controle são usadas de forma intensa por sua operacionalidade.

Os limites de controle do gráfico definem a sua região de ação e são baseados em estatísticas como média amostral, desvio-padrão, mediana, entre outras. Seu propósito é fornecer um critério que indique o momento de intervir no processo. A verificação se o processo está ou não sob controle é feito pela coleta periódica das amostras. O processo sob controle supõe que o característico de qualidade do conjunto de dados possua uma distribuição normal. O intervalo da distribuição normal, quando usado o $\mu \pm 3\sigma$, corresponde a 99,7%. Portanto, a faixa de variabilidade normal num processo sob controle é a do intervalo $\mu - 3\sigma$ e $\mu + 3\sigma$. As causas que ocorrem fora deste intervalo são identificáveis e, conseqüentemente, exigem pronta correção (MONTGOMERY, 2004).

Para controlar a qualidade, MONTGOMERY (2004) diz que é necessária a identificação e a medição das variações ocorridas no processo por meio dos gráficos de controle, que são ferramentas úteis para a avaliação do estado de controle estatístico do processo, pois servem para determinar se as variações que ocorrem são devidas a causas assinaláveis ou aleatórias.

Causas especiais de variabilidade, como no caso desta pesquisa, podem estar ligadas a descargas de efluentes em determinada coleta, menor vazão durante coleta, maiores valores daquela determinada variável na coleta, problemas de cálculo, reagentes ou operador de laboratório, entre outros fatores.

Os gráficos de controle univariados permitem o controle de uma única característica quantitativa a cada vez. Se houver mais de uma característica a ser controlada, será necessário aplicar um gráfico de controle para cada uma delas (MOTGOMERY, 2004).

Os gráficos contêm uma linha central (*LC*) que é dada pelo valor médio do processo. O limite superior de controle (*LSC*) e o limite inferior de controle (*LIC*) definem os valores - máximo e mínimo - de uma variável. Assim, no estado de estabilidade, a probabilidade de

um ponto cair fora dos limites de controle torna-se muito pequena (MONTGOMERY, 2004; ALBERS & KALLENBERG, 2004).

Na Figura 1, apresenta-se um exemplo de gráfico de controle do tipo Shewhart. MONTGOMERY (2004) comenta que a principal desvantagem de qualquer gráfico de controle de Shewhart é usar somente informação sobre o processo contido no último ponto demarcado e ignorar qualquer informação dada pela sequência inteira de pontos. Esta característica faz com que o gráfico de controle de Shewhart seja insensível a pequenos e contínuos desvios no processo, da ordem de até 1,5 desvios-padrão.

A intensa utilização das cartas de controle tem motivado estudos que buscam seu aperfeiçoamento (MICHEL & FOGLIATTO, 2002). MONTGOMERY (2004) ressalta que o controle estatístico de processo é um conjunto de ferramentas úteis para a resolução de problemas para o alcance da estabilidade do processo e aumento da capacidade através da redução da variabilidade. A função fundamental do processo estatístico de controle é fornecer um sinal estatístico da ocorrência de causas especiais, possibilitando a ação para sua eliminação e evitando seu reaparecimento.

O objetivo das cartas de controle (Shewhart, CUSUM e MMEP) é monitorar a variabilidade existente nos processos, distinguindo causas comuns (causadoras de pequenas variações aleatórias e, via de regra, inofensivas ao processo) de causas especiais. Estas devem ser identificadas e corrigidas para que o processo permaneça dentro de um padrão esperado de desempenho (MICHEL & FOGLIATTO, 2002).

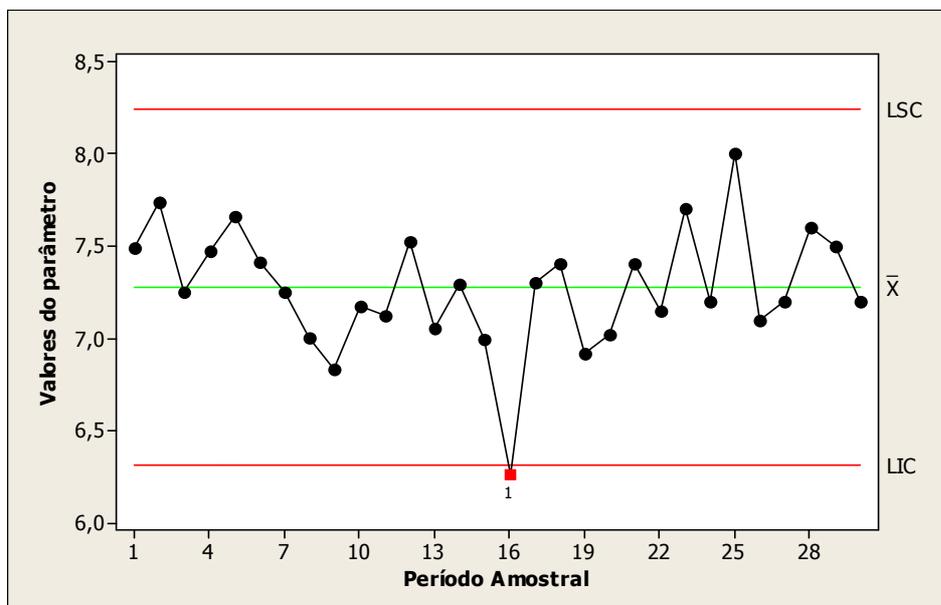


Figura 1 Exemplo de gráfico de Shewhart para medidas individuais.

No gráfico de controle, mostra-se o desempenho do processo, que estará “sob controle” se: todos os pontos do gráfico estiverem dentro dos limites de controle; a

disposição dos pontos dentro dos limites de controle for aleatória. O gráfico estará “fora de controle” quando: houver periodicidade (subidas e descidas em intervalos regulares), tendência (pontos direcionados nitidamente para cima ou para baixo) e deslocamento (mudança do nível de desempenho do processo). Além destes padrões típicos de comportamento não-aleatório, existem outras disposições de pontos que indicam processo “fora de controle”, quando, por exemplo, de 20 pontos de um gráfico 18 deles estiverem acima da linha central. E, também, outros casos: mais de seis pontos consecutivos em um só lado da linha central; 10 de 11 pontos de um só lado da linha central; 12 de 14 pontos de um só lado da linha central; 16 de 20 pontos de um só lado da linha central (MONTGOMERY, 2004; MICHEL & FOGLIATTO, 2002).

A variação do processo provocada por causas comuns, também conhecida como variabilidade natural (soma dos efeitos de pequenas causas inevitáveis), é inerente ao processo e estará sempre presente, mesmo que todas as operações sejam executadas empregando-se métodos padronizados. Quando um processo está operando de maneira natural, ou seja, sem causas especiais de variabilidade presentes, é dito estável ou sob controle estatístico (MONTGOMERY, 2004).

Muitos autores já utilizaram cartas de controle em seus estudos nas mais diversas áreas de conhecimento, como SILVA *et al.* (2007), que utilizaram cartas de controle por média para verificar as perdas de algodão no solo através de colheita mecanizada e concluíram que essa técnica é eficaz, porém as perdas na colheita do algodão não se encontram dentro dos padrões de qualidade, sob o ponto de vista do controle estatístico de processo.

MASSON (2007) utilizou técnicas de controle estatístico como as cartas de controle para analisar rotinas de cromatografia líquida em laboratório, demonstrando os mais variados usos deste tipo de ferramenta.

CHEN, HSU & WU (2006) estudaram a análise da capacidade do processo para produtos multiprocessados que tivessem distribuição normal usando cartas de controle para esse fim e também desenvolveram cartas de controle para analisar capacidade de multiprocessos que tivessem distribuição não-normal dos dados.

Neste caso, quando os dados não são normais ou apresentam autocorrelação, é necessário efetuar a transformação dos dados e, por vezes, aplicar séries temporais, como é o caso dos estudos desenvolvidos por SAFÁDI (2004), com séries temporais, em que analisou a vazão de água de uma barragem e concluiu que o melhor modelo que se ajustou aos seus dados foi o SARIMA, que é um modelo de série temporal.

COOK, ZOBEL & WOLFE (2006) usaram modelo de série temporal AR (autoregressivo) e relatam que este modelo é o mais popular modelo de simulação de séries temporais e previsão em hidrologia.

LINO, PECHE FILHO & STORINO (1999) analisaram a fragmentação de fitomassa realizada por uma roçadora em área com predominância de capim-colonião, utilizando as ferramentas preconizadas pelo controle estatístico da qualidade. Concluíram que o controle estatístico de qualidade foi eficaz para o estudo realizado.

MICHEL & FOGLIATTO (2002) utilizaram em seus estudos cartas de controle estatístico propondo um modelo econômico, quando estudaram monitoramento de processo de usinagem de peças para automóveis e concluíram que o uso destas cartas minimiza os custos de operação do processo, custos relacionados a alarmes falsos sobre o processo, custos de localização e reparos de causas especiais e custo médio da amostragem do processo.

O gráfico de controle para medidas individuais, chamado gráfico I, monitora a variação da média e da amplitude móvel de amostras com um só elemento. Esse tipo de gráfico é eficaz, porém, perde esta característica quando os processos vão ficando “mais robustos” (robustos no sentido de causas especiais cada vez mais interferirem com menos profundidade, de modo que a magnitude dos desvios ou dos aumentos tende a diminuir). Nestes casos, é aconselhável utilizar os gráficos de CUSUM e o gráfico de controle da média móvel ponderada exponencialmente – MMEP, que são indicados para o monitoramento de processos sujeitos a pequenas perturbações (MONTGOMERY, 2004).

Para monitorar processos sujeitos a pequenas perturbações, utiliza-se o gráfico de controle chamado CUSUM (somas acumuladas) e o gráfico de controle chamado MMEP (média móvel ponderada exponencialmente). Nestes casos, tais métodos se mostram mais ágeis e estimam com maior credibilidade do que os gráficos de controle de Shewhart. Quando se utiliza um desses gráficos, a decisão sobre o estado do processo é baseada na informação acumulada de diversas amostras e não apenas na última delas, obtendo-se maior rapidez na sinalização de pequenos desajustes (MONTGOMERY, 2004).

A carta MMEP foi inicialmente proposta por Roberts [1959], para aplicações em controle de qualidade com variáveis aleatórias, independentes e identicamente distribuídas (*i.i.d.*) e tem como objetivo suprir a deficiência apresentada pela carta de Shewhart, ou seja, incorporar diretamente o comportamento passado no ponto presente (MONTGOMERY, 2004).

O gráfico MMEP, de acordo com COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI (2004), é uma alternativa quando se tem como objetivo detectar pequenos deslocamentos na média do processo. Seu desempenho é semelhante ao gráfico CUSUM. Na Figura 2, mostra-se um exemplo de gráfico MMEP.

A média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) possui o parâmetro λ ($0 < \lambda \leq 1$) chamado “fator de suavização”, que determina a magnitude dos pesos em relação aos retornos passados. Logo, quando λ se aproxima de zero, maior é a importância das

observações recentes, em relação àquelas que estão no horizonte de tempo mais distante. Ao passo que, quando o fator de decaimento assume valor 1, a MMEP torna-se uma média simples (MARQUES, 2009).

LONGCHEEN, HUANG & WANG (2010), empregando as cartas MMEP para monitoramento de processos de dispersão, usaram λ de 0,05; 0,1; 0,2; 0,3, obtendo carta sensível à detecção de mudanças globais no processo.

LEIRAS, COSTA & EPPRECHT (2007) usaram cartas de controle para estudar o planejamento estatístico de processo de empacotamento de cadernos de jornais, utilizando amostras pequenas, e concluíram que o importante é escolher o gráfico que melhor se adapte ao tamanho da amostra, pois para amostras menores ($n=1$) o gráfico de Shewhart não é aconselhável, é melhor utilizar MMEP e CUSUM.

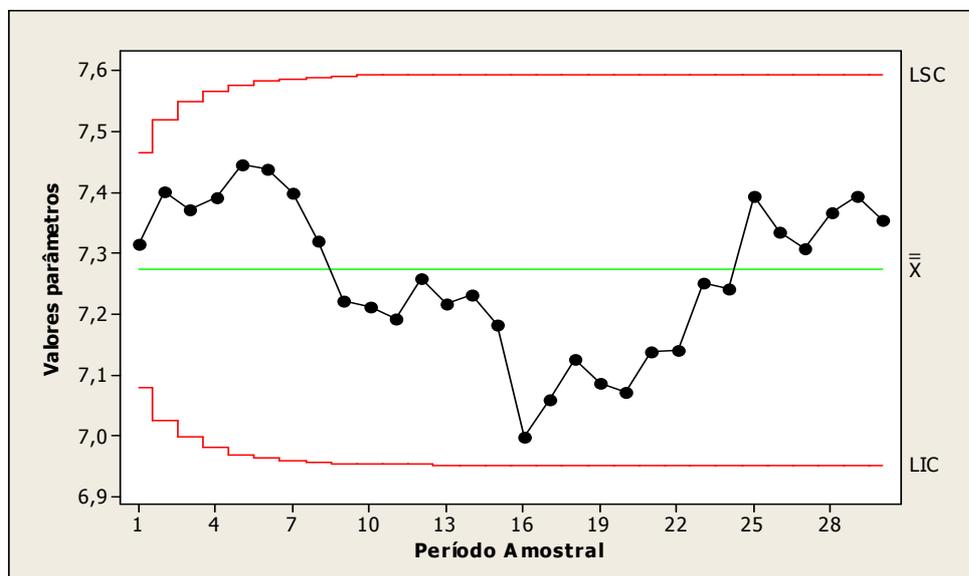


Figura 2 - Exemplo de gráfico de controle MMEP.

BERLITZ (2009) utilizou, em seu estudo de estabilidade de método analítico, fator de suavização de 0,5. MARQUES (2009) usou para o fator de suavização $\lambda = 0,94$. IDE, RIBEIRO JUNIOR & SOUZA (2009) utilizaram os seguintes conjuntos de dados: $L = 1,28$ $\lambda = 0,75$; $L = 1,96$ $\lambda = 0,75$.

Outro gráfico de controle é a carta CUSUM (somas acumuladas) que atribui peso igual para a sequência inteira de dados, desde o mais antigo até o mais recente. A carta MMEP concede peso maior para as informações mais atuais e peso menor para as mais remotas (VARGAS, LOPES & SOUZA, 2004).

O gráfico CUSUM é dividido em duas regiões: a de ação e a de controle, por limites superior e inferior. Os limites são de mesma magnitude; o superior é positivo e o inferior é negativo. Quando o valor de S (soma) ultrapassa um dos dois limites, isso é entendido como sinal de que a média do processo deslocou-se do valor médio. O gráfico CUSUM além de

sinalizar o desajuste, informa quando este ocorreu (COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI 2004).

O gráfico de controle CUSUM acumula a “pequena evidência” que cada amostra fornece do estado do processo. Conseguem-se maior rapidez na sinalização de pequenos desajustes (COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI 2004). Na Figura 3, mostra-se um exemplo de gráfico de CUSUM Tabular.

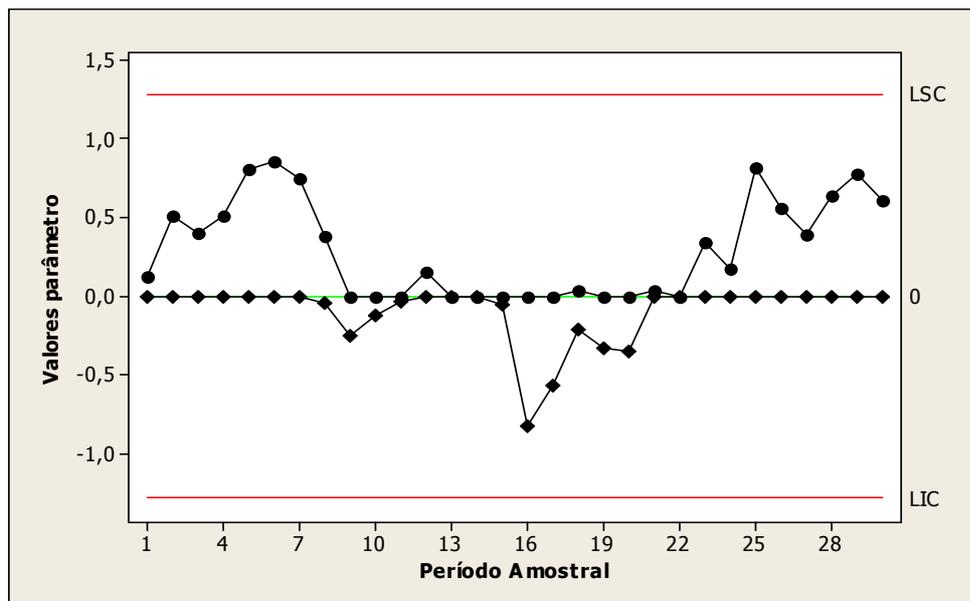


Figura 3 Exemplo de gráfico de controle CUSUM.

Segundo COELHO (2009), CUSUM Tabular é um procedimento que faz duas somas individuais, unilaterais – uma para valores acima do alvo, outra para valores abaixo do alvo – e os compara com um intervalo de decisão H (atribuídos em número de desvios-padrão). Caso uma das somas seja maior que o valor H , o processo é dito fora de controle estatístico. A recomendação de MONTGOMERY (2004) é de cinco desvios-padrão para o intervalo de decisão e 0,5 desvios-padrão para o valor de referência.

O CUSUM Tabular, utilizado neste trabalho, significa somas acumuladas unilaterais comparadas com intervalo de decisão H , em que um valor considerado razoável seria de ($H= 5\sigma$), porém, geralmente a literatura traz o valor 4σ (a escolha de H depende do número médio de eventos, até que ocorra uma mudança), $k= 0,5$ (MONTGOMERY, 2004) e comprimento de sequência (que é sistema de vigilância) igual a 2, por ter sido o valor que foi perceptível ao máximo às mudanças que ocorrem no processo (o comprimento de sequência deve ser inversamente proporcional à probabilidade de ocorrência do alarme falso, pois quanto maior a probabilidade para este tipo de alarme menor é o número de observações até que ele aconteça). Como valor alvo utilizou-se a média dos dados de cada variável. Se um valor da soma for maior ou menor que o intervalo H , o processo está fora de controle (MONTGOMERY, 2004; RIBEIRO JUNIOR & GONÇALVES, 2009). Também é

recomendado o uso do valor 2 por IDE, RIBEIRO JUNIOR & SOUZA (2009), em função da facilidade do uso e da não incidência de alarmes falsos no processo.

As cartas de controle do tipo CUSUM são mais eficazes em amostras de $n = 1$ (VARGAS, LOPES & SOUZA, 2004), como é o caso deste trabalho.

O gráfico de controle CUSUM tabular é eficaz para detectar pequenas ou grandes variações especiais e, para este estudo, com base nos valores utilizados de k e h e sendo a amostra de tamanho $n=1$, utilizou-se k de 0,5, como sugerem SOUZA *et al.* (2008), que usaram valores de k entre 0,5 e 1,0 que auxiliam para que não ocorram alarmes falsos na detecção de pontos fora de controle. RIBEIRO JUNIOR & GONÇALVES (2009) também recomendam que os valores de k estejam entre 0,25 e 1,5 e os de H estejam entre 3 e 6 desvios-padrão. Geralmente, utiliza-se um valor para H igual a cinco vezes o desvio-padrão do processo ($H = 5\sigma$), pois este é um valor condizente com a literatura da área (MOREIRA *et al.*, 2008). IDE, RIBEIRO JUNIOR & SOUZA (2009) utilizaram em seu estudo valores de $H = 4$ e k 0,5.

ZHOU *et al.* (2008) utilizaram cartas de controle de Shewhart e de CUSUM para avaliar a qualidade da água de um lençol freático, desenvolvendo cada uma e em seguida correlacionando-as.

2.3.2 Monitoramento e controle estatístico de processo multivariado

Para controlar a qualidade de um produto, MONTGOMERY (2004) diz que é necessária a identificação e a medição das variações ocorridas no processo por meio dos gráficos de controle, que são ferramentas úteis para a avaliação do estado de controle estatístico do processo, pois servem para determinar se as variações que ocorrem são devidas a causas assinaláveis ou aleatórias. A eficácia de um gráfico de controle é medida pela rapidez com que esse dispositivo detecta alterações no processo. Ao iniciar o processo estatístico de controle, o primeiro passo é estabelecer padrões confiáveis e uniformizar medidas.

Sabe-se que as variáveis envolvidas em um processo são, muitas vezes, correlacionadas e que o controle individual dessas variáveis não é o mais indicado. Neste caso, a qualidade depende do efeito comum dessas variáveis, em lugar do efeito de cada variável separadamente. E, assim, fez-se necessário, outro conceito de gráficos de controle que pudesse se ajustar a esse tipo de processo (JACOBI, SOUZA & PEREIRA, 2002).

Os gráficos de controle multivariados são mais uma alternativa de controle de processo, principalmente quando se quer controlar vários fatores do processo e várias características do produto combinadas em um único gráfico. Esse gráfico é conhecido como T^2 que foi proposto por Hotelling em 1947 e que o aplicou pela primeira vez em dados de

bombas na segunda guerra mundial. SOUZA & RIGÃO (2005) usaram estas cartas para avaliar variáveis correlacionadas, identificando quais as variáveis que influenciam o processo, como é o caso deste estudo.

A carta de controle T^2 é a versão multivariada que pode ser usada para observações individuais. Sua finalidade é avaliar se a diversas variáveis estão simultaneamente no controle. Por exemplo, para controlar a qualidade das carcaças de pneus de automóvel, você pode medir, simultaneamente, três variáveis: peso, temperatura e porcentagem de poliéster (MONTEGOMERY, 2004).

Neste tipo de gráfico, mostram-se as estatísticas de duas ou mais variáveis de medida relacionadas. Num gráfico multivariado, verifica-se como diversas variáveis conjuntamente podem influenciar um processo ou resultado. Por exemplo, pode-se usar gráficos de controle multivariado para investigar como a resistência à tração e o diâmetro de uma fibra podem afetar a qualidade do tecido (MONTEGOMERY, 2004).

Na Figura 4, mostra-se um exemplo da carta de controle multivariada para variáveis de qualidade da água.

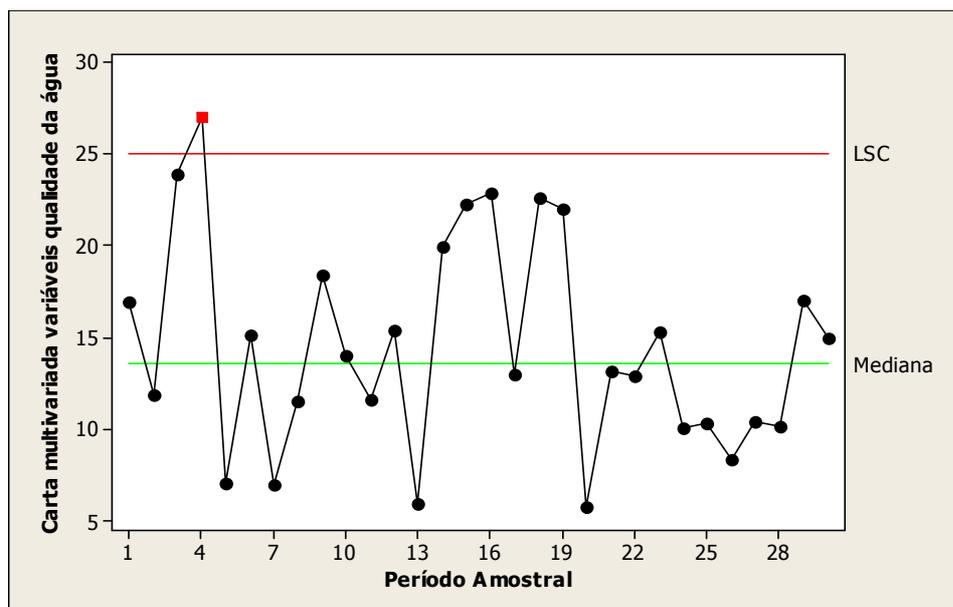


Figura 4 Exemplo de gráfico de controle multivariado.

SOUZA & RIGÃO (2005) estudaram a identificação de variáveis fora de controle em processos produtivos multivariados. Estudando, desta forma, o controle de qualidade utilizando ferramentas de estatística como o gráfico de controle do tipo T^2 de Hotelling. Concluíram que as técnicas estatísticas multivariadas podem ser aplicadas no controle de qualidade. As técnicas identificaram a variável causadora de instabilidade do sistema e o período em que esteve fora de controle.

PAN (2007) estudou cartas de controle multivariadas usando a estatística T^2 de Hotelling para avaliar várias características correlacionadas, como no presente trabalho. Essas cartas de controle possibilitam detectar uma mudança de processo e prevenir a ocorrência de defeitos pela identificação e eliminação de causas atribuíveis de variação.

NIJHUIS *et al.* (1999) utilizaram cartas de controle multivariadas do tipo T^2 de Hotelling para análises de cromatografia a gás, comparando estas com cartas de controle univariadas do tipo Shewhart. Devido aos benefícios apresentados pela carta multivariada, esta foi preferida e recomendada por esses autores.

CHEN (2010) estudou cartas de controle multivariadas objetivando diminuir o possível número de alarmes falsos gerados nos gráficos univariados, concluindo que realmente essas têm sido melhores. O autor afirma que a escolha dos limites de controle é muito importante para a não ocorrência de alarmes falsos, tendo monitorado um processo químico simulado.

SURTIHADI, RAGHAVACHARI & RUNGER (2004) estudaram cartas de controle multivariadas chamando a atenção para a covariância no sentido das mudanças que devem ser detectadas nesta matriz.

COSTA & MACHADO (2008) utilizaram o gráfico T^2 e também os gráficos univariados observando a correlação existente entre as variáveis. Concluíram que os gráficos de controle univariados, baseados nas variáveis originais, têm um melhor desempenho global quando as variáveis são positivamente correlacionadas.

CHEN, HSU & WU (2006) utilizaram uma carta de monitoramento, relacionando os índices por eles estudados, criando uma zona de capacidade de processo em que os processos são capazes, logo, espera-se que todas as características de qualidade do processo avaliado estejam dentro desta zona ou então que se promovam ações para que as características atendam às especificações.

NIJHUIS *et al.* (1999) estudaram o controle de qualidade aplicado à análise cromatográfica gasosa por meio de cartas univariadas e multivariadas (T^2), comparando seus resultados. Devido à segurança em relação a cartas univariadas, que requerem esforço e riscos de alarmes falsos e/ou enganosos, os autores sugerem o uso de carta multivariada.

2.3.3 Análise da capacidade de processos

A análise do controle estatístico de processo (CEP) inicia-se com a coleta de dados, em seguida, calcula-se a média e a amplitude ou desvio-padrão e os limites superior (LSC) e inferior (LIC). Na sequência, é construído um gráfico no qual se apresentam as amostras e os limites. Os pontos que aparecerem fora desses limites caracterizam a existência de

causas especiais, ou seja, o processo está fora de controle estatístico, devendo ser investigado os motivos que levaram a estas causas e tentar solucioná-las.

O primeiro índice de capacidade de processo foi desenvolvido por KANE em 1986. Em seguida, muitos índices foram sendo desenvolvidos por muitos engenheiros e estudiosos (CHEN, HSU & WU, 2006).

Os índices de capacidade de processo (ICP) são parâmetros adimensionais que, indiretamente, medem o quanto o processo consegue atender às especificações. Para a maior parte dos índices, quanto maior o seu valor, melhor o processo conseguirá atender às especificações (COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI 2004).

A definição de controle estatístico de processo pode ser realizada pela junção dos significados de cada uma das palavras: Controle – manter algo dentro dos limites (padrões) ou fazer algo se comportar de forma adequada. Estatística – obter conclusões com base em dados e números que trazem informações. Controle estatístico – fazer com que os resultados se mantenham conforme o previsto pelos padrões com a ajuda de dados numéricos. Portanto, Controle Estatístico de Processo (CEP) é um método preventivo de se comparar, continuamente, os resultados de um processo com os padrões, identificando a partir de dados estatísticos as tendências para variações significativas, a fim de controlar ou eliminar essas variações. O objetivo principal no CEP é reduzir cada vez mais a variabilidade de um processo (MONTGOMERY, 2004). Processo – é a combinação necessária entre o homem, materiais, máquinas, equipamentos e o meio ambiente para fabricar um produto qualquer. Mais especificamente, um processo é qualquer conjunto de condições ou conjunto de causas (sistema de causas) que trabalham simultaneamente para produzir um determinado resultado.

Na Tabela 2 encontram-se os valores mínimos recomendados para a razão de capacidade do processo.

Tabela 2 Valores recomendados para a razão de capacidade do processo

Condição de Valores de Cp		Qualidade
Super Excelente	\geq	2,00
Excelente	entre	1,67 e 2,00
Satisfatório	entre	1,33 e 1,67
Capaz	entre	1,00 e 1,33
Inadequado	entre	0,67 e 1,00
Ruim	$<$	0,67

Fonte: KAHRAMAN & KAYA (2009).

Para MONTGOMERY (2004), a capacidade do processo é definida como um estudo de engenharia para estimar a capacidade. Esta estimativa de capacidade de um processo pode ser apresentada por uma distribuição de probabilidade, com uma forma, um centro

(média) e uma dispersão (desvio-padrão) especificados. Para estimar essa capacidade do processo, utilizam-se índices de capacidade.

O índice de capacidade é utilizado para produzir um relatório de capacidade do processo, quando os dados são de uma distribuição normal ou para transformar os dados utilizando transformação de Box-Cox, incluindo um histograma com capacidade revestida com duas curvas normais e uma tabela completa de estatísticas globais. As duas curvas normais são geradas usando-se o processo que observa média e desvio-padrão. Portanto, o relatório pode ser usado para avaliar visualmente se os dados são normalmente distribuídos, se o processo está centrado no alvo e se é capaz de cumprir de forma consistente as especificações do processo (MONTEGOMERY, 2004, KAYA & KAHRAMAN, 2009; WU, PEARN & KOTZ, 2009).

Segundo COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI (2004), o índice de capacidade relaciona os limites superior e inferior, que correspondem à variabilidade permitida ao processo, com a variabilidade natural do processo que é o 6σ ou 6S, dependendo de qual índice for usado. Quanto maior for a capacidade do processo mais irá satisfazer as especificações, desde que a média (μ) esteja centrada no valor nominal.

Os processos também podem ser identificados por cores, como sugerem alguns autores: Processo Vermelho: ($C_p < 1$), a capacidade do processo é inadequada à tolerância exigida. Nesta situação, o ideal é realizar o trabalho com outro processo mais adequado às especificações. Não sendo possível mudar o processo, deve-se tentar diminuir a sua variabilidade. Por último, resta a possibilidade de se alterar as especificações do produto; Processo amarelo: ($1 \leq C_p \leq 1,33$), a capacidade do processo está em torno da diferença entre as especificações. O tratamento deve ser semelhante àquele dado ao processo vermelho. Neste caso, cartas de controle são muito úteis para manter o processo sob controle e evitar a produção de itens fora das especificações; Processo Verde: ($C_p > 1,33$), a capacidade do processo é adequada à tolerância exigida. Se a capacidade do processo está entre $3/4$ e $2/3$ da tolerância, é aconselhável coletar amostras periódicas para acompanhamento do processo. Se a capacidade do processo é menor que metade da tolerância, não é preciso tomar maiores cuidados com o processo, pode-se dizer que ele é excelente ou altamente confiável (MONTGOMERY, 2004; COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI, 2004). Logo, têm-se:

1) Processo sob controle: É o processo cujas causas de variação são devidas somente pelas causas aleatórias. Se o processo está sob controle: a variabilidade das características de qualidade do produto é devida, apenas, ao acaso; as causas de variações não afetam de forma significativa o processo; pode ser até impossível, mas é quase sempre antieconômica, a eliminação estas causas; existe uma distribuição estatística estável associada ao processo.

2) Processo fora de controle: é o processo em que se fazem sentir causas especiais. Se o processo não está sob controle: a variabilidade das características de qualidade do produto é devida a causas especiais, possíveis de serem corrigidas; a variabilidade do processo é anormal, com grandes alterações nas características de qualidade; trata-se de uma situação que requer imediata intervenção; há diferenças notáveis entre a média do processo e os valores observados (MONTGOMERY, 2004).

A capacidade do processo depende principalmente das próprias especificações e da variabilidade do processo. A falta de estabilidade do processo (provocado por causas especiais) reduz sua capacidade e aumenta o número de itens não conformes produzidos (COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI, 2004).

Autores diversos têm utilizado em seus estudos a capacidade de processo, como MILAN & FERNANDES (2002), que utilizaram CEP em seu trabalho, com o objetivo de verificar os efeitos do controle de qualidade aplicado a operações de preparo de solo para a cultura do milho. Os métodos estatísticos utilizados para ambas as operações foram os histogramas, as cartas de controle por variáveis e o teste T. A utilização de controle das operações agrícolas proporcionou redução na variabilidade dos dados, tendo sido viável para o sistema de produção em questão.

JACOBI, SOUZA & PEREIRA (2002) utilizaram dados coletados em uma empresa, no setor de Engenharia de Saneamento e Meio Ambiente e gráficos de controle de regressão para monitorar o processo, apresentando técnica de controle simultâneo de variáveis correlacionadas.

CHEN, HSU & WU (2006), ao trabalharem com análise de capacidade de processo para um processo com multiprodutos, concluíram que o índice de capacidade de processo é muito importante, desde que se combinem os parâmetros do processo com as especificações dos produtos estudados para então introduzir o índice de capacidade do processo. O valor encontrado para o índice neste estudo foi de 1,3.

PEARN & LIN (2004) estudaram um índice da capacidade de processo, relacionando dois índices e escolhendo o que melhor se ajustava ao estudo realizado. Os índices de capacidade escolhidos foram o C_p , C_a , C_{pk} , C_{pm} para analisar uma indústria de manufatura, representando várias medidas que obedeceram a critérios como o rendimento, perdas, entre outros.

CHEN, HUANG & HUANG (2007) comentam a utilização por grande número de indústrias do índice de controle de processo para monitorar seus processos de qualidade. Enfatizam que a técnica utilizada pode não servir apenas para perceber a estabilidade do processo, mas para controlar a qualidade do processo.

PRASAD & CALIS (1999) estudaram o índice de capacidade com base no gerenciamento, sendo os gestores ativadores de medidas de controle e redução da

variabilidade do processo, detectando as perdas e minimizando a probabilidade de falso alarme.

LIN (2005) também utilizou índice de capacidade de processo, no caso o Cpk, o que tem sido utilizado por muitas indústrias para medir quantitativamente o desempenho dos produtos.

ZHOU *et al.* (2008) utilizaram um índice que considerou as concentrações de variáveis de qualidade da água, criando uma variável estatística e comparando-a com médias aritméticas e geométricas.

KAYA & KAHRAMAN (2009) utilizaram um índice de precisão de processo, em que mediram o grau do processo, observando se este está centrado e se forneceu alarmes quando o processo mostrou desvios em relação ao valor-alvo.

CHEN, HSU & WU (2006) utilizaram vários índices de capacidade de processo para medir o desempenho de um processo de fabricação de funil de silício, chamando a atenção para o uso do índice para avaliação de múltiplas características de qualidade do processo analisado, no qual se deve considerar a tolerância assimétrica dos limites de especificação, ou seja, observar cada característica analisada, verificando se seus limites de especificação são unilaterais ou bilaterais. Nesta pesquisa, esse cuidado foi tomado e, em função disso é que o índice que melhor atende às expectativas do tipo de variáveis, características de qualidade analisadas, foi o Ppk.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

A bacia do rio Marrecas, da qual o rio Mandurim faz parte, possui uma área aproximada de 90.000 hectares, ou em torno 836,50 km², representando 4,8% da região Sudoeste do Estado do Paraná, tendo o Rio Marrecas como o principal e estendendo-se por 110,6 km (RECH, SHOENSHALS & FOLLADOR, 2008a).

A Figura 5 representa a microbacia do rio Mandurim. De acordo com FERRETTI (1998, p. 125), a bacia do rio Marrecas compreende a margem direita, as microbacias dos rios: Frito, Sanga dos Serpas, Mandurim, Córrego da Escola, Água Branca, Urutago, São José, Sem Nome IV e Córrego Alegre e apresenta agricultura de 10.325 hectares; mata de 4.075 hectares; capoeira, capoeirinha e ervas de 1.830 hectares; mata secundária e capoeirão de 340 hectares.

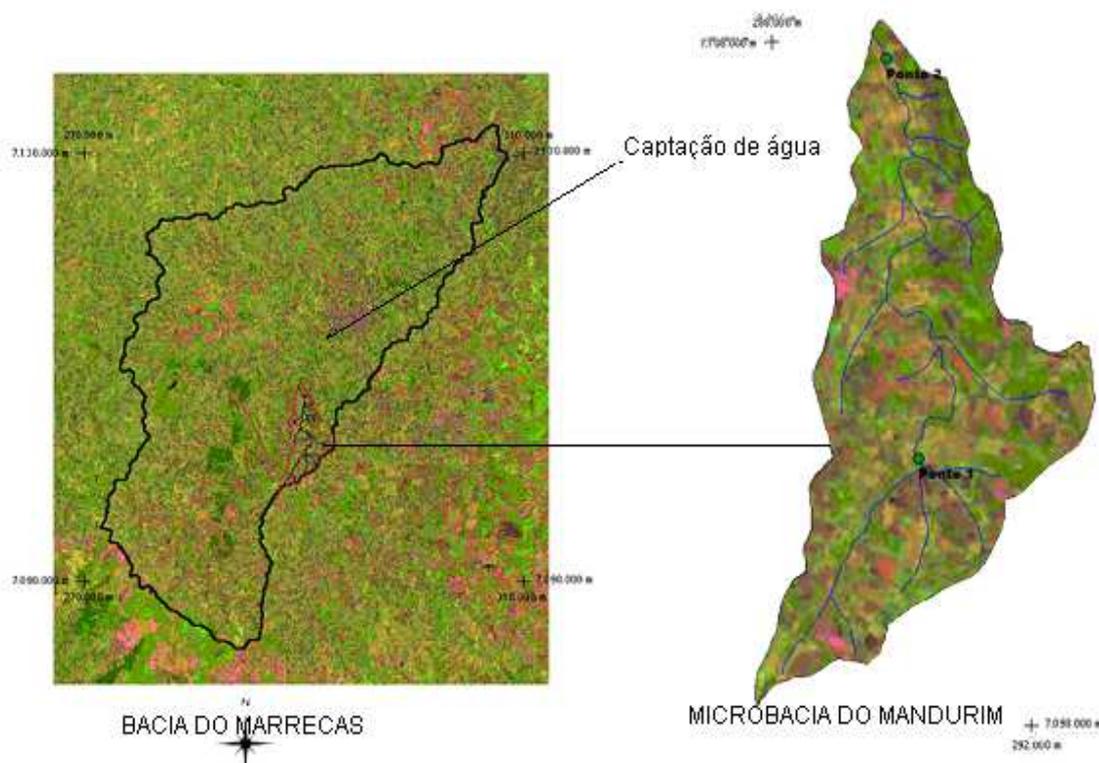


Figura 5 Bacia do Rio Marrecas, microbacia do Rio Mandurim e o ponto de captação de água da cidade de Francisco Beltrão.

Fonte: Adaptado do PNMA II (BRASIL, 2006), RECH, SHOENSHALS & FOLLADOR (2008b).

A microbacia do rio Mandurim possui uma área aproximada de 22,4 km² e a extensão do eixo principal do rio Mandurim tem, aproximadamente, 9,5 km, localizada no município de Marmeleiro – PR (RECH, SHOENSHALS & FOLLADOR, 2008b).

A composição do solo da bacia do rio Mandurim, conforme classificação desenvolvida pela EMBRAPA/IAPAR, segundo BHERING & SANTOS (2008), é de Latossolo vermelho Distroférrico, que apresenta como características predominantes: porosidade, com argila distribuída ao longo do perfil, baixos teores de silte, baixa capacidade de troca catiônica e pouca mobilidade das argilas. Possui “Boa permeabilidade e relevo suave ondulado, conferindo resistência à erosão. O solo apresenta mais de 60% de argila, caracterizando textura muito argilosa. Também apresenta altos teores de ferro” (FERRETTI, 1998, p. 64).

Segundo BLEY JR. (2004), a área de drenagem da microbacia do rio Mandurim é de, aproximadamente, 2269 ha de terra e existem cerca de vinte criadores de suínos na região, micro e pequenos produtores, vivendo em regime de economia familiar, com baixo nível tecnológico, diversificação de atividades entre a lavoura e criação de animais, obtendo o sustento da família nesta atividade.

3.2 Análise qualitativa da água

A avaliação da qualidade da água do rio Mandurim foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica e de campo, com dados do Plano Nacional do Meio Ambiente – PNMA II (vazão e coleta de amostras de água em 2 pontos durante dois anos) e outros dados oriundos de coletas posteriores a estas, até julho de 2009 (BRASIL, 2006). O 1º ponto foi definido a montante, próximo das nascentes do rio, nas coordenadas geográficas de Latitude: 26° 11' 11" Sul e Longitude: 53° 06' 01" Oeste, a uma altitude de 637 m. O 2º ponto, situado a jusante, próximo da foz do rio Mandurim no Rio Marrecas, logo após a última propriedade que cria suínos, dentro da microbacia, nas coordenadas geográficas de Latitude: 26° 08' 03" Sul e Longitude: 53° 06' 08" Oeste e altitude de 563 m (RECH, SHOENSHALS & FOLLADOR, 2008b).

Os parâmetros escolhidos para avaliação da qualidade da água foram: oxigênio dissolvido, temperatura, coliformes fecais, coliformes totais, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, fósforo, pH, nitrogênio, sólidos totais e turbidez.

As análises foram realizadas de acordo com metodologia descrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, desde o ano de 2003 até 2005 em

análises mensais e a partir de 2006 até 2009 semestralmente, totalizando 30 amostras. O turbidímetro utilizado apresentava uma precisão de $\pm 0,02$ UNT e o pHmêtro $\pm 0,01$.

Para o cálculo do índice de qualidade da água utilizou-se o IQA, desenvolvido pela CETESB, conforme a Equação 1 e pesos descritos na Tabela 3.

$$IQA = \sum_{i=1}^n W_i Q_i \quad \text{Eq. (1)}$$

em que:

- Índice de Qualidade das Águas, um número entre 0 e 100;
- qualidade do parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva "curva média de variação de qualidade", em função de sua concentração ou medida e;
- peso correspondente ao parâmetro (Tabela 3), atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade.

Tabela 3 Pesos dos parâmetros avaliados

Parâmetro	Peso - W_i
Oxigênio Dissolvido – OD (% OD)	0,17
Coliformes Fecais/100ml	0,15
pH	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio –DBO (mg/l)	0,10
Nitrogênio Total (mg/L)	0,10
Fósforo Total (mg/l)	0,10
Variação da temperatura (°C)	0,10
Turbidez (UFT)	0,08
Resíduo Total (mg/L)	0,08

Fonte: CETESB (2010).

Para o cálculo do índice do estado trófico da água utilizou-se o IET, desenvolvido por CARLSON (1977), conforme a Equação 2. O índice trófico foi calculado com base nos resultados do parâmetro fósforo.

$$IET(PT) = 10(6 - (1,77 - 0,42(\ln PT))) \quad \text{Eq. (2)}$$

em que:

- concentração de fósforo total medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;
- logaritmo natural.

3.3 Análise estatística

Para permitir a visualização geral do comportamento dos dados que foram utilizados, foi usada ferramenta estatística de controle de qualidade desenvolvida dentro do programa *Minitab* 15, para o cálculo das medidas de tendência central (média aritmética e mediana), das medidas de dispersão (valores máximo e mínimo, desvio-padrão e coeficiente de variação) e das medidas de assimetria e de curtose. Foi efetuado, também, o teste de Anderson-Darling, Ryan-Joiner (similar ao Shapiro-Wilk) e Kolmogorov-Smirnov, para caracterizar a normalidade dos dados e, ainda, foi realizado o ensaio de autocorrelação, que são condições essenciais para o uso de gráficos de controle, pois, quando não atendem a essas características, os resultados podem ser enganosos (MONTGOMERY, 2004).

O tratamento e a análise estatística dos dados foram realizados por meio de gráficos de medidas individuais, o que se chama de gráfico I ou Shewhart, gráfico CUSUM e gráfico MMEP. No gráfico de Shewhart foram comparados os resultados das análises com as diretrizes especificadas pelo CONAMA, com a intenção de verificar se os parâmetros estão de acordo ou não com a Resolução 357/2005.

3.3.1 Teste de normalidade

Ao se aplicar técnicas estatísticas de controle de processos no controle de qualidade é necessário testar a normalidade dos dados estudados. Os testes aplicados a este estudo foram os de Anderson-Darling, Ryan-Joiner (similar ao Shapiro-Wilk) e Kolmogorov-Smirnov. Quando um dos testes acusou normalidade, considerou-se distribuição normal dos dados. Muito embora, segundo MONTGOMERY (2004), ao usar o gráfico de Shewhart e gráficos MMEP exista a possibilidade dos dados do processo não seguirem distribuição normal.

Para os dados medidos, que não seguiram distribuição normal, aplicaram-se as técnicas de transformação necessárias para a busca da normalidade que, no caso deste estudo, foi a de box-cox. Para aqueles dados que, mesmo assim, não se tornaram normais, foi aplicado o modelo de séries temporais, no caso ARIMA (modelo autoregressivo de média móvel) e para a execução dos gráficos foram utilizados os dados dos resíduos.

3.3.2 Transformação box-cox

A transformação Box-Cox é muito útil e particular, entre a família das transformações estatísticas, e pode ser definida de acordo com a Equação 3.

$$y(\lambda)$$

Eq. (3)

em que:

- variável resposta y ;
- λ - parâmetro de transformação.

Porém, essa equação é válida para λ diferente de zero, se for igual a zero aplica-se o logaritmo natural (\ln). Neste estudo, os valores utilizados foram os propostos automaticamente pelo programa Minitab, sendo o lambda ótimo variando de -5 a 5.

3.3.3 Estudo da correlação

Para o uso e aplicação de cartas de controle, os dados devem apresentar independência entre si, sendo fundamental 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 do processo. A autocorrelação é o coeficiente de correlação entre observações defasadas no tempo.

De acordo com MONTGOMERY (2004), a violação da hipótese de independência das observações reduz a aplicabilidade dos gráficos convencionais. As observações podem cair fora dos limites do gráfico, com o processo sob controle, comprometendo a credibilidade e aumentando a ocorrência de alarmes falsos (IDE, RIBEIRO JUNIOR & SOUZA, 2009).

De acordo com CLARO, COSTA & MACHADO (2007), quando ocorre autocorrelação entre os dados, pressupõe-se que ocorrerão alarmes falsos no gráfico e esta deveria ser verificada antes dos dados serem analisados e interpretados.

Entretanto, há que se notar que nenhum dos autores pesquisados diz que não se pode utilizar os gráficos de controle convencionais, apenas alertam para o fato de que pode ocorrer engano diante dos resultados apresentados por estes. Porém, há alternativas para dados correlacionados mostrando ser necessária a utilização de espaçamentos maiores que garantam a independência das observações com maior margem de segurança. A

desvantagem é a necessidade de se esperar muito tempo entre duas amostras, retardando a detecção de possíveis descontroles (MONTGOMERY, 2004). Nesta pesquisa, as amostras foram espaçadas, haja vista que são análises mensais e semestrais.

MONTGOMERY (2004) afirma que a autocorrelação é a medida de dependência de uma observação num instante T, em relação àquela tomada num instante T-K, em que K é a defasagem (lag) considerada, ou seja, a distância entre as duas observações. Neste trabalho, utilizou-se lag 1 para testar a autocorrelação, que mede o quanto o valor de uma variável é capaz de influenciar a amostra vizinha no tempo.

A verificação da autocorrelação se deu por meio da função de autocorrelação amostral, a qual, segundo MONTGOMERY (2004), pode ser estimada pela Equação 4.

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (x_t - \bar{x})(x_{t-k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad \text{Eq. (4)}$$

em que:

- 0, 1, ..., K;
- média da amostra.

As linhas tracejadas são os limites de dois desvios-padrão. Quando excedidos pelas linhas azuis, que correspondem às amostras coletadas, significa que os dados apresentam autocorrelação (MONTGOMERY, 2004). Na Figura 6, apresenta-se um gráfico em que os dados não apresentam correlação.

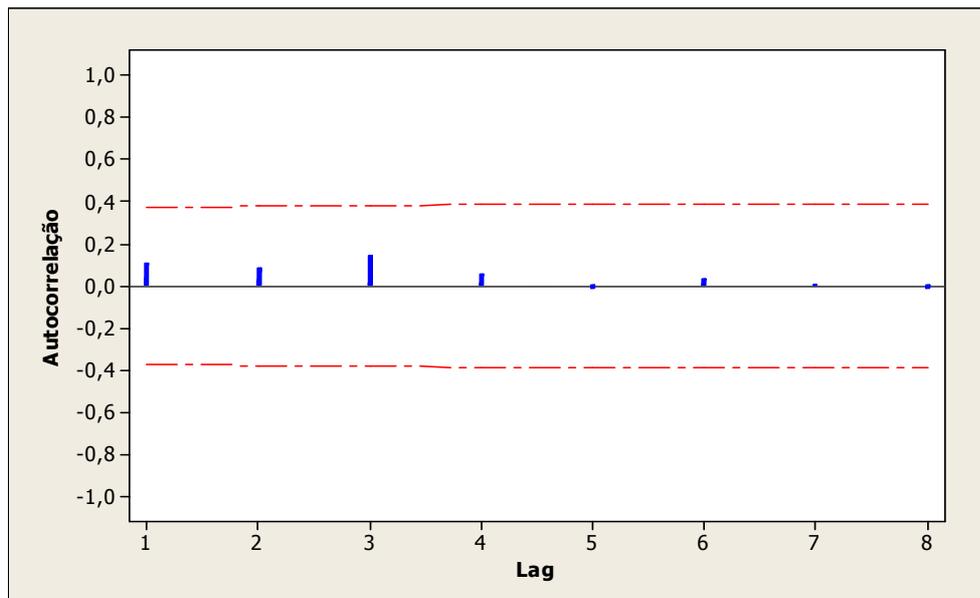


Figura 6 Exemplo de gráfico de autocorrelação entre dados.

3.3.4 Modelo autoregressivo de média móvel (ARIMA)

Quando dados analisados apresentam autocorrelação, deve-se modelar diretamente a estrutura correlacional com um modelo apropriado de série temporal, ou seja, um modelo que remova a autocorrelação dos dados, aplicando-se gráficos de controle aos resíduos (MONTGOMERY, 2004; MINGOTI & YASSUKAWA, 2008).

Neste estudo foram testadas todas as possibilidades de ARIMA com número 1 e utilizou-se o modelo autoregressivo (AR) p,d,q 1,0,0, como o que melhor se ajustou aos dados, buscando-se a remoção da autocorrelação pela construção de gráficos de controle com os resíduos, tendo sido testada novamente a normalidade e a autocorrelação, após a geração dos resíduos (este se comportará como uma variável aleatória independente e identicamente distribuída. Portanto, os gráficos de controle convencionais podem ser aplicados a essa série de resíduos).

No modelo ARIMA (p,d,q), quando se utilizam valores, como no presente estudo, $p = 1$, $d = 0$ e $q = 0$, em que: p é o número de termos autoregressivos, d é o número de diferenças e q é o número de termos da média móvel, passando a ser um AR (autoregressivo). Após terem sido testados vários valores para p,d,q, os valores foram escolhidos com base no erro quadrático, ou seja, o menor erro foi com os valores acima, assumidos para p,d,q, justificando a escolha dos valores para o modelo. A opção de não sazonalidade também foi escolhida.

De acordo com metodologia de Box e Jenkins, a modelagem ARIMA deve seguir três passos básicos, antes de se proceder aos cálculos das previsões: a) identificação/seleção do modelo, b) estimação e c) verificação. O passo mais importante é o primeiro, em que se determinam os valores apropriados de p , d e q (WERNER & RIBEIRO, 2003).

MONTGOMERY (2004) afirma que existem pelo menos duas dificuldades na implementação dessa abordagem. A primeira é que o pesquisador precisará identificar e ajustar um modelo ARIMA apropriado para o processo. Um modelo inapropriado, identificado incorretamente, comprometerá o desempenho do método e a identificação não é uma tarefa livre de erros, essa também é a opinião de ZHANG (1998).

Em um modelo autoregressivo, a série de dados históricos é descrita por seus valores passados regredidos e pelo ruído aleatório. O modelo AR (p) é dado pela Equação 5.

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_1$$

Eq. (5)

em que:

$$\hat{z}_t = \phi_1 \hat{z}_{t-1} + \epsilon_t$$

- ϕ_1 é o parâmetro (peso) que descreve como \hat{z}_t se relaciona com o valor para

$$\hat{z}_{t-1} = 1 \quad (\text{que é a série de dados}). \quad \epsilon_t \text{ é o erro aleatório.}$$

O modelo autoregressivo de ordem 1 ou AR (1) é a versão mais simples dessa classe de modelos. Sua apresentação algébrica é dada pela Equação 6.

$$\hat{z}_t = \phi_1 \hat{z}_{t-1} + \epsilon_t$$

Eq. (6)

3.4 Gráficos de controle

3.4.1 Gráfico de controle de medida individual - Shewhart

As convenções utilizadas na carta de controle são descritas como 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. Abaixo as equações 7, 8 e 9, que mostram os limites superior, linha média e limite inferior de controle, segundo MONTGOMERY (2004):

$$LSC = \mu + 3\sigma$$

Eq. (7)

$$LSC = \mu + 3\sigma$$

Eq. (8)

$$LIC = \mu - 3\sigma$$

Eq. (9)

em que:

- linha média;
- média;
- limite inferior de controle;

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

Amplitude de uma amostra é o valor absoluto da diferença entre essa amostra e a anterior. Não se define amplitude para a primeira amostra. Neste estudo, a amplitude foi calculada de acordo com a Equação 10.

$$A = |x_i - x_{i-1}| \quad \text{Eq. (10)}$$

3.4.2 Gráfico de controle por soma cumulativa - CUSUM

No gráfico CUSUM, à medida que as amostras são retiradas, os desvios de em relação ao valor-alvo μ_0 (ou ao valor médio em controle) são acumulados, gerando a Equação 11.

$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0) \quad \text{Eq. (11)}$$

em que:

- média da j-ésima amostra de tamanho $n \geq 1$.

Enquanto a média do processo permanecer ajustada ao alvo (que neste trabalho foi a média do processo), os desvios positivos ($> \mu_0$) serão compensados pelos negativos ($< \mu_0$) e a fórmula oscilará, de forma aleatória, em torno do valor zero. Se, porém, a média do processo aumentar (ou diminuir), o S crescerá (ou decrescerá) indefinidamente (COSTA, EPPRESCHT & CARPINETTI, 2004).

Existem duas maneiras de representar o CUSUM, o CUSUM tabular (ou algoritmo), e a forma máscara V do CUSUM. Das duas representações, a tabular é preferida pela maioria (MONTGOMERY, 2004).

O intervalo de decisão H, utilizado neste trabalho, foi o valor de 4σ , o valor de $k = 0,5$ (magnitude da mudança) e o valor do comprimento de sequência igual a 2, conforme sugere o *software* utilizado e autores como MONTGOMERY (2004) e NEZHAD & NIAKI (2010).

CUSUM é um plano de controle de decisão intervalar bilateral simétrico que utiliza planos superior (+) C_i^+ e inferior (-) C_i^- para detectar mudanças, conforme Equações 12 e 13.

$$C_i^+ = \max[0, x_i - (\mu_0 + K)] \quad \text{Eq. (12)}$$

$$C_i^- = \max[0, (\mu_0 - K) - x_i] \quad \text{Eq. (13)}$$

em que:

- zero;
- x_i é a observação no tempo;
- μ_0 é a média da amostra;
- K valor compensação ou folga, está entre a média desejada e a obtida.

3.4.3 Gráfico da média móvel ponderada exponencial – MMEP

Segundo MONTGOMERY (2004), o gráfico da média móvel exponencialmente ponderada pode ser definido pela Equação 14.

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) z_{i-1} \quad \text{Eq. (14)}$$

em que:

$$0 < \lambda \leq 1;$$

$$z_0 = \mu_0 \text{ (valor-alvo ou valor médio em controle de } \mu \text{)}.$$

A variância da variável z_i é dada pela Equação 15.

$$\sigma_z^2 = \sigma^2 \left(\frac{\lambda}{1 - \lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^i] \quad \text{Eq. (15)}$$

em que:

- σ^2 é a variância da variável x_i ; portanto, a linha média e os limites de L-sigma do gráfico de MMEP são dados pelas Equações 16, 17 e 18.

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

Eq. (16)

Linha centra

Eq. (17)

$$LIC = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}} [1 - (1-\lambda)^{2L}]$$

Eq. (18)

em que, σ é o desvio-padrão do processo quando em controle.

O peso da amostra λ (mudança que se quer detectar), utilizado nesta pesquisa, foi de 0,2 que é o valor que o *software* utilizado indica como ideal para conjunto de dados e, também, porque foram testadas várias hipóteses. Neste trabalho, a que melhor se adaptou foi com esse valor e o valor de L (número de desvios-padrão que se quer detectar como variação aleatória; aparecimento de primeiro sinal), conhecido na literatura inglesa como *Average Run Length (ARL)*, foi de 2.

3.4.4 Análise bivariada

Para o cálculo da análise bivariada, utilizou-se a correlação de Pearson, em que se consideram duas variáveis aleatórias x e y , sendo que x representa os valores da variável X , y representa os valores da variável Y , com médias e variâncias μ_x , σ_x^2 e μ_y , σ_y^2 , respectivamente, e covariância $\sigma_{xy} = Cov[x,y]$. O coeficiente de correlação de X e Y é definido conforme a Equação 19.

$$\rho(X,Y) = \frac{Cov[X,Y]}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}}$$

Eq. (19)

em que:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= E\{(x - \mu_x)^2\} \\ \sigma_y^2 &= E\{(y - \mu_y)^2\} \\ \sigma_{xy} &= Cov[X,Y] = E\{(x - \mu_x)(y - \mu_y)\} \end{aligned}$$

No denominador de $\rho(x, y)$, os desvios-padrão das variáveis x e y têm o papel de padronizar a covariância entre x e y , tornando-a um valor comparável e no intervalo de -1 a 1. O coeficiente de correlação mede a possível relação linear existente entre as variáveis aleatórias, de maneira que:

- a) $\rho(x, y)$ é sempre um valor entre -1 e 1;
- b) Quanto maior a tendência de uma relação linear positiva, $\rho(x, y)$ mais próximo de 1 será o seu valor;
- c) Quanto maior a tendência de uma relação linear negativa, $\rho(x, y)$ mais próximo de -1 será o seu valor;
- d) Quando $\rho(x, y)$ está próximo de zero, não existe relação linear.

3.4.5 Gráfico de controle multivariado

Ao construir o gráfico multivariado, usando a estatística T^2 para observações X_i , plota-se a estatística de acordo com a Equação 20.

$$T^2 = (x - \bar{x})' S^{-1} (x - \bar{x}) \quad \text{Eq. (20)}$$

em que:

- T^2 - tamanho da amostra;
- dado individual do ponto;
- vetor médio da amostra;
- matriz de covariância da amostra.

Os limites de controle para observações individuais são dados pela Equação 21.

$$LSC = \frac{(m-1)^2}{m} B_{1-\alpha/2, p/2, (m-1)} \quad \text{Eq. (21)}$$

em que:

- número de observações;
- p - característica dos números/observações;

- indica que a distribuição beta é usada.

A matriz de covariância é dada pela Equação 22.

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})' \quad \text{Eq. (22)}$$

em que:

matriz de covariância da amostra;

A razão da decomposição de T^2 é detectar qual a variável responsável pelo descontrolo estatístico do processo.

Decomposição T^2 :

$$T_{p-1}^2 + T_p^2 \quad \text{Eq. (23)}$$

em que:

$$T_{p-1}^2 = \left(X_i^{(p-1)} - \bar{X}_i^{(p-1)} \right) S_{xx}^{-1} \left(X_i^{(p-1)} - \bar{X}_i^{(p-1)} \right)' \quad \text{Eq. (24)}$$

em que:

\bar{p} - é a média amostral das m observações das p variáveis;

$x_i^{(p-1)}$ - é o vetor das medidas individuais no período i , excluindo a variável p ;

$\bar{x}^{(p-1)}$ - é o vetor das médias amostrais das m observações para as primeiras $(p-1)$ variáveis;

S_{xx} - é o $(p-1) \times (p-1)$ submatriz principal de S ;

$T_{p|1, \dots, p-1}^2$ - é uma aproximação que seja diferente para as fases se você tiver subgrupos ou observações individuais.

Fase 1 para observações individuais, conforme Equação 25.

$$\frac{(m-1)^2}{m} B_{1/i} \quad \text{Eq. (25)}$$

Fase 2 para observações individuais, conforme Equação 26.

$$\frac{(m-1)^2}{m}$$

Eq. (26)

em que:

- número de amostras.

A razão pela qual se decompõe a estatística T^2 é detectar a variável responsável pelo descontrole estatístico do processo. O método descrito por Tracy, Young & Mason em 1992, da distribuição exata da estatística é descrito na Equação 27 (MONTGOMERY, 2004).

$$T_j^2 + 1.1, \dots, j \approx \frac{n+1}{n} F_{(1, n-1)}$$

Eq. (27)

3.4.6 Índice de capacidade de processo

Neste estudo, um índice de capacidade de processo foi calculado, além do estabelecimento de um índice de qualidade para a água para o rio Mandurim.

De acordo com MONTGOMERY (2004), foi realizada a avaliação da capacidade do processo calculando-se o índice de performance do processo (P_{pk}), conforme AIAG (1995). O índice P_{pk} é utilizado quando o processo encontra-se estável, ou seja, quando se encontra sob controle estatístico, tendo a variável distribuição normal ou não-normal. O índice P_{pk} permite avaliar se o processo é de fato capaz de atender à meta de melhoria. Quando só existe o limite inferior ou superior e o processo encontra-se descentrado utiliza-se o índice performance, conforme Equações 28 e 29.

$$P_{pk} = \min(P_{ps}, P_{pi})$$

Eq. (28)

Desmembrando P_{pi} tem-se a Equação 29:

$$P_{pk} = \min\left(P_{ps} = \frac{LSE - \mu}{3S}, P_{pi} = \frac{\mu - LIE}{3S}\right)$$

Eq. (29)

em que:

- e - limites inferior e superior de especificação, respectivamente;
- S - desvio-padrão amostral da variável em estudo.

O índice de capacidade multivariado, que é a junção dos índices de todas as variáveis, é descrito a seguir. Essa junção é feita, via média geométrica, como demonstrado na Equação 30.

$$C_{pmultiv.} = \left(\prod_{j=1}^p \right) \quad \text{Eq. (30)}$$

em que:

- são as variáveis: 1º, 2º, 3º...;
- é o número total de variáveis.

3.4.7 Limites de especificação

Os limites de especificação utilizados foram seguidos pelos padrões de qualidade da água, estipulados pela Resolução CONAMA 357/2005 para rios classe 2, sendo: pH, o limite superior de especificação (LSE) e o limite inferior de especificação (LIE) foram de 6 e 9, respectivamente. Para a temperatura da água utilizou-se 30 °C como LSE; para a variável DBO 5mg/L; para o nitrogênio 3,7 mg/L; para o fósforo 0,050 mg/L; para turbidez 100 NTU; sólidos totais 500 mg/L; para coliformes termotolerantes 1000 coliformes/ml; para o oxigênio dissolvido o LIE utilizado foi de 5 mg/L. (BRASIL, 2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da estatística descritiva dos parâmetros de qualidade da água

Através da aplicação da metodologia utilizada desenvolveu-se com uso da estatística básica a Tabela 4 observando-se os parâmetros estudados que qualificam a água do rio Mandurim.

Tabela 4 Análise dos dados de estatística descritiva dos parâmetros estudados

Variável	Nº Amos.	Valor medio	DPM	Desvio-padrão	Variância	C.V. (%)	Mín.	Mediana	Máx.	Assimetria	Curtose
pH1	30	7,27	0,06	0,33	0,11	4,53	6,26	7,25	8	-0,56	2,18
pH2	30	7,34	0,07	0,41	0,17	5,61	6,44	7,24	8,30	0,68	0,98
OD1	30	7,71	0,23	1,26	1,60	16,36	5,30	7,60	10,50	0,50	-0,29
OD2	30	7,77	0,22	1,21	1,47	15,61	5,40	8,00	9,90	-0,25	-0,75
N1	30	0,29	0,05	0,28	1,07	94,13	0,02	0,20	1,12	1,16	1,06
N2	30	0,29	0,05	0,28	0,08	93,80	0,02	0,23	1,23	1,51	2,97
P1	30	0,07	0,01	0,05	0,003	74,38	0,01	0,06	0,19	1,30	0,87
P2	30	0,07	0,007	0,04	0,002	59,84	0,01	0,06	0,17	1,14	1,04
DBO1	30	3,1	0,60	3,26	10,65	105,97	0,10	1,98	12,90	1,65	2,29
DBO2	30	4,5	1,06	5,83	34,00	128,48	0,10	2,44	29,60	3,08	11,57
CT1	30	1087	534	2926	8559314	269,16	0,300	262	16000	4,88	25,32
CT2	30	1521	692	3788	14352517	249,14	0,70	359	16000	3,37	10,75
CF1	30	397	113	620	384542	164,60	0,10	171	2700	2,79	8,16
CF2	30	1043	540	2956	8737778	283,39	0,10	201	14000	3,81	14,56
DQO1	30	9,92	1,83	10,01	100,28	100,91	0,92	6,83	36,36	1,51	1,49
DQO2	30	10,07	1,58	8,66	75,07	86,05	1,10	7,35	36,20	1,59	2,37
Turb 1	30	16,37	5,08	27,82	773,80	169,88	1,06	8,70	155	4,58	22,88
Turb 2	30	21,39	5,96	32,67	1067,41	152,76	3,62	12,05	184	4,55	22,74
ST 1	30	55,7	15,5	86,4	7472,0	155,20	7	39	500	4,84	25,15
ST 2	30	51,82	7,40	40,53	1642,76	78,21	10,10	42,50	227	3,03	11,93
T 1	30	18,84	0,63	3,45	11,94	18,34	12,5	19,1	25,5	0,0	-1,03
T 2	30	19,08	0,65	3,6	12,93	18,84	13,5	19,4	26,5	0,12	-0,81

Legenda: 1 = ponto a montante; 2 = ponto a jusante; pH = potencial hidrogeniônico; OD = Oxigênio dissolvido; N = Nitrogênio; P = Fósforo; DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio; CT = Coliformes totais; CF = Coliformes termotolerantes; DQO = Demanda Química de Oxigênio; Turb. = Turbidez; ST = Sólidos Totais; T = temperatura da água. DPM – desvio-padrão médio. C.V. = coeficiente de variação. Nº amos. = número de amostras.

Pode-se observar na Tabela 4 que, para a maioria dos parâmetros, os valores médios encontraram-se semelhantes nos dois pontos monitorados, exceto para a DBO, coliformes, turbidez e sólidos que resultaram numa variabilidade maior. Este fato também é compreendido quando se examina os valores de mínimo e máximo.

Com relação ao desvio-padrão, os valores referentes aos coliformes apresentaram resultados muito elevados, conseqüentemente proporcionando elevados C.V., sendo que apenas para o parâmetro de pH os dados foram classificados como homogêneos, “pois apresentaram um C.V. inferior a 10%, indicando que há baixa variabilidade nos dados do pH (TOLEDO & NICOLELLA, 2002; RAFAELLI, VILAS BOAS & OPAZO (2002).

Segundo critérios apresentados por RAFAELLI, VILAS BOAS & OPAZO (2002), a maioria dos valores de C.V. foram altos, indicando que nos pontos amostrados, os valores observados encontravam-se afastados da média. Outro fator também considerado é que os resultados do C.V. indicaram grande variabilidade dos dados das amostras, pois estão acima de 20%, como nas variáveis DBO, nitrogênio, fósforo, coliformes, entre outros (TOLEDO *et al.*, 2008). Este fato também é compreendido quando se examinam os valores de mínimo e máximo.

O coeficiente de variação de alguns parâmetros é alto, isso se justifica pela própria natureza dos dados e pelas múltiplas influências que podem sofrer (TOLEDO & NICOLELLA, 2002).

Dados de assimetria e curtose próximos de zero, segundo SILVA *et al.* (2007), indicam simetria da distribuição, como observado nas variáveis pH e temperatura. Com relação à média e mediana, quando a distribuição for simétrica seus valores serão coincidentes ou próximos. Pelo valor da medida de assimetria, percebe-se que se o valor foi negativo, a distribuição está desviada para a esquerda. Se o valor foi positivo, será desviada para a direita. Uma distribuição razoavelmente simétrica tem coeficiente de assimetria variando entre -1 e $+1$.

Os valores de assimetria e curtose são em sua maioria valores positivos, caracterizando-se menores do que os valores médios, como nos estudos desenvolvidos por TOLEDO *et al.* (2008). Quando a distribuição é simétrica em relação a sua média, como é o caso da distribuição normal, o valor da assimetria é zero.

Quanto ao nível de 5% de significância, a maioria dos dados não apresentaram uma distribuição normal.

4.2 Gráficos de controle - Gráficos de medidas individuais – Shewhart, CUSUM e MMEP

Os gráficos individuais para monitoramento dos parâmetros estudados para se obter a característica da qualidade da água do rio Mandurim estão representados a partir da Figura 7, em que se apresentam as cartas de controle de pH a montante e a jusante.

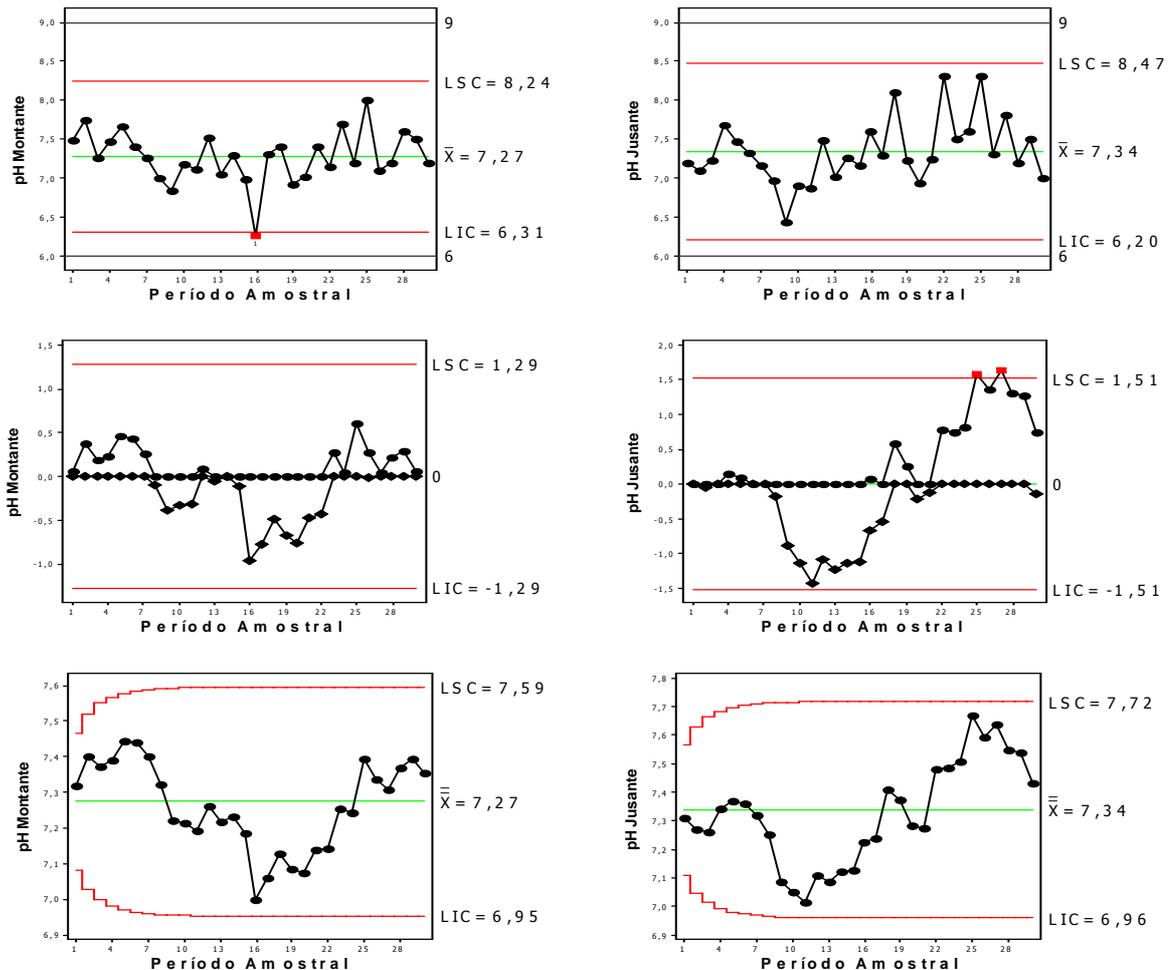


Figura 7 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para o pH a montante e a jusante do rio.

O que se observa com o gráfico de Shewhart do pH é que os valores deste estão dentro da normalidade, segundo teste estatístico ($p\text{-valor} \geq 0,05$). Também se encontra dentro do padrão estipulado pelo CONAMA. Quando o processo se encontra deste modo COSTA & MACHADO (2007) afirmam que o processo é estável porque os valores da amostra caem raramente fora dos limites de controle.

Quanto à variabilidade dos dados, pode-se afirmar que um dos pontos de análise da carta de Shewhart a montante esteve abaixo do limite inferior de controle, caracterizando possível processo fora de controle, visto que o ponto variou 0,73 em relação ao dado anterior e 1,04 em relação ao dado posterior. O valor de pH observando-se o ponto 16 é o valor mais baixo de todas as amostras de pH coletadas, justificando o fato de a amostra estar abaixo do limite de controle inferior.

CHANG (2008), que monitorou 118 estações de água da bacia Han no sul da Coréia, percebeu que os valores de pH apresentaram tendência de valores crescentes ao longo das coletas, comparando-se com os dados de pH deste trabalho não se percebeu esta característica, tendo os valores pouca variação.

De acordo com JONNALAGADDA & MHERE (2001) e SIMEONOV *et al.* (2003), em experimento observando a qualidade da água, o parâmetro pH esteve constante em praticamente todos os pontos (variando aproximadamente entre 6 e 9), sendo diminuído no último ponto provavelmente devido ao aumento na concentração do ácido orgânico causado pela decomposição da matéria orgânica de um dos afluentes. No estudo em questão percebe-se que os valores das amostras não variaram de forma significativa quando comparado com a média da variável, tendo resultados semelhantes aos dos autores citados.

SANCHEZ *et al.* (2006), em estudos sobre qualidade da água de rio, os valores encontrados para pH estiveram na escala de 7,1 a 7,3. Já GUEVARA-RIBA *et al.* (2006) encontraram valores médios de pH que variaram entre 7,2 e 7,8, obtendo apenas uma amostra que teve como resultado 5,1. Resultados semelhantes foram encontrados por BORDALO, NILSUMRANCHI & CHALERMWAT (2001) e NAGEL (2001), cujos valores de pH foram próximos dos obtidos neste estudo, indicando que o pH da água é apropriado, principalmente para a presença e metabolismo de organismos fotossintetizantes.

Com relação ao controle de processo, pode-se afirmar que os gráficos de pH estão sob controle estatístico e não apresentam comportamento sistemático ou não-aleatório, porém podem apresentar descontrole porque apresentam alguns pontos sequenciais abaixo da linha média (gráfico de Shewhart jusante do ponto 6 ao 11) (MONTGOMERY, 2004).

No gráfico de CUSUM, percebem-se alguns valores próximos a zero, principalmente no início dos pontos a jusante. Isso ocorre porque a média do processo não sofre alteração, ou seja, os desvios negativos são compensados pelos positivos, fazendo com que o cálculo estatístico oscile em torno do zero (PYLRO, 2008).

Na carta do pH a jusante, percebem-se dois pontos fora do intervalo H superior, que é o intervalo que parte da linha zero em direção ao limite superior, fato observado apenas nas cartas tipo CUSUM, não sendo perceptíveis nas cartas individuais, mostrando que o processo pode ser considerado fora de controle estatístico (NEZHAD & NIAKI, 2010).

No caso das cartas de CUSUM se há uma tendência de pontos desenvolverem-se acima ou abaixo, é evidência de que a média do processo mudou e deve-se determinar a causa atribuível a esse fato (MONTGOMERY, 2004). Isto se observa em alguns pontos nos gráficos da Figura 7, no qual se apresentam pontos acima e abaixo da linha do zero.

O processo é dito fora de controle quando um ou mais pontos estiverem além dos limites de controle ou apresentarem um comportamento não aleatório. Um exemplo deste comportamento pode ser uma série de pontos consecutivos de um mesmo lado da carta, acima ou abaixo da linha central, quando se tratar de um gráfico de Shewhart, mesmo que nenhum ponto caia fora dos limites de controle (MICHEL & FOGLIATTO, 2002, p. 19).

Como nos estudos de SILVA *et al.* (2006), os gráficos MMEP do pH apresentam alguns pontos com comportamento que indica instabilidade no processo, já que se

apresentam em número de 4 ou 5 sequenciais na zona acima ou abaixo da linha média como a montante entre os pontos 1 e 8 e entre os pontos 9 e 24. No gráfico a jusante a sequência é observada entre os pontos 7 e 17 e entre os pontos 22 e 31.

Os valores de pH podem ser alterados principalmente por decomposições ácidas da poluição atmosférica, também pelo gás carbônico que ocorre naturalmente no meio ambiente e que, decomposto na água, forma o ácido carbônico que reduz o pH (LIBÂNIO, 2008). Nesta pesquisa os valores de pH estiveram dentro da faixa esperada não havendo alterações significativas.

Na Figura 8, apresentam-se às cartas de controle da variável oxigênio dissolvido.

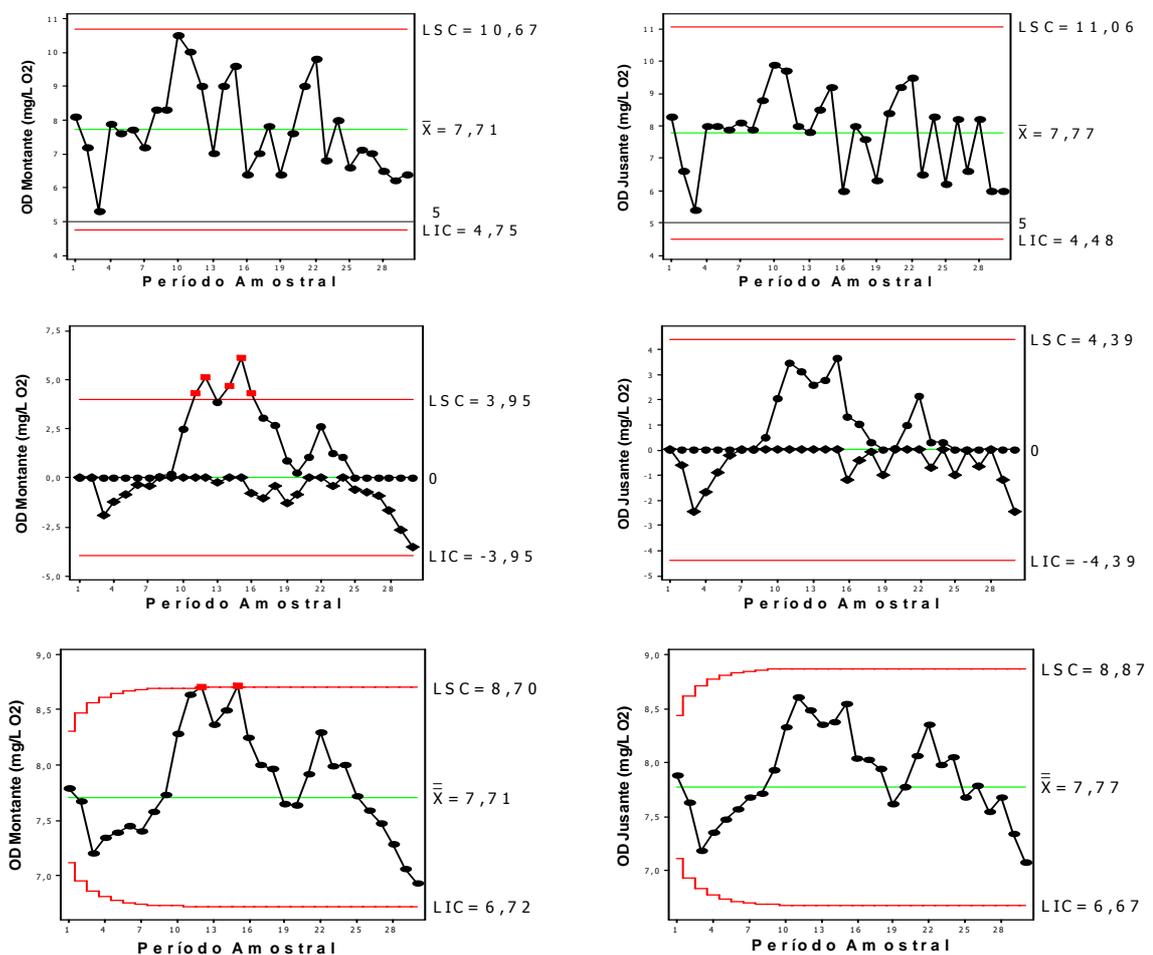


Figura 8 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM e MMEP para o OD a montante e a jusante do rio.

Variações podem ocorrer no processo e por isso devem ser identificadas o mais rapidamente possível, observando-se alguns critérios como, por exemplo, não haver sete pontos consecutivos crescendo ou decrescendo e não haver sete pontos consecutivos acima ou abaixo da média. Isso é utilizado pela maioria das indústrias para minimizar o tempo que se leva para identificar causas no processo (NOMELINI, FERREIRA &

OLIVEIRA, 2009). No gráfico de Shewhart relativo a jusante do rio percebe-se uma sequência de 9 pontos acima da média, entre os pontos 4 e 15, merecendo certa atenção ao desenvolvimento do processo.

De acordo com ALENCAR *et al.* (2004), sequência de pontos de um mesmo lado da linha média é um movimento contínuo em uma direção (amostras 4 - 15 a jusante), cujas causas podem ser desgaste dos equipamentos do laboratório, fadiga do operador dos equipamentos, reagentes e baixa qualidade ou contaminados.

Também para ALENCAR *et al.* (2004), o gráfico a jusante apresenta tendência ou ciclos, pois 6 pontos aumentando ou diminuindo caracterizam essa propriedade. No gráfico ocorre, entre as amostras 4 e 10, uma tendência crescente de valores do gráfico a jusante.

WILLIAMS *et al.* (2000) estudaram a variação da qualidade de água em três rios de Reino Unido e estabeleceram uma equação empírica entre a variação do déficit de oxigênio, a taxa média de fotossíntese e a taxa de respiração média, mostrando a importância do parâmetro oxigênio dissolvido em estudos desta natureza.

Os resultados de SANCHEZ *et al.* (2006) sugerem que a variação do oxigênio foi um parâmetro representativo para estabelecer uma escala relativa da qualidade da água, sendo, portanto, o oxigênio dissolvido considerado muito importante nesta pesquisa. SANCHEZ *et al.* (2006), em seus estudos pesquisando o parâmetro oxigênio dissolvido, encontraram valores entre 3,6 e 4,4 mg/L. De acordo com o inciso VI, art.15º, da Resolução 357/2005 do CONAMA, para águas de classe 2, o valor mínimo de OD, em qualquer amostra, não deve ser inferior a 5mg/L de OD (BRASIL, 2005). Neste estudo encontraram-se valores entre 5,4 e 10,5 mg/L, estando, portanto, de acordo com a Resolução do CONAMA. Estatisticamente, observam-se alguns valores plotados no gráfico OD Montante que estão acima do limite superior, tornando o processo possivelmente fora de controle.

NAIME & FAGUNDES (2005), analisando o controle da qualidade do rio Portão - RS, concluíram que o aumento da pluviosidade e, conseqüentemente, da vazão aumentam o teor de oxigênio dissolvido. Os resultados da presente pesquisa não permitiram correlacionar essas variáveis, pois existe bastante oscilação nos valores de vazão, embora em alguns pontos observe-se a correlação.

Na carta de controle de Shewhart, do oxigênio dissolvido a jusante, apresentam-se pontos sequenciais acima da linha média, entre os pontos 4 a 16, podendo caracterizar uma eventual tendência de o processo sair do controle.

Pode-se perceber que, principalmente, do ponto 1 ao ponto 9 a montante do rio, no gráfico de Shewhart os valores oscilaram em torno de certo nível, contudo nos pontos seguintes, acima da linha central, houve uma súbita mudança no comportamento do dado, o que revela uma mudança no padrão de variação do processo.

O gráfico CUSUM a montante apresenta cinco pontos acima do limite superior de controle, caracterizando processo fora de controle. Além disso, a partir do ponto 25 ocorre o início de uma sequência de pontos, podendo indicar que o processo pode ter sofrido alguma mudança e estar sob ação de causas especiais, cabendo a investigação da causa desta instabilidade no processo (podendo ser erro do equipamento, falha do analista, falta de duplicata de amostra, entre outros fatores) e indicando a necessidade de promoção de ações corretivas a fim de que retorne à estabilidade. Também apresenta uma sequência a partir do segundo até o décimo ponto, já que os pontos estão abaixo da linha média (NOMELINI, FERREIRA & OLIVEIRA, 2009).

No gráfico CUSUM a jusante, ocorre a partir da amostra 9 uma sequência de 10 pontos, todos de um mesmo lado da linha média, indicando instabilidade no processo (CORBETT & PAN, 2002). Em seus estudos, ALENCAR *et al.* (2004) encontraram resultados semelhantes, observando pontos sequenciais, caracterizando não aleatoriedade dos dados. Para estes autores, que utilizaram as cartas de Shewhart e CUSUM, em seus estudos de monitoração de variáveis ambientais, estas são mais eficazes na detecção de mudanças no processo.

RUDOLF, AHUMADA & PÉREZ (2002) utilizaram OD como um índice de qualidade da água de um rio no Chile e os resultados sugeriram que a variação do oxigênio foi um parâmetro representativo para estabelecer uma escala relativa da qualidade da água. Neste trabalho, não foram observadas diferenças entre os valores de oxigênio dissolvido ao longo do período amostral, porém a diminuição da concentração deste parâmetro pode ser relacionada, principalmente, ao despejo de resíduos da suinocultura.

Na carta CUSUM a montante e a Jusante a partir do ponto 10 até o ponto 18 é observado um aumento, ou seja, deslocamento dos valores em relação à linha média.

Na Figura 9, mostram-se as cartas de controle do nitrogênio a montante e a jusante do rio. No gráfico Shewhart a montante do rio pode ser observado entre os pontos 19 e 24, uma sequência de 6 pontos de um mesmo lado da linha média, indicando possível instabilidade no processo (CORBETT & PAN, 2002).

Ao se observar o p-valor do teste de normalidade, rejeita-se a hipótese nula de normalidade da variável analisada, considerando-se 5% de significância, ou seja, os dados não são normais a montante do rio, tendo sido, portanto, transformados.

Pode-se considerar um padrão de não aleatoriedade, na forma de estratificação, observando-se o gráfico Shewhart a jusante do rio, entre os pontos 4 e 23 que, segundo NOMELINI, FERREIRA & OLIVEIRA (2009), pode ocorrer quando os limites não são calculados de forma correta ou, ainda, quando os subgrupos foram formados de maneira inadequada. Não é o caso dos dados desta pesquisa, visto que os limites foram calculados com base em dados transformados e não-correlacionados, observando-se todas as

exigências para a construção de gráficos de controle. Ainda de acordo com os mesmos autores, não é comum encontrar na literatura número de pontos que indiquem estratificação.

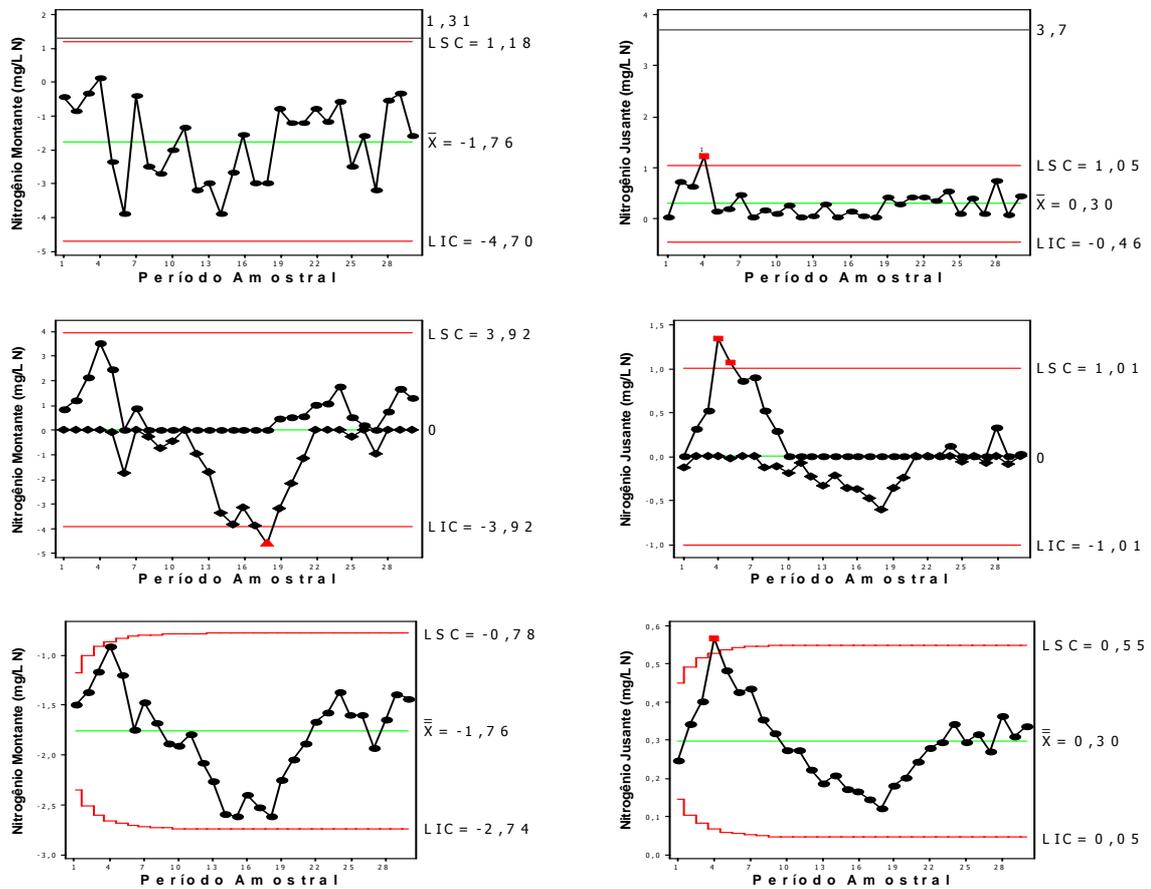


Figura 9 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para o nitrogênio a montante e a jusante do rio.

Outro fator a ser observado é que no ponto 4 do gráfico a jusante que se apresenta acima do limite superior é realmente o ponto que tem o mais alto valor de todas as coletas, indicando oscilação em relação a valores próximos. A vazão do rio neste ponto e nesta coleta foi uma das mais baixas do conjunto de dados, podendo justificar o valor alterado do parâmetro. Diferentemente dos resultados obtidos por BONNET, FERREIRA & LOBO (2008), que encontraram valores mais altos para parâmetros de qualidade da água com vazões altas. Embora, também esses autores, observem que dados de nitrogênio e fósforo são diretamente ligados a atividades agropastoris.

Concentrações de nitrogênio acima dos limites podem favorecer a proliferação de plantas aquáticas e, se a água for represada, poderá afetar o nível de oxigênio dissolvido, a temperatura e a passagem de luz, com reflexos negativos na vida aquática (GONÇALVES *et al.*, 2005). Não é o caso desta pesquisa em que os valores do parâmetro estiveram dentro dos limites de especificação.

Nos estudos de SANCHEZ *et al.* (2006), observando o parâmetro nitrogênio os autores notaram que as concentrações estavam baixas nos dois primeiros pontos de coleta e tiveram ligeira elevação nos pontos seguintes. Na presente pesquisa, os valores iniciais foram mais altos que os seguintes apresentando variação ao longo das coletas, principalmente a montante.

Segundo CHANG (2008), em sua pesquisa na bacia Han na Coréia, o parâmetro nitrogênio se mostrou em concentrações mais elevadas ao longo do percurso do rio, diferentemente do que foi observado nesta pesquisa, em relação ao parâmetro nitrogênio que teve concentrações maiores nas primeiras coletas.

HERMES *et al.* (2008) estudaram os parâmetros de qualidade da água fósforo total e nitrogênio total do Rio Piquiri, Ubatã – PR e encontraram valores que variaram de 0,030 a 1,80 mg L⁻¹ para a variável nitrogênio, valores superiores aos obtidos no presente trabalho.

LIU *et al.* (2008), estudando variáveis de qualidade da água como DBO e nitrogênio na forma amoniacal, encontraram valores para este parâmetro acima dos encontrados neste trabalho. Também observaram níveis de matéria orgânica além dos indicados para qualidade das águas.

JONNALAGADDA & MHERE (2001) observaram o parâmetro nitrato em águas do rio Odzi no Zimbábue, encontrando valores entre 0,44 e 0,96 mg L⁻¹. Nesta pesquisa foram encontrados valores para nitrogênio variando entre 0 e 1,23 mg L⁻¹.

MANSOR, FILHO & ROSTON (2006) avaliaram cargas difusas de origem rural em uma sub-bacia do Rio Jaguari, SP e encontraram um valor médio igual 1,75 mg L⁻¹ para o parâmetro nitrogênio, ou seja, também superiores aos encontrados no presente trabalho.

O nitrogênio presente em demasia na água causa alguns problemas ambientais como cita ISOLDI (2004): a eutrofização, odor e sabor desagradável em águas para consumo, toxidez para os peixes e diminuição da concentração de oxigênio dissolvido. No rio Mandurim não se observa esse fato, pois atende à norma estabelecida pelo CONAMA.

MOLINA, HERNANDEZ & VANZELA (2006), estudando a qualidade da água na microbacia do Córrego Água da Bomba no município de Regente Feijó – SP, observaram pequenas variações de nitrogênio nos pontos de amostragem, como neste estudo, principalmente na carta Shewhart a jusante, em que houve pequena variação dos dados.

Na carta Shewhart a jusante, nos primeiros pontos, podem ser observados valores mais altos para o parâmetro nitrogênio, sendo que para o parâmetro oxigênio dissolvido são observados valores baixos nestes mesmos pontos, justificando-se este comportamento pelo fato de poder ter sido consumido no meio, caracterizando conversão de amônia a nitrito e deste em nitrato, afetando a vida aquática (BRAGA *et al.*, 2005).

Se um processo está sob controle os valores permanecem próximos a zero no gráfico de CUSUM. Caso se desloque para cima ou para baixo, então ocorrerão valores

cada vez mais positivos ou negativos, com tendência à detecção de causas especiais (RIBEIRO JUNIOR & GONÇALVES, 2009, p. 87), como se verifica nos gráficos de controle de CUSUM a montante entre os pontos 1 e 6 e 11 e 21 e a jusante entre os pontos 2 e 8. Isso pode ocorrer em virtude de resultados de erros de registro dos dados, cálculos de medição, instrumentos de laboratório descalibrados, erro do operador dos equipamentos ou, ainda, erro no uso da técnica ou defeitos nos equipamentos de laboratório (NOMELINI, FERREIRA & OLIVEIRA, 2009).

De acordo com REYNOLDS JR. & STOUMBOS (2009), o gráfico CUSUM tabular tem bom desempenho em detectar pequenos ou grandes deslocamentos na média de controle, mesmo para $n = 1$, como é o caso deste estudo, sendo similar ao gráfico de controle da média móvel ponderada exponencialmente (MMEP).

Segundo SANCHEZ *et al.* (2006), a concentração total de fósforo foi ligeiramente mais elevada no ponto um em relação aos outros pontos da amostragem, em seu experimento, apresentando valores superiores aos encontrados nas águas do rio Mandurim. Analisando os dados coletados observa-se que as concentrações de fósforo tiveram picos de valor tanto a montante como a jusante do rio, porém não ultrapassaram limites estatísticos, mas sim os ambientais.

MACLEOD & HAYGARTH (2003) compilaram vários estudos feitos na Europa sobre a importância de fontes difusas de fósforo com origem agrícola. Concluíram que as referidas fontes contribuem com 29 a 60% da carga total observada nas águas superficiais daquelas bacias. No rio Mandurim, até o ano de 2006, era observado o aporte de nutrientes como o fósforo no rio, porém com a implantação de cercas de proteção e reconstrução da mata ciliar essa característica tem sido modificada significativamente no local, embora ainda apareçam nas análises principalmente a jusante no gráfico de Shewhart, valores que não se enquadram na norma de qualidade ambiental.

Na Figura 10, mostram-se as cartas de controle do parâmetro fósforo a montante e a jusante do rio Mandurim. Quando todos os pontos estão distribuídos aleatoriamente sobre os limites inferior e superior, diz-se que o processo está estável, sob controle ou é previsível. Assim, as variações se devem apenas por causas comuns (MOREIRA *et al.*, 2008).

Ao se observar o p-valor do teste de normalidade, admite-se que a hipótese dos dados serem normais é nula, considerando-se 5% de significância, ou seja, os dados não são normais para o gráfico a montante do rio, por isso os dados foram transformados através de box-cox.

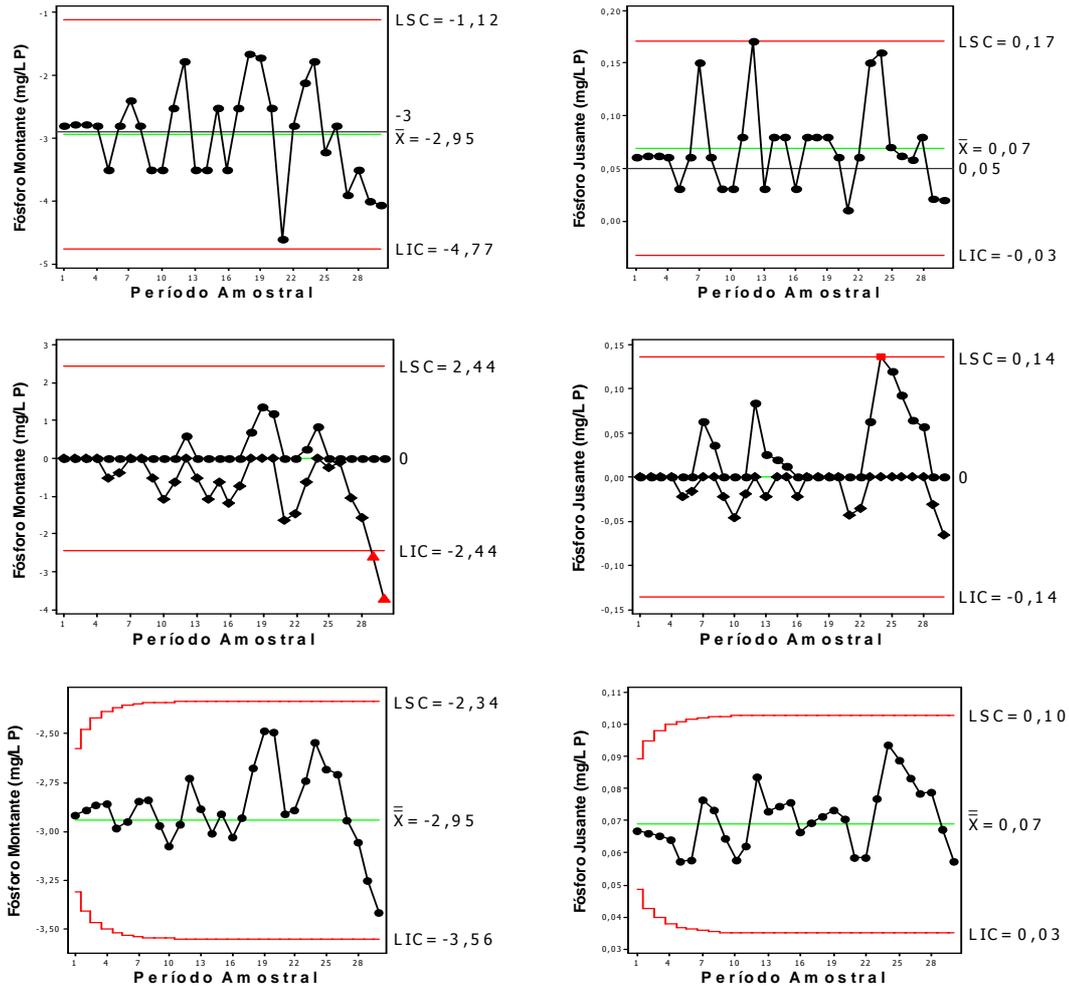


Figura 10 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para o fósforo a montante e a jusante do rio.

BORDALO, NILSUMRANCHI & CHALERMWAT (2001) encontraram valores médios para o parâmetro fósforo em estação chuvosa de $0,62 \text{ mg L}^{-1}$ e em estação seca de $0,33 \text{ mg L}^{-1}$, valores bem maiores dos que os encontrados nesta pesquisa, que variaram de 0 a $0,19 \text{ mg L}^{-1}$.

JOANNALAGADDA & MHERE (2001) também encontraram valores maiores dos que os desta pesquisa, ou seja, valores que variaram de $0,50$ a $0,85 \text{ mg L}^{-1}$.

No parâmetro fósforo, verifica-se que os pontos estão dentro dos limites de controle, não havendo evidências de configurações do tipo sequência de coletas, ou seja, o processo está sob controle do ponto de vista da variabilidade.

CHANG (2008) encontrou em sua pesquisa valores para o parâmetro fósforo mais baixos nos primeiros pontos de coleta e variação crescente ao longo do rio, comportamento semelhante ao obtido nesta pesquisa, que também encontrou valores de fósforo mais baixos nos primeiros pontos e variação ao longo do rio.

Pontos da carta CUSUM do parâmetro fósforo a montante apresentaram-se abaixo do intervalo H inferior (é o intervalo entre a linha do zero e o limite inferior), indicando possível falta de controle estatístico no processo. O gráfico CUSUM incorpora diretamente toda a informação na sequência dos valores da amostra, plotando as somas cumulativas dos desvios dos valores da amostra de um valor-alvo (MONTEGOMERY, 2004).

De acordo com pesquisa em *in loco*, observaram-se várias características da área estudada, dentre elas a criação de suínos, o que pode proporcionar o aporte de fósforo ao rio. GONÇALVES *et al.* (2005) desenvolveram pesquisa de qualidade da água em uma microbacia hidrográfica e observaram resultados semelhantes para o parâmetro fósforo.

ALENCAR *et al.* (2004) utilizaram em seus estudos o controle estatístico de processos, construindo gráficos de controle como o de CUSUM e o MMEP. Os resultados da carta CUSUM fósforo jusante desta pesquisa são similares aos resultados encontrados na carta CUSUM desses autores, pois ambas encontram-se sob controle estatístico.

As cartas de controle DBO a montante e a jusante do rio são apresentadas na Figura 11.

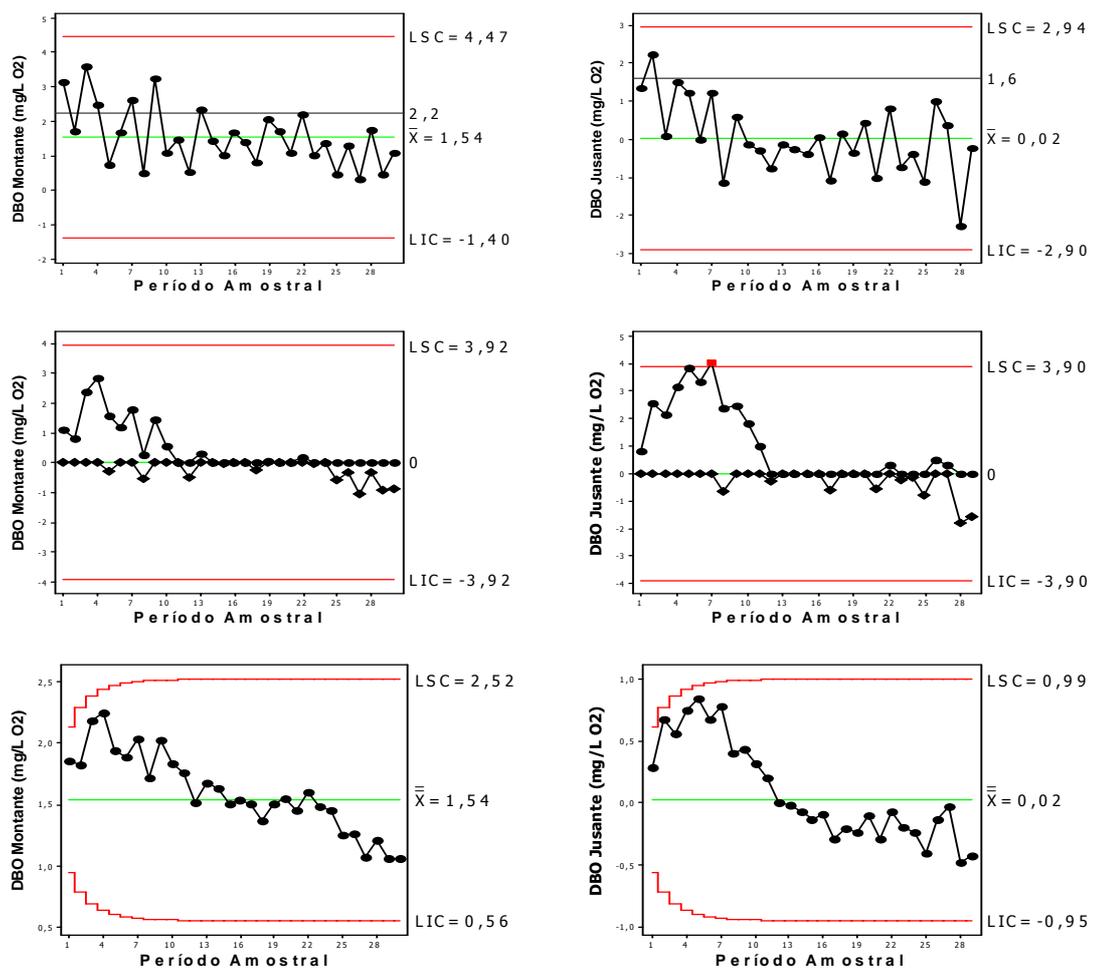


Figura 11 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para a DBO a montante e a jusante do rio.

No gráfico Shewhart DBO a montante do rio surgem, a partir da amostra 12 até 23 sucessivas, observações que apresentam uma autocorrelação negativa, isto é, uma observação abaixo do valor médio tende a ser seguida por uma observação acima do valor médio e vice-versa. Essa correlação não afeta o gráfico como um todo, já que testada a correlação de todos os dados em conjunto esta não está presente.

Ao se observar o p-valor do teste de normalidade, admite-se que a hipótese dos dados serem normais é nula, considerando-se 5% de significância, ou seja, os dados não são normais, necessitando, portanto, serem transformados (Box-Cox) e no gráfico a jusante serem aplicadas series temporais – ARIMA, para serem construídos os gráficos de controle, em virtude também de correlações entre os dados.

A DBO apresentou valores elevados nos primeiros meses avaliados, apresentando uma tendência de redução nos meses subsequentes, sendo mantidos os valores acima do máximo permitido, em alguns pontos, nos primeiros meses de coleta, com queda a partir do mês de junho de 2004, onde os valores estabeleceram-se abaixo de 5 mg L^{-1} , máximo permitido pela Resolução 357/2005 CONAMA para corpos de água classe 2.

O padrão de não aleatoriedade que aparece no gráfico de Shewhart a jusante do rio, entre os pontos 10 e 17, é chamado de sequência ou deslocamento no nível do processo, em que 7 ou mais pontos consecutivos estão em apenas um dos lados da linha média, isto pode ser um indicativo de falta de controle no processo, se persistir esse tipo configuração nos dados (NOMELINI, FERREIRA & OLIVEIRA, 2009).

Nos estudos de SANCHEZ (2006), a DBO média e as concentrações desta diminuíram a jusante e o valor mínimo foi observado no ponto da descarga dentro do rio de Guadarrama, provavelmente devido à oxidação da matéria orgânica que causa a redução de concentração do oxigênio dissolvido e do déficit de oxigênio. Além disso, a DBO diminuiu, também consideravelmente, de 593 a 37 mg L^{-1} e 209 a 3 mg L^{-1} , respectivamente, mostrando que uma taxa elevada da oxidação da matéria orgânica ocorreu durante toda a jusante. Os valores de DBO do rio Mandurim foram menores que os encontrados por SANCHEZ (2006), mas tiveram comportamento semelhante.

JONNALAGADDA & MHERE (2001) encontraram valores para a variável DBO variando entre $2,4$ e $3,9 \text{ mg L}^{-1}$, valores mais baixos do que os encontrados nesta pesquisa que apresentou valores com maior variabilidade.

MENEZES *et al.* (2009) encontraram valores alterados para variáveis como DBO (valor acima), OD (valor abaixo), pH (valor abaixo), indicando que o comprometimento da qualidade da água é influenciado pela prática agrícola. As semelhanças com este trabalho estão relacionadas aos valores encontrados para DBO e à indicação de práticas agrícolas e dejetos de animais, os quais teriam alterados tais valores dos parâmetros.

Nos estudos de BORDALO, NILSUMRANCHI & CHALERMWAT (2001), os valores de DBO aumentaram consideravelmente ao longo do estudo, tendo como média $68,5 \text{ mg L}^{-1}$ na estação seca, sendo estes valores mais altos dos que os encontrados nesta pesquisa que variaram entre montante e jusante de 0,2 a $29,6 \text{ mg L}^{-1}$.

Nas pesquisas de LIU *et al.* (2008), no rio Hun-Taizi na China, foram coletadas amostras, semanalmente, em 18 locais e os resultados mostram que a carga de poluentes foi acima do normal enfatizando-se os níveis de DBO no rio, durante um período de 1995 a 2004, que tiveram aumento ao longo do período. No rio Mandurim, como citado acima, isso não foi verificado.

PINTO *et al.* (2009), em estudo de qualidade da água, observaram que o parâmetro DBO teve resultados abaixo da Resolução do CONAMA, ao contrário desta pesquisa em que em alguns pontos os valores encontrados estão acima do permitido, principalmente observando-se pontos de coleta iniciais a montante e a jusante.

Segundo os mesmos autores, a pecuária extensiva e o baixo nível tecnológico empregado foram determinantes no nível da qualidade da água, na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha - MG, concorrendo para a elevação dos valores de coliformes termotolerantes e DBO. Neste estudo, também se enfatiza o baixo nível tecnológico empregado nas propriedades e atividades suinícolas ao longo da bacia.

Quando o processo está sob controle os valores do CUSUM Tabular ficarão em torno de zero. Caso contrário, se eles se deslocarem para cima ou para baixo, significa que ocorreram valores cada vez mais positivos ou negativos com tendência à detecção de causas especiais (RIBEIRO JUNIOR & GONÇALVES, 2009). No gráfico a jusante perceberam-se alterações nos valores em relação à linha do zero (entre pontos 1 e 15) e também um ponto acima do limite superior, porém a montante nenhum valor ultrapassou os limites estatísticos propostos para o gráfico, estando o processo sob controle.

Na Figura 12, mostram-se as cartas DQO a montante e a jusante do rio Mandurim. Os ciclos são pontos com picos altos intercalados por picos baixos com certa regularidade e mesma amplitude (NOMELINI, FERREIRA & OLIVEIRA, 2009). Uma das causas, que podem indicar está ocorrência, é a mudança sistemática nas condições ambientais. Também se justifica esse comportamento nos dados devido à rotatividade de analistas nos laboratórios, desgaste de equipamentos ou descalibragem, entre outros fatores. No gráfico a montante observa-se essa representação do ponto 4 ao ponto 12. Os gráficos Shewhart DQO estão sob controle estatístico de processo.

A configuração do tipo tendência decrescente está presente e foi detectada no gráfico MMEP DQO, demonstrando mudança no nível de processo. Também se observam alguns dos pontos iniciais na carta CUSUM DQO montante e Jusante, pontos com valores

distantes da linha média, indicando falta de controle no processo (NOMELINI, FERREIRA & OLIVEIRA, 2009).

Ao se observar o p-valor do teste de normalidade, rejeita-se a hipótese nula, considerando-se 5% de significância, ou seja, os dados não são normais (BALESTRASSI, FERREIRA & MORAES, 2006).

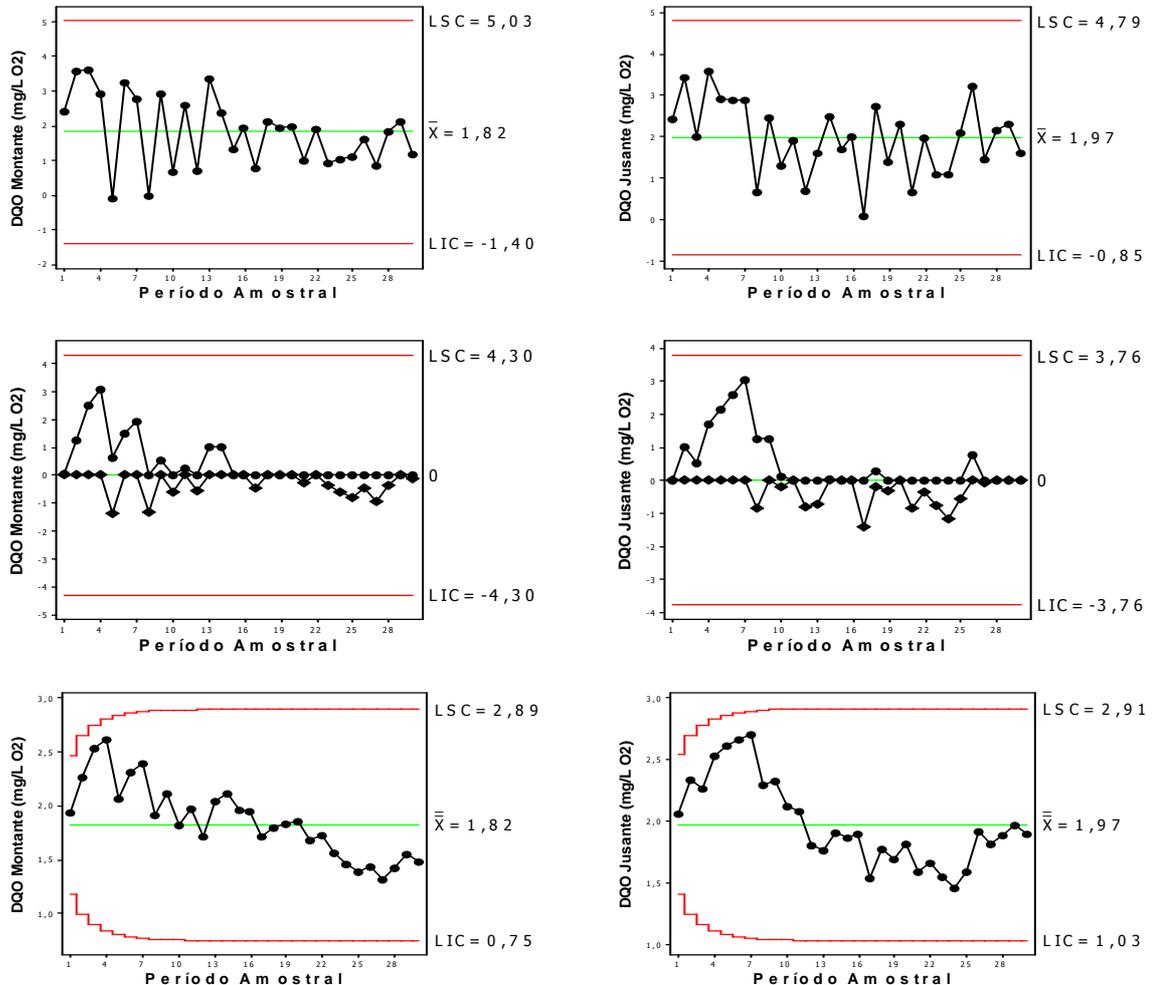


Figura 12 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para a DQO a montante e a jusante do rio.

Seguindo a metodologia proposta, foram empregados dados do resíduo ARIMA para a construção dos gráficos coliformes termotolerantes a montante e a jusante, para que não fosse gerado nenhum alarme falso e para que os limites fossem calculados de forma correta (BALESTRASSI, FERREIRA & MORAES, 2006). Em relação aos gráficos de Shewhart e MMEP, até se admite, por alguns autores, a hipótese de utilização de dados de campo, ou seja, mesmo em situações em que a suposição de normalidade é violada, estes gráficos ainda funcionam razoavelmente bem (MONTEGOMERY, 2004), porém não foram usados os dados dessa maneira, devido à autocorrelação existente nos mesmos.

Na Figura, 13 são mostradas as cartas de coliformes termotolerantes a montante e a jusante do rio Mandurim.

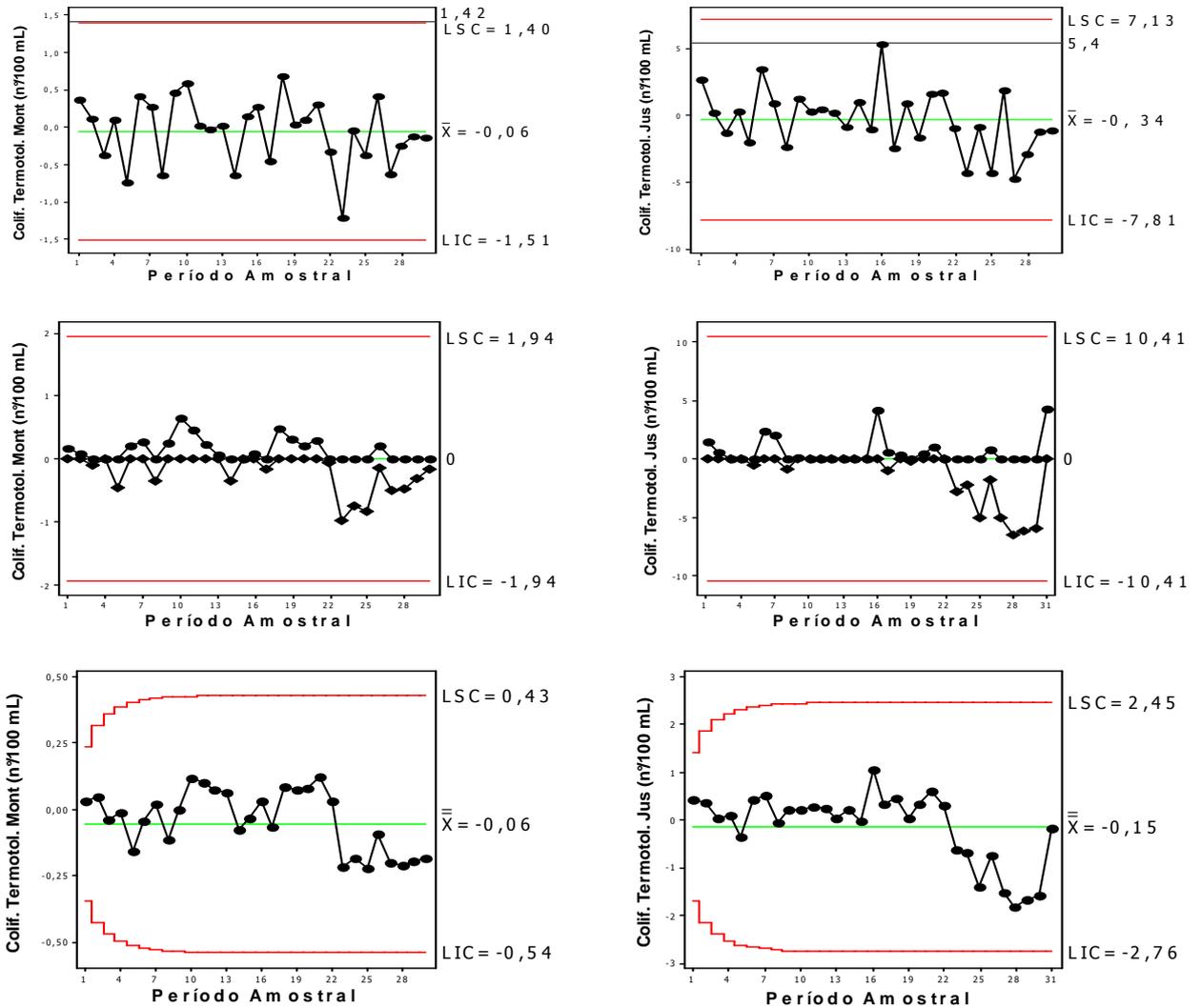


Figura 13 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para os coliformes termotolerantes a montante e a jusante do rio.

Para os coliformes termotolerantes, o uso da água para recreação de contato primário deverá obedecer a Resolução 274/2000 CONAMA (200 coliformes em 100ml em 5 amostras). Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de, pelo menos, 6 (seis) amostras, coletadas no período de um ano, com frequência bimestral (BRASIL, 2005). Os coliformes termotolerantes não apresentaram pontos fora dos limites de especificação do CONAMA.

MERTEN & MINELLA (2002) relatam que as atividades de pecuária representam grande risco à qualidade de corpos d'água, quando nestas não são adotadas práticas de manejo conservacionistas, elevando os valores de DBO e coliformes fecais, como é o caso

desta pesquisa, cuja área de estudo apresentou, durante as primeiras 20 coletas, atividades desta natureza nas margens do rio.

PINTO *et al.* (2009) encontraram em seus dados valores muito semelhantes ao desta pesquisa para o parâmetro coliformes termotolerantes. Quando os valores deste parâmetro diminuíram, os autores atribuíram o fato à rotatividade do gado na pastagem e ao baixo índice pluviométrico.

BORDALO, NILSUMRANCHI & CHALERMWAT (2001) encontraram valores para coliformes termotolerantes semelhantes ao desta pesquisa, pois, em sua pesquisa, os valores variaram de 20 a 2043 coliformes por ml.

Na carta Shewhart coliformes totais jusante, entre os pontos 9 e 14, há um indicativo de falta de controle no processo, pois ocorreu uma configuração do tipo sequência (pontos consecutivos encontram-se em apenas um dos lados da linha média).

Na Figura 14, mostram-se as cartas de coliformes totais a montante e a jusante do rio Mandurim.

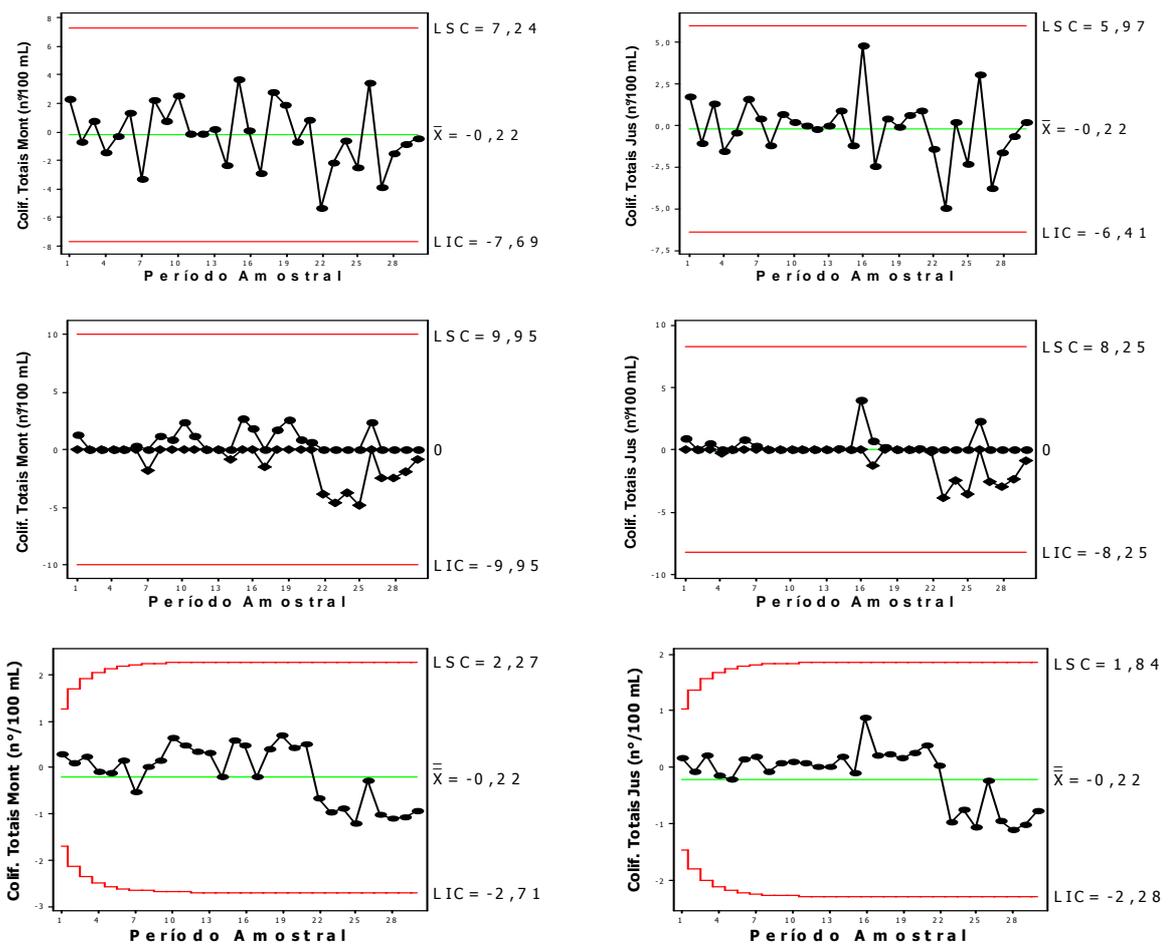


Figura 14 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para os coliformes totais a montante e a jusante do rio.

Com relação aos gráficos CUSUM, apresentados para os coliformes totais, pode-se afirmar que são estacionários, ou seja, os valores plotados estão em sua maioria em torno da média do processo, não ocorrendo afastamento do valor-alvo. No caso desta pesquisa, que trabalha com dados de qualidade da água de um rio, os dados não seriam estacionários se houvessem erros dos equipamentos, erro do analista, problemas relacionados à contaminação pontual, eventos ambientais ocorridos na época da coleta, entre outros fatores.

MINGOTI & YASSUKAWA (2008) testaram modelos de séries temporais como o AR, ARIMA, sendo que em todas as situações os resultados para AR foram os melhores. Esse tipo de modelo é o que foi usado nesta pesquisa tendo sido considerado o mais adequado para o conjunto de dados. Também observaram que em processos independentes os gráficos de controle CUSUM e MMEP foram os mais rápidos para detectar sinais de processo fora de controle.

Na Figura 15, apresentam-se os gráficos de controle para a variável turbidez. Quando há pontos além dos limites inferior e superior, considera-se o processo como instável, fora de controle ou imprevisível. Esse comportamento pode ser explicado pela presença de causas especiais que atuam sobre o processo e que ocorrem de forma independente e sem controle (MOREIRA *et al.*, 2008), como ocorre com a amostra de número 14 do gráfico Shewhart a montante. Ao se verificarem os dados não transformados percebe-se que o ponto 14 é igual a 155 NTU, sendo o maior valor encontrado para a variável turbidez. O valor dessa amostra é um ponto discrepante no conjunto de dados.

Na carta Shewhart turbidez a montante do rio o ponto fora do limite superior de controle e também acima do limite estabelecido pelo CONAMA, indica alguma causa especial atuando no processo. Como o gráfico foi aplicado a dados de água de rio, observando a amostra correspondente ao ponto indicado no gráfico, percebeu-se um aumento expressivo neste ponto, em relação ao anterior e ao posterior. Nesta data de coleta, observaram-se dados de vazão e precipitação altas, podendo ter afetado o valor do parâmetro (TOLEDO *et al.*, 2008; PINTO *et al.*, 2009).

De acordo com NOMELINI, FERREIRA & OLIVEIRA (2009), ciclos descritos com uma série de pontos acima intercalados por série de pontos abaixo ou vice-versa, como se observa no gráfico Shewhart turbidez montante, entre os pontos 17 a 22 e entre os pontos 2 a 8, podem ser atribuídos à rotatividade de operadores, mudanças sistemáticas no meio ambiente, variação nos equipamentos, entre outros.

Quando alguns pontos encontram-se acima ou abaixo dos limites, diz-se que o processo está fora do controle estatístico, logo, é preciso identificar a causa que deixou o processo em tal estado (MONTEGOMERY, 2004). No gráfico de Shewhart, da turbidez a jusante do rio, observou-se um ponto abaixo do limite inferior, a 14ª amostra, devendo ser

identificada a causa, para posterior correção do processo. Uma das atribuições de possível causa é a diferença dos valores de algumas destas amostras com a média do processo.

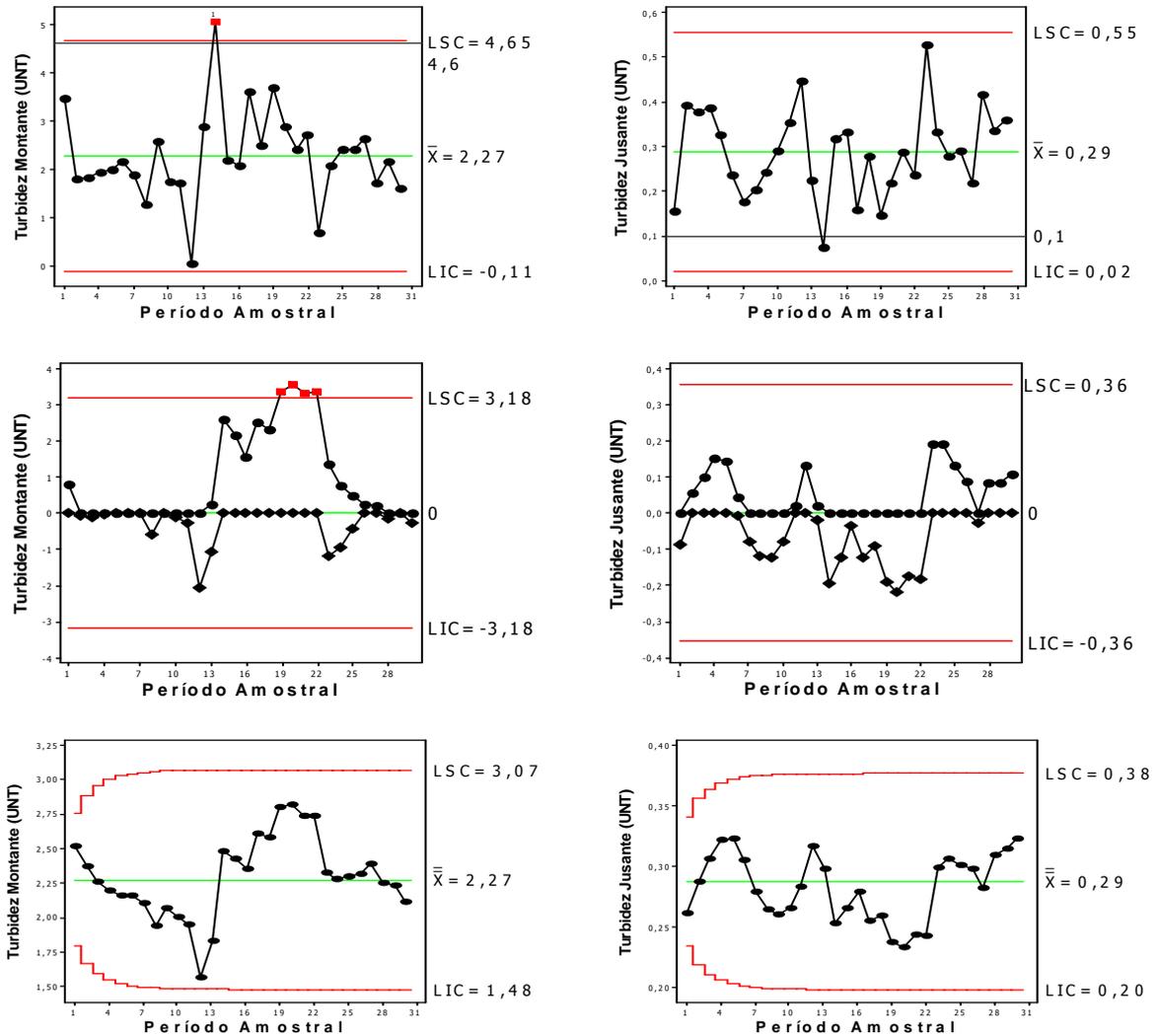


Figura 15 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para a turbidez a montante e a jusante do rio.

Na carta de Shewhart a montante do rio ocorreu um ponto acima do limite superior de controle estabelecido e também do limite do CONAMA, evidenciando diferenças de valores de alguns pontos em relação à média do processo, principalmente a partir de amostras coletadas em 2006, caracterizando possível falta de controle no processo. Quando se verifica nos gráficos algum ponto fora do limite de controle e, principalmente, quando este ponto situa-se acima do limite superior de controle, ele deve merecer uma atenção especial e ser investigado (JACOBI, SOUZA & PEREIRA, 2002).

A turbidez identifica a qualidade da água do ponto de vista de materiais em suspensão, partículas e algas dissolvidas no meio, dificultando ou impedindo a penetração de luz. Neste estudo, um dos valores de turbidez esteve fora do limite superior de controle,

porém, em sua maioria não apresentaram valores acima dos especificados pela norma, ou seja, neste rio não há problemas relacionados à eutrofização ou materiais em suspensão.

SARDINHA *et al.* (2008) avaliaram a qualidade da água e a autodepuração do Ribeirão do Meio em Leme, São Paulo, e para turbidez e encontraram valores que variaram de 3 a 34 NTU, os quais estão de acordo com a maioria dos valores do presente trabalho, discordando apenas no ponto de coleta 13.

BORDALO, NILSUMRANCHI & CHALERMWAT (2001), em seus estudos de qualidade da água, encontraram valores médios de turbidez para estação seca de 69,9 NTU e 30,9 NTU em estação chuvosa, diferentemente dos valores encontrados nesta pesquisa.

Na Figura 16, apresentam-se os gráficos de controle para a variável sólidos totais. No gráfico de Shewhart a montante, verifica-se um ponto abaixo do limite inferior, ou seja, abaixo dos 3 desvios-padrão, podendo estar ligado à heterogeneidade do dado coletado.

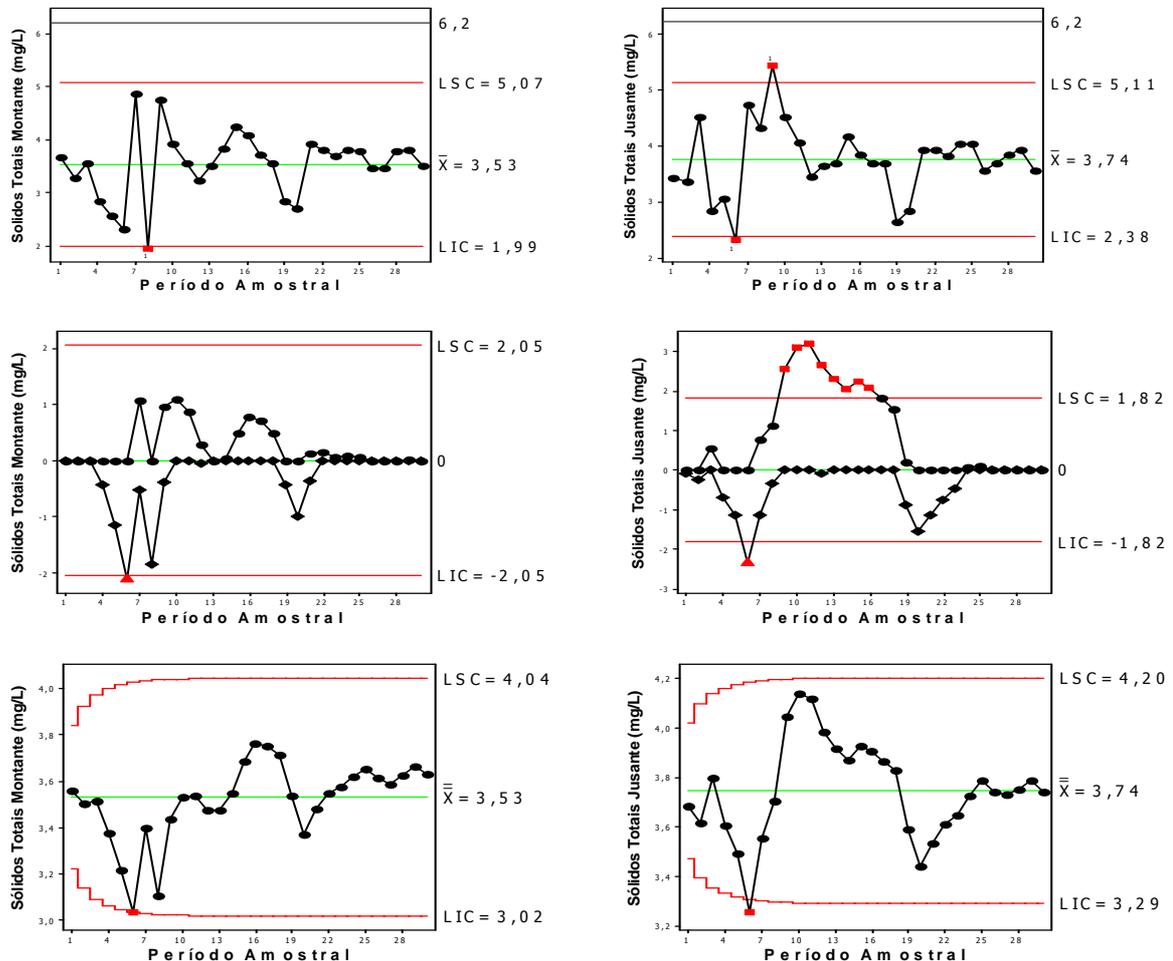


Figura 16 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para os sólidos totais a montante e a jusante do rio.

Pode-se perceber, observando o gráfico MMEP a jusante, que do ponto 9 ao 19 os valores tiveram uma súbita mudança no comportamento, ou seja, alguma causa especial

está agindo no processo, o que revela uma mudança no seu padrão de variação, deixando os pontos de um mesmo lado da linha.

ZIMMERMANN, GUIMARÃES & ZAMORA (2008) avaliaram a qualidade do corpo hídrico do Rio Tibagi, na região de Ponto Grossa, encontrando valores que variaram de 18 a 182,66 mg L⁻¹ de sólidos totais, os quais se aproximam dos dados apresentados no presente trabalho, que obteve valores entre 10 a 129 mg L⁻¹, tendo apenas uma coleta com resultado 227 mg L⁻¹. JONNALAGADDA & MHERE (2001) encontraram valores que variaram de 50 a 165 mg L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos, semelhantes aos valores desta pesquisa.

Na Figura 17, mostram-se os gráficos da variável temperatura da água.

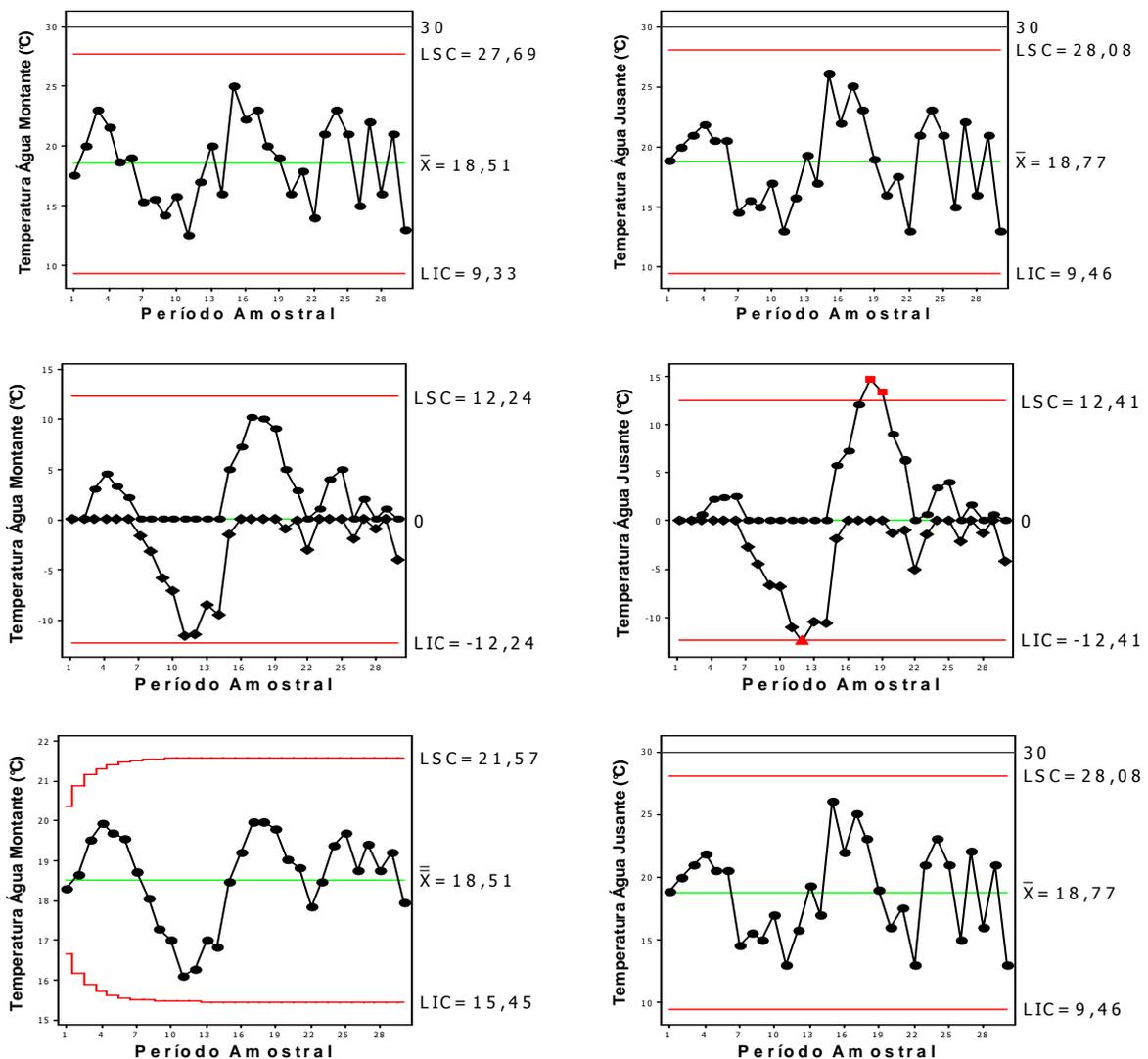


Figura 17 Cartas de controle de Shewhart, CUSUM, MMEP para a temperatura a montante e a jusante do rio.

Para ALENCAR *et al.* (2004) o gráfico MMEP construído por eles em seu trabalho, apresentou vários pontos fora dos limites de controle, indicando que o processo está fora de controle. Resultados diferentes têm sido percebidos nesta pesquisa, na qual as cartas de

controle do tipo MMEP não apresentam pontos fora de controle, apenas na carta de controle CUSUM a jusante foi identificado ponto fora de controle.

ALENCAR *et al.* (2004) também observaram em seus estudos de cartas de controle MMEP pontos fora dos limites de controle, como nesta pesquisa, conforme se pode verificar no gráfico MMEP acima.

MASSON (2007) reporta-se a processos fora de controle, atribuindo possíveis causas à mudança dos reagentes laboratoriais usados nas metodologias analíticas, à contaminação de reagentes e a erro do analista. Observa-se no gráfico CUSUM a jusante do parâmetro sólidos pontos indicando processo fora de controle.

Como as informações do presente trabalho são largamente espaçadas no tempo (amostras mensais e semestrais), as situações de alterações bruscas são maiores e não poderiam não ser detectadas pelas cartas de média móvel exponencialmente ponderada e também pelas cartas de CUSUM (MONTGOMERY, 2004), porém, os gráficos deste tipo também se mostraram como alternativas viáveis para interpretação dos dados.

Em função do calor específico da água, as variações naturais da temperatura nos meios aquáticos costumam ser brandas. A temperatura das águas correntes acompanha a temperatura do meio externo, porém com menor amplitude de variação. A biota aquática não sobrevive a grandes variações de temperatura que normalmente ocorrem quando há despejos de efluentes aquecidos (LIBÂNIO, 2008). Não é o caso desta pesquisa, pois, como se observa na Figura 17, não ocorreram grandes variações de temperatura da água, muito provavelmente porque o rio está localizado numa área rural não recebendo diretamente efluentes em quantidades acentuadas.

Também se houvesse aumento da temperatura da água, a viscosidade diminuiria e assim diminuiria a força de atrito entre água e fitoplâncton, o que reduziria ou cessaria a fotossíntese. Esse é um dos motivos pelos quais os despejos de água aquecida em corpos d'água podem ser danosos ao ecossistema aquático (LIBÂNIO, 2008).

BUENO, GALBIATTI & BORGES (2005) monitoraram a qualidade de água do horto Ouro Verde, em Conchal, São Paulo, e encontraram valores médios de temperatura que variam entre 20,4 a 23,7 °C, sendo estes valores mais altos do que os encontrados no presente trabalho.

JONNALAGADDA & MHERE (2001), estudando a qualidade da água em rio no Zimbábue encontraram valores para o parâmetro temperatura da água variando entre 16 e 28 °C, ou seja, semelhantes ao desta pesquisa.

SOUZA & NUNES (2008) avaliaram parâmetros físico-químicos e bacteriológicos do Córrego Figueira em Tangará da Serra - MT e encontraram valores de temperatura que variaram de 20,65 a 22,93 °C, ou seja, temperaturas mais elevadas do que as encontradas no presente estudo.

GONZÁLEZ, HERRERA-SILVEIRA & MACEDO-AGUIRRE (2008) encontraram média de temperatura de 29 °C nas águas das lagoas estudadas no México. Valor este mais alto do que a média encontrada nesta pesquisa.

DONÁDIO, GALBIATTI & PAULA (2005), estudando qualidade da água, avaliaram a temperatura da água que variou de 17,5 a 19,8 °C nos pontos amostrados nas nascentes 1 e 3; nos pontos das nascentes 2 e 4, a temperatura variou de 20,2 a 22,6 °C. Para as quatro nascentes estudadas, nos dois períodos analisados, a temperatura aumentou sucessivamente à medida que os pontos de coleta se distanciavam das nascentes. Nesta pesquisa a temperatura variou de 12,5 a 26 °C, ou seja, apresentou uma faixa de variação maior. Neste sentido, a manutenção da vegetação ciliar é a maneira mais efetiva de prevenir o aumento da temperatura da água.

Os mesmos autores consideram que o aumento da temperatura intensifica a produção fitoplanctônica, aumentando a absorção de nutrientes por esses organismos e diminuindo a solubilidade do oxigênio na água.

BORDALO, NILSUMRANCHI & CHALERMWAT (2001) encontraram valores de temperatura para água na Tailândia variando entre 26 e 36 °C, diferentemente desta pesquisa que encontrou valores mais baixos, entre 12 e 26 °C.

Para CHANG (2008), topografia e fatores associados ao solo são os principais fatores determinantes da variação espacial de variáveis como temperatura, oxigênio dissolvido e pH. A variância restante pode ser explicada por outros preditores como a geologia. Estes fatores não influenciaram a qualidade da água do rio Mandurim, principalmente no que se refere à temperatura.

ZHOU *et al.* (2008), que estudaram cartas de controle do tipo CUSUM atribuíram o processo fora de controle a possíveis erros, que podem ser de procedimento de amostragem, falha nos equipamentos de laboratório ou mesmo descalibragem destes. Isso pode explicar o gráfico CUSUM a jusante.

O aumento dos valores da temperatura causa diminuição da solubilidade dos gases, como o oxigênio dissolvido (BRAGA *et al.*, 2005). Nesta pesquisa, analisando-se o ponto 15 da amostragem da carta de controle a montante, percebe-se que a temperatura apresenta um dos mais altos valores e, observando-se o gráfico de controle para o parâmetro oxigênio dissolvido, neste mesmo ponto, evidencia-se o conceito acima exposto.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados alcançados pelas cartas de controle individual (Shewhart), MMEP, CUSUM Tabular, para os parâmetros estudados de qualidade da água. A metodologia usada foi a comparação entre os gráficos, observando se os pontos apresentavam comportamento semelhante nos diferentes tipos de gráficos estudados.

Os resultados apontam que para os parâmetros pH e OD o gráfico Shewhart e MMEP se mostraram mais eficazes. Em relação aos parâmetros nitrogênio e DBO, houve

maior eficácia no gráfico CUSUM e MMEP. A respeito do fósforo, DQO, por exemplo, os gráficos CUSUM e MMEP se mostraram mais eficientes. Quanto aos parâmetros coliformes totais e termotolerantes, turbidez e sólidos totais, os três gráficos mostraram-se eficientes, pois pontos que aparecem fora de controle em um deles também aparecem em outros, ou seja, a mesma detecção, confirmando a inter-relação dos dados dos gráficos.

ZHOU *et al.* (2008) utilizaram cartas de controle de Shewhart e CUSUM e depois as correlacionaram, monitorando a qualidade da água. Seu trabalho resultou na combinação de cartas de controle, percebendo a importância de seu uso para processos que estão sob controle. Também afirmam que, para monitorar um manancial e ser bem sucedido na interpretação dos dados, deve-se fazer avaliação estatística para se ter um entendimento global do sistema, como foi realizado nesta pesquisa, além da independência dos dados, caso contrário os testes estatísticos seriam inválidos.

VARGAS, LOPES & SOUZA (2004), em seus estudos de comparação de cartas de controle, observaram que as cartas de controle CUSUM e MMEP apresentam resultados muito próximos, observando que a carta MMEP pode ser considerada mais lenta para reagir que a carta CUSUM para algumas mudanças no processo.

VARGAS, LOPES & SOUZA (2004), em sua pesquisa utilizando cartas de controle de CUSUM e MMEP para detectar as mudanças na média na ordem de 1 desvio-padrão ou com magnitudes menores e utilizando constantes de $\lambda=0,10$ e $\lambda=0,05$, constataram que a carta de controle que tem melhor desempenho é a carta MMEP. Já para mudanças maiores que um desvio-padrão e menores que 1,5 é aconselhável o emprego da carta CUSUM. No estudo em questão foi utilizado $\lambda= 0,2$ na carta MMEP, para detectar mudanças no processo.

Tabela 5 Comparativo entre gráficos de controle estudados

Parâmetros	Shewhart	CUSUM	MMEP
pH	x		x
Oxigênio Dissolv.	x		x
Nitrogênio		x	x
Fósforo		x	x
DBO		x	x
DQO	x	x	x
Coliformes			
Termotolerantes	x	x	x
Coliformes Totais	x	x	x
Turbidez	x	x	x
Sólidos Totais	x	x	x
Temperatura	x	x	x

No estudo de MAGALHÃES & CYMROT (2009), as cartas testadas demonstraram que as mudanças de um desvio-padrão ocorridas na média do processo não ocorreram

simultaneamente nas mesmas cartas de controle. A ordem de melhor detecção foi a de CUSUM, seguida pela MMEP e depois Shewhart, resultado semelhante ao encontrado neste estudo quando se observou parâmetros como nitrogênio e DBO.

Os gráficos de Shewhart forneceram uma análise simples dos dados, sendo de fácil adaptação e integração com as práticas de controle já existentes nos laboratórios. Também nestes gráficos, há baixa probabilidade de falsos alarmes e melhor capacidade de identificação de erros analíticos (SILVA *et al.*, 2006). Em praticamente todos os parâmetros analisados neste trabalho, os gráficos de Shewhart foram considerados satisfatórios.

CLARO, COSTA & MACHADO (2007), em seus estudos com gráficos de controle, observaram que o gráfico MMEP que apresenta baixa constante de alisamento λ tem melhor desempenho, como é o caso desta pesquisa, na qual se utilizou baixa constante e foram obtidos resultados positivos com a carta de controle MMEP.

NEZHAD & NIAKI (2010) estudaram vários tipos de cartas de controle como Shewhart, CUSUM, MMEP, constatando que, para amostras de tamanho 1, os gráficos de CUSUM e MMEP são mais eficazes por detectarem com mais precisão pequenas mudanças no processo. Neste estudo as amostras tiveram tamanho $n = 1$, tendo sido observados bons resultados com as cartas CUSUM e MMEP.

Dessa forma, observou-se que os gráficos de controle conseguem identificar causas especiais no conjunto de dados, tendo sido o mais eficaz, dentre os três tipos utilizados, o gráfico MMEP.

4.3 Matriz de correlação entre as variáveis estudadas

COOK, ZOBEL & WOLFE (2006) observaram alta correlação entre as variáveis ambientais por eles estudadas, aplicando séries temporais. Neste trabalho, as correlações entre duas variáveis são na maioria baixas, evidenciando que uma variável independe da outra.

Entre as variáveis pH e sólidos, observa-se correlação negativa, indicando que à medida que uma variável cresce a outra decresce, embora os valores encontrados estejam distantes de 1. Essa relação nos dados coletados a campo pode ser observada em vários pontos, sendo mais evidente no ponto 9 a montante e a jusante.

RAMESH *et al.* (2010) observaram correlação entre os dados de qualidade da água, tendo dividido as variáveis em grupos. O grupo 1 que continha a variável pH e que também é de interesse desta pesquisa, além de sódio, cloro, condutividade elétrica, sulfato, foi o que

mais influenciou a qualidade da água ($r = 0,911$). Nesta pesquisa, esta variável não teve a mesma representatividade.

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentadas as matrizes de correlação bivariada das variáveis de qualidade da água, avaliadas nesta pesquisa, a montante e a jusante respectivamente.

Tabela 6 Matriz bivariada de correlação entre variáveis de qualidade da água a montante

	pHM	ODM	PM	STM	CTM	CTerM	TAM	DQOM	DBOM
ODM	-0,098 0,608								
PM	0,027 0,887	0,046 0,808							
STM	-0,236 0,209	0,099 0,601	-0,120 0,526						
CTM	0,071 0,708	0,093 0,623	0,010 0,960	-0,036 0,849					
CTer	0,195 0,302	0,185 0,327	0,007 0,971	-0,062 0,746	0,808 0,000				
TAM	0,096 0,614	-0,368 0,046	0,176 0,354	-0,112 0,554	-0,018 0,924	-0,082 0,665			
DQOM	0,031 0,869	-0,249 0,185	-0,110 0,563	0,042 0,827	0,113 0,551	0,377 0,040	0,101 0,596		
DBOM	-0,191 0,313	-0,187 0,323	-0,075 0,692	0,345 0,062	0,433 0,017	0,358 0,052	-0,053 0,783	0,650 0,00	
TurM	-0,049 0,799	0,134 0,480	-0,076 0,688	0,009 0,964	0,079 0,679	-0,027 0,888	-0,087 0,647	-0,001 0,994	0,024 0,901
NM	0,160 0,399	-0,252 0,180	0,048 0,803	0,060 0,754	0,238 0,206	0,267 0,153	0,108 0,570	0,291 0,119	0,475 0,008
NM	-0,179 0,345								

Tabela 7 Matriz bivariada de correlação entre variáveis de qualidade da água a jusante

	pHJ	ODJ	PJ	STJ	CTJ	CTerJ	TAJ	DQOJ	DBOJ
ODJ	-0,251 0,181								
PJ	0,190 0,314	0,039 0,838							
STJ	-0,401 0,028	0,195 0,301	-0,044 0,818						
CTJ	-0,006 0,975	-0,190 0,314	-0,161 0,395	-0,056 0,769					
CTerJ	0,044 0,818	-0,183 0,332	-0,173 0,360	-0,080 0,674	0,932 0,00				
TAJ	0,353 0,056	-0,322 0,083	0,070 0,712	-0,237 0,208	0,137 0,472	0,137 0,471			
DQOJ	0,064 0,736	-0,027 0,886	-0,106 0,576	-0,137 0,470	0,031 0,871	0,040 0,835	0,020 0,916		
DBOJ	-0,081 0,670	-0,028 0,885	-0,047 0,807	-0,100 0,600	0,201 0,288	0,174 0,357	-0,021 0,912	0,777 0,000	
TurJ	-0,081 0,670	0,124 0,513	0,052 0,786	-0,058 0,760	0,027 0,889	0,006 0,975	-0,084 0,659	-0,021 0,913	-0,095 0,619
NJ	0,019 0,919	-0,095 0,618	0,094 0,621	-0,111 0,558	-0,116 0,540	0,138 0,467	-0,115 0,547	0,549 0,002	0,483 0,007
NJ	-0,103 0,588								

Uma das maiores correlações entre os parâmetros foi observada entre DBO e DQO a jusante, caracterizando a inter-relação entre esses parâmetros (ambos expressam a concentração de matéria orgânica). Além disso, observa-se que os valores da correlação de Pearson encontrada entre esses parâmetros (0,777) são considerados com forte correlação

(entre 0,6 e 1). Se o monitoramento da qualidade da água do rio perdurar por mais tempo (maior que 30 amostras no caso), podem ser repensadas a quantidade de análises efetuadas, pois sendo monitorada apenas uma destas variáveis ela já dará a indicação da qualidade. Também se observou esta relação entre os parâmetros coliformes termotolerantes e totais. A correlação indica que quando o valor de um destes parâmetros cresce o outro também cresce.

Considerando-se um valor de p de 0,05, para avaliar a hipótese de que a correlação seja igual a zero, ou seja, se há correlação entre as variáveis. Se o valor de p for inferior a 0,05, considera-se alta correlação entre as variáveis analisadas. No estudo realizado, perceberam-se valores abaixo de 0,05 nas correlações a montante: DQO e DBO, coliformes totais e termotolerantes; a jusante: DBO e DQO, nitrogênio e DQO, coliformes totais e termotolerantes.

4.4 Gráfico de controle multivariado das variáveis de qualidade da água

Na Figura 18 são mostrados os gráficos de controle multivariados das nove variáveis (pH, OD, P, N, DBO, coliformes termotolerantes, temperatura, turbidez, sólidos) de qualidade da água a montante e a jusante do rio Mandurim.

Observando-se os gráficos acima, percebe-se um ponto acima do limite superior de controle, onde o ponto quatro do gráfico a montante, por exemplo, apresenta um valor de 27, sendo o limite superior de controle, aproximadamente, 25.

SOUZA & RIGÃO (2005), em seus estudos utilizando as cartas multivariadas do tipo T^2 , também identificaram pontos fora de controle nos gráficos e identificaram quais as variáveis que estiveram correlacionadas e tornaram o ponto fora de controle.

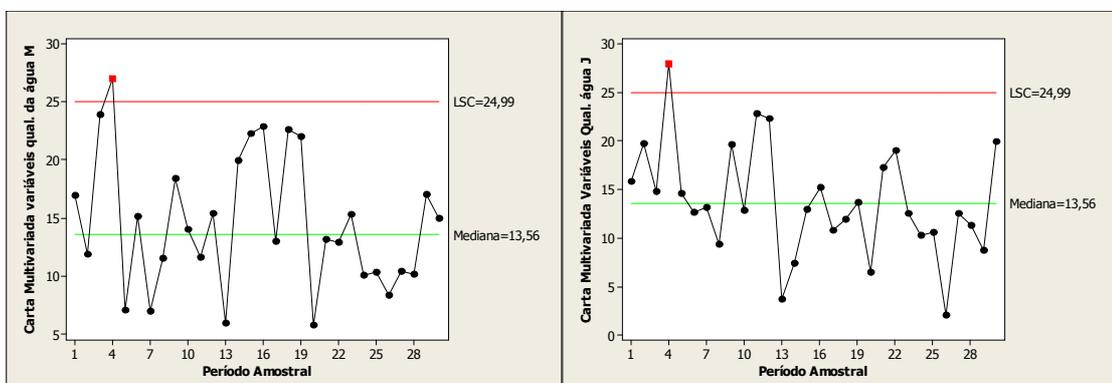


Figura 18 Gráfico de controle multivariado T^2 a montante e a jusante do rio.

No gráfico a montante, ainda se pode observar a relação de algumas variáveis de qualidade da água analisadas que, quando estão nas cartas controle com valores relativos somente pertencentes à variável, não apresentam pontos acima ou abaixo dos limites de controle, ou seja, o processo está sob controle. Porém, quando é construído o gráfico multivariado, algumas dessas variáveis implicam em ponto fora de controle. Neste trabalho, o ponto 4 do gráfico está fora de controle, devido à relação entre as variáveis: pH, DBO, sólidos, temperatura da água, nitrogênio e fósforo. ZHOU *et al.* (2008) observaram que alguns fatores como intensidade e duração das chuvas, temperatura da água e turbidez influenciaram o seu estudo da qualidade da água, quando correlacionadas as concentrações dos parâmetros.

PAN (2007) estudou carta multivariada T^2 e observou que esta é uma excelente metodologia para analisar correlação de certa quantidade de variáveis. Usou regras diferenciadas para cálculo da carta multivariada, atentando para o fato do não aparecimento de alarmes falsos, indicando processo fora de controle. Esta pesquisa foi semelhante, pois também foram testadas várias hipóteses para que a carta multivariada não apresentasse alarmes considerados falsos.

Ainda, se comparar alguns dos valores plotados nos gráficos de controle de Shewhart, justificam-se algumas semelhanças com os pontos observados no gráfico multivariado, como por exemplo, o ponto 4 da DBO e também do nitrogênio, que no gráfico de Shewhart para essa variável a amostra 4 é a que apresenta o maior valor.

Segundo BOLLMANN & EDWIGES (2008), as variáveis de qualidade da água, principalmente a DBO, nitrogênio, fósforo, coliformes termotolerantes, turbidez, sólidos totais são características de despejos orgânicos comumente lançados em rios, como nesta pesquisa é o caso dos resíduos oriundos da suinocultura, que eram lançados no rio durante as primeiras amostragens, sendo que estas variáveis, quando correlacionadas com outras, influenciam o processo, sendo eficaz a carta multivariada para esse fim.

No gráfico a jusante do rio também pode ser notado um ponto fora do limite superior de controle. O 4º ponto está plotado, por exemplo, a 27,94, sendo que o limite superior é de 24,99.

Além disso, analisando-se o gráfico a montante entre os pontos 24 e 29 apresenta-se pequena sequência de pontos, já que os pontos estão plotados de um mesmo lado da linha da mediana, no caso abaixo desta. A sequência é considerada anormal quando tem 7 ou mais pontos consecutivos (NOMELINI, FERREIRA & OLIVEIRA, 2009). No gráfico a jusante são observados 7 pontos consecutivos entre as amostras 23 e 29.

No gráfico a jusante, também é possível observar a relação de algumas variáveis de qualidade da água analisadas que, quando estão nas cartas de controle com valores relativos somente com relação àquela variável, não apresentam pontos acima ou abaixo dos

limites de controle, não estando fora de controle o processo, principalmente nos gráficos de Shewhart. O gráfico a jusante apresenta apenas um ponto acima do limite superior de controle, indicando que os dados são estatisticamente estáveis (SOARES, 2006). Neste trabalho o ponto 4 do gráfico está fora de controle devido às variáveis: nitrogênio e temperatura da água. Desta forma, percebe-se também no gráfico individual da variável nitrogênio o ponto com maior valor que foi o ponto 4.

Se os dados incluem variáveis correlacionadas, o uso de gráficos de controle univariados separadamente pode gerar uma falsa expectativa dos valores porque as variáveis conjuntamente afetam o processo, ou seja, existe uma situação multivariada e dessa forma pode ocorrer erro tipo I (probabilidade de pontos de plotagem estarem fora de controle e com valores incorretos) (MONTEGOMERY, 2004).

CORBETT & PAN (2002) e BOLLMANN & EDWINGES (2008) perceberam que muitas variáveis ambientais são correlacionadas, ou seja, influenciam uma às outras, sendo importante o monitoramento por cartas de controle multivariadas.

CHEN (2010) usou a carta de controle multivariado, em estudo aplicado a processos químicos, observando potenciais alarmes falsos, advindos de erros nos cálculos dos limites. A escolha dos dois limites de controle normalmente são considerados em conjunto para manter o equilíbrio entre a robustez (menos falsos alarmes) e a sensibilidade (detecção de curto prazo). A provável ocorrência desses fatores está ligada à distribuição anormal dos dados, correlação entre as amostras, podendo gerar pontos fora de controle. Nesta pesquisa, esses aspectos foram também considerados, para que não ocorressem alarmes falsos.

NIJHUIS *et al.* (1999) também usaram dois tipos de cartas de controle (univariada e multivariada) para expressar os resultados de suas pesquisas com cromatografia gasosa, observando que a carta multivariada do tipo T^2 mostrou-se mais segura, pois apresenta melhores efeitos, mesmo com processos estatisticamente instáveis, pois quando se analisa um processo por longo período de tempo podem ocorrer situações de pontos fora de controle. Nesta pesquisa, também se utilizaram os dois tipos de cartas de controle, que apresentaram resultados semelhantes, do ponto de vista de que a carta multivariada indica qual o parâmetro e em que ponto está influenciando no processo como um todo, quando este ponto está fora de controle. Os pontos fora de controle devem ser analisados com base em ferramentas de diagnóstico e experiência do analista. Isso gera um resultado satisfatório visto que, quando se tem muitas variáveis que têm ligação, as cartas multivariadas se apresentam como as alternativas mais claras de análise do processo.

4.5 Índice trófico, índice de qualidade da água e índice de capacidade de processo univariado e multivariado

Em relação ao índice de estado trófico estudado, os resultados encontrados para o rio Mandurim foi de 25,56, ou seja, estado oligotrófico, indicando baixa concentração de nutrientes, boa penetração da luz, alta concentração de oxigênio dissolvido, baixo crescimento de algas e alta biodiversidade.

FIA *et al.* (2009) avaliaram o IET através da classificação proposta por Toledo Jr. que ajustou o índice proposto por Carlson encontrando como resultados nos corpos de água nível Mesotrófico (IET > 44) e Hiperotrófico (IET > 74).

SENDACZ, CALEFFI & SANTOS-SOARES (2006) estudaram o estado trófico de represas de água no estado de São Paulo e observaram que os níveis tróficos na água foram oligotróficos e eutróficos, como nesta pesquisa que também encontrou nível oligotrófico nas águas.

LIU *et al.* (2008), avaliando a eutrofização em rio da China, perceberam que o índice estava acima dos valores considerados normais, diferentemente deste trabalho que apresentou valores baixos.

GONZALÉZ *et al.* (2008), estudando a tendência eutrófica das águas das lagoas costeiras da Península de Yucatán, encontraram resultado de qualidade, em alguns trechos da lagoa, classificado como oligotrófico, semelhante ao desta pesquisa, e em outros trechos como mesotrófico para essas águas.

ALMEIDA *et al.* (2009) estudaram a qualidade da água e comunidade de zooplâncton em reservatórios do nordeste do Brasil, considerando o índice trófico classificaram estas águas como eutróficos e hipertróficos, ou seja, um maior aporte de fósforo foi encontrado pelos autores, diferentemente deste trabalho que encontrou valores menores.

Com relação ao IQA total, que consiste na soma de todos os IQAs de cada parâmetro, ou seja, o IQA montante teve como resultado 91 e o IQA jusante teve como resultado 86. Segundo o critério da CETESB (2010), quando o IQA situa-se dentro da faixa de 80 a 100 a água é considerada de qualidade ótima, semelhantes aos estudos de KONIG (2008) que encontraram valores satisfatórios (entre 66 e 80) para qualidade da água quando calcularam IQA.

Vários parâmetros são usados como indicadores da qualidade de água. O oxigênio dissolvido e o déficit de oxigênio são parâmetros usados, frequentemente, para avaliar a qualidade de água. Em seus estudos, SANCHEZ *et al.* (2006) analisaram esses parâmetros e estabeleceram uma relação linear entre o déficit de oxigênio dissolvido e um índice de qualidade da água. A qualidade da água pelos dois métodos analisados coincidiu em 93%

das amostras estudadas, tendo encontrado índice de aproximadamente 70 a montante e 65 a jusante, sendo este considerado de qualidade mediana para a água.

PIASENTIN *et al.* (2009) encontraram resultados semelhantes para o IQA em seu estudo e classificaram a água, durante o período de análise, como “boa”.

Para BOLLMANN & EDWIGES (2008), embora os resultados possam sofrer contestação, o uso do IQA como indicador relativo de poluição de rios propiciou bons resultados, pois apresentaram, para o rio Belém, valores de IQA semelhantes ao desta pesquisa, e, além disso, ao longo do rio o IQA mostrou-se decrescente.

BONNET, FERREIRA & LOBO (2008), calculando IQA, observaram que, em períodos de seca, este tinha valores maiores, sendo sensível às variações sazonais e ao aporte de sedimentos e matéria orgânica por escoamento superficial, semelhante a esta pesquisa que também observou aporte de matéria orgânica junto ao rio.

JONNALAGADDA & MHERE (2001) encontraram valores para o IQA do rio Odzi, no Zimbábue, que indicaram índices de médios a bons (variando de 52 a 77, aproximadamente), sendo mais baixos dos que os encontrados nesta pesquisa.

RAMESH *et al.* (2010) encontraram resultados semelhantes aos desta pesquisa quando calcularam o IQA para qualidade de água de abastecimento, pois em mais de 60% das amostras o índice foi considerado de ótimo a bom. Também calcularam o índice multivariado, obtendo valores inferiores ao índice aritmético.

FOY, LENNOX & SMITH (2001), avaliando a qualidade da água por meio de índice de qualidade na década de 1990, concluíram que o índice não foi um bom indicador, embora tenha havido alta nos valores de oxigênio dissolvido e, a partir de 1994, ocorra uma melhora evidente nos valores de DBO. Resultados semelhantes foram encontrados nesta pesquisa em relação à DBO, ou seja, à medida que o tempo foi passando e as amostras foram sendo analisadas, a DBO apresentou diminuição de seus valores.

Quando se compara o IQA com o Cp com dados tanto a montante quanto a jusante do rio Mandurim, obtém-se como resultado um Cp de 0,52 a montante e 0,41 a jusante.

Para executar o cálculo da capacidade do processo, algumas regras devem ser consideradas, como: característica de distribuição normal dos dados, processo sob controle estatístico, a média do processo deve estar centrada entre os limites de especificação superior e inferior do processo (MONTEGOMERY, 2004). Neste trabalho todas essas suposições foram observadas, como é possível verificar nos gráficos de controle de parâmetros como pH, que é um parâmetro que tem bilateralidade, percebendo-se aí que a média do mesmo encontra-se dentro dos limites de especificação. “Se não são consideradas essas observações os valores reportados da capacidade do processo pode estar seriamente errado” (MONTEGOMERY, 2001, p. 226).

Quando a variação do processo é muito grande, o valor da capacidade de processo é pequeno e representa baixa capacidade do processo (KAHRAMAN & KAYA, 2009). Isso é percebido nos parâmetros fósforo montante e jusante, DBO, coliformes termotolerantes e oxigênio dissolvido.

O parâmetro oxigênio dissolvido, embora não apresente nenhuma amostra fora dos valores especificados pelo limite de especificação, nos gráficos de controle de CUSUM e MMEP os valores mostraram-se com variabilidade, pois apresentaram pontos fora de controle estatístico, tornando o processo incapaz.

Alguns parâmetros apresentam processos capazes como é o caso do pH montante e jusante, ou seja, a qualidade da água do rio encontra-se dentro do valor especificado pelo CONAMA.

Em termos de matéria orgânica (DBO), o rio não apresenta desempenho satisfatório se observar valores do índice.

A Tabela 8 apresenta os resultados dos índices de capacidade do processo.

Tabela 8 Comparativo entre índices de controle univariados estudados

Parâmetro	Ppk
pH M	1,27
pH J	1,08
OD M	0,72
OD J	0,76
Nitrogênio M	2,01
Nitrogênio J	4,08
Fósforo M	0,01
Fósforo J	0,01
DBO M	0,16
DBO J	0,07
Temp. Água M	1,13
Temp. Água J	1,04
Turbidez M	0,92
Turbidez J	0,67
Sólidos M	1,95
Sólidos J	1,51
Colif. Term. M	0,33
Colif. Term. J	0,04

* OBS. No parâmetro temperatura foi usado tanto a montante quanto a jusante para cálculo da capacidade de processo limite de especificação superior de 30° C; O parâmetro sólidos totais montante estava fora de controle quando se calculou o índice.

WU, PEARN & KOTZ (2009) estudaram vários índices de capacidade de processo e observaram que quanto mais próximo os valores das amostras do valor alvo e menor o processo de propagação mais capaz será o processo. Porém, o fato de combinar esses dois fatores em um único número pode ser visto como desvantagem. É o que se observa no parâmetro oxigênio dissolvido, nesta pesquisa, que, embora apresente valores próximos do alvo, apresenta baixo valor para o índice. Os autores sugerem o uso de limites bilaterais

para melhorar o processo, tendo sido feito testes desta maneira, o parâmetro não apresentou resultados melhores.

Quando os valores são negativos, muitos autores definem os valores da capacidade do processo como não-negativos, de modo que os valores inferiores a zero podem ser definidos como zero (MONTEGOMERY, 2004).

CORBETT & PAN (2002), calculando o índice de capacidade do processo para variáveis de desempenho ambiental, encontraram valores para o nitrogênio menores que 1, diferentemente desta pesquisa que encontrou para esta variável valor de processo capaz.

SOARES (2006), calculando índice multivariado, usou o valor de 1,33 para sua base de cálculo e encontrou a relação de que, à medida que aumentavam as características de qualidade do cálculo do índice, este diminuía seu valor. Ele utilizou duas e três características de qualidade, encontrando índices de 1,0 e 0,50, respectivamente. No caso do presente estudo foram nove características de qualidade, justificando os valores encontrados, que foram relativamente pequenos.

Comparando-se os valores do índice de capacidade do processo multivariado com o IQA construiu-se a Tabela 9, na qual constam os valores do IQA de 91 para montante e 86 para jusante e o Ppk para montante 0,52 e 0,41 para jusante.

Tabela 9 Valores entre IQA e capacidade de processo

IQA	91	86
Ppk	0,52	0,41

Em relação à Tabela 9, percebe-se que o limite para o índice multivariado que seria considerado ideal, ou seja, mostrando que o processo é capaz, seria de 0,718, quando usado valor de 100 para IQA considerado ótimo. Porém, na literatura ainda não se conhecem valores específicos para índices multivariados. SOARES (2006), em seus estudos com índice multivariado, utilizou o valor de 1,33, o mesmo valor utilizado para as cartas univariadas. Portanto, comparando-se esses dados apresentados com os valores considerados “ideais”, o Ppk de 1,33 e o IQA de 100, percebe-se relação entre os dados, visto que à medida que aumenta o IQA também aumenta o Ppk e vice-versa.

WU, PEARN & KOTZ (2009) indicam que o índice de capacidade multivariado é ainda pouco pesquisado em comparação a índices univariados, visto que existe uma dificuldade essencial em avaliar a capacidade multivariada por meio de um único valor, ou seja, o índice multivariado.

Investigações neste domínio são necessárias para garantia do sucesso universal do uso da técnica. Essa teoria é defendida por vários autores que estimam que o índice multivariado não seja o mesmo valor do univariado. A tendência é que seja menor.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, na avaliação da qualidade da água do rio Mandurim, permitem concluir que:

1. O grau de comprometimento da qualidade da água é baixo, pois apenas as variáveis turbidez, DBO e fósforo apresentaram-se fora dos limites estabelecidos pela Resolução 357/2005 CONAMA (classe 2).

2. Com exceção do pH, as variáveis em todos os pontos de controle apresentaram elevada variabilidade dos dados.

3. Nas cartas de CUSUM, observou-se que, para as variáveis pH, nitrogênio, DBO, sólidos totais, temperatura a jusante e OD, fósforo e turbidez a montante, 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.

4. Na carta MMEP verificou-se, para o parâmetro OD montante e para os parâmetros nitrogênio e sólidos totais a jusante, pontos acima ou abaixo dos limites de controle.

5. Dentre as cartas de controle, a MMEP mostrou-se mais eficaz, para indicar o controle de qualidade de água.

6. Quanto ao gráfico de controle multivariado, apresentou-se vantajoso do ponto de vista do ganho de tempo no monitoramento e análise de vários parâmetros ao mesmo tempo.

7. As correlações bivariadas entre os parâmetros de qualidade da água apresentam alta correlação entre as variáveis DQO e DBO; coliformes totais e termotolerantes.

8. Para o índice de capacidade do processo, observou-se que, com exceção do pH, nitrogênio, temperatura, sólidos a montante e jusante, os processos das variáveis não são capazes de cumprir as especificações.

9. O IQA teve como resultado a montante 91 e a jusante 86, índice considerado de qualidade ótima.

10. O IET encontrado é bom, pois está abaixo do valor 44.

11. O índice multivariado apresentou como resultados 0,52 a montante e 0,41 a jusante, acompanhando o IQA, ou seja, quando o IQA aumenta o ICP multivariado também aumenta.

12. Sugerem-se novas pesquisas sobre o uso das técnicas de controle estatístico de qualidade para monitoramento da qualidade da água.

REFERÊNCIAS

ALBERS, W.; KALLENBERG, W. C. M. Estimation in Shewhart control charts: effects and corrections. **Metrika**. Berlin - Alemanha, v. 59, p. 207-234, 2004. DOI 10.1007/s001840300280.

ALENCAR, J. R. B.; SOUZA JR., M. B.; ROLIM NETO, P. J.; LOPES, C. E. Uso de controle estatístico de processo (CEP) para validação de processo de glibenclamida comprimidos. **Rev. Bras. Farm.**, Rio de Janeiro, RJ, v. 85, n. 3, p. 115-119, 2004.

ALMEIDA, V. L. S.; DANTAS, Ê. W.; MELO-JÚNIOR, M.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C.; MOURA, A. N. Zooplanktonic community of six reservoirs in northeast Brazil. **Braz. J. Biol.**, São Paulo-SP, v. 69, n.1, p. 57-65, 2009.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP - AIAG. **Statistical' process control reference manual**. Southfield, MI, 1995.

BACCI, D. PATACA, E. M. Educação para a água. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008. DOI 10.1590/S0103 40142008000200014.

BALESTRASSI, P. P.; FERREIRA, J. R.; MORAES, C. F. Análise crítica da aplicação de métodos estatísticos em processos definidos por dados que não apresentam distribuição normal. **Gestão e Produção** (UFSCar), São Carlos, SP, v. 2, p. 7-18, 2006.

BERLITZ, F. **Proposta de abordagem de controle de qualidade de longo prazo para avaliar a estabilidade de um método analítico**. Porto Alegre – RS: Publicações Weinmann. Disponível em: www.publicacoesweinmann.com.br/2009/08/proposta. Acesso em: 20 dez. 2009.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. (ed.). **Mapa de solos do estado do Paraná**. Legenda atualizada. Rio de Janeiro: IAPAR/EMBRAPA, 2008.74 p.

BLEY JR. C. J. **Manual da gestão ambiental da suinocultura**. PNMA II, gestão integrada de ativos ambientais - Paraná, MMA. Curitiba: SEMA/IAP/FUMPAR, 2004. p. 11.

BOLLMANN, H. A.; EDWIGES, T. Avaliação da qualidade das águas do Rio Belém, Curitiba – PR, com emprego de indicadores de qualitativos e perceptivos. **Eng. Sanit. e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, out./dez, 2008.

BONNET, B. R. P.; FERREIRA, L. G. LOBO, F. C. Relações entre qualidade da água e uso do solo em Goiás: uma análise à escala da bacia hidrográfica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 311-322, 2008.

BORDALO, A. A.; NILSUMRANCHI, W.; CHALERMWAT, K. Water quality and uses of the Bangpakong River (Eastern Thailand). **Water Research**, Oxford, Grã-Bretanha, n. 35, p. 3535-3642, 2001.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **IBGE investiga o meio ambiente de 5.560 municípios brasileiros.** Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=363&id_pagina=1. Acesso em: 10 jul. 2008.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente - MMA. **PNMA II** – Plano Nacional do Meio Ambiente. Curitiba, 2002. Disponível em <http://www.funpar.ufpr.br/pnma/bacias.htm>. Acesso em: 20 jan. 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário oficial da União**, Brasília – DF, 18 mar. 2005.

BRITTO, J. M.; RANGEL, M. C. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 114-122, 2008.

BUENO, L. F.; GALBIATTI, J. A.; BORGES, M. J. Monitoramento de variáveis de qualidade da água do Horto Ouro Verde - Conchal – SP. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, set./dez., p. 742-748, 2005. DOI 10.1590/S0100-69162005000300020.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnological and oceanography**, Alberta, Canadá, v. 22, n. 2, p. 361-369, 1977.

CARVALHO, A. R.; SCHLITTER, F. M.; TORNISIELO, V. L. Relações da atividade agropecuária com parâmetros físicos químicos da água. **Química Nova**, São Paulo, v. 23, n. 5, p. 618-622, 2000.

CARVALHO, C. F.; FERREIRA, A. L.; STAPELFELDT, F. Qualidade das águas do Ribeirão Ubá – MG. **Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto - MG, n. 3, jul./set. p. 165-167, 2004.

CHANG, H. Water quality trend urbanization land cover spatial regression spatial analysis scale GIS. **Water Research**, Oxford, Grã-Bretanha, n. 42, p. 3285-3304, 2008.

CHEN, K. S.; HSU, C. H.; WU, C. C. Process capability analysis for a multi-process product. Taiwan. Int. **Journal Manuf. Technol.**, United Kingdom, n. 27, p. 1235-1241, 2006.

CHEN, K. S.; HUANG, H. L.; HUANG, C. T. Control charts for one-sided capability indices. Taiwan. **Quality & Quantity**, Bologna, Italia, n. 41, p. 413-427, 2007.

CHEN, T. On reducing false alarms in multivariate statistical process control. **Chemical Engineering Research and Design**, n. 88, p. 430-436, 2010.

CLARO, F. A. E.; COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. Gráficos de controle de MMEP e de X para monitoramento de processos autocorrelacionados. **Revista Produção**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 536-546, set./dez. 2007.

COELHO, L. C. Utilização de modelos de suavização exponencial para previsão de demanda com gráficos de controle combinados Shewhart-CUSUM. INGEPRO. **Inovação, Gestão, Produção**, Santa Maria, RS, v. 1, 191-213 p. 2009.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. Série relatórios. Anexo V, 2005. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice_iva_iet.asp. Acesso em: 12 fev. 2010.

COOK, D. F.; ZOBEL, C. W.; WOLFE, M. L. Environmental statistical process control using an augmented neural network classification approach. **European Journal of Operational Research**, v. 174, p. 1631-1642, 2006.

CORBETT, C.; PAN, J. N. Evaluating environmental performance using statistical process control techniques. **European journal of operational research**, n. 139, p. 68-83, 2002.

CORDOBA, E. B.; MARTÍNEZ, A. C.; FERRER, E. V. Water quality indicators: Comparison of a probabilistic index and a general quality index. The case of the Confederacion Hidrografica del Jucar (Spain). **Ecological Indicators**, Amsterdam, Netherlands, v. 10, n. 5, p. 1049-1054, 2010. DOI 10.1016/j.ecolind.2010.01.013.

COSTA, A. F. B.; EPPRESCHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. São Paulo: Atlas, 2004.

COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. Synthetic control charts with two-stage sampling for monitoring bivariate processes. **Revista Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 117-130, jan./abr., 2007. Versão on line. ISSN 1678-5142.

COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. The use of principal components and univariate charts to control multivariate processes. **Revista Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 1, p. 173-196, jan./abr., 2008. Versão on line. ISSN 1678-5142, Versão impressa ISSN 0101-7438.

CONSTAN-LONGARES, A.; MONTEMAYOR, M.; PAYAN, A.; MENDEZ, J.; JOFRE, J.; MUJERIEGO, R.; LUCENA, F. Microbial indicators and pathogens: Removal, relationships and predictive capabilities in water reclamation facilities. **Water Research**, Oxford, Grã-Bretanha, v. 42, n.17, p. 4439-4448, 2008.

DERISÍO, J. C. **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 3. Ed. São Paulo: Signus, 2007.

DONADIO, N. M. M.; GALBIATTI, J. A.; PAULA, R. C. Qualidade da água de nascentes com diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do córrego Rico, São Paulo, Brasil. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 115-125, jan./abr. 2005.

FERRETTI, E. **Diagnóstico físico-conservacionista – DFC da bacia do rio Marrecas – Sudoeste do Paraná**. 1998. 194 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 1998.

FIA, R.; TEIXEIRA DE MATOS, A.; CARTERI CORADI, P.; PEREIRA- RAMIREZ, O. Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS, Brasil, Ambiente e Água. **Journal of Applied Science**, Lasani, Pakistan, v. 4, n. 1, p. 132-141, 2008.

FOY, R. H.; LENNOX, S. D.; SMITH, R. V. Assessing the effectiveness of regulatory controls on farm pollution using chemical and biological indices of water quality and pollution statistics. **Water Res.**, Oxford, Grã-Bretanha, v. 35, n. 12, p. 3004-3012, 2001.

GONÇALVES, C. S.; RHEINHEIMER, D. S.; PELLEGRINI, J. B. R.; KIST, S. L. Qualidade da água numa microbacia hidrográfica de cabeceira situada em região produtora de fumo. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.**, Campina Grande, v. 9, n. 3, jul./set. 2005, DOI 10.1590/S1415-43662005000300015.

GONZÁLEZ, F. U. T.; HERRERA-SILVEIRA, J. A.; MACEDO-AGUIRRE, M. L. Water quality variability and eutrophic trends in Karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula. Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, n. 76, p. 418-430, 2008.

GUEVARA-RIBA, A.; RUBIO, R.; RAURET, G.; MUNTAU, H.; SAHUQUILLO, A. Method study for the preparation of a wet sediment quality control material. **Analytica Chemical Acta**, v. 555, p. 384-390, 2006.

HERMES, E., ORSSATTO, F., BOAS, M. A. V., SCHOENHALS, M. Correlação entre os parâmetros fósforo total e nitrogênio total do rio Piquiri, Ubiratã - PR. In: ENCONTRO NACIONAL DE DIFUSÃO TECNOLÓGICA. 2008, Medianeira. **Anais...** Medianeira: UTFPR, 2008. p. 1-6.

IDE, M. S.; RIBEIRO JUNIOR, J. I.; SOUZA, L. M. Gráficos de controle com uma abordagem de séries temporais. **Revista eletrônica Produção e Engenharia**, Viçosa, MG, v. 2, n. 1, p. 69-84, jan./jul. 2009.

INFANTE, P.; DIAS, J. R. Carta X com amostras de tamanho variável: um novo procedimento dinâmico. **Revista Investigação Operacional**, Lisboa, Portugal, n. 26, p. 45-63, 2006.

ISOLDI, L. A.; KOETZ, P. R. Tratamentos biológicos para remoção de matéria carbonada e nitrogenada. **Revista do Mestrado em Educação Ambiental**. Rio Grande, v. 12, p. 273-277, 2004.

JACOBI, L. F.; SOUZA, A. M.; PEREIRA, J. E. S. Gráfico de controle de regressão aplicado na monitoração de processos. **Revista Produção**, São Paulo, SP, v. 12, n. 1, p. 46-59, 2002.

JONNALAGADDA, S. B.; MHERE, G. Water quality of the Odzi River in the eastern highlands of Zimbabwe. **Water Research**, Oxford, Grã-Bretanha, n. 35, p. 2371-2376, 2001.

KAHRAMAN, C.; KAYA, I. Fuzzy process capability índices for quality control of irrigation water. **Stoch Environ Res Risk Assess**, n. 23, p. 451-462, 2009, DOI 10.1007/s00477-008-0232-8.

KAYA, I.; KAHRAMAN, C. Development of fuzzy process accuracy index for decision making problems. **Information Sciences**, Alberta, Canadá, p. 2-12, 2009. DOI 10.1016/j.ins.2009.05.019.

KONIG, R.; SUZIN, K. R. H.; RESTELLO, R. M.; HEPP, L. U. Qualidade das águas de riachos da região norte do Rio Grande do Sul (Brasil) através de variáveis físicas, químicas e biológicas. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, Rio Grande, RS, v. 3, n. 1, p. 84-93, 2008.

LEIRAS, A.; COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K. Planejamento do controle estatístico de processos com baixa fração não conforme restrito a amostras pequenas. **Revista Produção**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 139-150, jan./abr. 2007.

LERMONTOV, A.; YOKOYAMA, L.; LERMONTOV, M.; MACHADO, M. A. S. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. **Ecological Indicators**, Amsterdam, Netherlands, n. 9, p. 1188-1197, 2009.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2. ed. Campinas: Átomo, 2008. v. 1. 444 p.

LIN, H. C. Using normal approximation for calculating the p-value in assessing process capability index Cpk. Taiwan. **Int. Journal manuf. Technol.**, n. 25, p. 160-166, 2005.

LINO, A. C. L.; PECHE FILHO, A.; STORINO, M. Análise da fragmentação de fitomassa realizada por uma roçadora em área com predominância de capim-colonião. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 58, p. 401-407, 1999.

LIU, Y.; YANG, P.; HU, C.; GUO, H. Water quality modeling for load reduction under uncertainty: A Bayesian approach. **Water Research**, Oxford, Grã-Bretanha, v. 42, n. 13, p. 3305-3314, 2008.

LONGCHEEN, H.; HUANG, C. J.; WANG, Y. H. T. New EWMA control charts for monitoring process dispersion. **Computational Statistics and Data Analysis**, Londres, p. 1-15, 2010. DOI 10.1016/j.csda.2010.03.011.

MACLEOD, C.; HAYGARTH, P. A review of the significance of non-point source agricultural phosphorus to surface water. **Science for Agriculture and Environment**, UK, Scope Newsletter, n. 51, p. 1-10, June, 2003.

MAGALHÃES, R. R.; CYMROT, R. **Técnicas de monitoramento e controle estatístico de processos através de cartas de controle da soma cumulativa e de cartas de controle de média móvel exponencialmente ponderada.** Disponível em: www.meusite.mackenzie.com.br/raquelc/INIC0000478CEP.pdf. Acesso em: 17 nov. 2009.

MANSOR, M. T., FILHO, J. T., ROSTON, D. M. Avaliação preliminar das cargas difusas de origem rural, em uma sub-bacia, do Rio Jaguari, SP. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 10, n. 3, p. 715-723. 2006.

MARQUES, R. A. G. Adequação do *BackTesting* no Modelo *Value-at-Risk*: Comparação entre aproximação normal e o teste de razão de verossimilhança. **R. Bras. Risco e Seg.**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 9, p. 1-22, abr./set. 2009.

MASSON, P. Quality control techniques for routine analysis with liquid chromatography in laboratories. France. **Journal of Chromatography**, n. 1158, p. 168-173, 2007.

MENEZES, J. M.; PRADO, R. B.; SILVA JÚNIOR, G. C. DA; MANSUR K. L.; OLIVEIRA, E. S. S. Qualidade da água e sua relação espacial com as fontes de contaminação antrópicas e naturais: bacia hidrográfica do rio São Domingos – RJ. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 687-698, 2009. DOI: 10.1590/S0100-69162009000400019.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecol. Desenvol. Rur. Sustent.** Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 33-38, out./dez. 2002.

MICHEL, R.; FOGLIATTO, F. S. Projeto econômico de cartas adaptativas para monitoramento de processos. **Gest. Prod.** São Carlos, v. 9, n. 1, p. 17-31, abr. 2002, ISSN 0104-530X., Versão impressa: DOI 10.1590/S0104-530X2002000100003.

MILAN, M.; FERNANDES, R. A. T. Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 261-266, abr./jun, 2002.

MINGOTI, S. A.; YASSUKAWA, F. R. S. A comparação de gráficos de controle para a média de processos autocorrelacionados. **Revista Eletrônica Sistemas e Gestão**, Rio de Janeiro, RJ, v. 3, n. 1, p. 55-73, jan./abr., 2008.

MOLINA, P. M. HERNANDEZ, F. B. T.; VANZELA, L. S. Índice de qualidade da água na microbacia degradada do Córrego Água da Bomba - Município de Regente Feijó – SP. In:

CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM – CONIRD, 16, 2006, Goiânia, **Anais...** Goiânia: ABID, 2006. 1 CD-ROM.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MOREIRA, P. D. O.; PINHEIRO, L.; RIBEIRO, J.; DE SOUZA, C. R. B.; REIS, R. Q. Aplicação dos gráficos de controle CUSUM tabular para avaliação da aderência dos projetos ao processo de *software*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE SOFTWARE, 2008, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBC, 2008. 1 CD-ROM.

NAGEL, J. W. A water quality index for contact recreation. **Water Science Technology**, n. 43, p. 285-292, 2001.

NAIME, R.; FAGUNDES, R.S. 2005. Controle da qualidade da água do Arroio Portão, RS. **Pesquisa em Geociências**, Porto Alegre, RS, v. 32, n. 1, p. 27-35, 2005.

NEZHAD, M. S. F.; NIAKI, S. T. A. A New monitoring design for uni-variate statistical quality control charts. **Information Sciences**, v. 180, p. 1051-1059, 2010.

NIJHUIS, A.; JONG, S.; VANDEGINSTE, B. G. M. The application of multivariate quality control in gas chromatography. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, Barcelona, ES, n. 47, p. 107-125, 1999.

NOMELINI, Q. S. S.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. Estudos dos padrões de não aleatoriedade dos gráficos de Shewhart: um enfoque probabilístico. **Revista Engenharia e Produção**, São Carlos, v. 16, n. 3, p. 414-421, jul.- set. 2009.

PAN, J. N. A study of multivariate pré-control charts. **Int. J. Production Economics**, n. 105, p. 160-170, 2007.

PEARN, W. I.; LIN, P. C. Measuring process yield based on the capability index Cpm. Taiwan, Int. **Journal Adv. Manuf. Technol.**, n. 24, p. 503-508, 2004.

PIASENTIN, A. M.; SEMENSATTO JUNIOR, D. M.; SAAD, A. R.; MONTEIRO JUNIOR, A. J.; RACZKA, M. F. Índice de qualidade da água (IQA) do reservatório tanque grande, Guarulhos (SP): análise sazonal e efeitos do uso e ocupação do solo. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 28, n. 3, p. 305-317, 2009.

PINTO, D. B. F.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; COELHO, G. Qualidade da água do Ribeirão Lavrinha na região Alto Rio Grande – MG, Brasil. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras v. 33, n. 4, jul./ago. 2009. DOI 10.1590/S1413-70542009000400028.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidades das águas e poluição**: aspectos físico-químicos. São Paulo: ABES, 2006. 285 p.

PRASAD, S.; CALIS, A. Capability indices for material balance accounting. EUA. **European Journal of Operational Research**, n. 114, p. 93-104, 1999.

PYLRO, A. S. **Modelo linear dinâmico de Harrison & Stevens aplicado ao Controle Estatístico de Processos Autocorrelacionados**. 2008. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

RAFAELLI, D. R.; VILAS BOAS, M. A.; OPAZO, M. A. U. Controle de qualidade e avaliação da capacidade de processo de fabricação de ração monitorando-se o teor de proteína bruta.

Teor de água e atividade de urease do farelo de soja utilizado como matéria-prima. **Eng. Agríc.** Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 229-237, maio 2002.

RAMESH, S.; SUKUMARAN, N.; MURUGESAN, A. G.; RAJAN, M. P. An innovative approach of drinking water quality index – A case study from Southern Tamil Nadu, India. **Ecological Indicators**, Amsterdam, Netherlands, v. 10, p. 857-868, 2010.

RECH, C.; SHOENSHALS, M.; FOLLADOR, F. A. C. Avaliação da capacidade de suporte para a atividade de suinocultura em uma bacia hidrográfica do Sudoeste do Paraná, tendo em vista a prevenção da degradação ambiental. **Eng. Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 5, n. 3, p. 220-233, set./dez., 2008a.

RECH, C.; SHOENSHALS, M.; FOLLADOR, F. A. C. Influência da suinocultura na qualidade da água em microbacia agrícola no Sudoeste do Estado do Paraná. **Eng. Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v.5, n. 3, p. 254 – 273, set./dez., 2008b.

REYNOLDS JR, M. R.; STOUMBOS, Z. G. Robust CUSUM charts for monitoring the process mean and variance. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 25, n. 6, out. 2009.

RIBEIRO JUNIOR, J. I.; GONÇALVES, T. C. Métodos alternativos de controle estatístico de processo univariado. **Revista eletrônica Produção & Engenharia**, Viçosa, MG, v. 2, n. 1, p. 85-95, jan./jul., 2009.

RIBEIRO, T. A. P., AIROLDI, R. P. S., PATERNIANI, J. E. S., SILVA, M. J. M. Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, n. 3, p. 295-301, 2005.

ROCHA, C. M. B. M., RODRIGUES, L. S., COSTA, C. C., OLIVEIRA, P. R., SILVA, I. J., JESUS, E. F. M., ROLIM, R. G. Avaliação da qualidade da água e percepção higiênico-sanitária na área rural de Lavras, Minas Gerais, Brasil, 1999-2000. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 9, p. 1967-1978. 2006.

RUDOLF, A.; AHUMADA, R.; PÉREZ, C. Dissolved oxygen content as an index of water quality in San Vicente Bay, Chile. **Env. Monit. Assess.**, n. 78, p. 89-100, 2002.

SÁFADI, T. Uso de séries temporais na análise de vazão de água na represa de furnas. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 28, n. 1, p. 142-148, jan./fev., 2004.

SANCHEZ, E.; COLMENAREJO, M.; VICENTE, J.; RUBIO, A.; GARCIA, M.; TRAVIESO, L.; BORJA, R. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. **Ecological Indicators**, Amsterdam, Netherlands, v. 7, n. 2, p. 315-328, 2006. ECOIND-224.

SARDINHA, D. S.; CONCEIÇÃO, F. T.; SOUZA, A. D. G.; SILVEIRA, A.; JULIO, M.; GONÇALVES, J. C. S. I. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme (SP). **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 329-328, jul./set. 2008. DOI 10.1590/S1413-41522008000300013.

SENDACZ, S.; CALEFFI, S.; SANTOS-SOARES, J. Zooplankton biomass of reservoirs in different trophic conditions in the State of São Paulo, Brazil. **Braz. J. Biol.**, São Carlos, v. 66, n. 1, p. 337-350, fev. 2006. DOI 10.1590/S1519-69842006000200016.

SILVA, R. P.; SOUZA, F. G.; CORTEZ, J. W.; FURLANI, C. E. A.; VIGNA, G. P. Variabilidade espacial e controle estatístico do processo de perdas na colheita mecanizada do algodoeiro. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 742-752, set./dez 2007.

SILVA, W. V.; NOGAS, P. S. M.; SILVA, E. D.; COSTA, L. S. Aplicação do gráfico de controle de média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) para monitorar a variabilidade de um processo produtivo. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 2, 2006, Resende - RJ. Disponível em: http://www.aedb.br/anais-seget/ac_pos.htm. Acesso em: 10 fev. 2009. ISSN-1807-409X.

SIMEONOV, V.; STRATIS, J. A.; SAMARA, C.; ZACHARIADIS, G.; VOUTSA, D.; ANTHEMIDIS, A.; SOFONIOU, M.; KOUIMTZIS, T. Assessment of the surface water quality in Northern Greece. **Water Research**, Amsterdam, v. 37, n. 17, p. 4119-4124, 2003.

SOARES, A. A. **O índice de capacidade multivariado como instrumento para avaliação do processo em uma operação de usinagem**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Florianópolis, Florianópolis, 2006.

SOUZA, A. M; RIGÃO, M. H. Identificação de variáveis for a de controle em processos produtivos multivariados. São Paulo. **Revista Produção**, v. 15, n. 1, p. 74-86, jan./abr., 2005.

SOUZA, H. M. L., NUNES, J. R. S. Avaliação dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos do Córrego Figueira pertencente à bacia hidrográfica do Queima-pé de Tangará da Serra/MT. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal. v. 5, n. 2, p. 110-124. 2008.

SOUZA, L. M.; RIBEIRO JÚNIOR, J. I.; REIS, G. M.; IDE, M. S. Eficiência dos gráficos de controle XBARRA, EWMA e CUSUM. **Rev. Eletrônica Produção & Engenharia**, Viçosa, MG, v. 1, n. 1, p. 81-94, set./dez. 2008.

STIGTER, T. Y.; RIBEIRO, L.; CARVALHO DILL, A. M. M. Application of a groundwater quality index. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 327, n. 3-4, p. 578-591, 2006.

SURTIHADI, J.; RAGHAVACHARI, M.; RUNGER, G. Multivariate control charts for process dispersion. **International Journal of Production Research**, U. K., n. 42, p. 2993-3009, 2004.

TOLEDO, A; TABILE, R. A; SILVA, R. P; FURLANI, C. E. A; MAGALHÃES, S.; COSTA, B. O. Caracterização das perdas e distribuição de cobertura vegetal em colheita mecanizada de soja. **Revista Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 710-719, out./dez., 2008.

TOLEDO, L. G.; NICOLELLA, G. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 59, n. 1, p. 181-186, 2002.

VARGAS, V. C. C.; LOPES, L.F.D SOUZA, A. M. Comparative study of the performance of the CuSum and EWMA control charts. **Computers & Industrial Engineering**, Los Angeles, USA, v. 46, n. 4, p. 707-724, 2004.

WERNER, L.; RIBEIRO, J. L. D. Previsão de demanda: uma aplicação dos modelos Box-Jenkins na área de assistência técnica de computadores pessoais. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 10, n. 1, p. 47-67, abr. 2003. DOI 10.1590/S0104-530X2003000100005.

WILLIAMS, R. J.; WHITE, C.; HARROW, M. L.; NEAL, C. Temporal and small-scale spatial variations of dissolved oxygen in the Rivers Thames, Pang and Kennet, UK. **Science Total Environment**, Michigan, EUA, n. 251, p. 497-510, 2000.

WU, C. W.; PEARN, W. L.; KOTZ, S. An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. **Int. Journal Production Economics**, Linköping, Suécia, v. 17, p. 338-359, 2009.

ZHANG, N. F. Estimating process capability indexes for autocorrelated data. **Journal of Applied Statistics**, U.K., v. 25, n. 4, p. 559-574, 1998.

ZHOU, W.; BECK, B. F.; PETIT, A. J.; WANG, J. Application of water quality control charts to spring monitoring in karst terranes. **Environmental Geology**, Heidelberg, Berlin, v. 53, n. 6, p. 1311-1321, 2008. DOI 10.1007/s00254-007-0739-1.

ZIMMERMANN, C. M., GUIMARÃES, O. M., ZAMORA, P. G. P. Avaliação da qualidade do corpo hídrico do Rio Tibagi na região de Ponta Grossa utilizando análise de componentes principais (PCA). **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 7, p. 1727-1732. 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A – DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO MANDURIM

pH M	pH J	ODM	OD J	Vazão M (m ³ /s)	Vazão J	PM	P J
7,49	7,2	8,1	8,3	0,11	0,32	0,06	0,06
7,74	7,1	7,2	6,6	0,26	1,2	0,062	0,062
7,25	7,23	5,3	5,4	0,47	0,59	0,062	0,062
7,47	7,67	7,9	8	0,09	0,16	0,06	0,06
7,66	7,47	7,6	8	0,07	0,12	0,03	0,03
7,41	7,33	7,7	7,9	0,05	0,11	0,06	0,06
7,25	7,16	7,2	8,1	0,07	0,13	0,09	0,15
7	6,97	8,3	7,9	0,29	1,2	0	0
6,83	6,44	8,3	8,8	0,17	0,38	0,03	0,03
7,17	6,9	10,5	9,9	0,12	0,27	0,03	0,03
7,12	6,87	10	9,7	0,17	0,61	0,08	0,08
7,52	7,48	9	8	0,09	0,27	0,17	0,17
7,05	7,01	7	7,8	0,06	0,22	0,03	0,03
7,29	7,25	9	8,5	0,26	1,4	0,03	0,08
6,99	7,16	9,6	9,2	0,23	1,2	0,08	0,08
6,26	7,6	6,4	6	0,14	0,64	0,03	0,03
7,3	7,29	7	8	0,06	0,16	0,08	0,08
7,4	8,1	7,8	7,6	0,04	0,1	0,19	0,08
6,92	7,22	6,4	6,3	0,04	0,09	0,18	0,08
7,02	6,94	7,6	8,4	0,06	0,22	0,08	0
7,4	7,24	9	9,2	0,15	0,46	0,01	0,01
7,15	8,3	9,8	9,5	0,2	0,94	0	0
7,7	7,5	6,8	6,5	0,07	0,11	0,12	0,15
7,2	7,6	8	8,3	0,23	0,32	0,17	0,16
8	8,3	6,6	6,2	0,14	0,18	0,04	0,07
7,1	7,3	7,1	8,2	0,09	0,15	0,06	0,061
7,2	7,8	7	6,6	0,62	0,74	0,02	0,058
7,6	7,2	6,5	8,2	0,2	0,26	0,03	0,08
7,5	7,5	6,2	6	0,09	0,17	0,018	0,021
7,2	7	6,4	6	0,23	0,34	0,017	0,019

DQOM	DQO J	DBOM	DBO J	NT M	NT J	C Ter M	C Ter J
11	11,4	9,8	10,9	0,63	0,04	2700	9000
35,4	31,2	2,9	29,6	0,42	0,73	2180	2180
36,36	7,27	12,9	3,91	0,7	0,63	450	199
18,6	36,2	6,2	13,2	1,12	1,23	459	202,98
0,92	18,43	0,53	11,2	0,095	0,146	20	20
25,51	17,61	2,8	3,2	0,02	0,2	138,5	1111,11
15,81	17,85	6,8	9,6	0,66	0,464	319,1	1111,11
0,97	1,94	0,231	1,02	0,081	0,04	19,89	45,5
18,27	11,63	10,4	4,6	0,067	0,1722	166,49	212,23
1,92	3,7	1,2	2,6	0,134	0,095	952,3	212,23
13,46	6,73	2,1	2,1	0,26	0,27	697	250
2	2	0,28	1,29	0,04	0,02	465,11	219,78
28,6	4,9	5,43	2,27	0,05	0,05	382,9	68,64
10,9	11,9	2,04	2,11	0,02	ND	25	204,8
3,7	5,5	1	1,9	0,068	0,032	57,73	57,73
6,9	7,43	2,84	2,9	0,21	0,15	176	14000
2,2	1,1	1,93	0,96	0,05	0,05	25	204,8
8,4	15,17	0,64	2,98	0,05	0,035	405,4	382,97
6,9	3,96	4,17	1,97	0,45	0,42	357	45,1
7,08	10,12	2,9	4,2	0,29	0,28	382	287
2,74	1,94	1,17	1,06	0,29	0,41	738	1084
6,75	7,25	4,8	5,79	0,45	0,42	176	176
2,5	3	1	1,48	0,3	0,35	0,2	2
2,8	3	1,81	1,81	0,56	0,54	0,65	3,25
3	8	0,2	0,9	0,08	0,1	0,1	0,15
5	25	1,7	6,8	0,2	0,4	8	10
2,3	4,21	0,1	0,1	0,04	0,09	0,2	0,2
6,31	8,51	3,1	3,6	0,58	0,74	0,1	0,1
8,2	10,1	0,2	0,3	0,7	0,082	0,2	0,35
3,2	5	1,2	1,8	0,2	0,45	0,3	0,8

C T M	C T J	Turb M	Turb J	Sól. Total	Sól. Total	T água M	T água J
16000	16000	32	40,7	39	30,9	17.5	18.9
2180	2180	6	6,5	26,6	28,8	20	19.9
2120	4800	6,2	7	35	91	23	21
218,36	494,44	7	6,74	16,9	16,9	21.6	21.8
134,5	254,69	7,32	9,47	13	21	18.7	20.5
454,55	1111,11	8,7	18	10,1	10,1	19	20.5
11,11	1111,11	6,6	32	129	114	15.3	14.5
176,25	219,19	3,62	24	7	74	15.5	15.5
305,34	407,33	13	17	115	227	14.2	15
2734	407,33	5,8	12	50	90	15.8	17
967,7	335,57	5,6	8	35	57	12.5	13
465,11	219,78	1,06	5	25	31	17	15.8
382,9	204,8	18	20	33	38	20	19.3
25	465,11	155	184	46	40	16	17
1428	108,69	9	10	69	64	25	26
810	14000	8	9	59	46	22.2	21.9
25	465,11	37	40	41	40	23	25
545,5	545,45	12	13	35	40	20	23
2335	382	40	47	17	14	19	19
503	584	18	21	15	17	16	16
738	1084	11	12,1	50	50	17.9	17.5
2,04	176	15	18	45	50	14	13
0,62	1,2	2	3,62	40	45	21	21
1,2	3,85	8	9	45	56	23	23
0,3	0,8	11	13	44	56	21	21
40	50	11	12	32	35	15	15
1	1,4	14	21	32	40	22	22
0,7	0,7	5,64	5,76	44	46	16	16
1	1,1	8,7	8,96	45	51	21	21
2,05	3,7	5	7,76	33	35	13	13

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE NORMALIDADE E AUTOCORRELAÇÃO

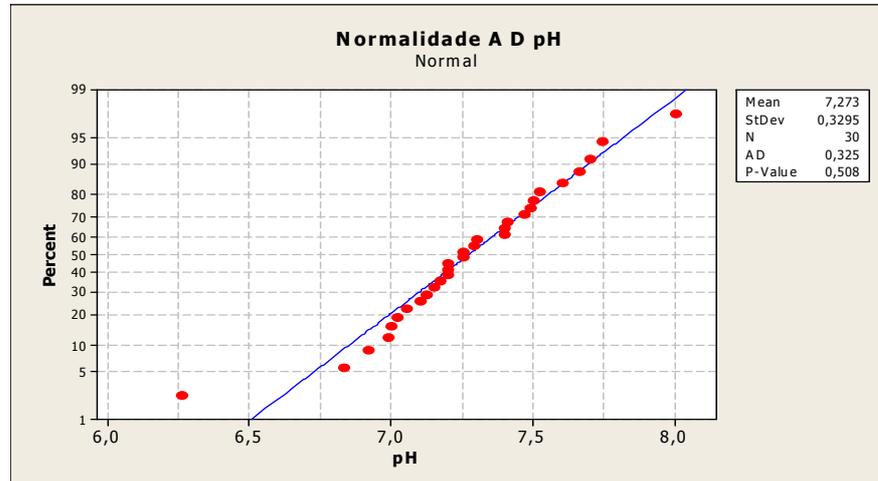


Figura 1 Teste normalidade Anderson Darling pH montante.

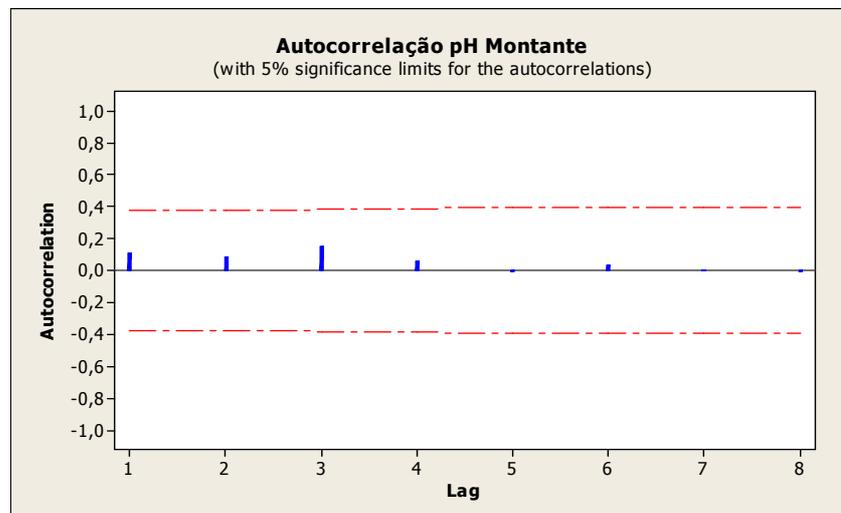


Figura 2 Gráfico autocorrelação pH montante.

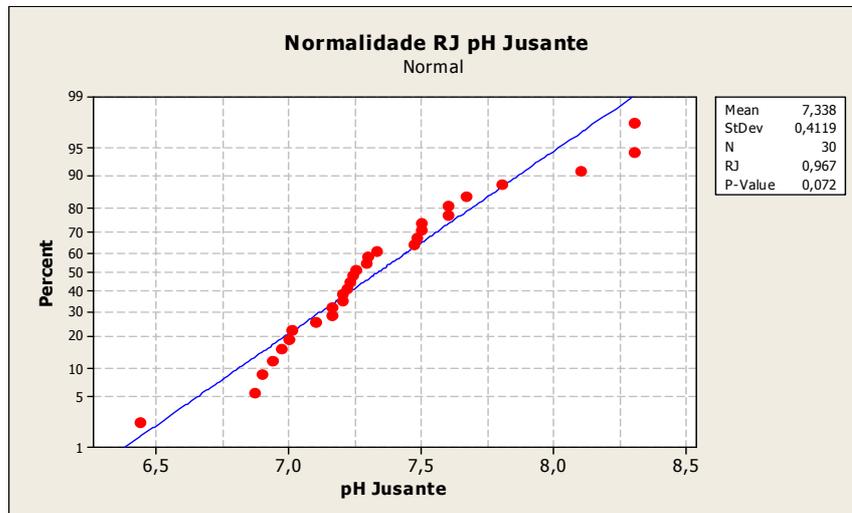


Figura 3 Teste de normalidade Ryan-Joiner para pH jusante.

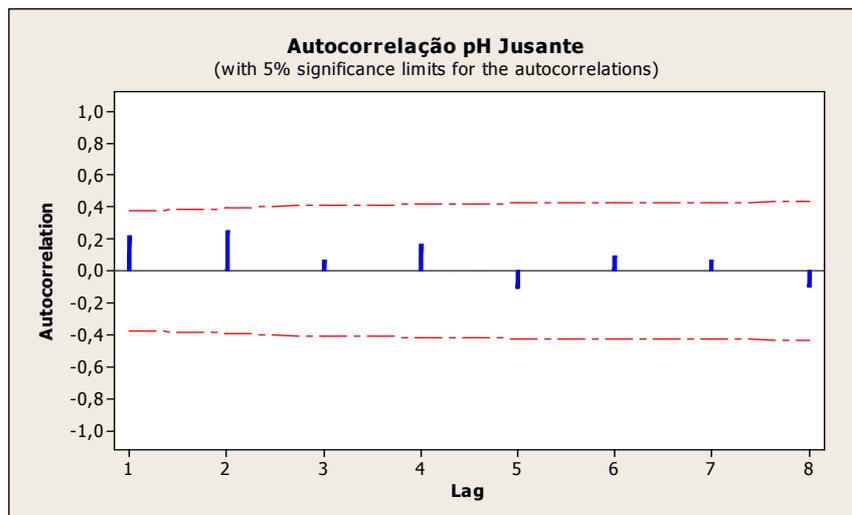


Figura 4 Gráfico autocorrelação pH jusante.

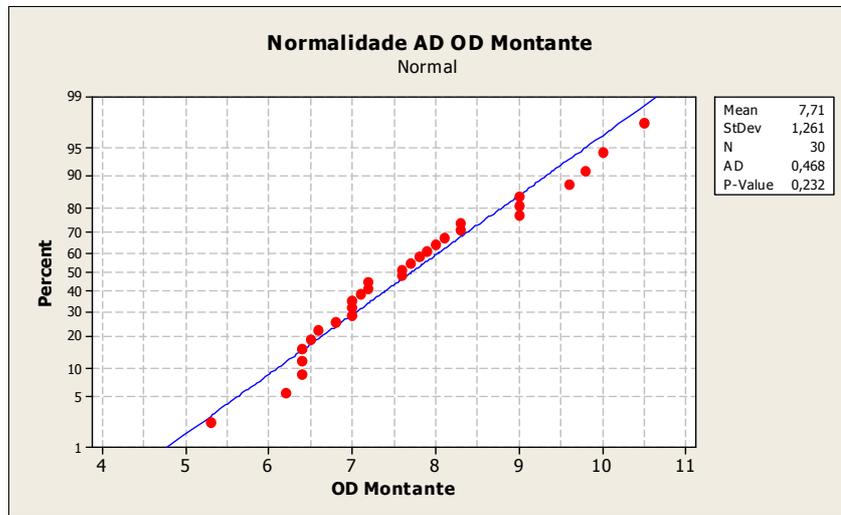


Figura 5 Teste de normalidade Anderson Darling OD montante.

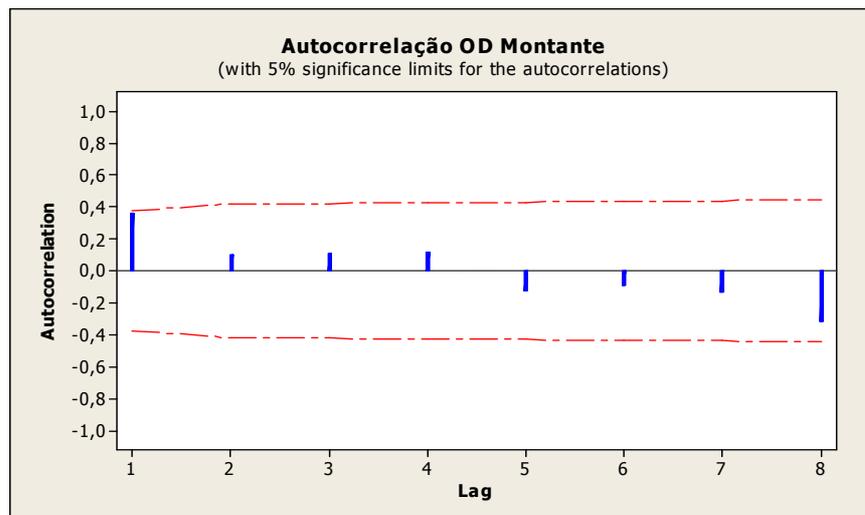


Figura 6 Autocorrelação OD montante.

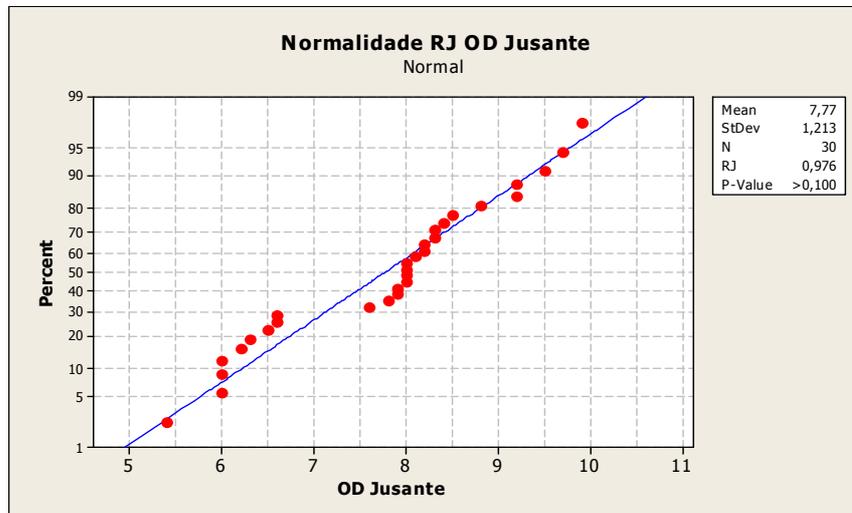


Figura 7 Teste de normalidade Ryan-Joiner OD jusante.

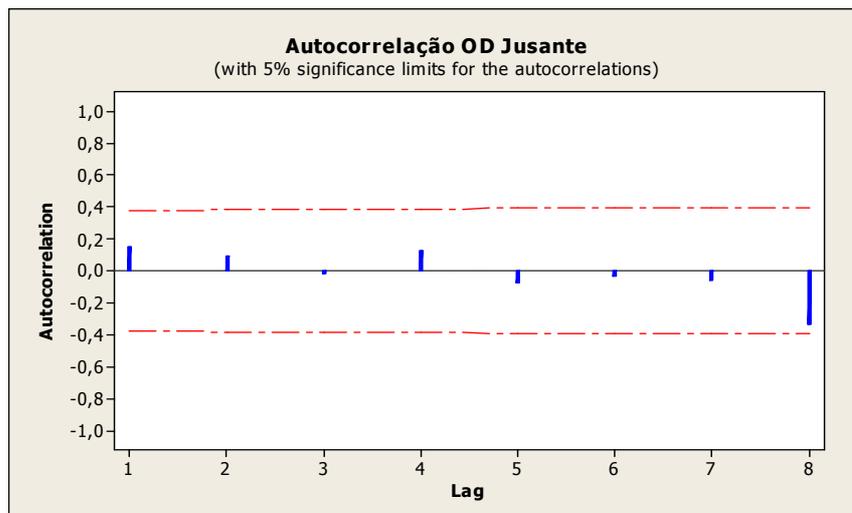


Figura 8 Autocorrelação OD jusante.

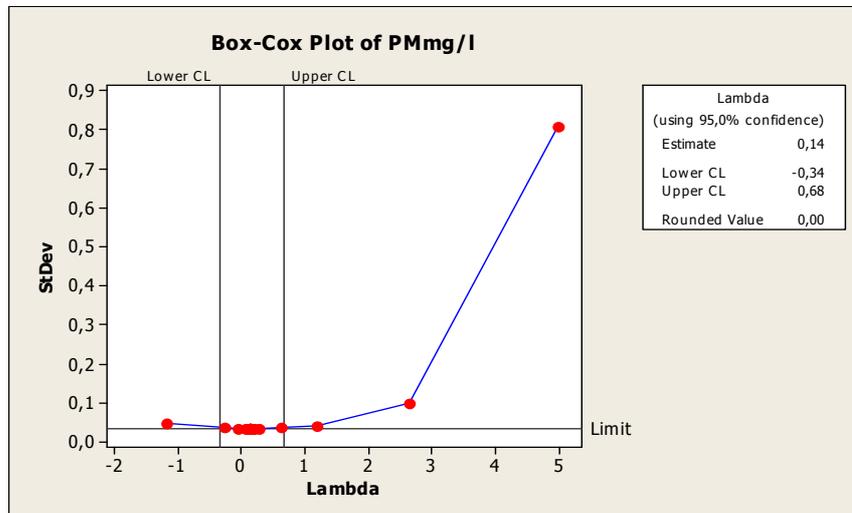


Figura 9 Transformação fósforo montante.

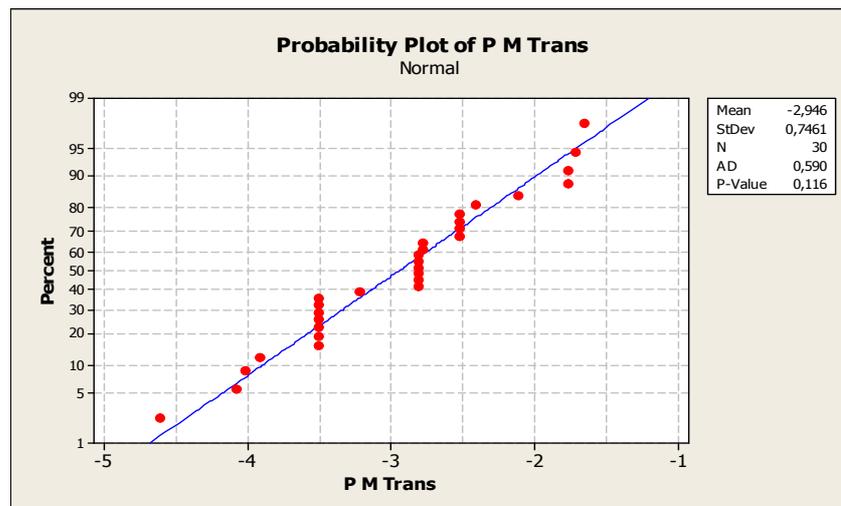


Figura 10 Normalidade fósforo montante transformada.

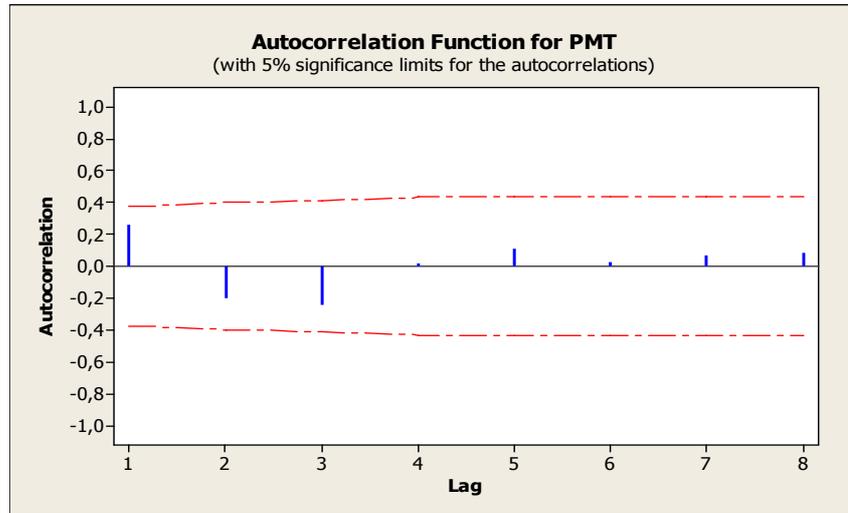


Figura 11 Autocorrelação fósforo montante transformada.

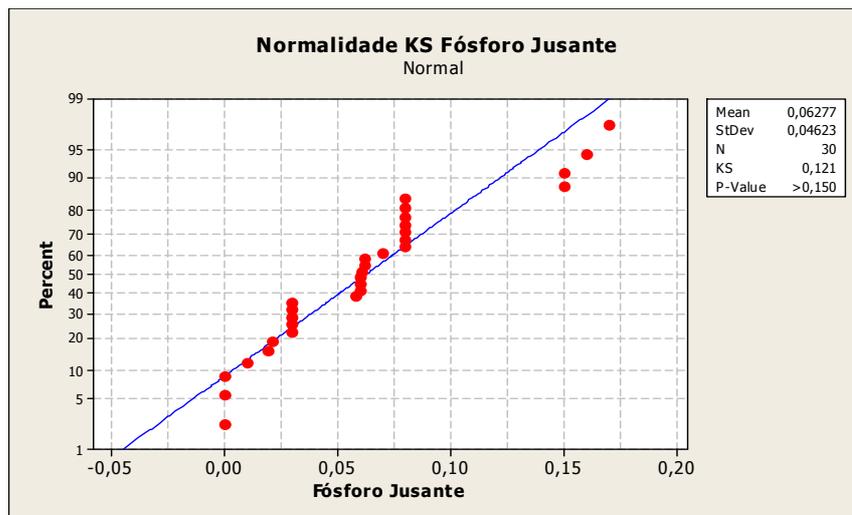


Figura 12 Teste de normalidade Kolmogorov–Smirnov fósforo jusante.

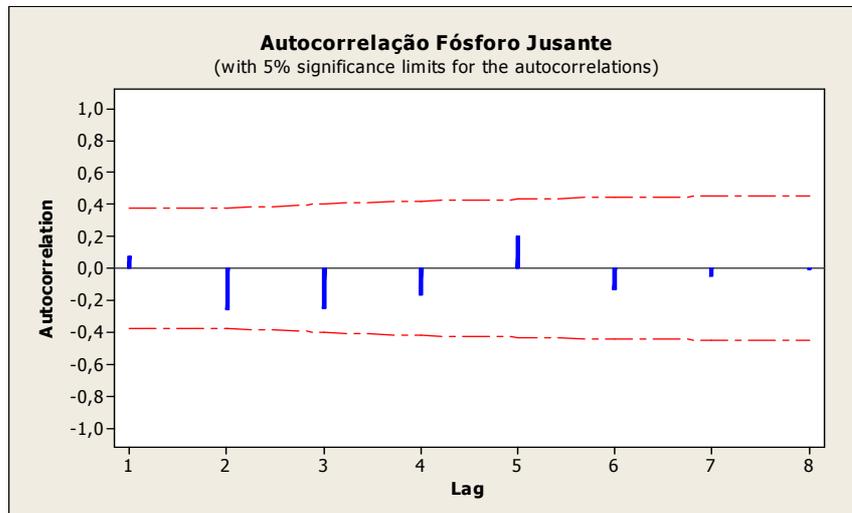


Figura 13 Autocorrelação fósforo jusante.

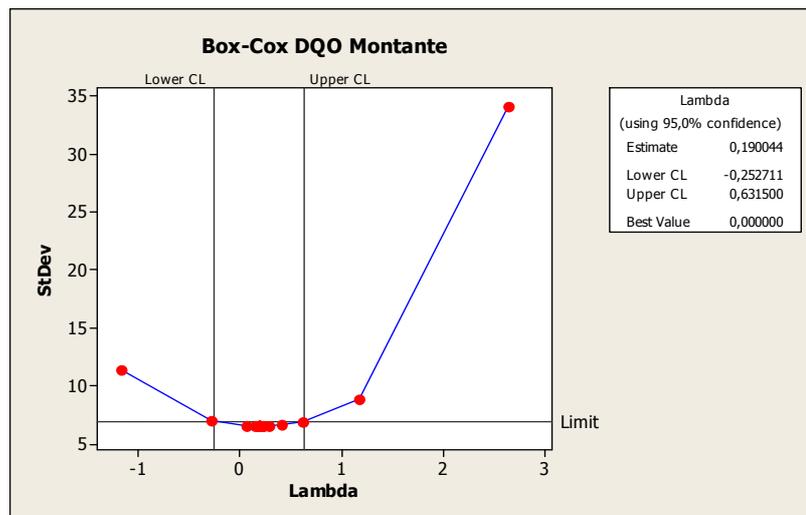


Figura 14 Transformação DQO montante.

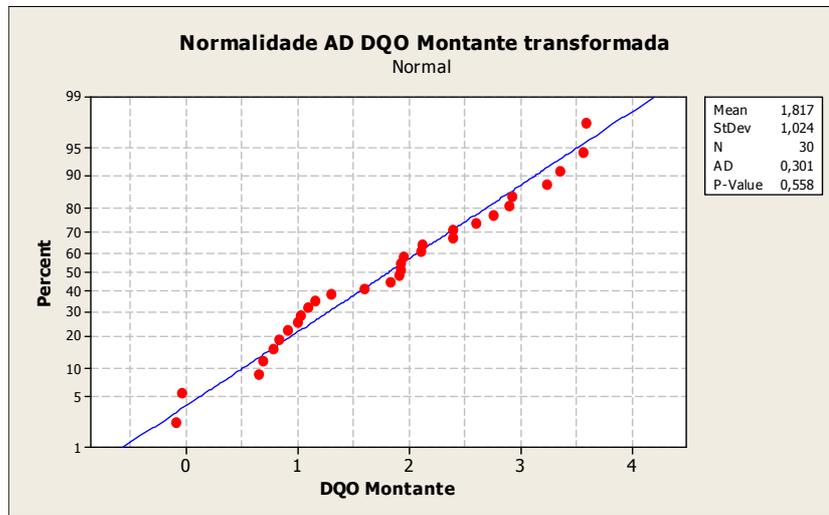


Figura 15 Teste de normalidade Anderson-Darling DQO Montante transformada.

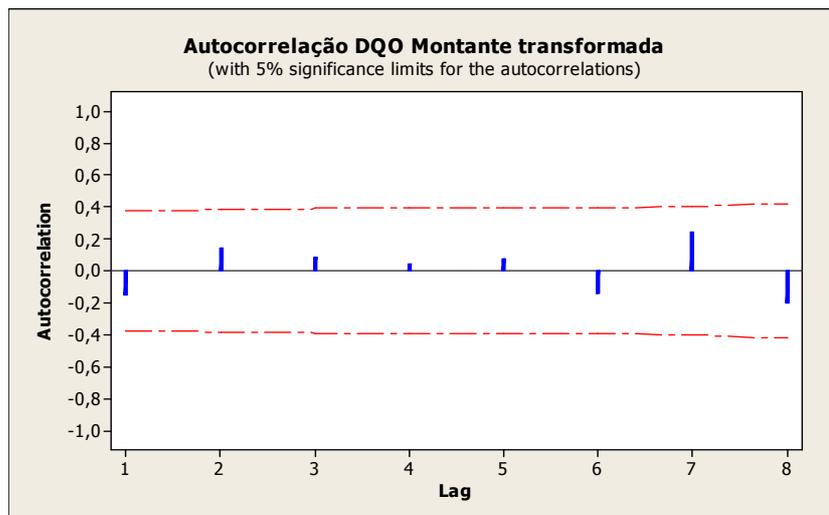


Figura 16 Autocorrelação DQO montante transformada.

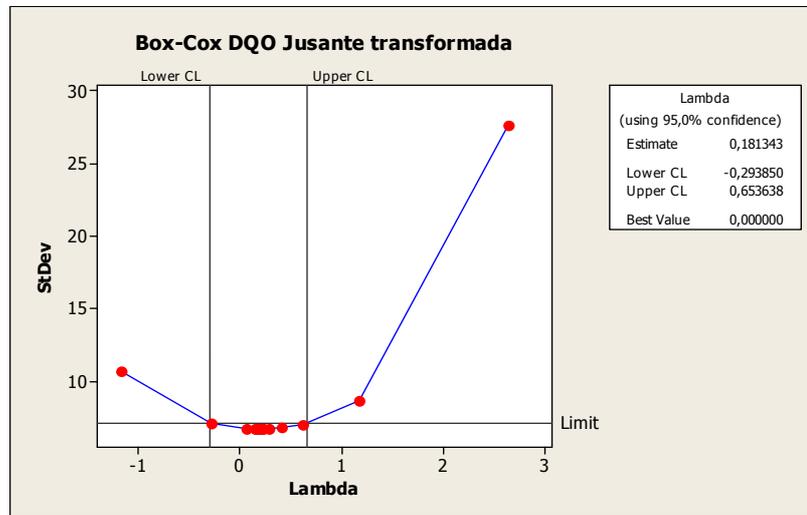


Figura 17 Transformação DQO jusante.

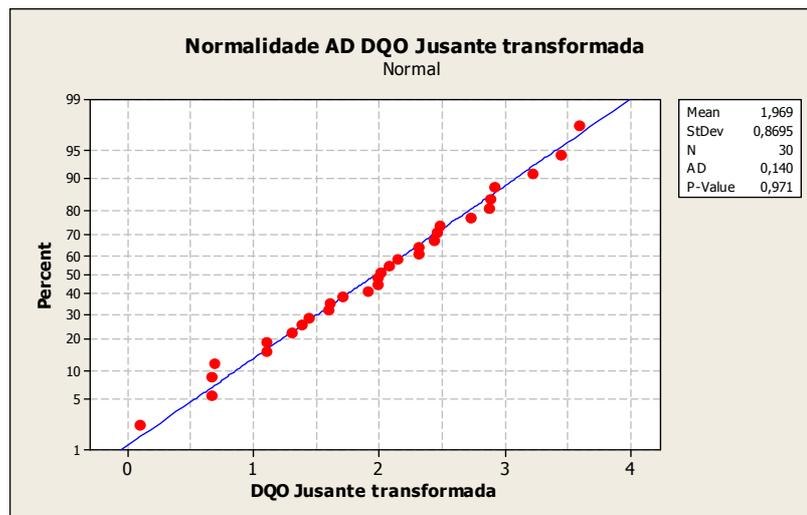


Figura 18 Teste de normalidade Anderson-Darling DQO jusante transformada.

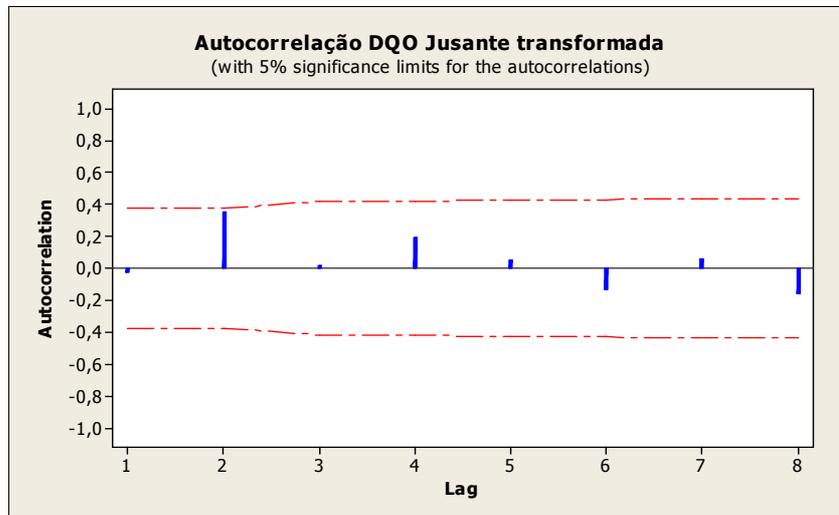


Figura 19 Autocorrelação DQO jusante transformada.

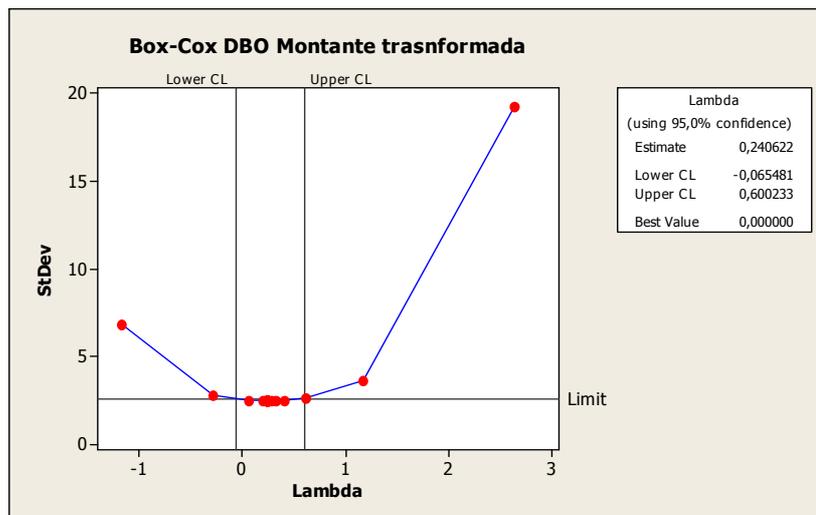


Figura 20 Transformação DBO montante.

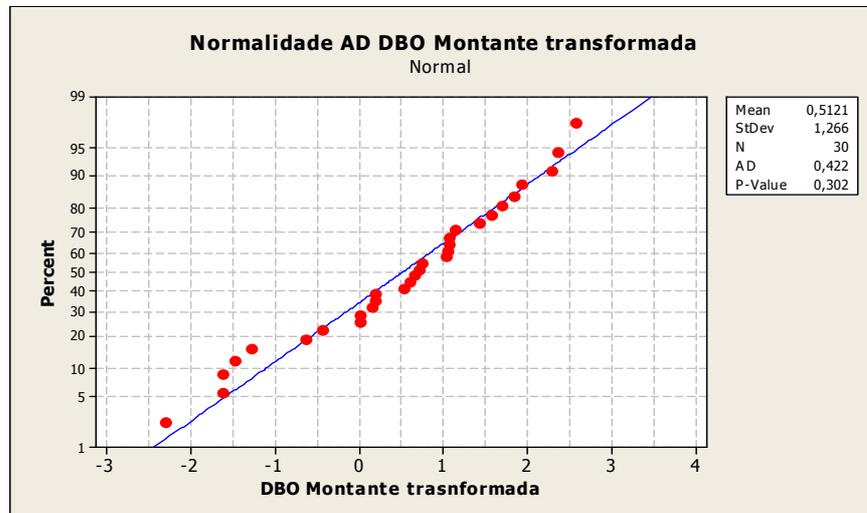


Figura 21 Teste de normalidade Anderson-Darling DBO montante transformada.

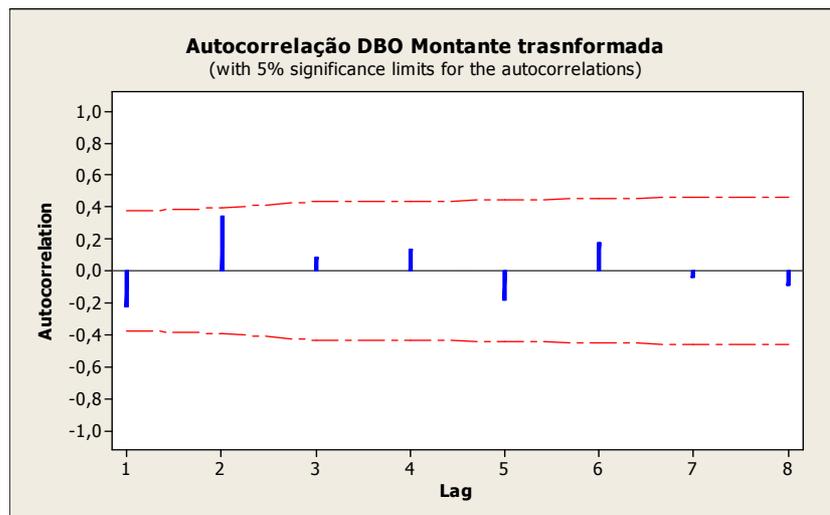


Figura 22 Autocorrelação DBO montante transformada.

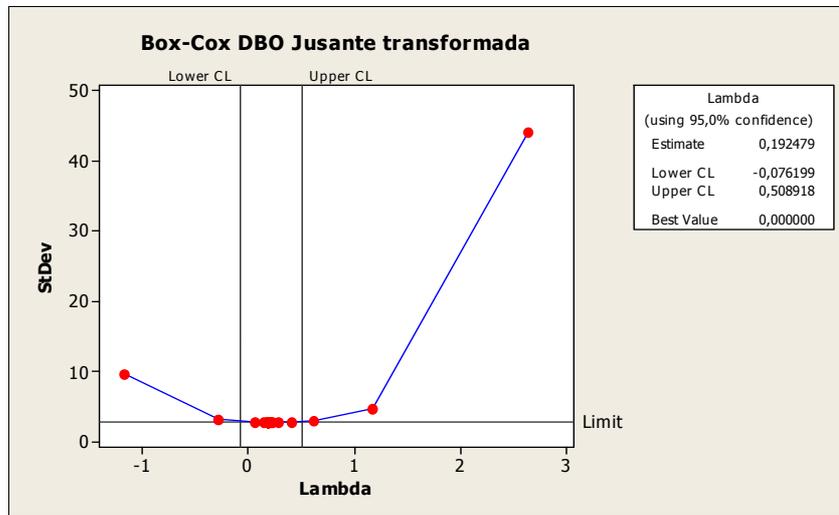


Figura 23 Transformação DBO jusante.

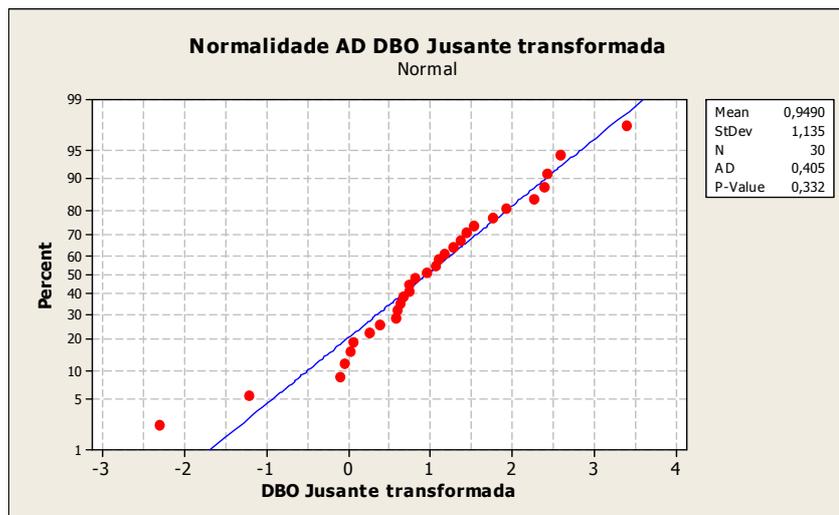


Figura 24 Teste de normalidade Anderson-Darling DBO jusante transformada.

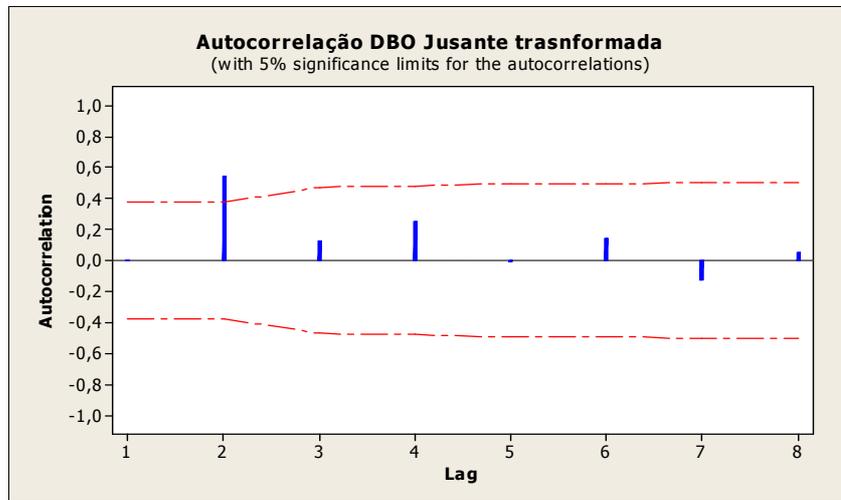


Figura 25 Autocorrelação DBO jusante transformada.

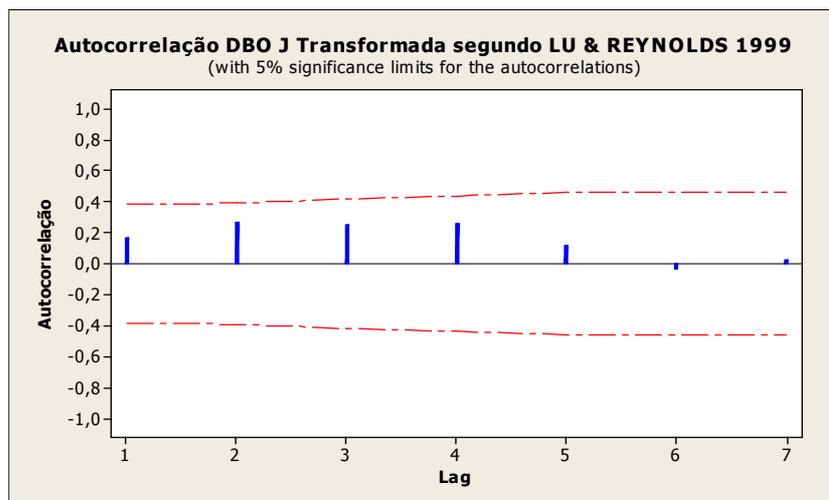


Figura 26 Autocorrelação DBO Jusante transformada segundo LU & REYNOLDS (1999), ou seja, retirada a amostra 27.

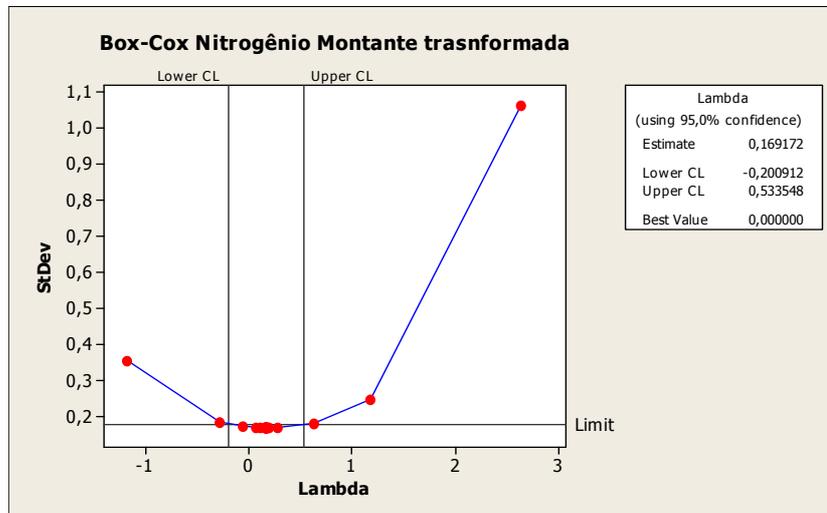


Figura 27 Transformação nitrogênio montante.

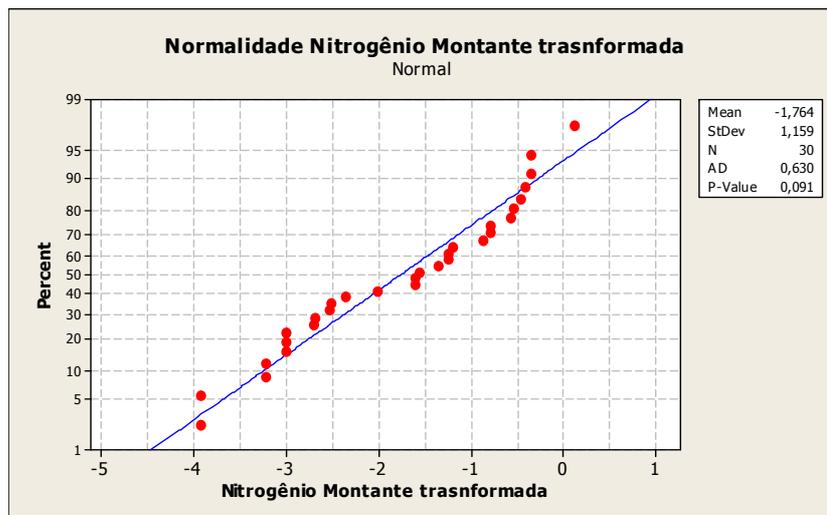


Figura 28 Teste normalidade Anderson-Darling nitrogênio montante transformada.

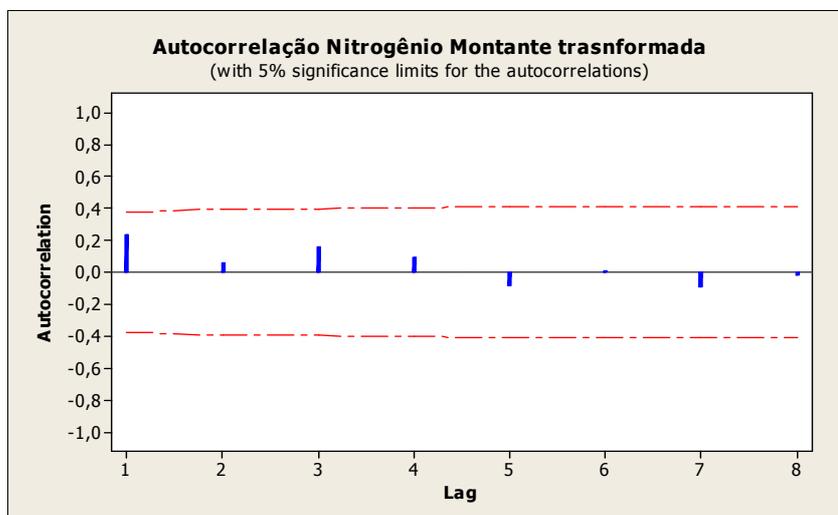


Figura 29 Autocorrelação nitrogênio montante transformada.

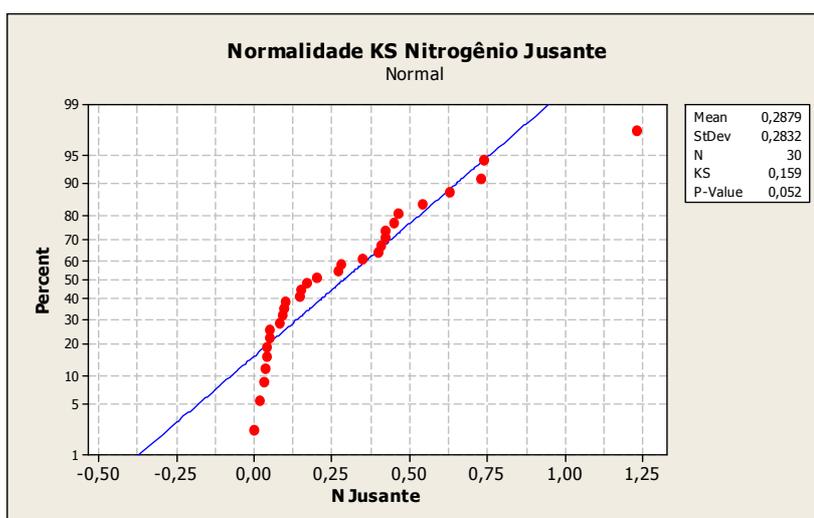


Figura 30 Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov nitrogênio jusante.

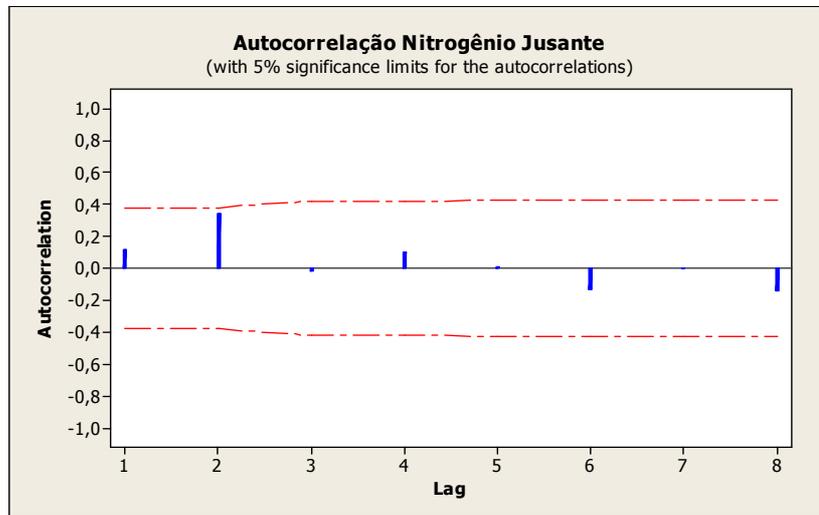


Figura 31 Autocorrelação nitrogênio jusante.

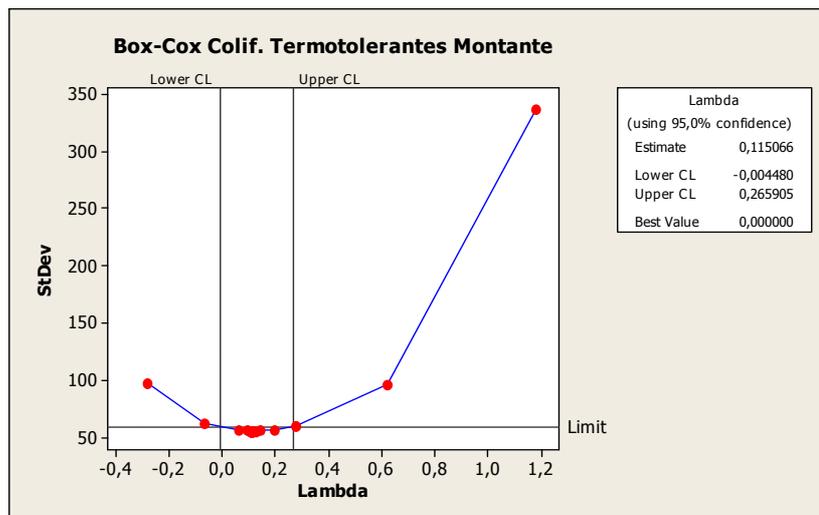


Figura 32 Transformação colif. termot. Montante.

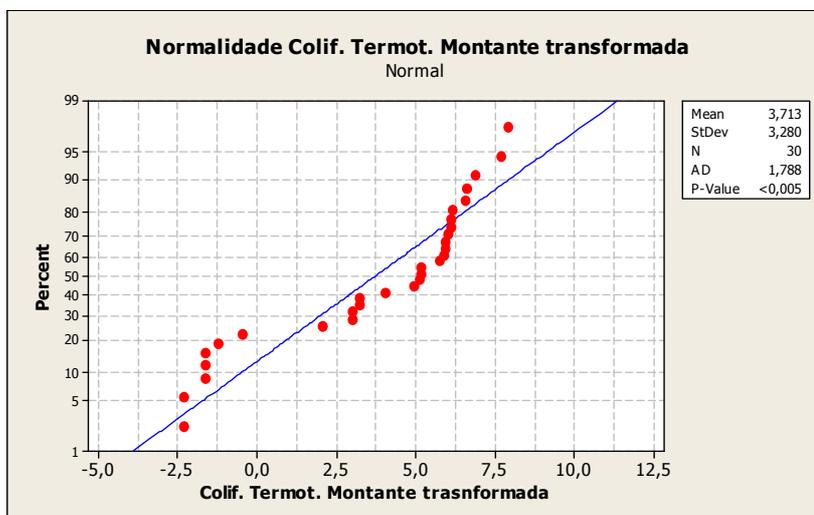


Figura 33 Teste de normalidade Anderson-Darling colif. termot. montante transformada.

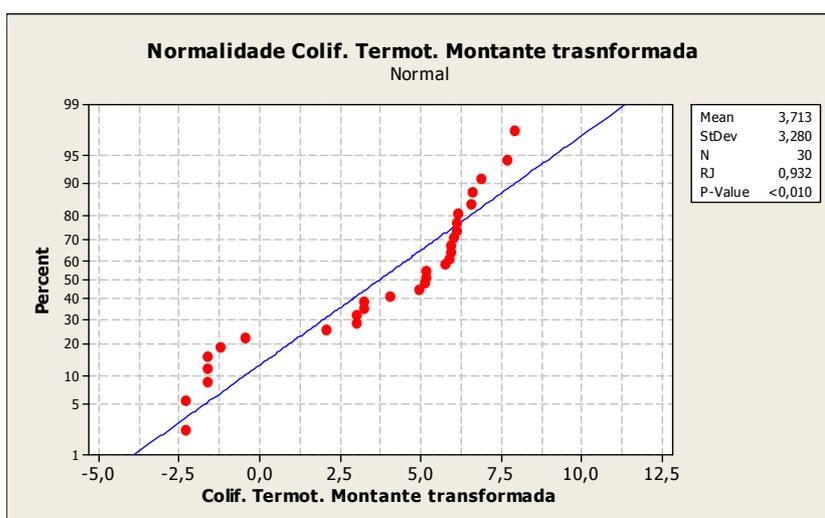


Figura 34 Teste de normalidade Ryan-Joiner colif. termot. montante transformada.

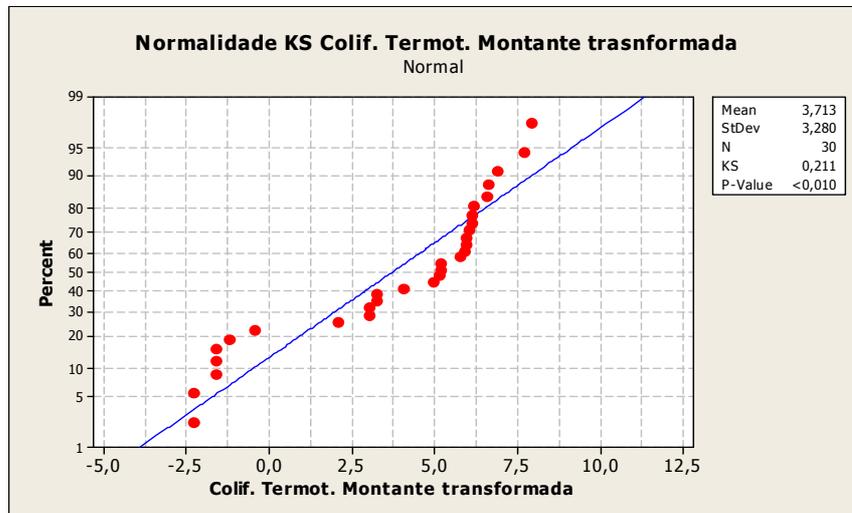


Figura 35 Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov colif. termot. montante transformada.

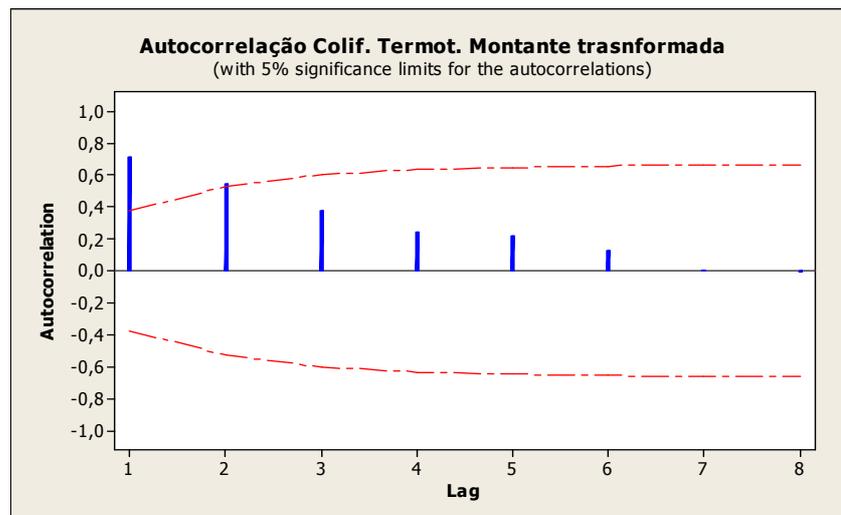


Figura 36 Autocorrelação colif. termot. montante transformada.

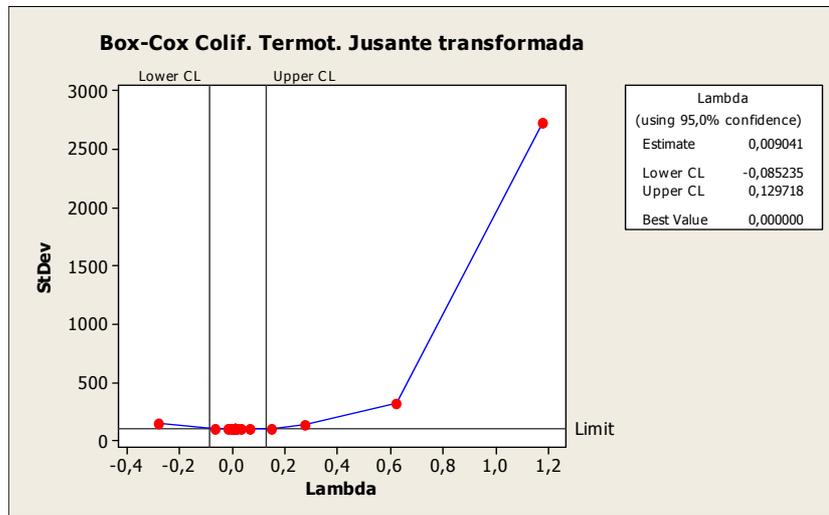


Figura 37 Transformação colif. termot. Jusante.

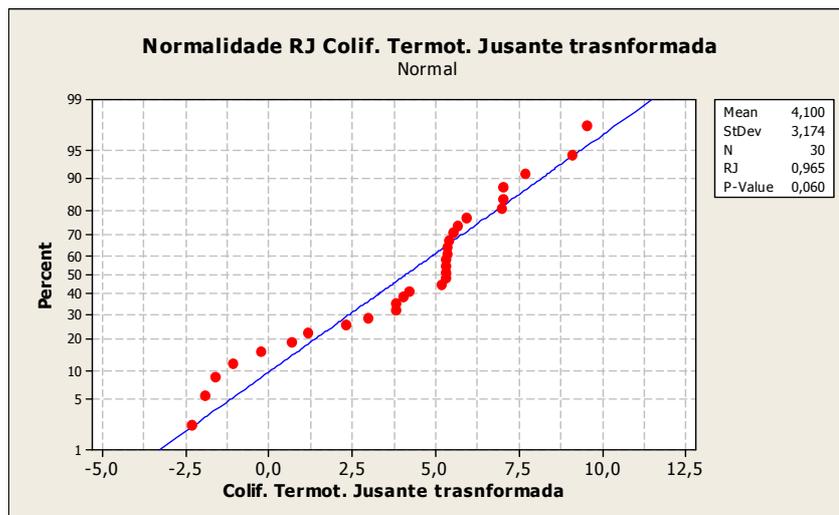


Figura 38 Teste de normalidade Ryan-Joiner colif. termot. jusante transformada.

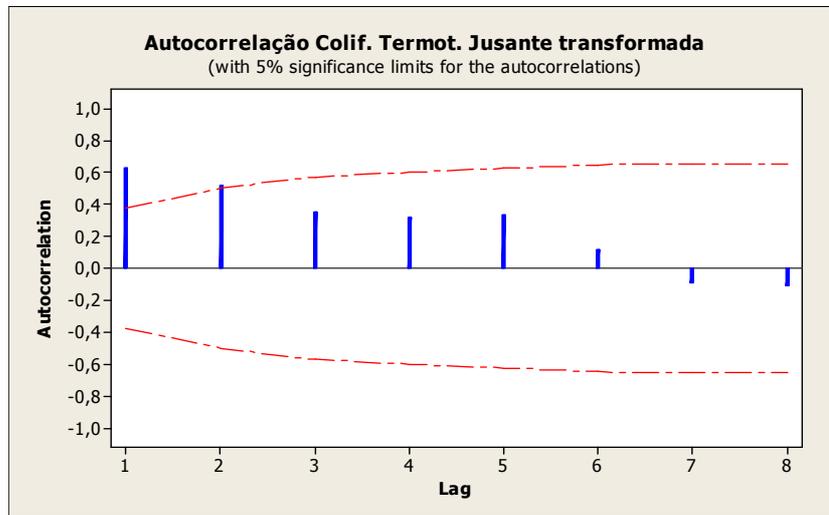


Figura 39 Autocorrelação colif. termot. jusante transformada.

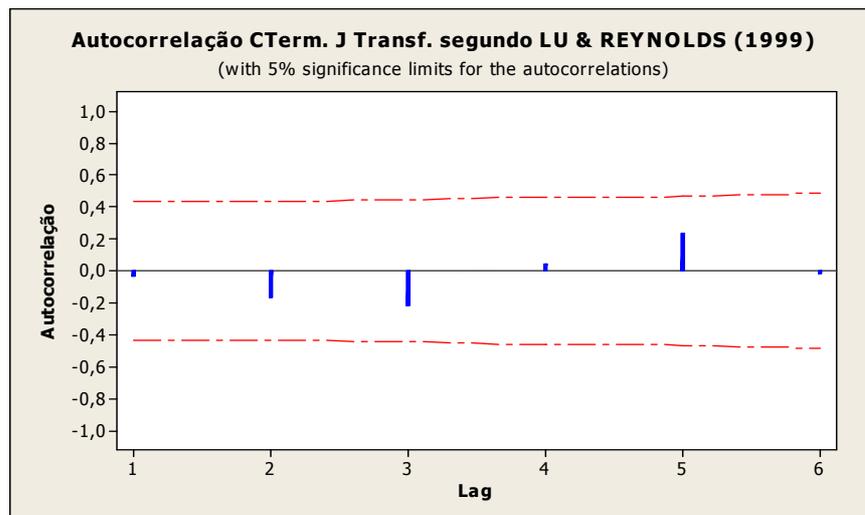


Figura 40 Autocorrelação coli. term. jusante Transf. segundo LU & REYNOLDS (1999).

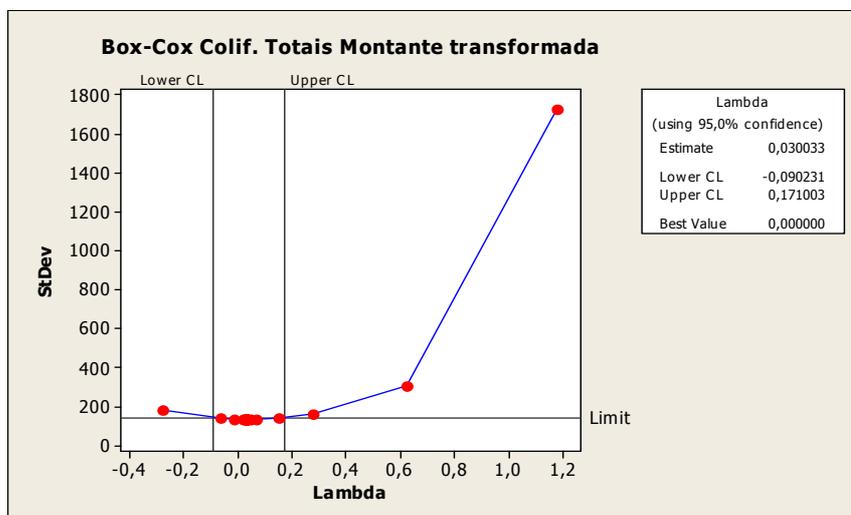


Figura 41 Transformação colif. totais montante.

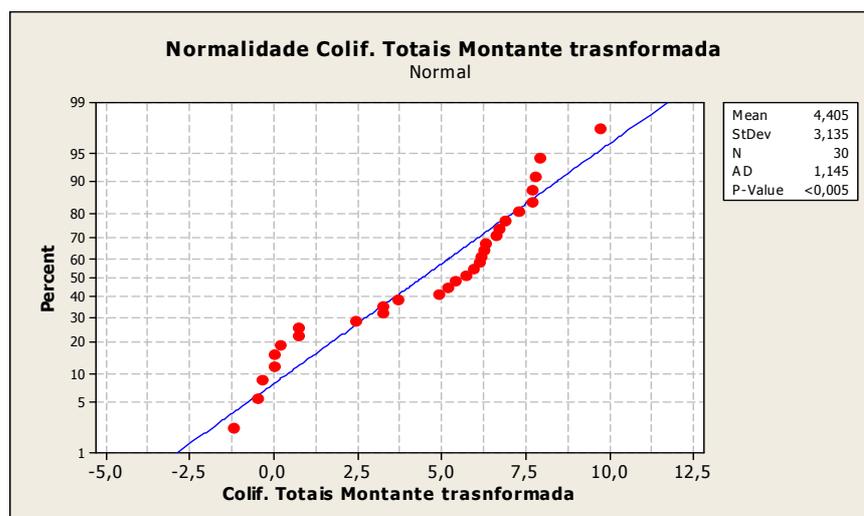


Figura 42 Teste de normalidade Anderson-Darling colif. totais montante transformada.

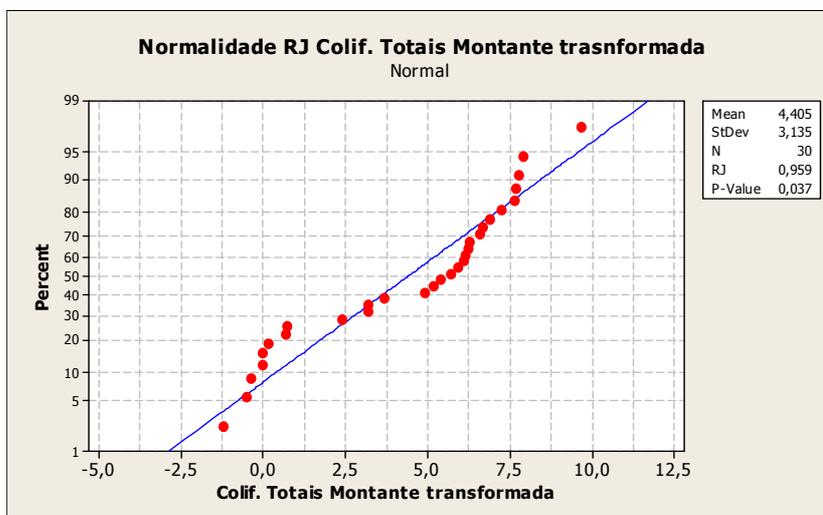


Figura 43 Teste de normalidade Ryan-Joiner colif. totais montante transformada.

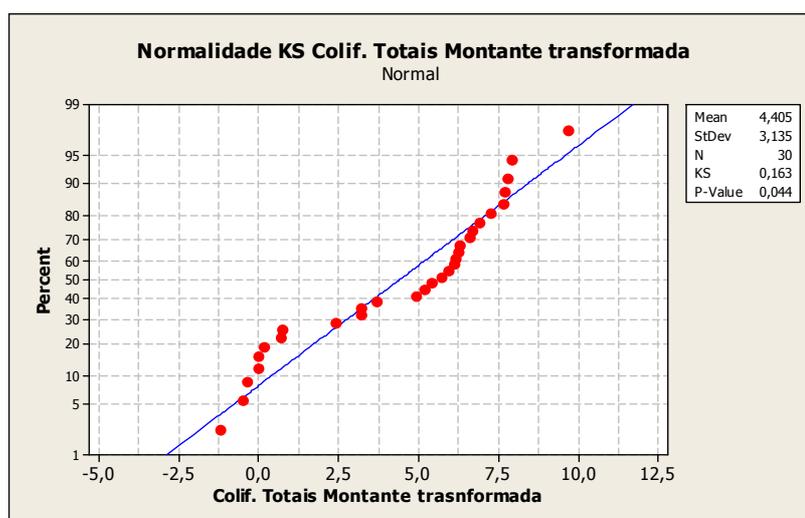


Figura 44 Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov colif. totais montante transformada.

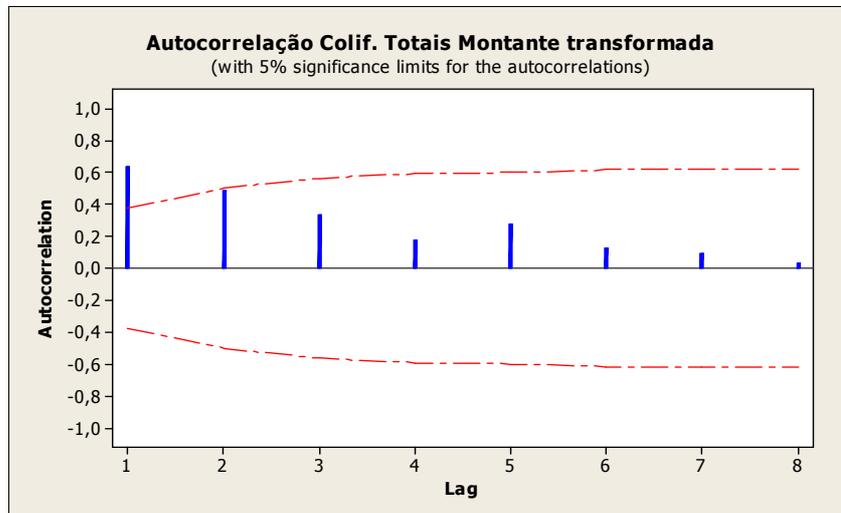


Figura 45 Autocorrelação colif. totais montante transformada.

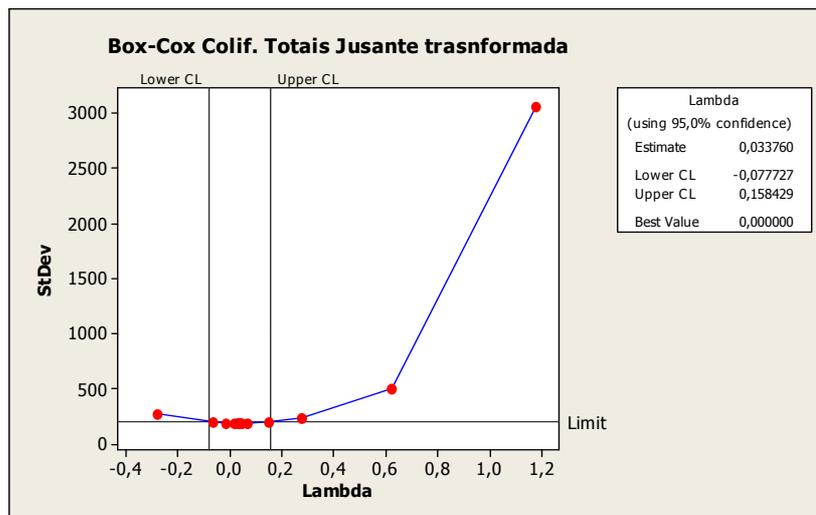


Figura 46 Transformação colif. totais jusante transformada.

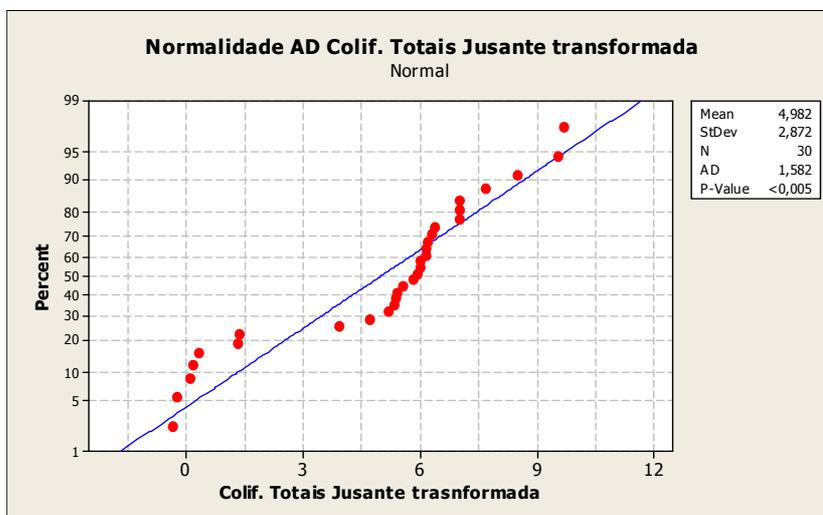


Figura 47 Teste de normalidade Anderson-Darling colif. totais jusante transformada.

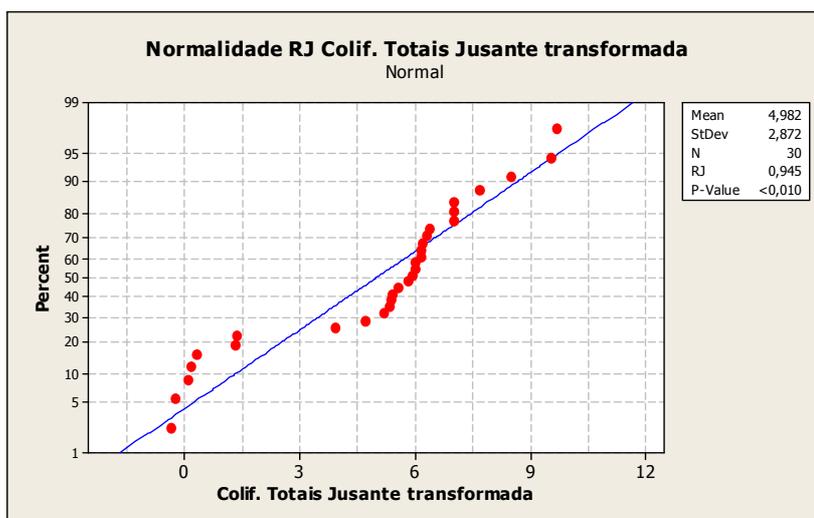


Figura 48 Teste de normalidade Ryan-Joiner colif. totais jusante transformada.

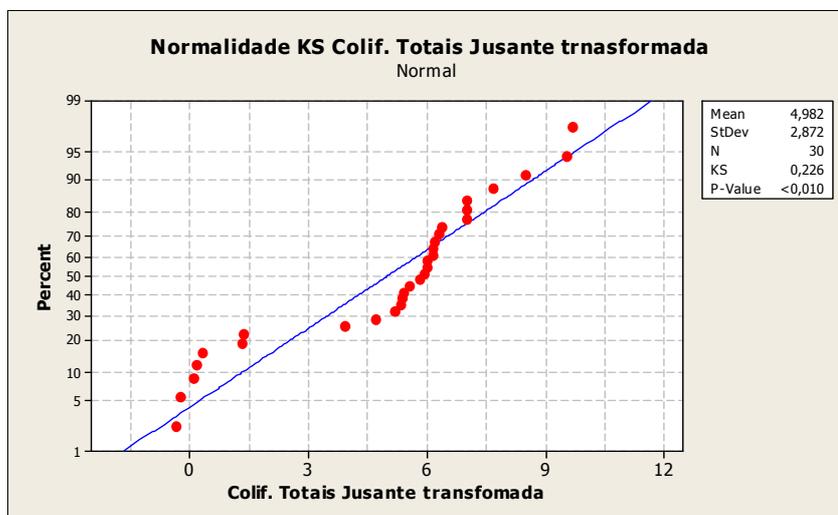


Figura 49 Teste de normalidade Kolmogorov–Smirnov colif. totais jusante transformada.

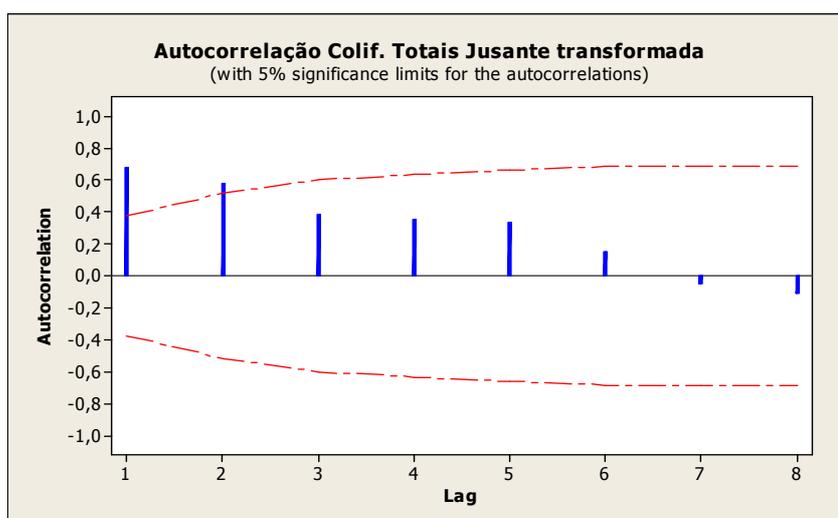


Figura 50 Autocorrelação colif. totais jusante transformada.

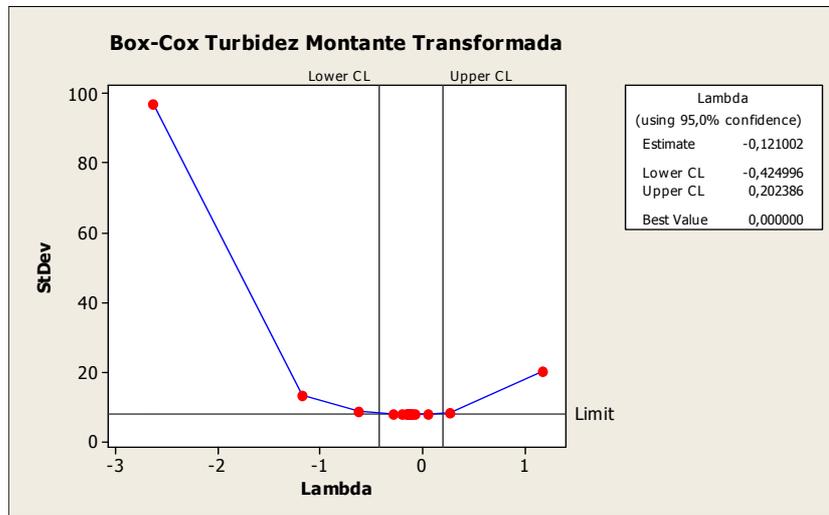


Figura 51 Transformação turbidez montante.

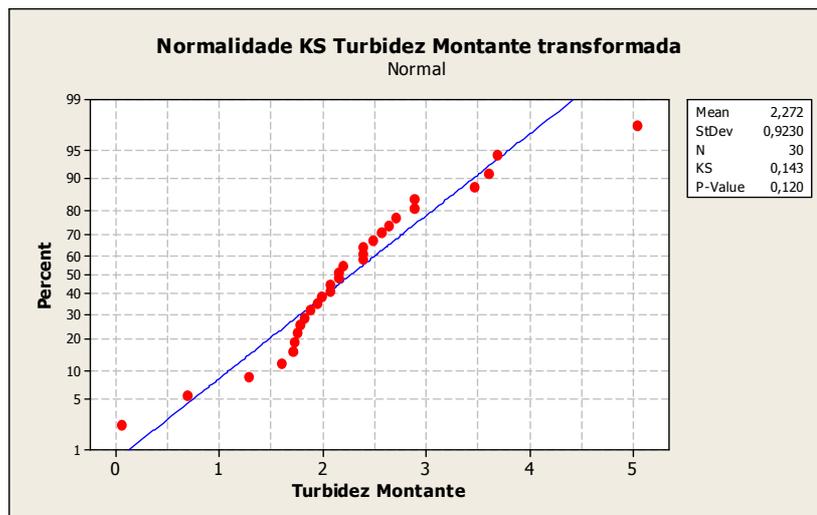


Figura 52 Teste de normalidade Kolmogorov–Smirnov turbidez montante transformada.

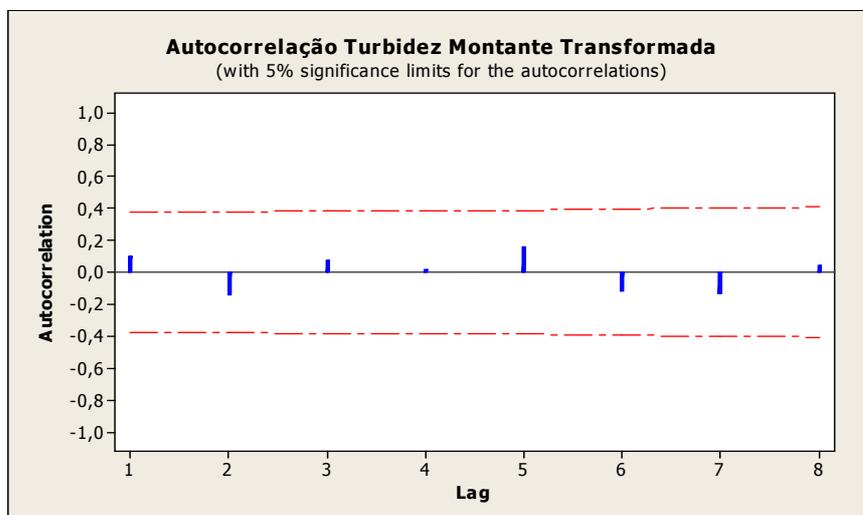


Figura 53 Autocorrelação turbidez montante transformada.

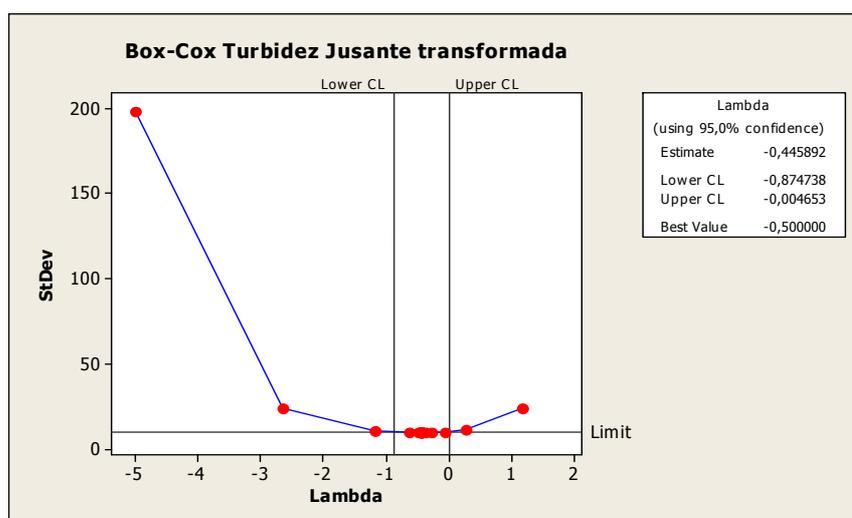


Figura 54 Transformação turbidez jusante.

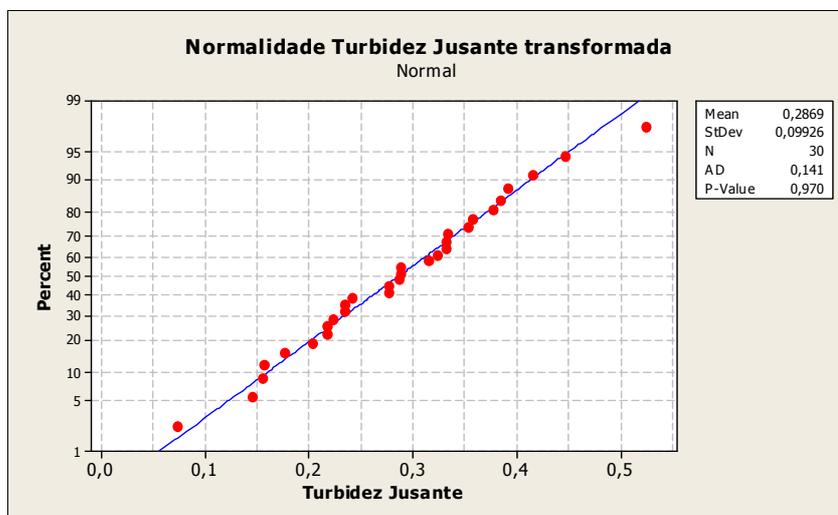


Figura 55 Teste de normalidade Anderson-Darling turbidez jusante transformada.

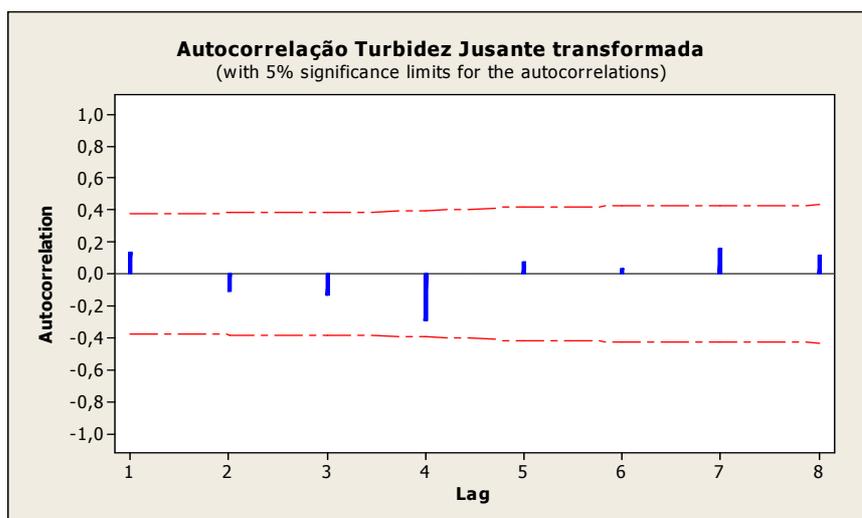


Figura 56 Autocorrelação turbidez jusante transformada.

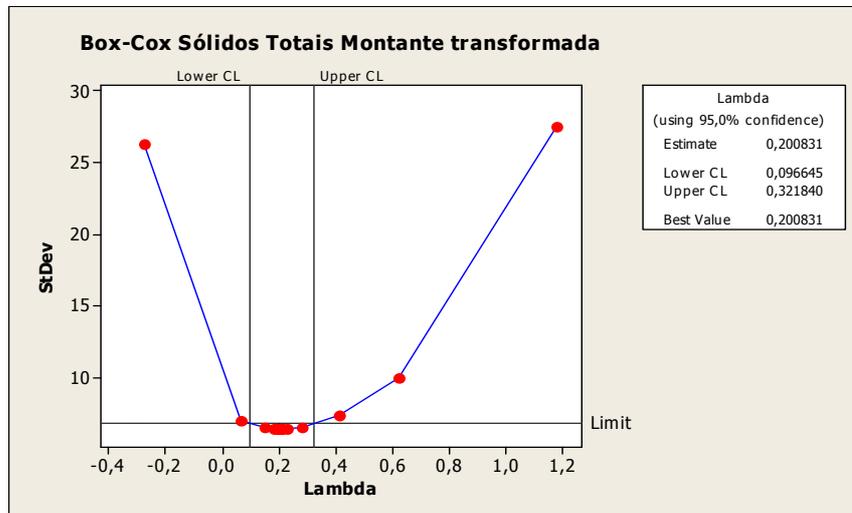


Figura 57 Transformação sólidos totais montante.

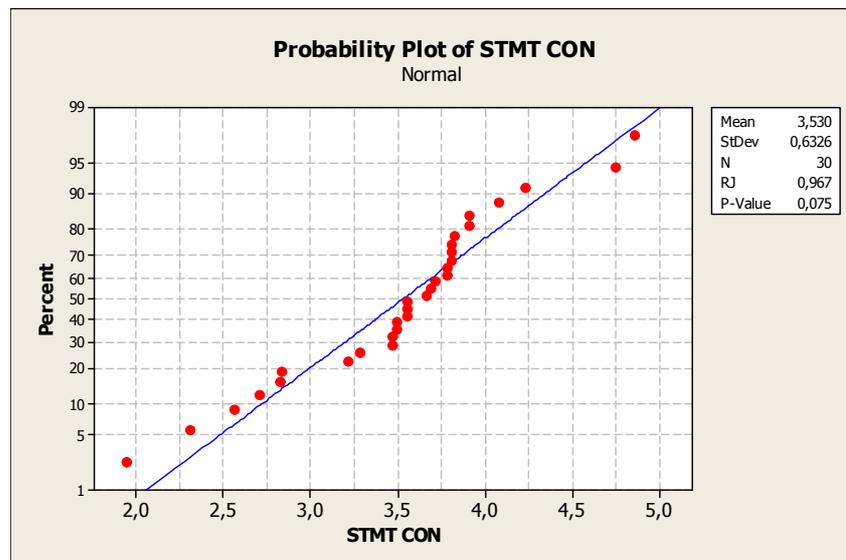


Figura 58 Teste de normalidade Ryan-Joiner sólidos totais montante transformada.

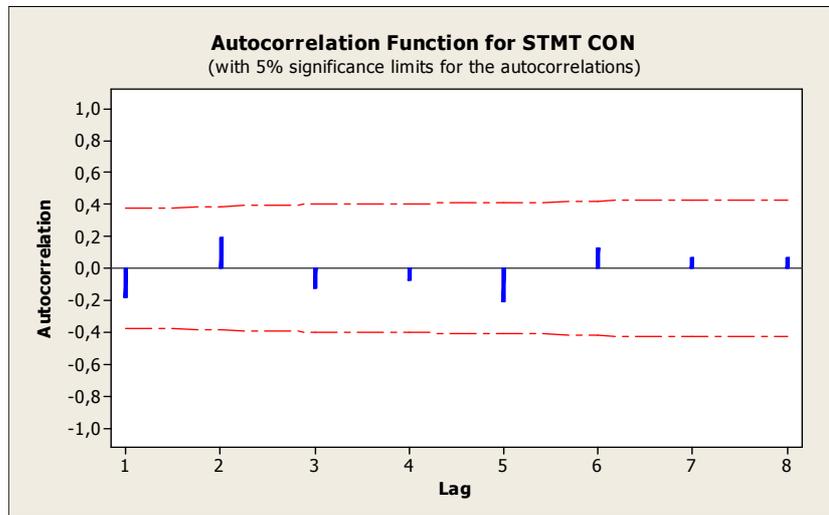


Figura 59 Autocorrelação sólidos totais montante transformada.

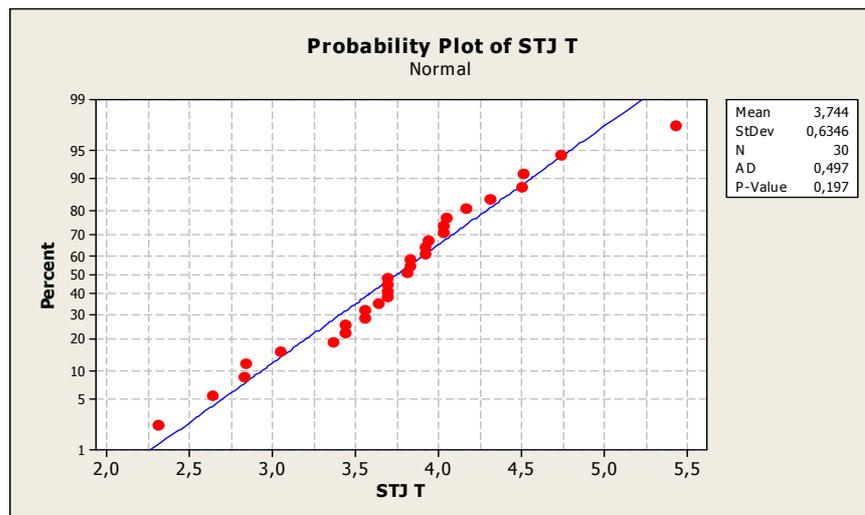


Figura 60 Teste de normalidade Anderson-Darling sólidos totais jusante transformada.

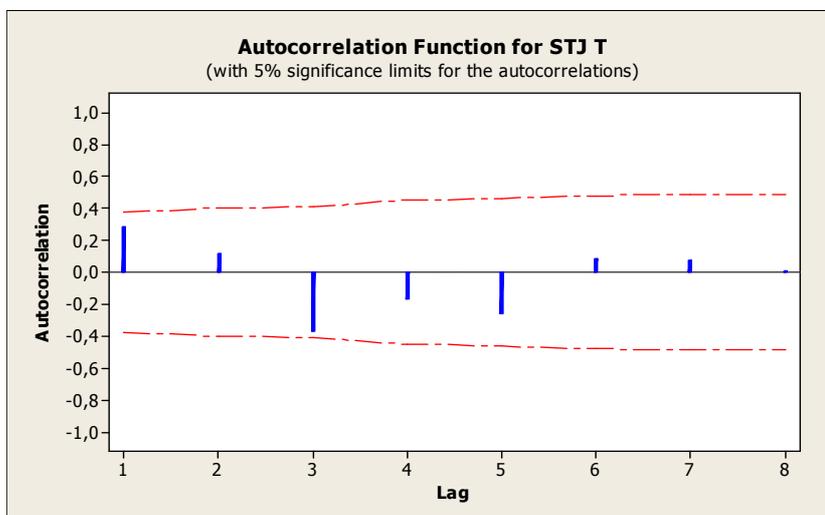


Figura 61 Autocorrelação sólidos totais jusante transformada.

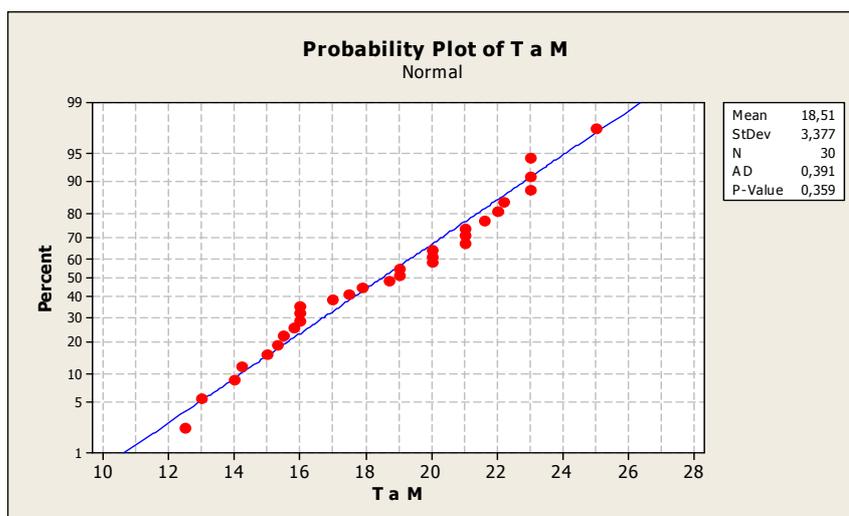


Figura 62 Teste de normalidade Anderson-Darling temperatura da água montante.

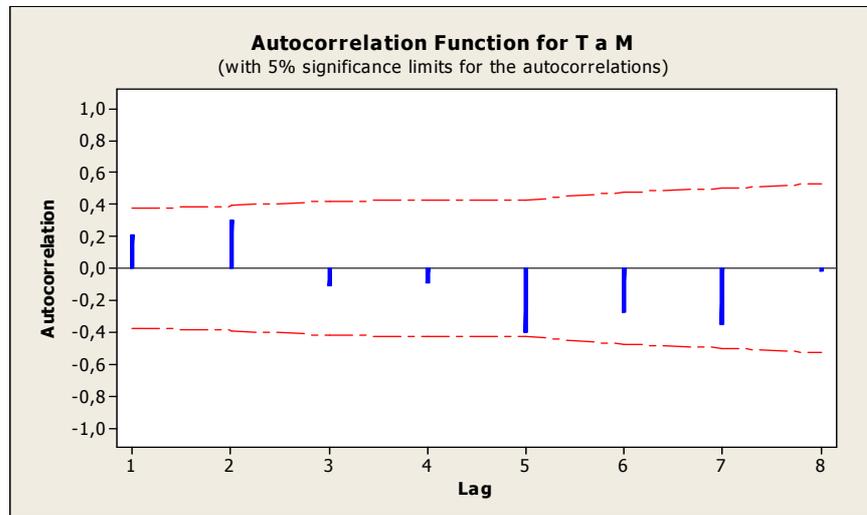


Figura 63 Autocorrelação temperatura da água montante.

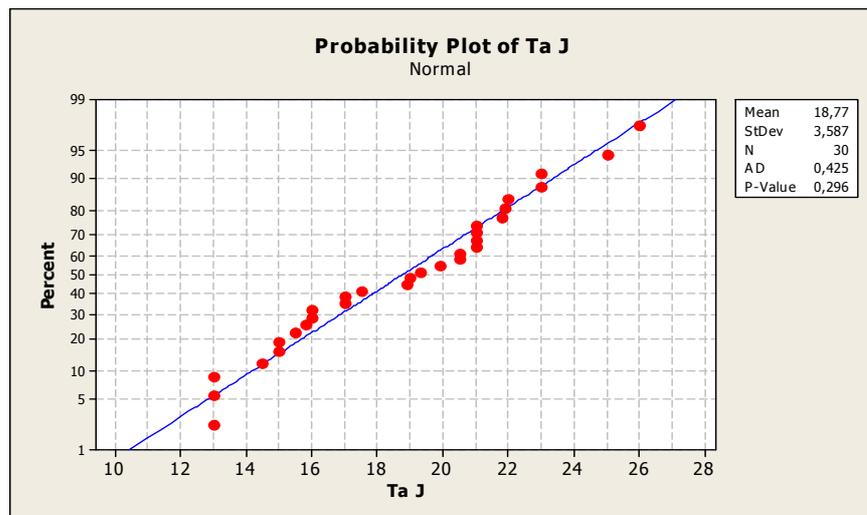


Figura 64 Teste de normalidade Anderson-Darling temperatura da água jusante.

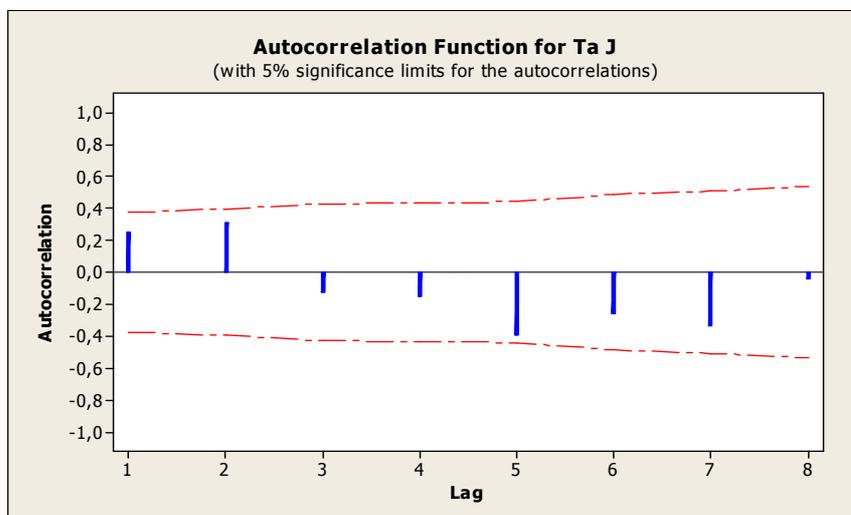


Figura 65 Autocorrelação temperatura da água jusante.