

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA-PPGEQ

TESE DE DOUTORADO

Otimização do tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada utilizando filtração direta e dupla filtração

Bruno Castro Barbalho

Orientador: Prof. Dr. André Luís Lopes Moriyama

Natal/RN

Março/2020

Bruno Castro Barbalho

Otimização do tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada utilizando filtração direta e dupla filtração

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Dr. André Luís Lopes Moriyama.

Natal/RN

Março/2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Barbalho, Bruno Castro.

Otimização do tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada utilizando filtração direta e dupla filtração / Bruno Castro Barbalho. - 2020.

115f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal, 2020.

Orientador: Dr. André Luís Lopes Moriyama.

1. Tratamento de água - Tese. 2. Dupla filtração - Tese. 3. Filtração - Tese. 4. Delineamento splitplot - Tese. 5. Delineamento splisplitplot - Tese. I. Moriyama, André Luís Lopes. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.16

BARBALHO, Bruno Castro - Otimização do tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada utilizando filtração direta e dupla filtração. Tese de Doutorado. UFRN, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Área concentração: Engenharia Química. Linha de pesquisa: Engenharia Ambiental. Natal, RN, Brasil, 2020.

Orientador: Prof. Dr. André Luis Lopes Moriyama

RESUMO: Estudos e pesquisas realizados no Rio Grande do Norte evidenciam tendência crescente e contínua de eutrofização dos mananciais superficiais por resíduos oriundos das atividades antrópicas acarretando diversos riscos para a saúde humana. Para tal situação, é essencial que estudos sejam realizados à escolha de uma configuração de tecnologias de tratamento de água capaz de garantir a qualidade da água oferecida à população local. Com isso, é importante obter condições mais estáveis, as quais não sofram grandes variações durante o processo de tratamento, com a capacidade de abranger as mudanças na qualidade da água do manancial. Desse modo, o presente trabalho avaliou, em escala piloto, as técnicas de tratamento de dupla filtração e filtração direta, com pré-oxidação e coagulação para o tratamento de água de reservatório com elevada densidade de cianobactérias, baixa turgidez e cor elevada buscando obter a condição mais robusta, ou seja, a mais estável no processo. Os fatores de controle estudados foram a taxa de filtração e as granulometrias dos filtros decedentes e ascendentes tendo o tempo de filtração sido considerado o fator de ruído do processo. Para a realização e análise dos experimentos foram utilizados dois planejamentos experimentais, sendo um delineamento split-plot para a filtração direta e um delineamento split-spli-plot para a dupla filtração. Como resposta ao tratamento foram avaliados os parâmetros de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, pH, temperatura, absorvância em 254 nm, matéria orgânica natural e vazão dos filtros. Para ambas as configurações estudadas não foram obtidas valores de turbidez em conformidade com o anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 de 2017, enquanto o pH apresentou valor levemente alcalino sem sofrer, estatisticamente, influência dos fatores de controle estudados e a temperatura é influenciada pelas condições climáticas durante os ensaios. Para a filtração direta a condição mais robusta ao longo da carreira de filtração corresponde a taxa de 280 m³/m².dia, com o filtro FDA 3 sendo o mais indicado por proporcionar maiores carreiras de filtração. Enquanto para a dupla filtração a condição mais robusta ao longo da carreira de filtração corresponde a taxa de filtração de 340 m³/m².dia com o filtro FAP 3, sendo o filtro FDA 2 o mais indicado por apresentar resultados em conformidade com a legislação. Portanto, o delineamento

split-plot consistiu em uma ferramenta importante para obtenção das condições dos fatores de controle mais estáveis ao longo do tempo de filtração.


Palavras-chave: tratamento de água, dupla filtração, filtração direta, delineamento splitplot, delineamento splisplitplot e experimentos robustos.

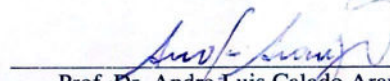
Bruno Castro Barbalho

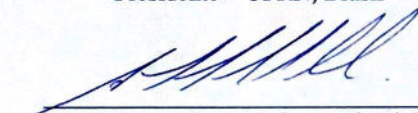
Otimização do tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada utilizando filtração direta e dupla filtração.

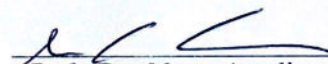
Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

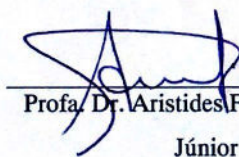
Aprovado em 02/ Março /2020


Prof. Dr. Andre Luis Lopes Moriyama
Presidente – UFRN, Brasil


Prof. Dr. André Luis Calado Araujo
Membro Externo –IFRN, Brasil


Prof. Dr. Andre Luis Santos de Pinho
Membro externo – UFRN, Brasil


Profa. Dra. Magna Angelica dos Santos
Bezerra Sousa
Membro Externo - UFRN, Brasil


Profa. Dr. Aristides Felipe Santiago
Júnior
Membro Externo – IFRN, Brasil

ABSTRACT

Studies and research carried out in Rio Grande do Norte show an increasing and continuous increase in the eutrophication of surface water sources by residues from anthropic activities that entail several risks to human health. For such a situation, it is essential that the studies be carried out in the choice of a configuration of water treatment technologies capable of guaranteeing the quality of the water offered to the local population. With this, it is important to obtain more conditions, such as those that are not major changes during the treatment process, with an ability to cover changes in the water quality of management. In this way, the present work is reproduced, on a pilot scale, as treatment techniques for double filtration and direct filtration, with pre-oxidation and coagulation for the treatment of reservoir water with a high density of cyanobacteria, low turbulence and color seeking to obtain the most robust, that is, more stable in the process. The control factors studied were the filtration rate and particle size of the descending and rising filters that had the filtering time considered as a noise factor in the process. In order to carry out and analyze the experiments, two experimental plans were used, being a split plot design for direct filtering and a split plot design for double filtration. In response to the treatment, the parameters of turbidity, apparent color, true color, pH, temperature, absorbance at 254 nm, natural organic matter and filter leakage were applied. For configurations such as studied configurations there were no turbidity values in accordance with Annex XX of Consolidation Ordinance No. 5 of 2017, while the pH showed the alkaline level value without being statistically influenced by the studied control factors and the temperature is influenced by climatic conditions during the tests. For direct filtration, the most robust and longest condition of the filtration row corresponds to a rate of 280 m³ / m².day, with the FDA 3 filter being the most indicated for longer filtration rows. While for double filtration, the most robust condition along the filtration row corresponds to a filtration index of 340 m³ / m².day with the FAP filter 3, with the FDA filter 2 or more being the FDA filter 2 or more indicated by test results in accordance with legislation. Therefore, the subdivided plot design is an important tool for determining the conditions of the most stable control factors over the filtering time.

Keywords: Water treatment, double filtration, direct filtration, split-plot design, split-split-plot design and robust experiments.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Edvaldo Barbalho Silva e Célia Gomes de Castro Silva e a minha irmã Bianka Castro Barbalho, por estar sempre presente, transmitindo força e coragem em toda a minha vida. À minha esposa Odênia Alves, pela paciência, carinho e companheirismo em todos os momentos, que sempre me pôs pra cima, com seu amor inquestionável, olhar de admiração e palavras de incentivo. E às minhas filhas Ísis e Iana, que me dão muito carinho. A vocês, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao escrever esta página, pensei no sentimento de gratidão que tenho por tantas pessoas que me ajudaram, que nada do que eu escreva aqui, será suficiente para expressar o que tenho em meu coração.

Todavia, quero primeiramente agradecer a Deus pelo dom da vida, saúde e por ter nele toda a minha fonte de inspiração.

Ao Professor André Moriyama por me receber com apoio e compreensão, me orientando na realização do trabalho. Como, também, ao Professor André Calado, por me receber no seu projeto pesquisa me dando esperança e força para continuar e não desistir, com dedicação, compreensão, paciência e conversas nos momentos difíceis. E ao Professor André Pinho que com tantos afazeres dispôs do seu tempo e paciência, passando-me os seus conhecimentos e experiências.

À minha família, meus pais Edvaldo e Célia, pelo amor, carinho, atenção, educação, ensinamentos, paciência e confiança depositada em mim. À minha irmã Bianka pelo convívio harmonioso, pela amizade e respeito mútuo.

À Odênia Alves, que sempre está do meu lado com paciência, me passando confiança, carinho, estando presente em todos os momentos me dando esperança e força para não desistir e acima de tudo amor.

Aos colegas de pesquisa professor Marco Calazans, Gustavo, Julyenne, Thiago, Jordânia, Luciana, Raissa, Ygo, Lana e Abraão, pela recepção e apoio na pesquisa no campo e no laboratório.

Aos colegas de trabalho, Cristina, Dayana, Fabiola, Fernando, Jonas, Renato, Sativa e Thaís pelo incentivo, apoio, compreensão e paciência me ajudando a finalizar este trabalho.

Por fim agradeço a todos que de alguma forma contribuiu para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1.1 Introdução	17
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivo específico.....	19
2. Revisão Bibliográfica.....	21
2.1 Tecnologia de tratamento de água.....	21
2.2 Coagulação	22
2.3 Oxidação com uso do Cloro	26
2.4 Filtração.....	27
2.5 Dupla filtração.....	30
2.6 Delineamento split-plot.....	34
3. Metodologia	41
3.1 Descrição das amostras e análise físico-química	42
3.2 Instalação piloto de tratamento de água por dupla filtração - IPDF.....	43
3.2.1 Filtro Ascendente de Pedregulho	46
3.2.2 Filtro rápido descendente de areia.....	48
3.3 Medida das perdas de cargas nos filtros FAP E FRDA	50
3.4. Ensaio na IPDF	50
3.4.1 Filtração Direta.....	51
3.4.2 Dupla Filtração.....	53
3.5. Análise estatística dos dados	57
4. Resultados e discussões.....	59
4.1. Características da água bruta.....	59
4.2. Avaliação da Robustez das variáveis de controle	60
4.2.1 Filtração direta	60
4.2.2 Dupla filtração.....	77
5. CONCLUSÃO GERAL	99
Referências Bibliográficas.	102
APÊNDICE 1 - Script aplicado aos dados obtidos na filtração direta.....	107
APÊNDICE 2 - Script aplicado aos dados obtidos na dupla filtração	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Esquema do mecanismo de neutralização de carga na coagulação (LEE <i>et al</i> , 2014).....	24
Figura 2.2 - Esquema do mecanismo de formação de pontes na coagulação. (a) Adsorção de polímeros e formação de laços e caudas disponível para ligação, (b) Pontes entra polímeros e partícula (agregação), (c) Desestabilização das partículas coloidais (quebra do agregado) (LEE <i>et al</i> , 2014).....	25
Figura 2.3 - Esquema do mecanismo de interação de carga na coagulação. (a) partícula negativamente carregada, (b) coagulante catiônico, (c) a seta mostra a atração de cargas (LEE <i>et al</i> , 2014).....	26
Figura 2.4 - Esquema de uma instalação de dupla filtração (Di Bernardo e Dantas, 2005).....	32
Figura 2.5 - Esquema de um delineamento split-plot aplicado na agricultura (o fator A é um Whole plot com dois níveis e o fator B é um subplot com dois níveis.....	36
Figura 3.1 - Vista da Lagoa de Extremoz. Em vermelho está destacada a localização da ETA Extremoz (Imagem obtida pelo autor usando o Google Maps).....	41
Figura 3.2 - Vista da Estação de Tratamento de Água – ETA Extremoz, destacada pela linha pontilhada branca. (Imagem obtida pelo autor usando o Google Maps).....	42
Figura 3.3 - Fluxograma da ETA de Extremoz/RN.....	42
Figura 3.4 - Vista Geral da IPDF em Extremoz/RN.....	43
Figura 3.5 - Perfil longitudinal das unidades de tratamento da IPDF.....	44
Figura 3.6 - Fluxograma Hidráulico da IPDF – Instalação piloto de dupla filtração.....	45
Figura 3.7 - Vista do Filtro ascendente de pedregulho (FAP).....	47
Figura 3.8 - Vista do Filtro rápido descendente de areia.....	48

Figura 3.9 - Desenho esquemático dos filtros: (a) Filtro descendente de areia; (b) Filtro ascendente de pedregulho (Duarte, 2018).....	50
Figura 3.10 - Fluxograma do IPDF na configuração utilizada para o processo de filtração direta.....	52
Figura 3.11- Fluxograma do IPDF na configuração utilizada para o processo de dupla filtração.....	55
Figura 4.1 - Gráfico da interação de segunda ordem entre a taxa de filtração e o tempo de filtração.....	61
Figura 4.2 - Gráficos de resíduos para a variável resposta turbidez. (a) Gráfico de resíduos em função dos valores ajustados; (b) Gráfico de probabilidade normal; (c) Gráfico de resíduos padronizados em função dos valores ajustados; e (d) Gráfico de resíduos padronizados em função dos níveis dos fatores.....	62
Figura 4.3 - Gráficos que relacionam (a) os níveis das taxas de filtração com o valor médio da cor aparente; e (b) os níveis do tempo de filtração com o valor médio da cor aparente.....	64
Figura 4.4 - Gráficos que relacionam os níveis das taxas de filtração com o valor médio da cor verdadeira.....	65
Figura 4.5 - (a) Gráfico da relação entre as médias da absorbância (ABS) em função do tempo de filtração; (b) Gráfico da relação entre as médias da absorbância (ABS) em função da taxa de filtração.....	67
Figura 4.6 - Gráfico que relaciona as médias da matéria orgânica natural com o tempo de filtração.....	69
Figura 4.7 - (a) Gráfico da média da temperatura em função do tipo de filtro; (b) gráfico da interação entre tempo de filtração e taxa de filtração para a temperatura.....	70
Figura 4.8 - Gráficos de resíduos para a variável resposta temperatura. (a) Gráfico de resíduos em função dos valores ajustados; (b) Gráfico de probabilidade normal; (c) Gráfico de resíduos padronizados em função dos valores ajustados; e (d) Gráfico de resíduos padronizados em função dos níveis dos fatores.....	71

Figura 4.9 - Gráfico da interação entre tempo de filtração e taxa de filtração para o pH.....	73
Figura 4.10 - Gráficos de resíduos para a variável resposta pH. (a) Gráfico de resíduos em função dos valores ajustados; (b) Gráfico de probabilidade normal; (c) Gráfico de resíduos padronizados em função dos valores ajustados; e (d) Gráfico de resíduos padronizados em função dos níveis dos fatores.....	74
Figura 4.11 - (a) Gráfico da interação entre o tempo de filtração e a taxa de filtração para a vazão, (b) Gráfico de interação entre o tempo de filtração e os tipos de filtro para a vazão.....	75
Figura 4.12 - Gráficos de resíduos para a variável resposta da vazão. (a) Gráfico de resíduos em função dos valores ajustados; (b) Gráfico de probabilidade normal; (c) Gráfico de resíduos padronizados em função dos valores ajustados; e (d) Gráfico de resíduos padronizados em função dos níveis dos fatores.....	76
Figura 4.13 - (a) Gráfico do valor médio da turbidez em função da granulometria dos filtros; (b)Gráfico do valor médio da turbidez em função da granulometria dos filtros.....	79
Figura 4.14 - Gráficos de resíduos para a variável resposta cor aparente. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.....	80
Figura 4.15 - Gráfico da media dos resultados da cor aparente (a) em função da granulometria do filtro descendente de areia e (b) em função da interação entre taxa e tempo de filtração.....	81
Figura 4.16 - Gráficos de resíduos para a variável resposta cor aparente. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.....	82
Figura 4.17 - Gráfico da media dos resultados da cor verdadeira em função da interação entre taxa de filtração e FDA.....	84
Figura 4.18 - Gráficos de resíduos para a variável resposta cor verdadeira. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.....	85

Figura 4.19 - Gráfico da media da absorbância em função da interação entre taxa de filtração e tempo de filtração.....	87
Figura 4.20 - Gráficos de resíduos para a variável resposta absorbância. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.....	87
Figura 4.21 - Gráfico da media dos valores da MON(a) em função do tempo de filtração e (b) em função da interação entre taxa de filtração e granulometria dos FDA.....	89
Figura 4.22 - Gráficos de resíduos para a variável resposta MON (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.....	89
Figura 4.23 - Gráfico da média dos valores da temperatura (a) em função da granulometria dos filtros FDA e (b) em função da interação entre taxa e tempo de filtração.....	92
Figura 4.24 - Gráficos de resíduos para a variável resposta temperatura. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.....	93
Figura 4.25 - Gráfico da média da vazão em função da interação entre a taxa de filtração e a granulometria dos filtros rápidos descendentes de areia.....	95
Figura 4.26 - Gráficos de resíduos para a variável resposta vazão. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.....	96

LISTA DE TABELAS E QUADRO

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens de tecnologias de tratamento de água.....	22
Tabela 2.2 - Características dos filtros lentos e rápidos.....	28
Tabela 3.1 - Matérias e dimensões da IPDF.....	46
Tabela 3.2 - Características físicas das camadas filtrantes e suporte dos filtros FAP.....	47
Tabela 3.3 - Características da camada suporte dos FRDA.....	48
Tabela 3.4 - Características das camadas filtrante dos FDA.....	49
Tabela 3.5 - Valores das taxas de filtração dos FAP e FDA, tempos de contato na pré-oxidação e tempo de mistura rápida.....	51
Tabela 3.6 - Planejamento experimental para os ensaios na IPDF na configuração de filtração direta.....	53
Tabela 3.7 - Planejamento experimental para os ensaios na IPDF na configuração de dupla filtração.....	56
Tabela 4.1 - Características da água bruta para os ensaios em filtração direta (FD) e dupla filtração (DF).....	59
Tabela 4.2 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Turbidez.....	60
Tabela 4.3 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Cor Aparente.....	63
Tabela 4.4 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Cor Verdadeira.....	65
Tabela 4.5 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para ABS 254.....	66
Tabela 4.6 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a MON.....	68
Tabela 4.7 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Temperatura.....	69

Tabela 4.8 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para o pH.....	72
Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a vazão.....	74
Tabela 4.10 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a turbidez.....	77
Tabela 4.11 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a cor aparente.....	80
Tabela 4.12 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a cor verdadeira.....	83
Tabela 4.13 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a Absorbância.....	86
Tabela 4.14 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a matéria orgânica natural.....	88
Tabela 4.15 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para o pH.....	90
Tabela 4.16 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para o Temperatura.....	91
Tabela 4.17 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a vazão.....	94
Quadro 2.1 - Representação de uma matriz interna e externa de um planejamento robusto (VIVACQUA, 1996).....	38

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAERN	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
CPOX	Câmara de pré-oxidação
CCAP	Câmaras de adsorção com carvão ativado pulverizado
CIOX	Câmara de interoxidação
COT	Carbono Orgânico Total
DF	Dupla Filtração
ETA	Estação de Tratamento de Água
FAP	Filtro ascendente de pedregulho
FCAG	Filtro de adsorção com carvão ativado granulado
FDD	Filtração Direta Descendente
FRDA	Filtro rápido descendente de areia
IPDF	Instalação piloto de dupla filtração
IFRN	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MON	Matéria orgânica natural
NESB	Núcleo de Estudos em Saneamento Básico
OC	Oxigênio Consumido
PAC	cloreto de polialumínio
PPgES	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária
SEMARH	Secretaria de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
THMs	Trihalometanos
UNT	Unidade nefelométrica de turbidez
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O uso inadequado dos recursos hídricos, em decorrência do desenvolvimento industrial e de atividades agrícolas relacionadas ao aumento das lavouras e da produção animal em regime confinado (MERTEN et al., 2002), aliado a fatores relativos à urbanização desordenada e ao crescimento populacional, tem provocado a poluição dos mananciais superficiais (SILVA, G.G. et al., 2012).

Com isso, ocorre o aumento do aporte de carga orgânica com elevada quantidade de nitrogênio e fósforo, ocasionando florações de organismos fitoplanctônicos (microalgas e cianobactérias) e microrganismos patogênicos em rios, lagos e reservatórios destinados ao abastecimento, que apresentam o potencial de produzir toxinas perigosas para os seres humanos (MACHADO, 2011).

Assim, surge a necessidade de buscar novas medidas de proteção a saúde pública. No caso específico dos sistemas de tratamento de águas para consumo humano, a aplicação de processos e tecnologias adequadas para a produção de água que atenda ao padrão de potabilidade (SILVA, G.G. et al., 2012).

Dessa forma, estudos têm sido realizados mostrando que os processos que envolvem o tratamento de água por ciclo completo não são efetivos na eliminação dos efeitos gerados pela presença de cianobactérias e seus subprodutos. De modo que, torna-se imprescindível, o desenvolvimento e domínio de tecnologias alternativas de tratamento, ou combinações destas, adequando às condições técnicas, sociais e econômicas locais (DI BERNARDO, 2005; MACHADO, 2011; SILVA, G.G. et al., 2012.).

Entre as tecnologias de tratamento de água a mais utilizada é a filtração, tendo como variáveis importantes para a eficiência do processo a granulometria dos filtros e a taxa de filtração, de modo que, recomenda-se o processo de filtração direta em fluxo descendente para baixos valores de turbidez, com o processo sendo realizado com ação de profundidade ao longo de todo o meio filtrante. Porém, tal processo possui uma aplicação limitada, abrangendo uma pequena faixa de atuação em relação à qualidade da água do manancial (RICHTER, 2017).

Por outro lado, segundo Di Bernardo (2003), a tecnologia de dupla filtração consiste em uma técnica promissora permitindo o tratamento de água com variações bruscas de qualidade, podendo utilizar taxas de filtração mais elevadas, provocando uma maior remoção de microrganismos, aumentando a segurança em relação à desinfecção final, e pode dispensar o descarte de água pré-filtrada no início da carreira de filtração.

Todavia, a busca pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento de processos de tratamento de água que sejam rentáveis economicamente vem sendo o foco de diversas pesquisas em todo o

mundo. Com isso, o presente trabalho está inserido no contexto do projeto de pesquisa intitulado “Caracterização de resíduos líquidos gerados em instalação piloto de dupla filtração e em ETA de ciclo completo em escala real”, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - processo 467848/2014-9), tendo como instituição executora o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) e como parceiras a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). Nesse projeto foram desenvolvidos estudos concomitantes sobre oxidação e adsorção, filtração direta em linha e caracterização das águas de lavagem e descargas de fundo de filtros da Instalação Piloto de Dupla Filtração e da ETA em escala real.

Uma avaliação inicial sobre essas técnicas foram realizadas de modo separado nas dissertações de mestrado de Lima (2019), para filtração direta e de Duarte (2018), para a dupla filtração. Em ambos os trabalhos foram obtidas as condições ótimas para cada processo. Contudo, os trabalhos não consideraram o tempo de filtração (carreiras de filtração) como um fator que possa influenciar em cada processo. Além disso, nem sempre a condição ótima consiste na condição mais estável, podendo ser sensível a variações no processo, tornando inviável do ponto de vista operacional, enquanto a condição mais estável, ou seja, mais robusta do ponto de vista estatístico e operacional, será menos sensível as variações no processo.

Portanto, o presente trabalho busca avaliar o comportamento da técnica de dupla filtração e da filtração direta, integrada aos processos de coagulação e pré-oxidação, para o tratamento da água proveniente da lagoa de Extremoz-RN, em estação piloto de dupla filtração utilizando o delineamento estatístico split-plot (parcelas subdivididas) de modo a obter as condições mais robustas para cada processo. Tal método estatístico é diferente do que foi utilizado nos trabalhos de Lima (2019) e Duarte (2018), nos quais, ambos os trabalhos, utilizaram um planejamento completamente aleatorizado. A escolha do delineamento split-plot se baseou na forma como os experimentos foram realizados, de modo a poupar tempo e custo ocorrendo a restrição de um dos fatores de controle. Com isso, buscou-se analisar os resultados como experimentos de parcelas subdivididas, uma vez que executar um experimento como parcela subdividida e analisá-lo como se fosse completamente aleatorizado podem levar as conclusões equivocadas sobre os resultados obtidos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa avaliar, em escala piloto, a técnica de tratamento de dupla filtração e filtração direta, com pré-oxidação e coagulação para o tratamento de água de reservatório com elevada densidade de cianobactérias, baixa turgidez e cor elevada.

1.2.2 Objetivo específico

- Verificar a influência da taxa de filtração nas configurações de dupla filtração e filtração direta;
- Verificar a influência da granulometria dos meios filtrantes dos filtros ascendentes e descendentes;
- Verificar a influência do tempo de filtração nas configurações de dupla filtração e filtração direta;
- Avaliar a robustez dos fatores de controle nas configurações de dupla filtração e filtração direta.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tecnologia de tratamento de água

O tratamento de água é um processo que consiste na remoção de contaminantes e impurezas para adequar as características físico-químicas e biológicas das águas naturais para consumo humano, obedecendo os padrões de potabilidade estabelecidos no Brasil pelo anexo XX da Portaria consolidação N°5/2017 (BRASIL, 2011).

As tecnologias de tratamento de água estão divididas em dois grupos, sendo um grupo sem a etapa de coagulação química e o outro grupo com a etapa de coagulação química, proposição comprovada pela NBR 12216/26. Na ausência do processo de coagulação é essencial à utilização de filtração lenta, com ou sem unidade de pré-tratamento em função das características da água bruta, como por exemplo a filtração em múltiplas etapas (pré-filtração dinâmica, filtração grossa em pedregulho e filtração lenta em areia). Na presença do processo de coagulação, pode-se exemplificar o tratamento em ciclo completo (Coagulação, floculação, decantação ou flotação e filtração rápida descendente), filtração direta descendente e ascendente, dupla filtração e floto-filtração (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

Das tecnologias citadas a dupla filtração apresenta diversas vantagens em relação às tecnologias convencionais e filtração direta (DI BERNARDO, 1999, DI BERNARDO, 2003; DUARTE, 2011, CIRNE, 2014). A Tabela 2.1 resume as principais vantagens e desvantagens das tecnologias de tratamento de água do tipo convencional ou ciclo completo, filtração direta e dupla filtração com e sem decantação.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens de tecnologias de tratamento de água.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Convencional ou ciclo completo	Aplicável em ampla faixa de qualidade de água bruta; Flexibilidade; Confiabilidade; Facilidade operacional.	Elevado custo de implantação; Maior consumo de coagulante; Maior produção de lodo.
Filtração direta	Economia de 20% no custo de implantação; 70% de redução no consumo de coagulante; 70% de redução na produção de lodo.	Aplicação limitada; Menor carreira de filtração; Suscetível a mudanças bruscas de qualidade do efluente; Menor flexibilidade; Pequena faixa de dosagem de coagulante.
Dupla filtração	Aplicável em ampla faixa de qualidade de água bruta ⁽¹⁾ ; Flexibilidade ⁽¹⁾⁽²⁾ ; Economia de 20% no custo de implantação ⁽²⁾ ; Maior facilidade operacional em relação a Filtração direta ⁽¹⁾⁽²⁾ ; Menor área requerida ⁽²⁾ ; Pré-filtração remove 50% de sólidos suspensos totais ⁽¹⁾⁽²⁾ ; Menor consumo de coagulante e menor produção de lodo ⁽²⁾ .	Maior perda de carga ao longo da planta ⁽¹⁾⁽²⁾ ; Dificuldade na lavagem dos pré-filtros ⁽¹⁾⁽²⁾ ; Duas baterias de filtros produzem mais resíduos ⁽¹⁾⁽²⁾ ; Processo pouco avaliado em escala real ⁽¹⁾ ; Aplicação limitada ⁽²⁾ ; Suscetível a mudança bruscas na qualidade do efluente ⁽²⁾ ; Menor flexibilidade operacional ⁽²⁾ ; Pouca experiência operacional ⁽²⁾ .

⁽¹⁾ dupla filtração tipo 1: coagulação, floculação, sedimentação curta, pré-filtração e filtração; ⁽²⁾ dupla filtração tipo 2: coagulação, pré-filtração e filtração. FONTE: DUARTE (2011).

Para garantir a saúde pública, são realizadas pesquisas para reformulação de estações de tratamento de água em operação e instalações de novas unidades, além da intensificação das ações de monitoramento da qualidade da água na saída da estação e da rede de distribuição. A avaliação e pesquisa de diferentes arranjos de processos de tratamento de água na remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica, fitoplâncton e cianobactérias e cianotoxinas são essenciais para aumentar a eficiência no tratamento de água acarretando em uma melhora na qualidade da água destinada a abastecimento (CIRNE, 2014).

2.2 Coagulação

A coagulação desempenha um papel importante no processo de tratamento de água, principalmente na preparação da floculação, sedimentação, flotação e filtração (RICHTER, 2017).

O processo de coagulação consiste na alteração físico-química de partículas coloidais, caracterizada pela cor e turbidez, produzindo partículas que possam ser removidas em seguida por

um processo físico de separação (DAVIS, 2010). A coagulação envolve a adição de coagulantes com a finalidade de desestabilizar as suspensões coloidais de partículas sólidas, reduzindo, assim, as forças de repulsão que mantêm separadas as partículas em suspensão (OLLER, I. et al., 2011).

Os coagulantes aplicados podem ser sais de metais inorgânicos, tais como sulfato de alumínio, aluminato de sódio, sulfato de férrico e cloreto férrico. Em alguns casos, estes sais de metais podem ser utilizados no tratamento de águas com a ajuda de um floculante. Contudo, a aplicação de coagulantes inorgânicos foi reduzida devido à presença de metais perigosos a saúde e ao meio ambiente devido resíduo gerado. Isso levou ao uso de polímeros a fim de promover o processo de separação. Uma grande variedade de polímeros tem sido desenvolvida para melhorar o processo de coagulação e floculação no tratamento de águas incluindo polímeros orgânicos sintéticos ou naturais e polímeros modificados (BOLTO E GREGORY, 2007).

Os poliméricos sintéticos tornaram-se conhecidos no tratamento de efluentes industriais, devido à sua inércia natural a alterações de pH, da alta eficiência com baixa dosagem, e a facilidade de manuseio. No entanto, os polímeros sintéticos não são biodegradáveis, sendo nocivos para o meio ambiente (STROHER, 2013).

Comparado com polímeros convencionais, os polímeros naturais são biodegradáveis, razoavelmente estáveis às forças de cisalhamento, e facilmente disponíveis a partir de recursos agrícolas reprodutíveis, como quitosana, moringa oleifera, tanina, alginato de sódio e não produzem poluição secundária. Os polímeros naturais podem desestabilizarem as partículas coloidais pelo aumento da força iônica reduzindo o potencial zeta e, portanto, ocasionando uma diminuição da espessura na camada difusa da dupla camada eléctrica. Como também, podem adsorver, especificamente, contra-íons para neutralizar a carga da partícula devido à grande variedade de grupos funcionais na estrutura da molécula, por exemplo, carboxila e grupos hidroxila, que podem interagir com os contaminantes (LEE et al., 2014).

Entretanto, os polímeros naturais apresentam eficácia moderada, como também provocam o aumento de matéria orgânica na água residual devido à elevada dosagem, possuindo tempo de validade curto. De modo a combinar as melhores propriedades de polímeros sintéticos e naturais, os polímeros modificados ou copolímeros modificados têm sido sintetizados e estudados extensivamente (LEE et al., 2014).

Os polímeros podem variar em massa molecular, estrutura - linear ou ramificada, densidade de carga, tipo de carga e composição. Em geral os polímeros são classificados em quatro formas: catiônicos - carregados positivamente; aniônicos - carregados negativamente; anfotéricos - contém grupos catiônicos e aniônicos; e não iônicos - próximo da neutralidade. A natureza das

cargas é o principal parâmetro que vai ter um efeito significativo na eficiência do processo de floculação seguido de massa molecular e densidade de carga.

Os principais mecanismos de coagulação envolvendo a remoção de contaminantes particulados e dissolvidos, frequentemente citados são neutralização de carga, formação de pontes e interação eletrostática. Esses mecanismos dependem da adsorção do coagulante na superfície da partícula (BOLTO E GREGORY, 2007; DAVIS, 2010; LEE et al., 2014; e RICHTER, 2017).

O mecanismo de neutralização de carga geralmente acontece quando o coagulante e os sítios adsorvidos possuem cargas opostas, como mostra a Figura 1. Como resultado ocorre a redução da carga superficial da partícula - redução do potencial zeta, próximo ao ponto isoelétrico, e com isso a força de repulsão eletrostática diminui entre as partículas colóidais, permitindo o surgimento de forças atrativas de Van Der Waals, estimulando a agregação inicial de colóides e material suspenso finos formando microflocos. Em caso de dosagem elevada do coagulante pode acarretar na reversão da carga superficial e as partículas voltam a se dispersar (BOLTO E GREGORY, 2007; e LEE et al., 2014).

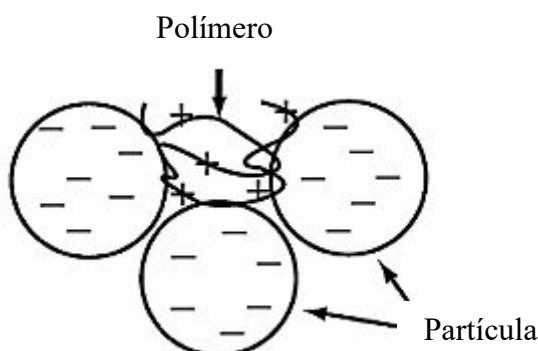


Figura 2.1 - Esquema do mecanismo de neutralização de carga na coagulação (LEE et al., 2014)

O mecanismo de formação de pontes de polímeros ocorre quando polímeros de cadeia longa com alta massa molecular e baixa densidade de carga adsorvem nas partículas de tal maneira que as curvas acentuadas e as caudas que se estendem ou alongam na solução além da dupla camada elétrica (Figura 2.a). Isto possibilita a adesão e interação de segmentos do polímero com outras partículas, e assim criando uma ponte entre as partículas (Figura 2.b). Com isso, polímeros de cadeia longa são mais efetivos que polímeros de cadeia curta. Este mecanismo depende da dosagem do coagulante, onde uma dosagem baixa pode não ocorrer contato suficiente para formar as pontes entre as partículas. E em dosagem elevada pode acarretar um excessivo revestimento da

superfície da partícula com o polímero de tal maneira que os sítios para formar as pontes não ficam acessíveis (Figura 2.c) (BOLTO E GREGORY, 2007; e LEE et al., 2014).

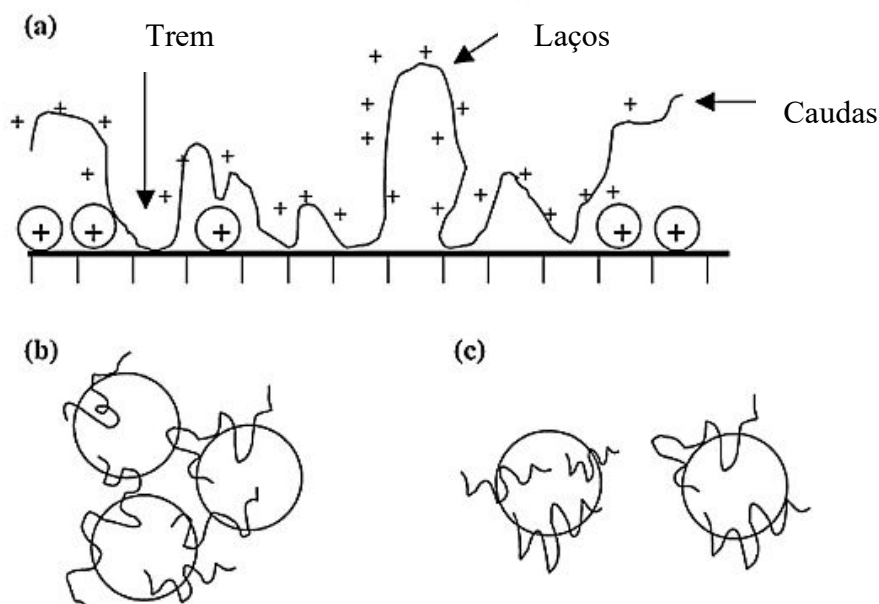


Figura 2.2 - Esquema do mecanismo de formação de pontes na coagulação. (a) Adsorção de polímeros e formação de laços e caudas disponível para ligação, (b) Pontes entre polímeros e partícula (agregação), (c) Desestabilização das partículas coloidais (quebra do agregado). (LEE et al., 2014)

O mecanismo de interação eletrostática, como mostra a Figura 2.3, surge quando polieletrólitos, com elevada densidade de carga com pequena massa molecular, adsorvem em superfície carregada negativamente, com bastantes sítios e baixa densidade de carga, reduzindo a capacidade de formação de pontes e a ligação ocorre por interação eletrostática (LEE et al., 2014).

Os processos de coagulação dependem do pH de coagulação, do tipo de coagulante utilizado, da quantidade aplicada, da alcalinidade presente e do gradiente de velocidade, sendo necessário o conhecimento desses dados para a otimização do processo. A temperatura influi na coagulação por sua ação na constante de equilíbrio da água, fazendo variar a concentração de íons H^+ para um dado pH de coagulação. Na mistura rápida e mistura lenta, a variação da viscosidade com a temperatura faz alterar os gradientes de velocidade aplicados, podendo ser necessário corrigi-la, a fim de manter ou melhorar a eficiência do processo (RICHTER, 2009).

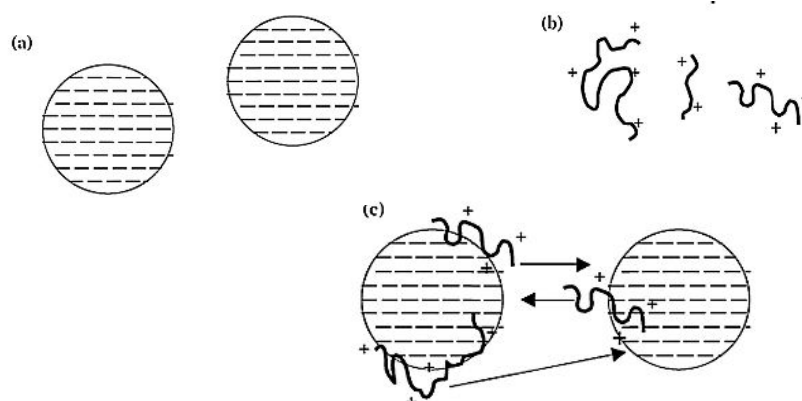


Figura 2.3 - Esquema do mecanismo de interação de carga na coagulação. (a) partícula negativamente carregada, (b) coagulante catiônico, (c) a seta mostra a atração de cargas (LEE et al., 2014).

Conforme Bhatnagar e Sillanpää (2017), para o tratamento de água o processo de coagulação consiste em um método convencional com altos níveis de remoção de matéria orgânica natural e como desvantagem, ocorre a produção de lodo.

2.3 Oxidação com uso do Cloro

O uso do cloro no tratamento de água na etapa de pré-oxidação se caracteriza pela oxidação dos compostos presentes na água tornando-os insolúveis, e na etapa de desinfecção tem a finalidade de eliminar os microrganismos patogênicos.

Os compostos que contem cloro são agentes oxidantes muito fortes. Em pH elevado, a reatividade do cloro com compostos inorgânicos redutores, como sulfitos, sulfetos, íon ferroso e nitrito, são geralmente muito rápidas apresentando papel importante na formação de subprodutos no processo de desinfecção da água. Contudo, as reações do cloro com a matéria orgânica natural, que compreende uma mistura complexa de compostos orgânicos, consiste no principal precursor na formação de subprodutos da desinfecção. Essas reações necessitam de algumas horas para que se completem (MEYER, 1994; HUA and RECKHOW, 2007).

A presença de cloro residual livre junto com as substâncias húmicas, podem formarem subprodutos, como os trihalometanos, que são nocivos à saúde. Os ácidos húmicos e fúlvicos são chamados de precursores dos trihalometanos. As substâncias mais significativas que compõem os THMs e que podem apresentar concentrações significativas na água potável são triclorometanos, bromodiclorometano, dibromoclorometano e tribromometano. Frações hidrofóbidas da matéria

orgânica natural são as principais fontes de formações dos THMs (HUA and RECKHOW, 2007; CHUNMEI LI, et al., 2017).

As variáveis que influenciam na formação de THMs, são: o tempo de contato - quanto maior o tempo de contato entre o cloro e os precursores, maior será a probabilidade de formá-los; temperatura - a elevação da temperatura aumenta a probabilidade dessa formação; pH - a elevação do pH tem ação catalítica sobre o halofórmio; presença de brometo e iodeto - na presença de cloro, estes são oxidados a espécies capazes de participar da reação de substituição orgânica, resultando na formação de THMs; características e concentração dos precursores - quanto maior a concentração de ácidos húmicos e fúlvicos, maior será a probabilidade de formação dos THMs; e concentração de cloro - quanto maior a concentração de cloro maior será a probabilidade de formação de THMs (MEYER, 1994). A redução dos precursores de THMs pode ser obtida com o emprego da coagulação na etapa de clarificação ou com a aplicação de filtros de adsorção em carvão ativado granulado (DUARTE, 2011).

O controle e/ou minimização na formação dos subprodutos na etapa de desinfecção no tratamento de água, consiste na remoção dos seus precursores antes da etapa de desinfecção ser iniciada. Essa opção se mostra mais efetiva do que alterar o processo de desinfecção (BOND et al., 2011; MA et al., 2013).

Estudo realizado por Zheng (2015), sobre a influência da coagulação na remoção da matéria orgânica natural, geotoxina e de precursores de furanos halogenados, observou que a formação das genotoxicidade, a partir de substâncias húmicas, diminuiu com doses crescentes do coagulante (sulfato de alumínio) em até 40 mg/L, no entanto, em dosagens acima deste ponto, a resposta genotóxica mostrou um ligeiro aumento, possivelmente indicando potencial genotóxico exibido pelo excesso de alumínio.

2.4 Filtração

A filtração é um processo físico-químico e, em alguns casos biológicos, para a remoção de impurezas em suspensão na água, mediante sua passagem por meio poroso (DI BERNARDO E DANTAS, 2005). Esse processo unitário, provavelmente, é o mais importante na cadeia de processos de tratamento de água (RICHTER, 2017). Tal processo pode ser classificado em lentos e rápidos. A Tabela 2.2, mostra as principais características desses filtros.

Tabela 2.2 - Características dos filtros lentos e rápidos

Item	Filtros Lentos	Filtros Rápidos
Taxa de filtração	1-7,5 m ³ /m ² .dia	120-480 m ³ /m ² .dia
Profundidade	0,3 m camada de pedregulho 1,0-1,5 m de areia	0,4 m de pedregulho 0,5-0,7 m de areia
Tamanho efetivo	0,15-0,35 mm	0,45 mm a maior
Coefficiente de uniformidade	<3	<1,5
Distribuição dos grãos	Não estratificado	Estratificado
Duração da carreira de filtração entre limpezas	20-60 dias	1-3 dias
Perda de Carga limite	Profundidade da água no filtro	Profundidade da água no filtro
Penetração da materia em suspensão	Superficial	Profunda
Método de Limpeza	Raspagem da camada superficial e lavagem da areia removida	Lavagem a contra corrente a ar e água ou somente água a alta taxa
Quantidade de água usada para lavar o filtro (% de água processada)	0,2-0,6%	1-6%
Pré-tratamento	Geralmente nenhum	Coagulação+floculação+Decantação ou flotação

Fonte: RICHTER, 2017.

O tamanho dos grãos e dos poros do meio filtrante influenciam no desempenho do processo de filtração. A granulometria do material filtrante é definida pelo tamanho efetivo, pelo coeficiente de uniformidade e pela porosidade. A primeira característica corresponde ao tamanho dos grãos abaixo do qual ficam 10% da massa total do material granular. Enquanto a segunda característica corresponde a relação entre o tamanho das partículas abaixo do qual ficam 60% do total da amostra, no qual valores baixos indicam meio granular mais uniforme com maior penetração das impurezas ocasionando carreiras de filtração mais longas. Já a ultima característica corresponde a relação entre o volume de vazios e o volume total do meio. Um alto valor na porosidade significa uma maior capacidade de acumular sólidos, mas exige uma taxa de lavagem mais elevada (DI BERNARDO E DANTAS, 2005; RICHTER, 2017).

A lavagem dos filtros depende da elevação da turbidez no efluente acima de um valor máximo, ou pelo alcance de uma perda de carga máxima, que reduz drasticamente a porosidade.

Isso ocorre, quando a saturação do meio filtrante que pode ser verificada quando a leitura da diferença entre os dois piezômetros, situados acima e abaixo de uma camada do meio, não sofre alteração com o tempo de filtração (RICHTER, 2017).

Tal saturação pode provocar o transpasse de partículas do afluente para o efluente. Contudo, vai depender da granulometria do meio filtrante, onde meios com granulometria pequenas dificilmente podem ocorrer o transpasse, mas as carreiras de filtração são mais curtas. Enquanto, meios com granulometrias maiores há possibilidade de ocorrer o transpasse, mas a carreira de filtração será mais longa (DI BERNARDO E DANTAS, 2005a).

A filtração em filtros lentos, pode ser realizada sem pré-tratamento, e é recomendada quando a turbidez da água bruta é menor do que 50 UNT, cor inferior a 20 UC e coliformes NMP/100 mL é inferior a 2000. Enquanto os filtros rápidos requerem um pré-tratamento com coagulação e floculação, o fluxo da água pode ser classificado em ascendente ou descendente.

No primeiro, a filtração se faz dos grãos mais grossos para os mais finos, no sentido de diminuição do volume dos poros, com o emprego de um único material filtrante. O fluxo ascendente é recomendado quando a água bruta apresenta turbidez menor que 50 UNT, sendo preferencialmente menor que 10 UNT (VON SPERLING, 2014; RICHTER, 2017), cor inferior a 25 UC, contagem de algas diatomáceas for inferior a 1000 UPA/mL e índice bacteriológico não superior a 90 NMP/100 mL (RICHTER, 2017).

No segundo tipo de fluxo, pode ser projetado com mais de uma camada de meio filtrante sobrepostas de materiais diferentes. As camadas superiores de menor densidade e maior granulometria, de modo a reproduzir a filtração ideal, na qual a água deveria passar no leito através de grãos cada vez mais finos. O fluxo descendente é recomendado quando a água bruta apresenta turbidez e cor menores que 25 unidades, índice bacteriológico não superior a 90 NMP/100 mL (RICHTER, 2017) e clorofila 'a' for menor que 10 µg/L (VON SPERLING, 2014).

A vantagem da filtração direta descendente está em instalações compactas, de menor custo que as estações convencionais, despesas menores com reagentes e menor produção de lodo. Já as principais desvantagens são menor flexibilidade do processo, lavagem mais frequente com mais gasto de água de lavagem e aplicabilidade limitada e muito dependente da qualidade da água bruta e de suas variações ao longo do tempo (RICHTER, 2017).

No trabalho realizado por Lima (2019), foi simulado, hidraulicamente em instalação piloto de fluxo contínuo, o funcionamento de uma ETA de filtração direta descendente para avaliar a influência da taxa de filtração, granulometria e composição da camada filtrante no tratamento de água de reservatório eutrofizado. No estudo foi obtido que a escolha do meio filtrante é importante para a eficiência do processo de filtração. Os filtros em leito simples de areia em todas as condições

estudadas obtiveram valores de turbidez acima do permitido pela Portaria da Consolidação nº5/2017 (BRASIL, 2017), enquanto que, o uso do carvão antracito no meio filtrante, possibilitou maior carreira de filtração para o filtro de menor granulometria e melhor eficiência para remoção de cor aparente e turbidez, para o filtro de maior granulometria.

Um estudo realizado por Liu et al., (2019), investigaram a remoção de *Cryptosporidium* de água potável utilizando uma estação piloto de filtração direta em fluxo descendente com meio filtrante composto por areia e antracito, sendo do tipo regular com 55 cm de areia e 20 cm de antracito, e profundo com 140 cm de antracito e 55 cm de areia para diferentes dosagem dos coagulantes sulfato de alumínio e policloreto de alumínio e dois polímeros auxiliares de filtração Poliamina e poli(cloreto de dimetil-dialil-amônio). Nos resultados, os filtros de leito profundo foram associados a uma maior remoção de *Cryptosporidium*, enquanto exibiam taxas mais baixas e maior tempo de carreira de filtração, associado as condições de pré-tratamento com 0,454 mg/L de alumínio no coagulante com adição de 0,5 mg/L de poli(cloreto de dimetil-dialil-amônio).

Contudo, Lima (2019) avaliou a associação da filtração lenta convencional com a filtração rápida, precedida de oxidação química e coagulação, para o tratamento da água de uma lagoa litorânea tropical que apresentava baixa turbidez e cor moderada, para taxa de filtração fixa e diferentes coeficientes de desuniformidade ($CD = 3$ e 4). No estudo realizado, os filtros lentos, quando maduros, alcançaram a remoção de 100% de *E. coli* e em torno de 98% de Coliformes Totais, porém, não removeram eficientemente cor verdadeira. Em relação à remoção de turbidez o filtro lento com maior coeficiente desuniformidade apresentou melhor resultado. Segundo a autora, a associação do filtro lento com a filtração rápida, com pré-oxidação e coagulação, tem o potencial de atingir eficiências elevadas na remoção de turbidez, cor verdadeira e *E. coli*, alcançando valores remanescentes bem abaixo dos padrões de potabilidade vigentes no Brasil, implicando em maior segurança sanitária da água tratada.

Portanto, dependendo das condições da água bruta a filtração direta pode ser utilizada associada a outra tecnologia de tratamento. De acordo com Von Sperling (2014), para água bruta com valores de turbidez entre 10 UNT e 20 UNT e clorofila 'a' entre 10 µg/L e 25 µg/L recomenda-se o uso da dupla filtração. Conteúdo, que será apresentado no item posterior.

2.5 Dupla filtração

A dupla filtração consiste em um processo de tratamento de água que utiliza uma filtração de fluxo rápido ascendente seguida de uma filtração descendente. A primeira etapa funciona como um pré-tratamento, com granulometria apropriada para produzir uma água com turbidez menor que 10 UNT.

A dupla filtração apresenta diversas vantagens, como: a) permite o tratamento de água com qualidade muito baixa; b) podem ser utilizadas taxas de filtração mais elevadas nos filtros ascendentes; c) é seguro com relação à mudanças bruscas da qualidade da água bruta; d) a remoção quanto aos microorganismos é maior que a filtração ascendente e descendente, aumentando a segurança em relação à desinfecção final; e e) não tem necessidade de descarte da água tratada no filtro ascendente de pedregulho no início da carreira, pois esta água pode ser filtrada ainda nos filtros descendentes (DI BERNARDO, 2003).

No Brasil, o desenvolvimento de pesquisas sobre dupla filtração utilizando na primeira etapa do processo a filtração ascendente com pedregulho está em crescimento. Esta etapa tem como vantagens um maior volume de acumulação de impurezas, favorecendo uma etapa de floculação na camada inferior do meio filtrante, e promove uma etapa de clarificação semelhante ao do processo de sedimentação.

A água pré-filtrada é coletada por meio de calhas geralmente situadas acima do topo da camada de pedregulho de menor granulometria. Em seguida, é levada para os filtros rápidos descendentes de areia e o efluente deste é conduzido à etapa final, onde receberão produtos químicos para a desinfecção e fluoretação. A lavagem dos filtros deve ser feita utilizando água filtrada final, proveniente de reservatório ou de reservatório semienterrado, e com bombeamento direto e deve-se levar em consideração a carga hidráulica final fixada em cada filtro. A Figura 4 mostra o esquema de uma instalação de dupla filtração (DI BERNARDO, 2003).

Os filtros podem funcionar com taxas de filtração constantes ou declinantes. Para taxas de filtração constante a perda de carga vai variar de acordo com o tempo de funcionamento dos filtros. Os filtros com fluxo ascendente podem apresentar meio filtrante constituído por pedregulho (camada suporte) com areia grossa (FAAG), onde a perda de carga pode ocorrer entre 1,5 e 2,0 m; ou só por pedregulho (FAP), onde a perda de carga raramente excede 1,0 m (DI BERNARDO E DANTAS, 2005b).

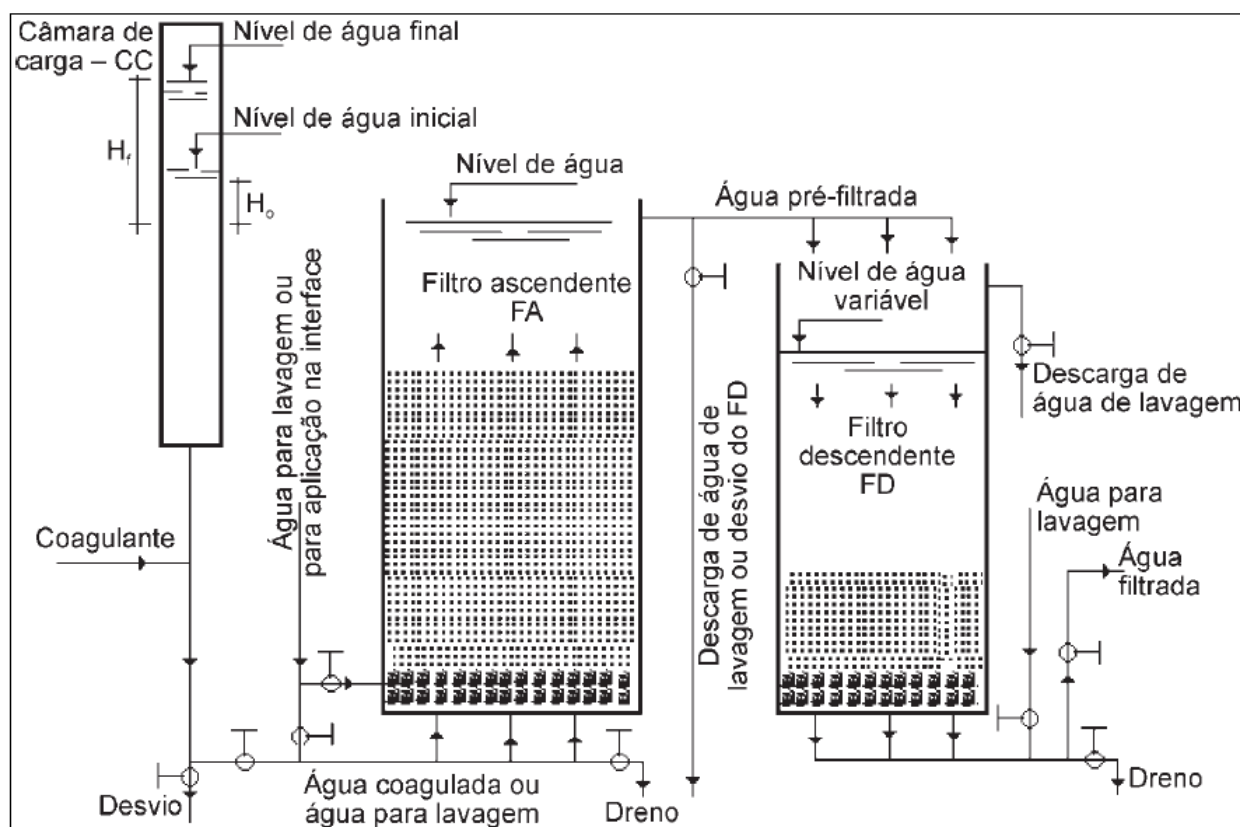


Figura 2.4 - Esquema de uma instalação de dupla filtração (Di Bernardo e Dantas, 2005)

Dantas (2004), estudou a montagem e operação de uma instalação piloto, constituída de dois sistemas de dupla filtração (sistema 1: filtro ascendente de areia grossa e filtro descendente de areia e sistema 2: filtro ascendente de pedregulho e filtro descendente de areia), com o fim de avaliar o seu desempenho para o tratamento de duas águas de elevada turbidez, utilizando taxas de filtração de 120, 180 e 240 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ para o filtro ascendente e 180, 300 e 360 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ para os filtros descendentes.

Como resultado foi observado que os dois sistemas foram capazes de produzir água filtrada com turbidez consistentemente menor que 0,5 uT e que a produção efetiva de água depende da turbidez da água de estudo, das taxas de filtração, da execução das descargas de fundo intermediárias e da carga hidráulica disponível para retenção de sólidos. Para o sistema 2, houve retenção de sólidos em todo o meio filtrante do filtro ascendente de pedregulho (FAP), com os melhores resultados, para água com turgidez em torno de 100 uT, em termos de remoção de sólidos, duração da carreira e produção efetiva de água nas condições de taxas de filtração 126 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ no filtro ascendente de pedregulho e 193 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ no filtro rápido descendente de areia, com a execução das descargas de fundo intermediária a cada 6 h e, para água com turbidez em torno de 300 uT, os melhores resultados foram obtidos com taxas de filtração para 178 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ no FAP e 185 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

no filtro rápido descendente de areia e a execução das descargas de fundo intermediárias a cada 4,5 h.

Duarte (2011), avaliou a técnica de tratamento da dupla filtração em leitos de pedregulho e areia, com pré ou interoxidação e adsorção com carvão ativado pulverizado ou granulado, para a potabilização de água de reservatório com elevada densidade de cianobactérias. As taxas de filtração de 160 e 200 m³/m².d no FAP e 211 e 267 m³/m².d no FRDA foram usadas nos ensaios para investigar o melhor desempenho da unidade existente.

Como resultado, o autor observou que a dupla filtração mostrou bom desempenho em relação à remoção de flocos de células de cianobactérias e, conseqüentemente, de microcistinas totais-LR, sendo que os filtros descendentes de areia atuaram como sistemas de polimento final com remoção na faixa de 61% a 98% (9.400 células.mL⁻¹ a 5.800 células.mL⁻¹). As etapas de oxidação com cloro (inter e pré-oxidação), com residual de cloro livre da ordem de 0,1 mg.L⁻¹, associada à adsorção com carvão ativado pulverizado e carvão ativado granulado produziram efluentes finais com qualidades aceitáveis quanto aos níveis de trihalometanos, turbidez e cor verdadeira. Os arranjos de pré e interoxidação, dupla filtração e adsorção com carvão ativado granulado exibiram melhores desempenhos de remoção de matéria orgânica natural (MON), carbono orgânico total, absorvância 254, cor aparente e verdadeira e turbidez e foram eficientes para assegurar a qualidade dos efluentes finais especialmente em relação à remoção de MCT-LR e trihalometanos: efluentes das colunas de filtro de carvão ativado granulado (FCAG) tiveram concentração de MCT-LR reduzida, consistentemente, para valores inferiores a 1,0 µg/L.

Silva et al. (2012), investigaram a eficiência global e a formação de subprodutos orgânicos halogenados (SOH) no tratamento de água bruta proveniente de um reservatório de água, utilizando instalação piloto de dupla filtração, composta pelas etapas de coagulação, pré-oxidação, filtro ascendente de pedregulho, interoxidação e filtro rápido descendente de areia (FRD), seguida de uma unidade de pós-tratamento com carvão ativado granular. As taxas de filtração adotadas foram de 120 m³/m².d para o FAP e de 180 m³/m².d para o FRD, e a granulometria do FAP variou de 2,0 - 25,4 mm dispostos, estratificadamente, sobre uma placa perfurada, em ordem decrescente no sentido do escoamento, enquanto a granulometria do FRD apresentou valores entre 0,42 e 0,45 mm com coeficiente de desuniformidade entre 1,6 - 1,7.

Como resultados, os autores observaram que a pré-oxidação melhorou a qualidade do efluente do FAP e a interoxidação favoreceu a ocorrência valores menores de turbidez e cor no efluente do FRD. O pós-tratamento empregado, mostrou-se eficiente para assegurar a qualidade dos efluentes finais nos ensaios realizados, especialmente, em relação à remoção de matéria orgânica, cianobactérias e cor. As concentrações máximas de SOH encontradas nos efluentes do FRD

e do FCAG não ultrapassaram os valores limites do anexo XX da Portaria de Consolidação nº5/2017 do Ministério da Saúde.

Cirne (2014), avaliou o comportamento da técnica de dupla filtração com pré-oxidação, para a potabilização da água proveniente de manancial concentrações elevadas de cianobactérias. No estudo, foi observado a ação do hidroxiclreto de alumínio como coagulante com dosagem fixa de 1 mg/L, variando as taxas de filtração para o FAP (120 e 180 m³/m².d) e FRDA (160 e 240 m³/m².d) e a granulometria dos filtros.

Os resultados encontrados na instalação piloto de dupla filtração demonstraram que o filtro ascendente de pedregulho que apresentava a menor granulometria, demonstrou a melhor eficiência e as menores médias de turbidez e cor aparente. E o filtro rápido descendente de areia, também de menor granulometria, foi mais eficiente na remoção de turbidez alcançando remoção em torno de 100% e indicando que quanto menor a granulometria dos filtros, maior a eficiência de remoção de turbidez. O uso da pré-oxidação favoreceu a remoção de cor no final dos ensaios, chegando a um percentual em torno de 60%. Com relação à remoção da turbidez, a técnica de dupla filtração se mostrou eficiente. Contudo, a remoção de cor e de cianotoxinas presentes na água só foi eficiente com o auxílio de um oxidante.

Queiroz et al. (2017), estudaram a aplicação do processo de Dupla Filtração como alternativa de tratamento de água eutrofizada na região Norte do Brasil, com a água apresentando densidade de cianobactérias da ordem de 10⁵ cel.mL⁻¹. No trabalho realizado foi montada uma instalação piloto de dupla filtração composta pelas unidades de pré-cloração, adsorção em carvão ativado pulverizado, filtro ascendente de pedregulho e filtro rápido descendente de areia, os quais funcionaram com taxas de filtração de 120 e 180 m³/m².d, respectivamente.

Os resultados obtidos mostraram que o tratamento produziu água com valores de COT abaixo de 2,0 mg.L⁻¹, turbidez inferior a 0,50 uT, e remoção de células de cianobactérias maior que 99%. As concentrações máximas de subprodutos orgânicos halogenados (SOH) encontrados na água tratada foram menores que os valores limites do anexo XX da Portaria de Consolidação nº5/2017 do Ministério da Saúde.

2.6 Delineamento split-plot

O planejamento experimental é útil para orientar a realização de experimentos de forma eficiente, uma vez que considera dados apropriados coletados em tempo e custo mínimos. Para isso, deve ser utilizada uma abordagem científica para seu desenvolvimento. Esta abordagem é

feita através do planejamento estatístico de experimentos. A análise destes dados, por meio de técnicas estatísticas adequadas, resultará em conclusões confiáveis (BARROS NETO et al., 2007).

Uma destas técnicas, consiste no delineamento split-plot ou em parcelas subdivididas, criado por Fisher (1925) com grande reconhecimento em planejamento de experimentos aplicados na indústria. Contudo, muitos experimentos realizados na indústria são experimentos do tipo split-plot, mas ainda são analisados erroneamente como um planejamento completamente aleatorizado (JONES E NACHTSHEIM, 2009). Como consequência, conclusões erradas podem ser desenvolvidas, conduzindo a decisões equivocadas.

Em alguns experimentos, podem ocorrer restrições em relação à possibilidade de aleatorização do experimento, devido aos aspectos relacionados a custos e tempo disponível para a realização destes. Com isso, o delineamento e a análise dos resultados precisam ser diferentes de um experimento completamente aleatorizado. Então, o delineamento split-plot dará atenção especial quanto aos diferentes tipos de unidades experimentais envolvidas, pois o próprio número de unidades experimentais associadas a um dado fator pode ser diferente do número associado a outro fator ou suas interações, sendo caracterizados pela sobreposição de dois planos experimentais (DANIEL, 2008 E MELO, 2007). Dessa forma, um experimento em parcela subdividida é um experimento em bloco, em que os próprios blocos servem como unidades experimentais para um subconjunto de fatores. Assim, existem diferentes níveis de unidades experimentais correspondendo a níveis de aleatorização, sendo uma aleatorização realizada para determinar a atribuição de tratamentos em nível do fator associado ao bloco (parcela inteira) e uma aleatorização em cada subparcela (dentro de cada bloco) (JONES e NACHTSHEIM, 2009).

Com isso, em um delineamento split-plot existem os chamados fatores de plot ou fatores de whole-plot, e as respectivas unidades experimentais, às quais os tratamentos destes fatores são aleatoriamente aplicados, que correspondem a parcela de tratamentos principais ou um fator cujos os níveis são difíceis de alterar. Cada parcela principal, é dividida em subparcelas, chamadas fatores de subplots - fatores cujos os níveis são mais fáceis de alterar, e seus respectivos tratamentos são atribuídos aos subplots seguindo uma nova aleatorização, em que cada plot tem tantos subplots quantos forem as combinações de níveis dos fatores de subplots (DANIEL, 2008 e MONTGOMERY, 2013).

Um simples exemplo pode ser observado na Figura 2.5, a qual mostra um esquema de delineamento split-plot aplicado na agricultura, em que o fator A corresponde ao whole-plot com dois níveis (dois métodos de irrigação) e o fator B correspondendo ao subplot com dois níveis (dois tipos de fertilizantes) com o rendimento de uma colheita sendo a resposta, usando quatro campos disponíveis, sendo cada unidade experimental neste nível. No caso, a uma aleatorização

nos dois tipos de irrigação nos quatro campos (whole-plot), enquanto, dentro de cada campo a uma segunda aleatorização para os dois tipos de fertilizantes.

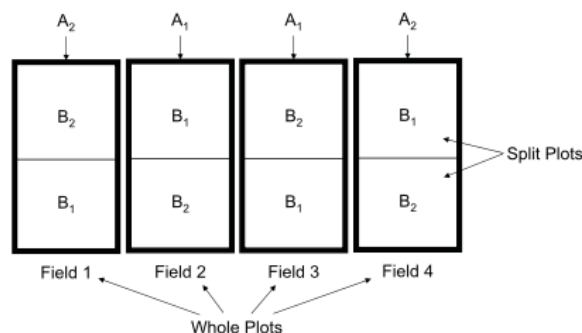


Figura 2.5 - Esquema de um delineamento split-plot aplicado na agricultura (o fator A é um Whole-plot com dois níveis e o fator B é um subplot com dois níveis) (JONES e NACHTSHEIM, 2009).

As diferenças entre as unidades experimentais em uma réplica são devido às mudanças nos níveis dos fatores da parcela. Isto, associado ao fato de que cada réplica funciona como um bloco para a aplicação de um nível do fator da parcela, permite que os graus de liberdade sejam subdivididos (DANIEL, 2008).

A existência de fatores não controlados ou fatores de ruído, que afetam a resposta do experimento em uma situação prática, podem levar a um confundimento dos efeitos na parcela de tratamento principal. Com isso, sugere-se que o fator de maior interesse no estudo seja colocado na subparcela do delineamento split-plot (MONTGOMERY, 2013). Isto ocorre, devido a uma maior precisão na estimativa dos efeitos de todos os fatores envolvidos na subparcela (JONES e NACHTSHEIM, 2009).

O princípio utilizado em um plano split-plot (parcelas subdivididas) pode ser utilizado mais de uma vez, gerando assim um experimento split-split-plot (parcelas sub-subdivididas). Neste caso, têm-se 3 aleatorizações diferentes: uma para a atribuição dos tratamentos de plot aos plots em cada réplica, outra para a definição dos níveis do fator de subplot que irão para cada subplot em cada plot, e ainda uma terceira aleatorização para designar os tratamentos de sub-subplot que serão aplicados em cada sub-subplot dentro de cada subplot (DANIEL, 2008).

Portanto, o planejamento completamente aleatorizado, que é frequentemente utilizado na indústria, não é executado como tal na presença de fatores em que seus níveis são difíceis de alterar, devido aos aspectos relacionados a custos e tempo disponível para a realização do experimento. Com isso, tais fatores não são reiniciados em todos os experimentos. No caso, são realizados blocos em que os fatores difíceis de alterar são mantidos constantes com a aleatorização dos outros fatores. Isto ocasiona uma análise incorreta dos resultados, aumentando o erro para os fatores da parcela inteira, assim como para os fatores da subparcela e para as interação dos fatores na

parcela. Logo, não significa que o planejamento completamente aleatorizado seja universalmente evitado. Mas, que considerações sobre a presença de fatores difíceis de mudar e seu potencial impacto na aleatorização devem fazer parte do planejamento de todos os experimentos na indústria (JONES e NACHTSHEIM, 2009).

Segundo JONES e NACHTSHEIM (2009), o delineamento split-plot pode ser dividido em cinco áreas sendo aplicado em, planejamentos fatorial completo de dois níveis, fatorial fracionário de dois níveis, misturas ou superfície de resposta, planejamentos ótimos e planejamentos robustos. Para a última área, esta apresenta dificuldades, seria o custo devido ao uso de uma matriz cruzada envolvendo planejamentos completamente aleatorizados. Contudo, o uso do planejamento de parcelas subdivididas (split-plot) podem ser efetivamente usados para reduzir custos de experimentos com o objetivo de obter a condição mais robusta quando a presença de um fator difícil de alterar.

Essa condição robusta foi definida pelo japonês Genichi Taguchi, cujo método corresponde a uma técnica de planejamento que tem como objetivo identificar os níveis de fatores de controle que sejam menos sensíveis aos efeitos dos fatores de ruído, e ao mesmo tempo, manter as características dos produtos o mais próximo possível do seu valor ótimo (VIVACQUA, 1996 e BARROS NETO et al., 2007).

Os fatores de ruído correspondem as variáveis que afetam o desempenho de um produto ou processo. Esses fatores são classificados em três tipos: externos, variação de unidade para unidade e deterioração. No primeiro tipo as variáveis são relacionadas ao ambiente onde o produto é manufaturado ou utilizado. O segundo tipo corresponde a uma variação inevitável, sendo um erro inerente ao processo de manufatura. E o último, corresponde ao afastamento nominal das características com o decorrer do tempo (VIVACQUA, 1996).

De acordo com Barros Neto (2007), no trabalho de Taguchi qualquer desvio em relação ao valor nominal passou a ser considerado indesejável, mesmo que o produto estivesse dentro dos limites de especificação.

O planejamento sugerido por Taguchi faz uso de fatoriais fracionários que são dispostos em uma matriz chamada de arranjos ortogonais. O experimento consiste na combinação de duas partes, uma com um arranjo correspondente aos fatores de controle, chamada de matriz interna e a outra parte que corresponde aos fatores de ruído, chamada de matriz externa. Esse esquema é mostrado no quadro 2.1.

Observando o quadro 2.1, tem-se que na matriz interna as colunas representam os níveis dos fatores de controle, enquanto às linhas representa o tratamento para cada fator. Já na matriz externa as colunas representam os níveis dos fatores de ruído e as linhas representam a combinação

desses níveis. Se a matriz interna possui n linhas e a externa m colunas, o número total de respostas obtidas seria de $n \times m$ (VIVACQUA, 1996).

Na análise dos resultados obtidos pelo método de Taguchi deve-se realizar uma interpretação na relação sinal/ruído de forma que a sua maximização seja equivalente a minimizar a variação no desempenho do processo estudado. O valor da relação sinal/ruído é obtido pela equação 3.1.

$$SN_T = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{s^2}$$

equação 3.1

Em que, \bar{y}^2 corresponde ao quadrado da média e s^2 corresponde a variância.

						1	2	...	m	
					Fatores de Ruído	R ₁	Matriz Externa			
						R ₂				
					Fatores de Controle	R ₁				
	C ₁	C ₂	...	C _K		Resposta				
1	Matriz Interna					y ₁	y ₂	...	y _m	
2										
n										

Quadro 2.1 - Representação de uma matriz interna e externa de um planejamento robusto (VIVACQUA, 1996).

Segundo Vivacqua (1996), os níveis dos fatores de ruído são controláveis nos experimentos, fato que não se repete na linha de produção. Ainda de acordo com Vivacqua (1996), o método de Taguchi apresenta como falha a pouca atenção dada as interações, uma vez que não é dada a ênfase adequada nas relações de confundimento entre as interações e efeitos principais. Isso, porque as interações exercem um papel fundamental no planejamento de experimento.

Em seguida, são apresentados três trabalhos, para exemplificar, o uso do método de Taguchi, para obter as melhores condições nos experimentos realizados.

Freitas (2012), aplicou o método de Taguchi, com arranjo ortogonal de L16, em estudo voltado para o tratamento de efluente fenólico por processos de oxidação avançada (Foto-Fenton e O₃/UV) para obter a melhor condição experimental. O estudo exploratório foi realizado com sete variáveis (massa de peróxido de hidrogênio, massa de íons ferrosos, pH, vazão de Ozônio, temperatura e potência da lâmpada) com dois níveis para cada fator. Após o estudo exploratório, algumas variáveis foram fixadas e aplicadas em um planejamento fatorial completo com duas variáveis de

controle com três níveis para cada fator. Para o processo foto-fenton as variáveis de controle foram massa de peróxido de hidrogênio e massa de íons ferrosos, e para o processo O₃/UV as variáveis de controle foram vazão do ozônio e potência do ozonizador. O método de otimização utilizando o processo Foto-Fenton foi o mais eficiente na degradação do composto fenólico, sendo assim a melhor condição experimental correspondendo a uma redução de COT= 54,68%, DQO=78,73% e Fenóis Totais= 98,1%. Os parâmetros controlados do processo para essa condição foram: pH=3, temperatura de 30 °C, potência ultravioleta de 28 W e reagente Fenton (H₂O₂= 48,3g e Fe⁺²=5,95g), que corresponde à relação mássica H₂O₂ /Fe⁺² igual a 8.

Mustafi et al. (2018), estudaram um polímero impresso com As³⁺ como material ativo de desintoxicação, sintetizado pelo método de preparação assistida por microondas. Segundo os autores, o polímero impresso é uma das melhores técnicas possíveis para a remoção de arsênio e vários outros contaminantes da água potável. No presente estudo, o arranjo ortogonal L9 de Taguchi foi utilizado para examinar a influência de quatro parâmetros no percentual de adsorção do íon As³⁺ e para otimizar o processo, obtendo assim melhores condições. Os parâmetros de controle investigados foram pH, tempo de agitação, velocidade de agitação e tempo de contato e com três níveis para cada parâmetro. Como resultado do planejamento experimental e da análise da ANOVA e da relação sinal/ruído na categoria maior melhor, foi obtida a condição ótima de pH igual 7, tempo de contato igual a 30 s, temperatura de 25 °C e velocidade de agitação de 100 rpm para os parâmetros estudados e que a matriz ortogonal L9 na categoria maior melhor mostrou que apenas 9 experimentos são suficientes para o planejamento dos experimentos.

Asgari et al. (2019), aplicaram um planejamento experimental de delineamento misto e o arranjo ortogonal de Taguchi L8 (4¹, 2²) para otimizar o processo de pirólise na preparação do carvão ósseo, a fim de remover o fluoreto das águas subterrâneas reais. Os parâmetros estudados foram temperatura (°C), taxa de aquecimento (°C/min) e tempo do tratamento térmico (h), sendo o primeiro parâmetro com 4 níveis e os outros dois parâmetros com dois níveis. Tais parâmetros foram analisados calculando o valor da relação sinal/ruído na categoria de maior melhor. Os resultados mostraram que as condições otimizadas para a pirólise do carvão ósseo foram a temperatura de 500 °C, taxa de aquecimento de 5 °C/min e tempo de contato de 2 h.

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada na estação piloto IPDF, localizada na Estação de Tratamento de Água - ETA, que pertence a Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte – CAERN, situada no município de Extremoz no litoral do Estado do Rio Grande do Norte. A estação é responsável pelo tratamento da água proveniente da lagoa de Extremoz (Figura 3.1), fazendo parte da Bacia Doce (SEMARH, 2013).



Figura 3.1 - Vista da Lagoa de Extremoz. Em vermelho está destacada a localização da ETA Extremoz (Imagem obtida pelo autor usando o Google Maps).

A ETA Extremoz, destacada em branco na Figura 3.2, foi inaugurada em 1992, com vazão inicial de projeto de 500 L/s, podendo ser ampliada para até 1000 L/s mediante o aproveitamento hídrico da Lagoa de Extremoz. Atualmente a estação opera com vazão de 700 L/s, apresentando uma sobrecarga hidráulica em relação à sua vazão nominal de cerca de 30%, sendo responsável pelo abastecimento de 70 % da população da região norte da cidade de Natal e parte do município de São Gonçalo do Amarante. A água da Lagoa de Extremoz caracteriza-se pela sua baixa turbidez, variando entre 1,28 - 2,37 e cor elevada, variando entre 19 - 24 (FREITAS, 2017).

A estação de tratamento de água foi concebida como tratamento convencional de ciclo completo, sendo dotada dos processos unitários de oxidação com dicloro isocianurato de sódio, coagulação com cloreto de polialumínio (PAC), mistura rápida em calha parshall, floculação me-

canizada, atualmente desativados, decantadores de fluxo laminar, filtros rápidos de fluxo descendentes, desinfecção com cloro, gasoso e dicloro isocianurato de sódio, e correção final de pH, como mostra o fluxograma na Figura 3.3.

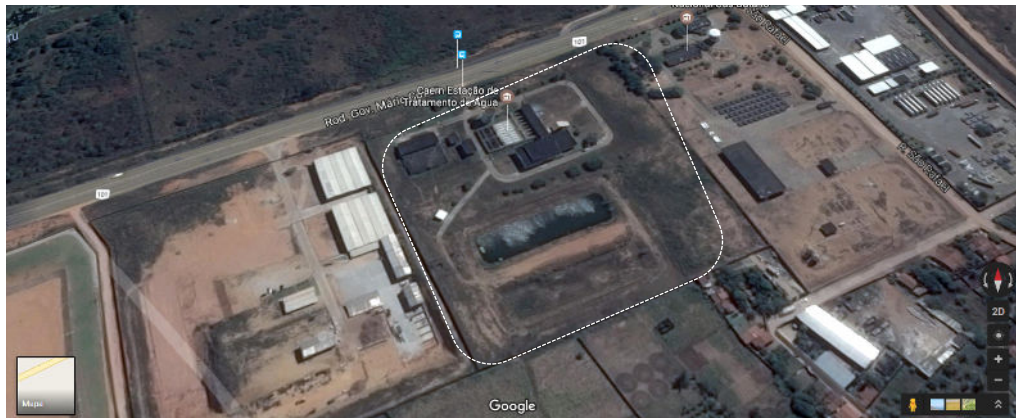


Figura 3.2 - Vista da Estação de Tratamento de Água – ETA Extremoz, destacada pela linha pontilhada branca. (Imagem obtida pelo autor usando o Google Maps).

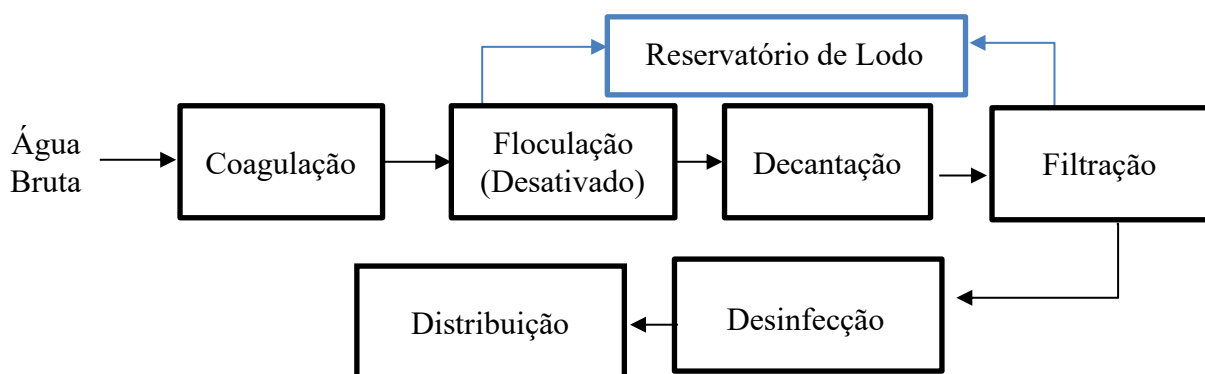


Figura 3.3 - Fluxograma da ETA de Extremoz/RN

3.1 Descrição das amostras e análise físico-química

As amostras analisadas no presente estudo correspondem a água bruta da lagoa de Extremoz e a água tratada após passagem na instalação piloto de dupla filtração, utilizando as configurações de filtração rápida descendente e dupla filtração. As análises físico-químicas realizadas foram de potencial hidrogeniônico (pH), cor aparente, cor verdadeira, temperatura, turbidez, oxigênio consumido/matéria orgânica natural (OC/MON) e absorvância no comprimento de onda de 254 nm. Os parâmetros físico-químicos foram analisados seguindo o livro *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA e WEF (2012)).

3.2 Instalação piloto de tratamento de água por dupla filtração - IPDF

Para o trabalho proposto, a IPDF está montada na ETA Extremoz/RN em área coberta de 110 m² e é alimentada com água bruta da lagoa de Extremoz. A Figura 3.4 mostra uma vista geral da estação IPDF, onde a entrada da água bruta está situada do lado direito na foto e a saída da água tratada está situada do lado esquerdo na foto, enquanto a Figura 3.5 e 3.6, mostram o perfil longitudinal das unidades de tratamento e o fluxograma hidráulico da IPDF, respectivamente.



Figura 3.4 - Vista Geral da IPDF em Extremoz/RN.

A estação piloto é composta por bomba dosadora, câmaras de pré-oxidação (CPOX), câmaras de adsorção com carvão ativado pulverizado (CCAP), câmara de mistura rápida de acrílico, filtros ascendentes de pedregulho (FAP), câmaras de interoxidação (CIOX), filtros rápidos descendentes de areia (FRDA), filtro de adsorção com carvão ativado granulado (FCAG) e reservatório de água tratada.

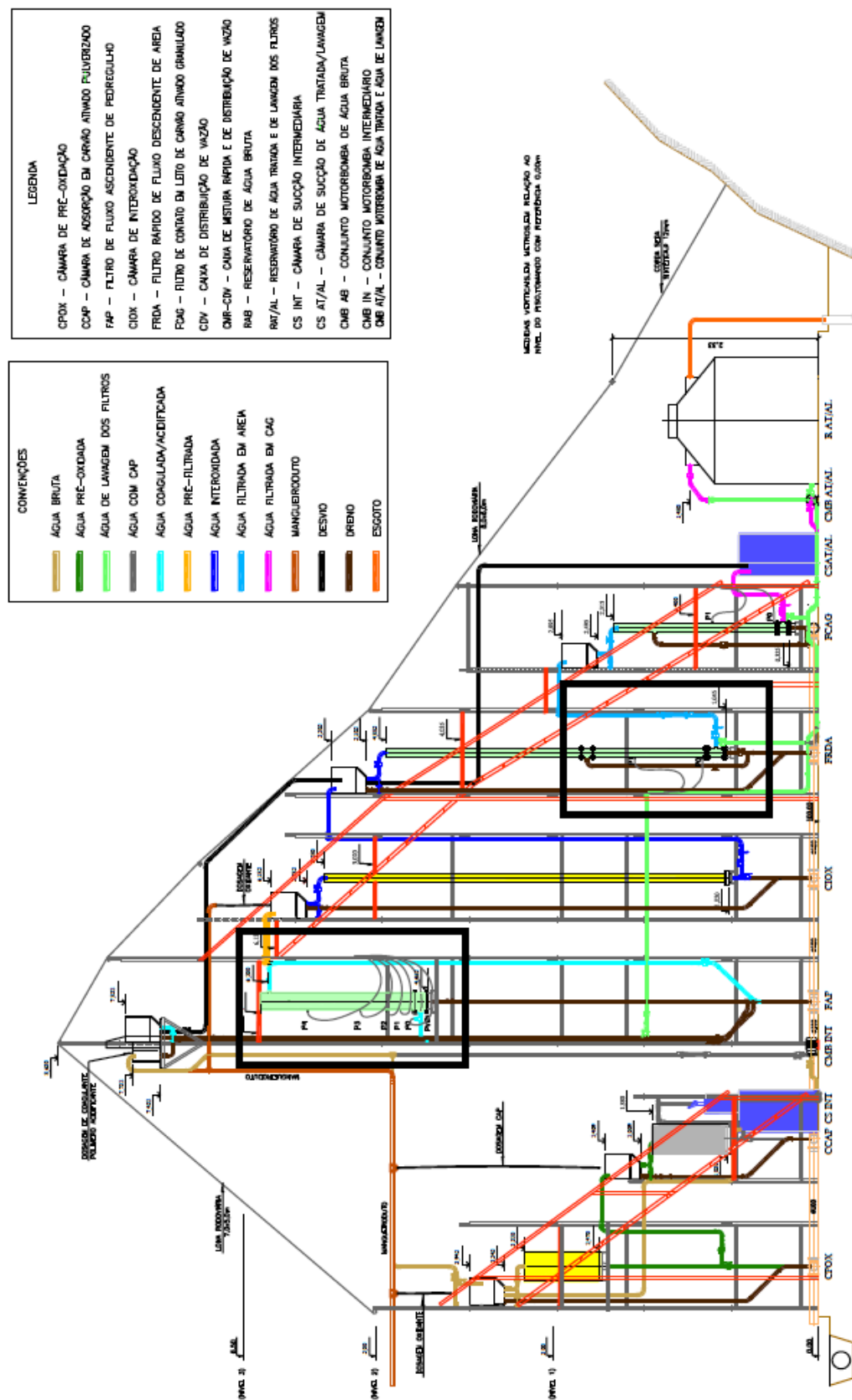


Figura 3.5 - Perfil longitudinal das unidades de tratamento da IPDF.

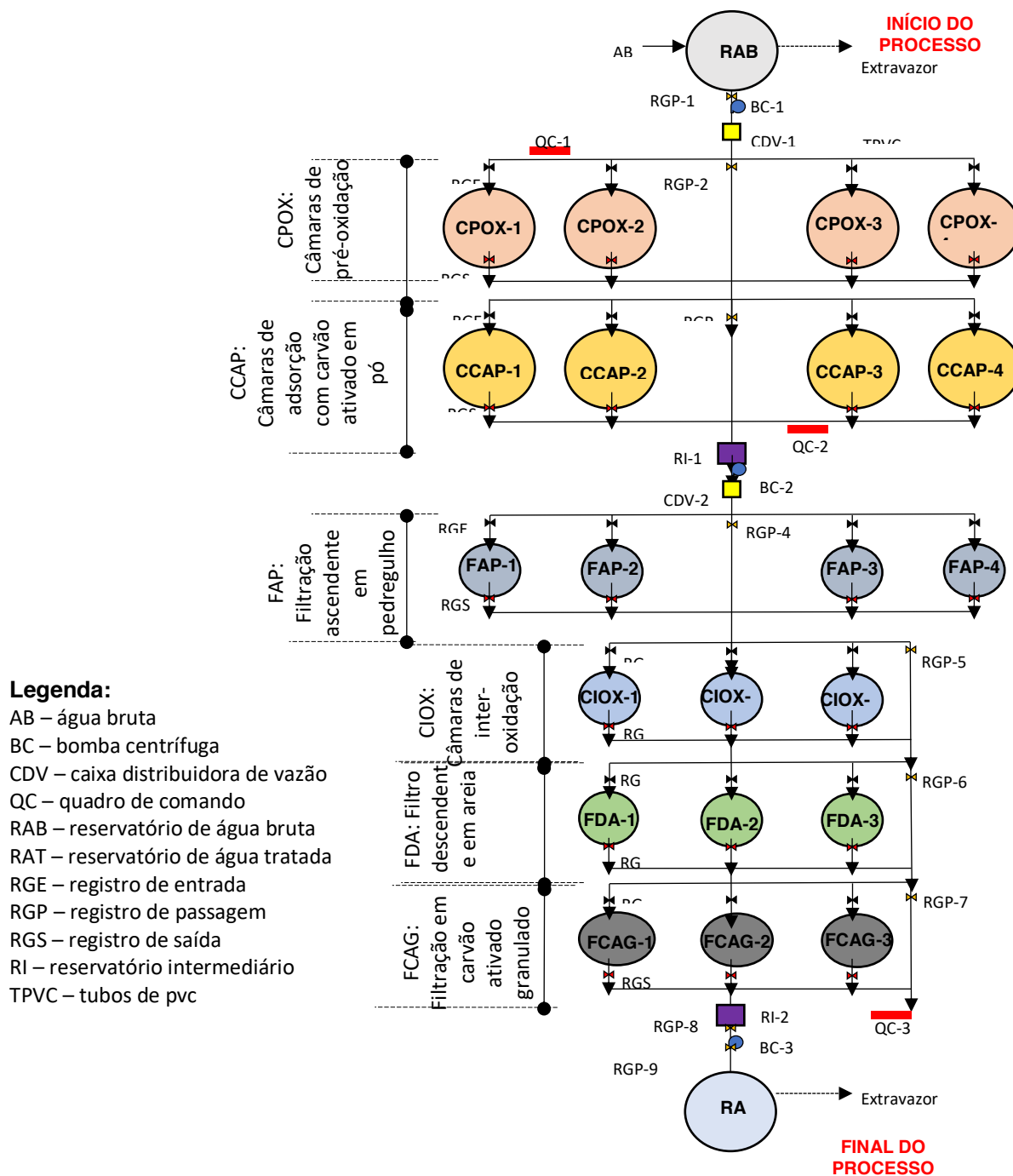


Figura 3.6 - Fluxograma Hidráulico da IPDF – Instalação piloto de dupla filtração.

Os matérias e dimensões das unidades de tratamento de IPDF são mostrados na Tabela 3.1, conforme Duarte (2011).

Tabela 3.1 – Matérias e dimensões da IPDF

Unidade	Material Construtivo	Quantidade	Dimensões		
			DIN (mm)	Ht (m)	Hu (m)
CS	PRFV	2	500	0,90	0,75
CPOX	PVC esgoto	4	300	0,85	0,80
CCAP	PVC esgoto	4	300	0,85	0,80
FAP	PRFV	4	200	1,95	1,85
CIOX	PVC água	3	100	4,55	4,50
FRDA	RPFV	3	100	3,85	3,85
FCAG	RPFV	2	100	2,00	2,00

Legenda: CS – Câmara de sucção (intermediária e de água tratada/lavagem); DIN – diâmetro interno; Ht – altura total; Hu – altura útil; PRFV – PVC revestido com fibra de vidro; RPFV – resina poliuretânica de fibra de vidro. Fonte: Duarte (2011).

Para minimizar o efeito de parede no escoamento da água nos filtros foi impregnada na superfície interna dos mesmos uma camada de areia com grãos entre 0,60 e 1,00 mm sobre a resina fresca, conferindo rugosidade equivalente à superfície de concreto sem acabamento, Duarte (2011).

A câmara de mistura rápida utilizada no sistema foi feita de acrílico e suas dimensões eram idênticas as de um equipamento jarreste. Assim, como as paletas do agitador. Com isso foi usado o gradiente de velocidade de 1000s^{-1} durante 30 s, conforme operação da ETA.

Em seguida serão descritos os filtros ascendentes de pedregulho e os filtros descendentes de areia.

3.2.1 Filtro Ascendente de Pedregulho

A IPDF é composta por quatro filtros ascendentes de pedregulho - FAP (Figura 3.7), contudo somente um funcionará por ensaio. As características granulométricas das camadas filtrantes e de suporte para cada FAP estão descritas na Tabela 3.2.



Figura 3.7 - Vista do Filtro ascendente de pedregulho (FAP).

Tabela 3.2 - Características físicas das camadas filtrantes e suporte dos filtros FAP.

Filtro	Camada Filtrante	Tamanho dos Grãos (mm)	Espessura (cm)	Filtro	Camada Filtrante	Tamanho dos Grãos (mm)	Espessura (cm)
FAP 1	1 (Fundo)	19,0 – 25,4	15	FAP 3	1 (Fundo)	15,9 – 25,4	15
	2	12,7 – 19,0	15		2	9,6 – 15,9	15
	3	7,9 – 12,7	30		3	4,8 – 9,6	30
	4 (Topo)	4,8 – 7,9	60		4 (Topo)	2,4 – 4,8	60
	Espessura total		120		Espessura total		120
FAP 2	1 (Fundo)	19,0 – 25,4	15	FAP 4	1 (Fundo)	12,7 – 19,0	15
	2	12,7 – 19,0	15		2	6,4 – 12,7	15
	3	6,4 – 12,7	30		3	3,2 – 6,4	30
	4 (Topo)	3,2 – 6,4	60		4 (Topo)	2,0 – 3,2	60
	Espessura total		120		Espessura total		120

Fonte: adaptado de Duarte (2011).

3.2.2 Filtro rápido descendente de areia

A estação IPDF é composta por três filtros rápidos descendentes de areia (Figura 3.8). As características das camadas suporte e do meio filtrante estão apresentadas nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.



Figura 3.8 - Vista do Filtro rápido descendente de areia.

Tabela 3.3 - Características da camada suporte dos FDA.

Filtro	Camada filtrante	Tamanho dos grãos (mm)	Espessura (cm)
FRDA 1, 2 e 3	1 (fundo)	19,0 – 12,7	5
	2	12,7 – 6,4	5
	3	6,4 – 3,4	5
	4	3,4 – 2,0	5
	5	6,4 – 3,4	5
	6	12,7 – 6,4	5
	7 (topo)	19,0 – 12,7	5
Espessura total			35

Fonte: adaptado de Duarte (2018).

Tabela 3.4 - Características das camadas filtrante dos FDA.

Filtro	Camada filtrante	Tamanho dos grãos (mm)	Filtro	Camada filtrante	Tamanho dos grãos (mm)
FDA 1	1	0,3 – 0,4	FDA 3	1	0,4 – 0,5
	2	0,4 – 0,5		2	0,5 – 0,6
	3	0,5 – 0,6		3	0,6 – 0,8
	4	0,6 – 0,8		4	0,8 – 1,0
	5	0,8 – 1,0		5	1,0 – 1,2
D₀=0,3 mm; D₁₀=0,50 mm; D₆₀=0,81 mm; D₁₀₀=1,0 mm; CD=1,62					6
FDA 2	1	0,3 – 0,4	D₀=0,4 mm; D₁₀=0,87 mm; D₆₀=1,45 mm; D₁₀₀=1,7 mm; CD=1,67		
	2	0,4 – 0,5	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>LEGENDA: D₀: diâmetro do menor grão; D₁₀: diâmetro efetivo; D₆₀: diâmetro tal que 60% do solo, em massa, têm diâmetros menores que ele (mm); D₁₀₀= diâmetro do maior grão; CD: coeficiente de desuniformidade.</p> </div>		
	3	0,5 – 0,6			
	4	0,6 – 0,8			
	5	0,8 – 1,0			
	6	1,0 – 1,2			
D₀=0,3 mm; D₁₀=0,57 mm; D₆₀=1,05 mm; D₁₀₀=1,2 mm; CD=1,84					

De acordo com Duarte (2018), as características da Tabela 3.4 foram estabelecidas visando adequar o sistema de drenagem dos FDA com placa perfurada com furos de Ø 9m, com densidade de furos de 190 furos/m², ao sistema em escala real, blocos cerâmicos leopold, atualmente blocos universais em plásticos polipropileno.

Segundo Duarte (2018) *apud* Kawamura (2000), para filtros rápidos de areia, recomenda-se que a grandeza L/d_{10} (sendo L a espessura da camada de areia) seja superior a 1.000. Dessa forma, os cálculos para os filtros de areia da IPDF: FRDA1, FRDA2 e FRDA3, L/d_{10} apresentaram os valores de 1.400, 1.200 e 800, respectivamente. Os cálculos são mostrados nas Equações 1, 2 e 3.

$$\frac{L}{d_{10}} = \frac{700mm}{0,5mm} = 1.400 \quad (\text{Eq.1})$$

$$\frac{L}{d_{10}} = \frac{700mm}{0,57mm} \approx 1.200 \quad (\text{Eq.2})$$

$$\frac{L}{d_{10}} = \frac{700mm}{0,87mm} \approx 800 \quad (\text{Eq.3})$$

3.3 Medida das perdas de cargas nos filtros FAP E FRDA

A medição da perda de carga foi realizada ao longo das carreiras de filtração através da verificação da pressão estática nos piezômetros instalados nos filtros. A Figura 3.9 detalha e identifica as posições dos piezômetros nos FAP no sentido ascendente por P₀, P₁, P₂, P₃ e P₄ e nos FDA, também no sentido ascendente por P₀, P₁ e P₂ (base, interface camada suporte e camada filtrante e acima da camada filtrante) (DUARTE, 2011 e DUARTE, 2018).

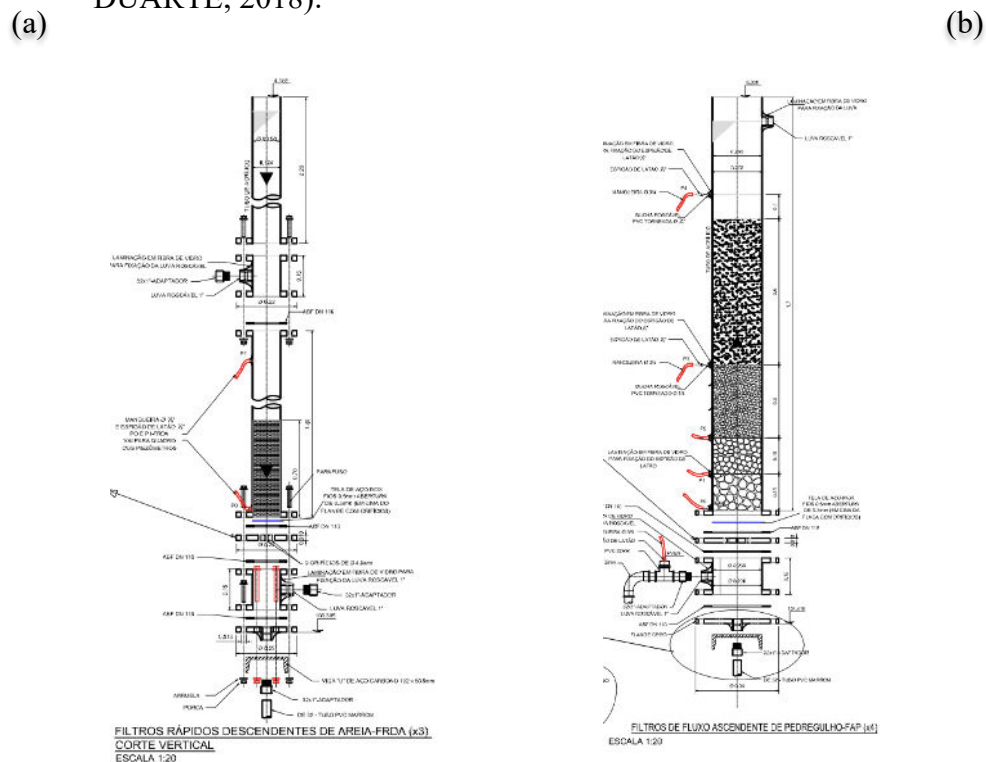


Figura 3.9 - Desenho esquemático dos filtros: (a) Filtro descendente de areia; (b) Filtro ascendente de pedregulho (Duarte, 2018).

3.4. Ensaios na IPDF

Os ensaios foram realizados em duas configurações distintas, tendo ambas carreiras de filtração com duração de 8 horas. Na primeira configuração, correspondendo ao processo de filtração direta e a segunda configuração, correspondendo a dupla filtração. Para ambas as configurações foram fixadas a dose de cloro na etapa de pré-oxidação de 3 mg/L, a dose de coagulante hidróxido cloreto de alumínio (PAC-23%) de 6 mg/L para coagulação e na etapa de mistura rápida foram utilizados o gradiente de velocidade de 1000 m/s.m e rotação do motor de 430 rpm controlados por um inversor de frequência.

Como também, foram testadas quatro taxas de filtração, com tempo de contato na pré-oxidação e tempo de mistura rápidas distintos, conforme a Tabela 3.5. Em seguida serão descritas as configurações utilizadas na estação piloto para o presente estudo.

Tabela 3.5 - Valores das taxas de filtração dos FAP e FDA, tempos de contato na pré-oxidação e tempo de mistura rápida.

Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia) FAP	Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia) FDA	Tempo de contato (POX) (min)	*TMR (s)
190	253	26	30
210	280	24	27
230	310	22	24
255	340	20	22

3.4.1 Filtração Direta

Os ensaios de filtração direta foram realizados nos períodos de março a julho de 2017, envolvendo as etapas de pré-oxidação, coagulação e filtração descendente em filtros de leito simples de areia. Com isso, algumas unidades da IPDF foram desativadas provocando o transpasse da água a ser tratada nas etapas escolhidas, como mostra o fluxograma na Figura 3.10.

No início de cada carreira de filtração, os filtros eram lavados com expansão da altura do meio filtrante em 25 % por 8 minutos. Após a lavagem dos filtros a bomba de recalque de água bruta alimentava duas caixas de pré-oxidação, onde foi adicionada uma solução clorada a água bruta. Em seguida, a água era bombeada para a caixa de mistura rápida, recebendo a dose de coagulante. Os níveis dos piezômetros foram verificados, observando se as cotas dos mesmos se igualavam para a condição estática (vazão de alimentação nula).

Em seguida, a água coagulada era direcionada para os filtros descendentes de areia abrindo o registro de entrada para os três FRDA. Os registros de saída de água filtrada eram abertos para que fosse iniciado o processo de filtração. Uma vez estabilizado o nível d'água nos filtros era iniciado o tempo da carreira de filtração. Uma hora após o seu início, era efetuada a primeira coleta de amostras de água filtrada e de água bruta, logo após efetuava-se a primeira leitura dos piezômetros dos três FRDA. As coletas da água filtrada e a leitura dos piezômetros foram efetuados a cada hora, como também, foi verificando a vazão dos filtros através dos rotâmetros, a fim de assegurar que a vazão de alimentação estivesse garantindo a taxa de filtração desejada.

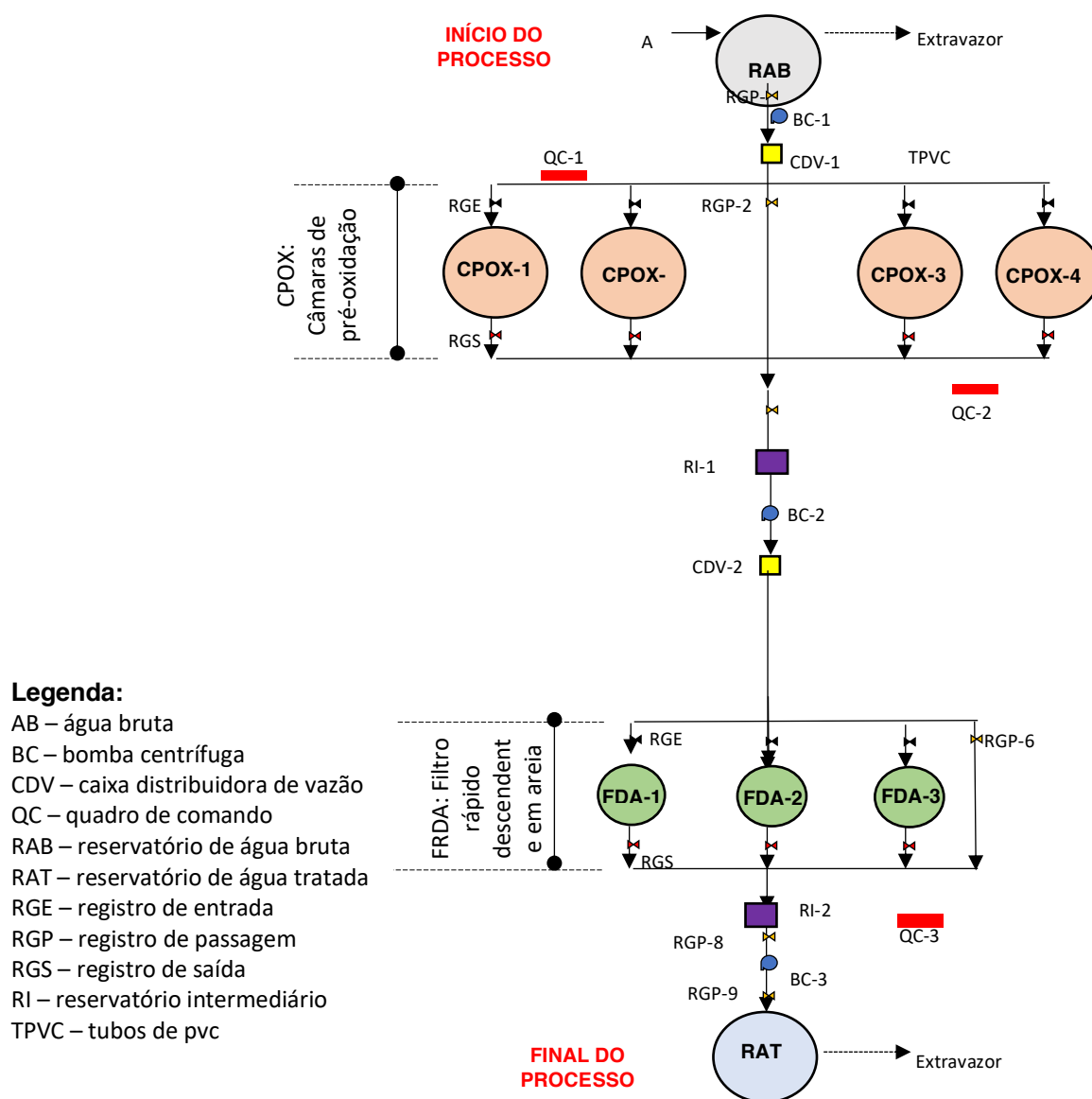


Figura 3.10 - Fluxograma do IPDF na configuração utilizada para o processo de filtração direta.

A interrupção da carreira de filtração era definida pela ocorrência de turbidez da água filtrada superior a 1,0 UNT ou perda de carga superior ao limite estabelecido pelo sistema. No encerramento da carreira de filtração de um filtro qualquer, era realizado a sua lavagem.

Para os ensaios na IPDF com configuração para o processo em filtração direta foram testados quatro níveis para as taxas de filtração, descrito na Tabela 3.5 e três níveis de granulometria, representados nos três filtros rápidos descendentes de areia, descritos nas Tabelas 3.3 e 3.4. Com isso, foi realizado um delineamento split-plot apresentando 12 blocos de ensaios, tendo o fator de controle correspondendo a taxa de filtração sido aleatorizado na parcela de cada bloco, devido a dificuldade na sua alteração nos ensaios, com os três FRDA sendo utilizados ao mesmo tempo, facilitando a sua aleatorização na subparcela de cada bloco de experimentos. No total foram

realizados 36 ensaios, sendo cada ensaio realizado com duas réplicas, como mostra a Tabela 3.6. O tempo da carreira de filtração de 8 horas foi considerada como fator de ruído, afim de observar como os fatores de controle, taxa de filtração e granulometria se comportavam ao longo do tempo de filtração.

Tabela 3.6 - Planejamento experimental para os ensaios na IPDF na configuração de filtração direta.

Blocos	Ensaio	FRDA (G-Tx)	Blocos	Ensaio	FRDA (G-Tx)	Blocos	Ensaio	FRDA (G-Tx)
	1	FRDA (1-253)		13	FRDA (1-253)		25	FRDA (1-253)
1	2	FRDA (2-253)	5	14	FRDA (2-253)	9	26	FRDA (2-253)
	3	FRDA (3-253)		15	FRDA (3-253)		27	FRDA (3-253)
	4	FRDA (1-280)		16	FRDA (1-280)		28	FRDA (1-280)
2	5	FRDA (2-280)	6	17	FRDA (2-280)	10	29	FRDA (2-280)
	6	FRDA (3-280)		18	FRDA (3-280)		30	FRDA (3-280)
	7	FRDA (1-310)		19	FRDA (1-310)		31	FRDA (1-310)
3	8	FRDA (2-310)	7	20	FRDA (2-310)	11	32	FRDA (2-310)
	9	FRDA (3-310)		21	FRDA (3-310)		33	FRDA (3-310)
	10	FRDA (1-340)		22	FRDA (1-340)		34	FRDA (1-340)
4	11	FRDA (2-340)	8	23	FRDA (2-340)	12	35	FRDA (2-340)
	12	FRDA (3-340)		24	FRDA (3-340)		36	FRDA (3-340)

3.4.2 Dupla Filtração

Os ensaios de dupla filtração foram realizados nos períodos de março a agosto de 2017 envolvendo as etapas de pré-oxidação, coagulação, filtração em filtros ascendentes de pedregulho e filtração descendente em filtros de areia. Com isso, algumas unidades da IPDF foram desativadas provocando o transpasse da água a ser tratada nas etapas escolhidas, como mostra o fluxograma na Figura 3.11.

No início de cada carreira de filtração, os FRDA eram lavados com expansão de 25 % do meio filtrante por 8 minutos, assim como os FAP também era lavados por 8 minutos. Após lavagem, a bomba de recalque de água bruta alimentava a caixa de pré-oxidação, onde era adicionada uma solução clorada a água bruta. Em seguida a mesma era bombeada para a caixa de mistura

rápida, onde a água bruta recebia a dose de coagulante. Os níveis dos piezômetros foram verificados, observando se as cotas dos mesmos se igualavam para a condição estática (vazão de alimentação nula).

Em seguida, a água coagulada era direcionada para os filtros ascendentes de pedregulho, sendo usado um FAP por ensaio. Após o preenchimento do FAP era considerado o início da pré-filtração, em que a água pré-filtrada era direcionada para os três filtros descendentes de areia abrindo-se o registro de entrada para os mesmo. Os registros de saída de água filtrada eram abertos para que se iniciasse o processo de filtração. Uma vez estabilizado o nível d'água nos filtros era iniciado o tempo da carreira de filtração. Uma hora após o seu início, era efetuada a primeira coleta de amostras de água filtrada e de água bruta, logo após efetuava-se a primeira leitura dos piezômetros do FAP e dos três FRDA. As coletas da água filtrada e a leitura dos piezômetros foram efetuados a cada hora, como também, foram verificados a vazões dos filtros, a fim de assegurar que a vazão de alimentação estivesse garantindo a taxa de filtração desejada.

A interrupção da carreira de filtração no FRDA era definida pela ocorrência de turbidez da água filtrada superior a 1,0 UNT ou pela perda de carga superior ao limite estabelecido pelo sistema. Na interrupção da carreira de filtração de um filtro qualquer, era realizado a sua lavagem. Para o FAP, a descarga de fundo intermediária (DFI) era realizada assim que a turbidez remanescente do FAP se elevava 50 % quando comparado a turbidez da coleta anterior.

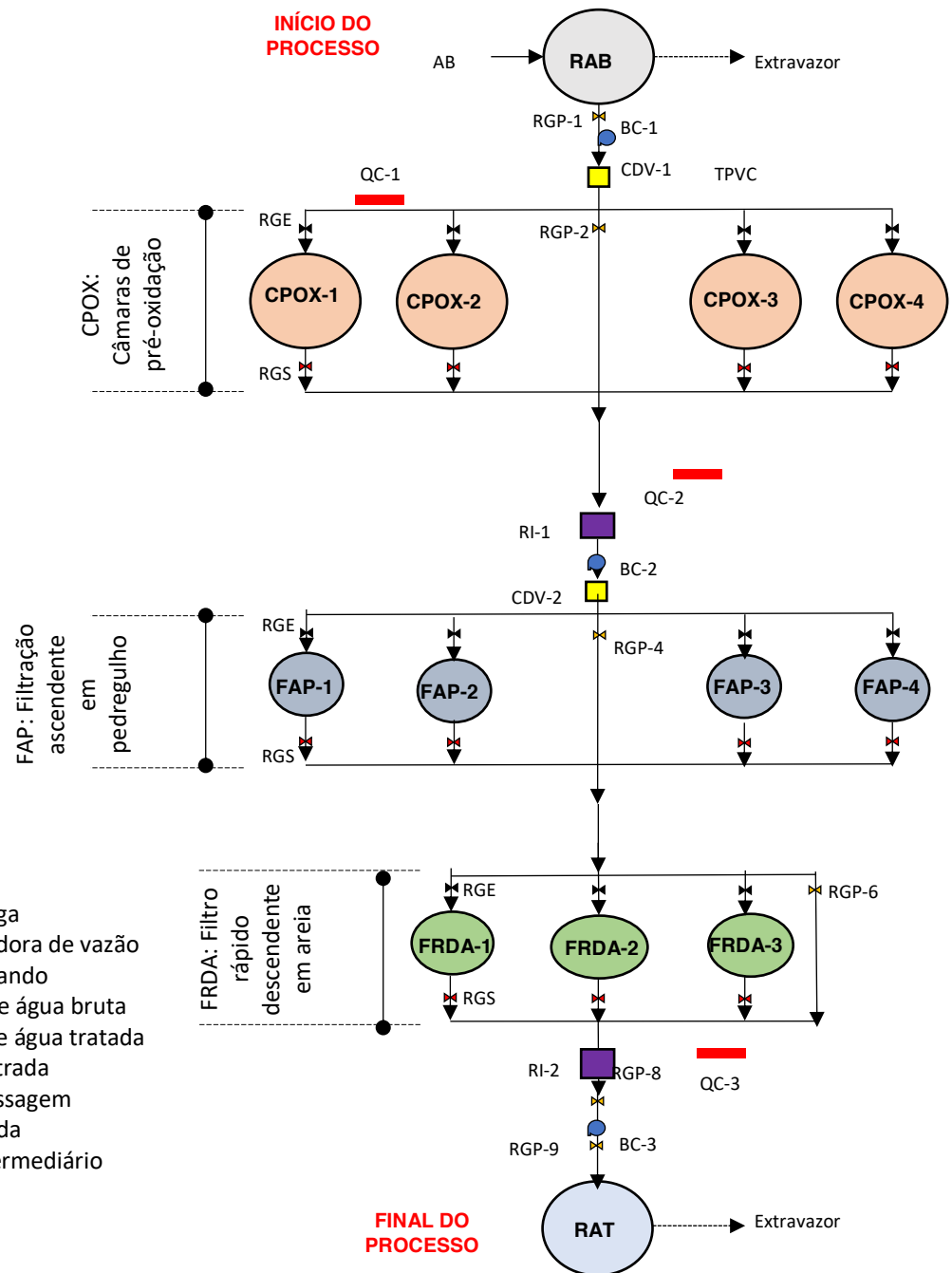


Figura 3.11 - Fluxograma do IPDF na configuração utilizada para o processo de dupla filtração.

Para os ensaios na IPDF com configuração para o processo em dupla filtração foram testados quatro níveis para as taxas de filtração, descritos na Tabela 3.5, quatro níveis de granulometria dos filtros ascendentes em pedregulho, descritos na Tabela 3.2 e três níveis de granulometria, representados nos três filtros rápidos descendentes de areia, descritos nas Tabelas 3.3 e 3.4. Com isso, foi realizado um delineamento split-split-plot apresentando 16 ensaios, sendo cada ensaio realizado com uma réplica, totalizando 32 ensaios como mostra a Tabela 3.7. Na parcela de cada bloco foram realizadas aleatorização dos níveis dos fatores de controle correspondentes a granulometria do FAP e a taxa de filtração, devido as dificuldades de alterar os níveis desses fatores nos

ensaios, enquanto na subparcela os três FRDA foram utilizados ao mesmo tempo, facilitando a sua aleatorização na subparcela de cada bloco de experimentos. O tempo da carreira de filtração de 8 horas foi considerado como fator de ruído.

Tabela 3.7 - Planejamento experimental para os ensaios na IPDF na configuração de dupla filtração

Ensaio	FAP (G-Tx)	FRDA (G-Tx)	Ensaio	FAP (G-Tx)	FRDA (G-Tx)
1	FAP (1-190)	FRDA (1-253)	9	FAP (1-230)	FRDA (1-310)
		FRDA (2-253)			FRDA (2-310)
		FRDA (3-253)			FRDA (3-310)
2	FAP (2-190)	FRDA (1-253)	10	FAP (2-230)	FRDA (1-310)
		FRDA (2-253)			FRDA (2-310)
		FRDA (3-253)			FRDA (3-310)
3	FAP (3-190)	FRDA (1-253)	11	FAP (3-230)	FRDA (1-310)
		FRDA (2-253)			FRDA (2-310)
		FRDA (3-253)			FRDA (3-310)
4	FAP (4-190)	FRDA (1-253)	12	FAP (4-230)	FRDA (1-310)
		FRDA (2-253)			FRDA (2-310)
		FRDA (3-253)			FRDA (3-310)
5	FAP (1-210)	FRDA (1-280)	13	FAP (1-255)	FRDA (1-340)
		FRDA (2-280)			FRDA (2-340)
		FRDA (3-280)			FRDA (3-340)
6	FAP (2-210)	FRDA (1-280)	14	FAP (2-255)	FRDA (1-340)
		FRDA (2-280)			FRDA (2-340)
		FRDA (3-280)			FRDA (3-340)
7	FAP (3-210)	FRDA (1-280)	15	FAP (3-255)	FRDA (1-340)
		FRDA (2-280)			FRDA (2-340)
		FRDA (3-280)			FRDA (3-340)
8	FAP (4-210)	FRDA (1-280)	16	FAP (4-255)	FRDA (1-340)
		FRDA (2-280)			FRDA (2-340)
		FRDA (3-280)			FRDA (3-340)

3.5. Análise estatística dos dados

Para a análise dos resultados foi utilizado o software livre RStudio versão 1.2.5001 (2019) no qual foram calculados parâmetros estatísticos, tais como, média aritmética para estimar a tendência central, o intervalo máximo e mínimo, e a ANOVA. Os efeitos principais e de interação, entre as características do meio filtrante, das taxas de filtração, o tempo de filtração e a qualidade da água tratada, foram analisados com um intervalo de confiança de 95 %. Nessa análise o tempo de filtração era considerado como um fator de ruído para avaliar a robustez dos processos. Para essa avaliação foi utilizado o delineamento splitplot para a configuração da filtração direta e o delineamento split-split plot para a configuração de dupla filtração, em que seus respectivos scripts estão nos anexos 1 e 2.

Na elaboração do script para o processo de filtração direta, foi criado um pseudo fator chamado “trat”, que corresponde a relação entre os fatores de controle (taxa de filtração e granulometria dos filtros rápidos descendentes de areia). Enquanto, para a elaboração do script para o processo de dupla filtração foi criado um pseudo fator chamado “dummy”, que corresponde à relação entre os fatores de controle (taxa de filtração e granulometria dos filtros ascendentes de pedregulho).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

O presente capítulo está dividido em duas partes. Na primeira parte são discutidos os resultados referente às características da água bruta. Em seguida, é realizada a avaliação da robustez dos resultados obtidos nas configurações de filtração direta e dupla filtração.

4.1. Características da água bruta

A Tabela 4.1 mostra as características da água bruta para os períodos em que os experimentos foram realizados.

Tabela 4.1 - Características da água bruta para os ensaios em filtração direta (FD) e dupla filtração (DF).

Variável	Mínimo		Média		Máximo		Desvio Padrão		Freitas (2017)
	FD	DF	FD	DF	FD	DF	FD	DF	
Temperatura (°C)	26	23,8	27	27,7	28	32,9	1,0	1,4	-
pH	7,56	7,3	7,70	7,3	7,80	8,3	0,1	0,2	7,36-7,72
Turbidez (UNT)	2,20	1,7	3,16	3,9	6,37	8,3	1,1	1,2	1,3-2,4
Cor Aparente (uH)	22	42	27	30	35	42	4,0	5	19-24
Cor Verdadeira (uH)	8	7	13	14	24	26	5,0	6	-
ABS ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0,09	0,02	0,16	0,16	0,18	0,21	0,1	0,03	-

Observa-se, na Tabela 4.1, que os resultados obtidos são semelhantes aos obtidos por Freitas (2017) em estudos realizados na Lagoa de Extremoz, mostrando características de baixa turbidez, cor aparente elevada e pH levemente alcalino. Como também, água bruta apresentou características semelhantes nos ensaios realizados em ambas configurações.

4.2. Avaliação da Robustez das variáveis de controle

4.2.1 Filtração direta

Com o objetivo de avaliar a robustez e encontrar a condição menos sensível a variações no experimento, foram avaliados para cada variável resposta quais efeitos e interações foram significativas, considerando o tempo de filtração como um fator. Cada parâmetro foi analisado separadamente.

Na Tabela 4.2, é mostrada a análise de variância do parâmetro Turbidez. Observando a Tabela 4.2, avaliando o valor p, verifica-se nas parcelas que os efeitos principais e sua interação não apresentaram significância estatística. Contudo, na sub-parcela, o efeito de interação de segunda ordem entre o tempo de filtração e a taxa de filtração são estatisticamente significantes ($p < 0,05$). Isto indica que a relação entre o tempo e a taxa de filtração apresentam maior influência nos resultados da turbidez do que a granulometria dos filtros.

Tabela 4.2 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Turbidez

Error: Parcela (Replica:trat)					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
TXT	2,361	3	0,7872	0,651	0,591
FDA	2,241	2	1,1205	0,927	0,411
TXT:FDA	0,261	6	0,0435	0,036	1,000
Resíduo	26,595	22	1,2089		
Error: Subparcela					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Tempo	0,844	7	0,12052	0,975	0,4511
Tempo:TXT	4,270	21	0,20335	1,645	0,0446
Tempo:FDA	0,929	14	0,06636	0,537	0,9085

Tabela 4.2 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Turbidez

Tempo:TXT:FDA	1,689	42	0,040021	0,325	1,00000
Resíduo	20,763	168	0,12359		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração

A Figura 4.1 mostra a relação de segunda ordem entre tempo de filtração e taxa de filtração. Observa-se que as taxas de filtração nos valores de 310 e 340 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ apresentaram uma significativa variação no seu comportamento nas 8 horas do tempo de filtração. Contudo, as taxas de filtração de 253 e 280 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ apresentaram uma menor variação nos seus resultados ao longo da carreira de filtração indicando que essas taxas de filtração são menos sensíveis ao longo da carreira de filtração, tendo a taxa de filtração de 280 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ apresentado os menores valores médios de turbidez ao longo das 8 horas de carreira de filtração.

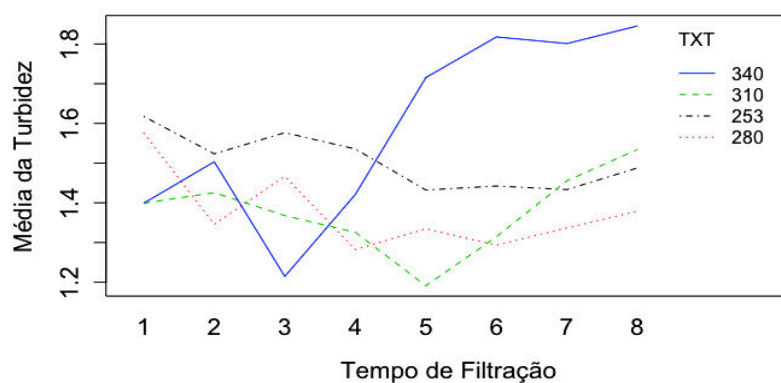


Figura 4.1 - Gráfico da interação de segunda ordem entre a taxa de filtração e o tempo de filtração.

A Figura 4.2 apresenta os gráficos de resíduos dos resultados da análise de turbidez. Observa-se que em grande parte os resultados aparecem aleatoriamente dispersos em ambos os lados e próximos de zero (Figura 4.2 (a) e (d)), como também, os resíduos ao serem padronizados, apresentaram seus valores distribuídos aleatoriamente próximo de 1 com uma pequena inclinação positiva. Os resultados seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.2 (b)). Na Figura 4.2 (c), percebe-se que a maior densidade dos valores obtidos para a turbidez estão entre os valores 1,0 e 1,5, com uma baixa dispersão dos resultados. Contudo, nota-se nos gráficos a existência de pontos distantes da curva, em que o ponto mais elevado pode estar relacionado com uma lavagem do filtro, realizada de modo ineficiente, antes de iniciar o

ensaio e os valores mais baixos podem estar relacionados com a complementação do meio filtrante, que tinha sido perdida após a lavagem dos filtros no ensaio anterior.

Entretanto, para todas as taxas de filtração estudadas as médias dos valores de turbidez estão acima do valor permitido pelo anexo XX da Portaria da Consolidação nº 5/2017 (BRASIL, 2017).

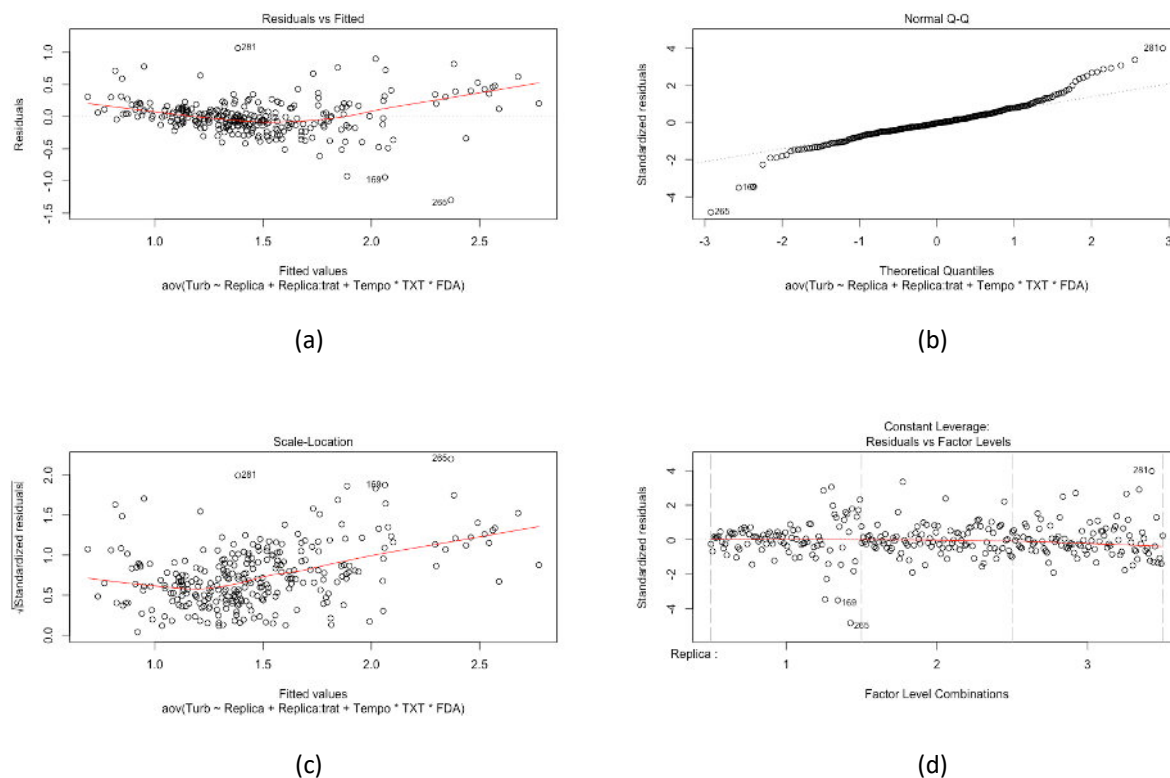


Figura 4.2 - Gráficos de resíduos para a variável resposta turbidez. (a) Gráfico de resíduos em função dos valores ajustados; (b) Gráfico de probabilidade normal; (c) Gráfico de resíduos padronizados em função dos valores ajustados; e (d) Gráfico de resíduos padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.3 mostra a análise de variância para o parâmetro de cor aparente. Observa-se na Tabela 4.3, avaliando o valor p , que o efeito principal da parcela taxa de filtração e da subparcela de tempo de filtração foram estatisticamente significativos. Como nenhuma interação foi estatisticamente significativa, os efeitos de ambos os fatores serão analisados separadamente, observando seu comportamento em relação aos resultados obtidos nos ensaios.

Observa-se na Figura 4.3 (a), a relação entre os níveis das taxas de filtração estudados e os resultados da cor aparente. Este gráfico é semelhante ao que foi obtido por Lima (2019), em que as taxas de filtração de 253 e 280 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ apresentaram comportamentos diferentes das

taxas de 310 e 340 m³/m².dia, enquanto estes apresentaram comportamentos estatísticos semelhantes entre si. O valor médio mais alto foi obtido para a taxa de filtração de 253 m³/m².dia, com este estando acima do valor permitido pela Portaria da Consolidação n° 5/2017 (BRASIL, 2017). Para as outras taxas, os valores médios obtidos estão dentro das especificações da Portaria da Consolidação n° 5/2017 (BRASIL, 2017), tendo o menor valor médio obtido na taxa de filtração de 280 m³/m².dia.

Tabela 4.3 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Cor Aparente

Error: Parcela (Replica:trat)					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
TXT	1446,4	3	482,1	9,125	0,000409
FDA	27,3	2	13,6	0,258	0,774647
TXT:FDA	6,4	6	1,1	0,020	0,999956
Resíduo	1162,4	22	52,8		
Error: Subparcela					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Tempo	92,6	7	13,222	4,662	8,5x10 ⁻⁵
Tempo:TXT	72,2	21	3,436	1,212	0,247
Tempo:FDA	13,3	14	0,951	0,335	0,988
Tempo:TXT:FDA	63,7	42	1,516	0,535	0,991
Resíduo	476,4	168	2,836		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração

Na Figura 4.3 (b), tem-se a relação entre os resultados da cor aparente em função do tempo de filtração. Observa-se que ao longo do tempo os valores médios para a cor aparente encontram-se abaixo 15 uH, dentro das especificações da Portaria da Consolidação nº 5/2017 (BRASIL, 2017), com baixa variação nas duas primeiras horas de ensaio. Contudo, no período das 3 horas apresentou menor média nos resultados, em seguida, os valores médios para a cor aparente apresentaram um aumento no decorrer do tempo do ensaio de filtração. Isto, pode estar associado com o acúmulo de impurezas que são retidas ao longo do meio filtrante no decorrer da carreira de filtração. Com o passar do tempo da carreira de filtração ocorre a diminuição na eficiência do filtro e quando estiver saturado, o processo de filtração deve ser interrompido para ser realizado a sua lavagem. Contudo, nos ensaios de 8 horas somente o filtro 1 saturou e precisou ser lavado.

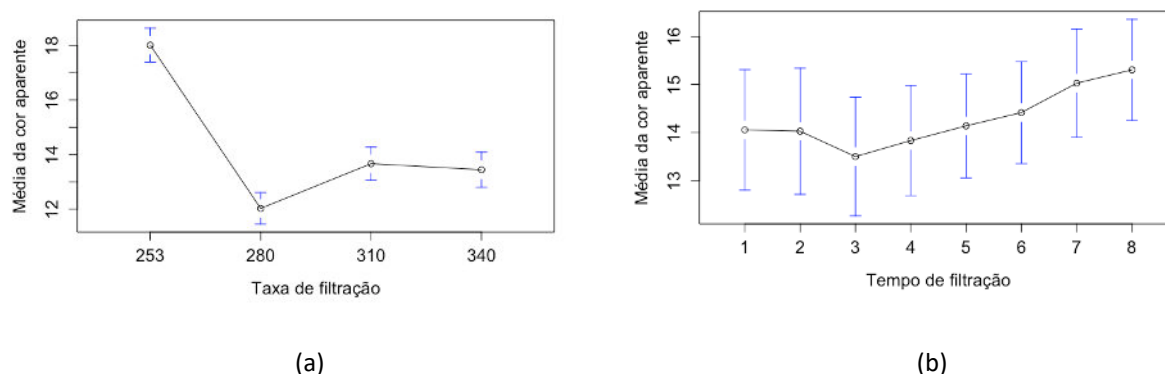


Figura 4.3 - Gráficos que relacionam (a) os níveis das taxas de filtração com o valor médio da cor aparente; e (b) os níveis do tempo de filtração com o valor médio da cor aparente.

A Tabela 4.4 mostra a análise de variância para o parâmetro de cor verdadeira. Observa-se, avaliando o valor p , que somente na parcela o efeito principal taxa da filtração foi estatisticamente significativos.

A Figura 4.4, mostra o gráfico da relação os valores médios da cor verdadeira em função dos níveis das taxas de filtração. Em ambas as taxas de filtração estudadas apresentaram comportamentos diferentes. O valor médio mais alto foi obtido para a taxa de filtração de $253 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, enquanto o menor valor de cor verdadeira foi obtido para a taxa de filtração de $280 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Tal comportamento se assemelha ao comportamento obtido para a cor aparente.

Tabela 4.4 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Cor Verdadeira

Error: Parcela (Replica:trat)					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
TXT	294,1	3	98,02	6,624	0,00234
FDA	9,5	2	4,76	0,322	0,72809
TXT:FDA	2,9	6	0,48	0,032	0,99982
Resíduo	325,5	22	14,80		

Error: Subparcela					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Tempo	9,64	7	1,3765	1,590	0,141
Tempo:TXT	19,46	21	0,9268	1,071	0,384
Tempo:FDA	12,58	14	0,8988	1,038	0,418
Tempo:TXT:FDA	23,03	42	0,5483	0,633	0,958
Resíduo	145,42	168	0,8656		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro rápido descendente de areia*; Tempo - tempo da carreira de filtração

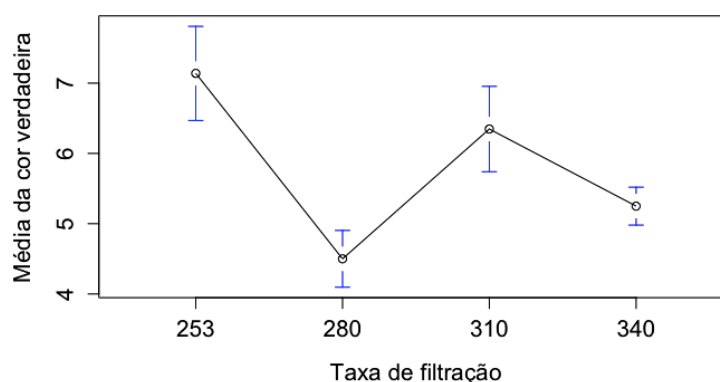


Figura 4.4 - Gráficos que relacionam os níveis das taxas de filtração com o valor médio da cor verdadeira.

A Tabela 4.5 mostra a análise de variância para o parâmetro de absorvância de comprimento de onda 254 nm. Observa-se, avaliando o valor p ($p < 0,05$), que na parcela o efeito principal taxa de filtração e que na sub-parcela o efeito principal tempo de filtração foram estatisticamente significativos. Como nenhuma interação foi estatisticamente significativa, os efeitos de ambos os fatores serão analisados separadamente, observando seu comportamento em relação aos resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 4.5 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para o ABS 254

Error: Parcela (Replica:trat)					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
TXT	0,017869	3	0,005956	11,925	7,62x10-5
FDA	0,000676	2	0,000338	0,676	0,519
TXT:FDA	0,000424	6	0,000071	0,142	0,989
Resíduo	0,010989	22	0,0000499		
Error: Subparcela					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Tempo	0,000789	7	1,12x10-4	2,727	0,0105
Tempo:TXT	0,001269	21	6,045x10-5	1,463	0,0967
Tempo:FDA	0,000763	14	5,451x10-5	1,319	0,2005
Tempo:TXT:FDA	0,001137	42	2,707x10-5	0,655	0,9459
Resíduo	0,006942	168	4,132x10-5		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro rápido descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração

A Figura 4.5 (a) mostra o gráfico da relação entre os valores médios da absorvância (254 nm) e o tempo de filtração. Observa-se, que houve uma pequena variação em torno do valor médio dos resultados para a absorvância, com uma diminuição nas três primeiras horas. Esses comportamentos foram semelhantes aos obtidos para a cor aparente, indicando uma diminuição de substâncias orgânicas que absorvem no comprimento de onda de 254 nm e que dão coloração a água. Contudo, nas horas seguintes ocorre um aumento no valor médio da absorvância (254 nm), indicando uma diminuição na eficiência do filtro devido ao acúmulo de impurezas.

Enquanto, a Figura 4.5 (b) mostra o gráfico da relação entre os valores médios da absorvância (254 nm) em função das taxas de filtração estudadas, repara-se, que ocorreu uma variação significativa, tendo a taxa de 253 m³/m².dia apresentado o maior valor médio entre as taxas estudadas e a taxa de 280 m³/m².dia apresentou o valor médio mais baixo entre as taxas estudadas. Esses comportamentos foram semelhantes aos comportamentos obtidos para a cor verdadeira, indicando que a taxa de filtração de 280 m³/m².dia foi a que obteve maior redução de espécies que dão coloração a água.

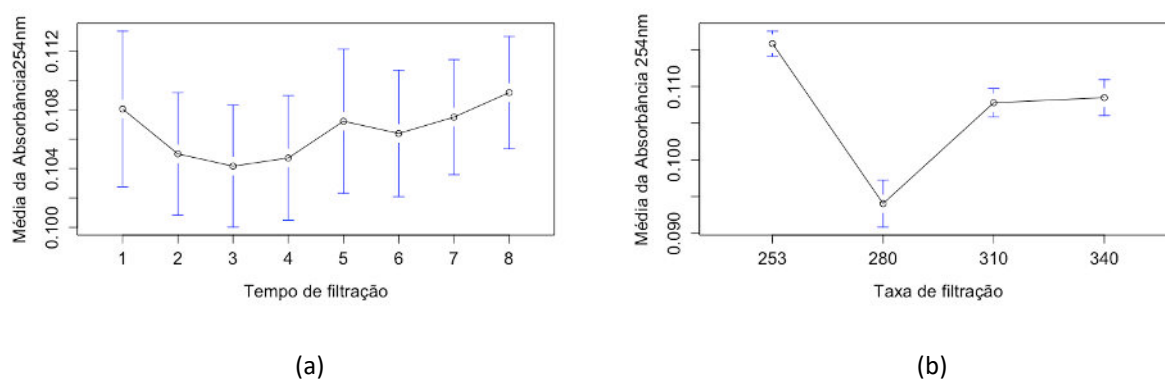


Figura 4.5 - (a) Gráfico da relação entre as médias da absorvância (ABS) em função do tempo de filtração; (b) Gráfico da relação entre as médias da absorvância (ABS) em função da taxa de filtração.

A Tabela 4.6 mostra a análise de variância para o parâmetro da matriz orgânica natural. Observa-se, avaliando o valor p ($p < 0,05$), que somente na sub-parcela o efeito principal tempo de filtração foi estatisticamente significativos.

A Figura 4.6 mostra o gráfico da relação entre o valor médio da matéria orgânica natural em função tempo da carreira de filtração. Observa-se, que não houve uma variação significativa uma vez que os intervalos de confiança se sobrepõem. Contudo, apresentaram comportamentos semelhantes aos parâmetros de cor aparente e da absorvância (254nm) em que ocorre uma diminuição no valor médio nas três horas iniciais do processo de filtração e em seguida ocorre um

aumento no valor do mesmo. Isto indica que no início da filtração ocorre uma maior redução na presença de matéria orgânica natural, que ocasiona uma coloração a água, no início do processo de filtração. Porém, com o passar do tempo, o filtro se torna mais sujo devido à medida que retém as impurezas, diminuindo remoção da mataria orgânica.

Tabela 4.6 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a MON.

Error: Parcela (Replica:trat)					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
TXT	27,07	3	9,024	2,458	0,0898
FDA	0,97	2	0,483	0,131	0,8775
TXT:FDA	4,65	6	0,776	0,211	0,9694
Resíduo	80,77	22	3,672		
Error: Subparcela					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Tempo	1,939	7	0,27703	2,656	0,0125
Tempo:TXT	2,534	21	0,12067	1,157	0,2958
Tempo:FDA	1,377	14	0,09837	0,943	0,5143
Tempo:TXT:FDA	4,003	42	0,9531	0,914	0,6244
Resíduo	17,526	168	0,10432		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia*; Tempo - tempo da carreira de filtração; MON - Matéria Orgânica Natural

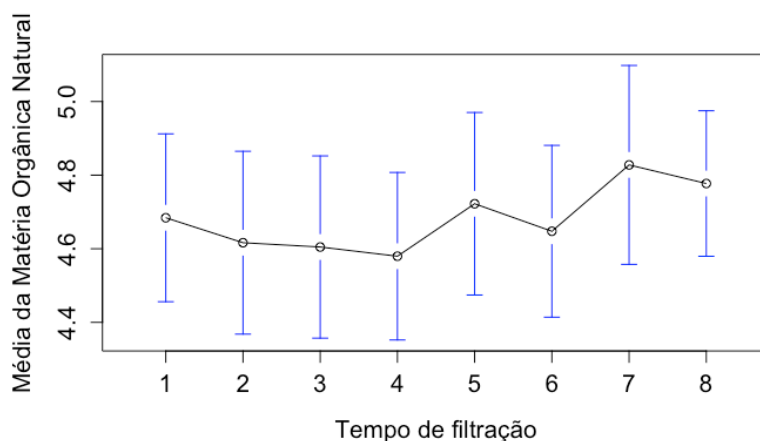


Figura 4.6 - Gráfico que relaciona as médias da matéria orgânica natural com o tempo de filtração.

A Tabela 4.7 mostra a análise de variância para o parâmetro temperatura. Observa-se que os efeitos principais da parcela taxa de filtração e tipo de filtro, e que o efeito principal da subparcela tempo de filtração e a interação tempo de filtração e taxa de filtração foram estatisticamente significativos.

Tabela 4.7 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Temperatura

Error: Parcela (Replica:trat)					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Pr (>F)
TXT	15,581	3	5,194	3,716	0,0266
FDA	10,763	2	5,381	3,850	0,0368
TXT:FDA	2,374	6	0,396	0,283	0,9388
Resíduo	30,751	22	1,398		
Error: Subparcela					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Pr (>F)
Tempo	80,90	7	11,557	9,748	3,63x10 ⁻¹⁰
Tempo:TXT	84,57	21	4,027	3,397	4,98x10 ⁻⁰⁶

Tabela 4.7 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a Temperatura

Tempo:FDA	5,71	14	0,408	0,344	0,987
Tempo:TXT:FDA	8,91	42	0,212	0,179	1,000
Resíduo	199,18	168	1,186		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração

Na Figura 4.7 (a), mostra o gráfico da relação entre as médias dos filtros descendentes de areia e a temperatura. Nota-se que a uma diminuição no valor médio da temperatura de acordo com o tipo de filtro. Contudo, os intervalos e confiança se sobrepõem, indicando que não há uma diferença significativa entre os valores. Como foi informado no trabalho de Lima (2019), os ensaios foram realizados no período de transição entre verão e inverno no Nordeste e que nesse período a temperatura média na região foi de 28 °C, valor próximo a média dos resultados, indicando que a temperatura é influenciada pelo clima.

Já a Figura 4.7 (b), mostra a interação entre o tempo de filtração e a taxa de filtração. Observa-se uma variação significativa entre as taxas de filtração e o tempo de filtração. Com isso, não foi possível visualizar a robustez para este parâmetro, apesar do comportamento da temperatura ser semelhante para todas as taxas de filtração. Isto pode estar relacionado com período dos ensaios, que foram realizados iniciando no começo do turno matutino e finalizando no final do turno vespertino.

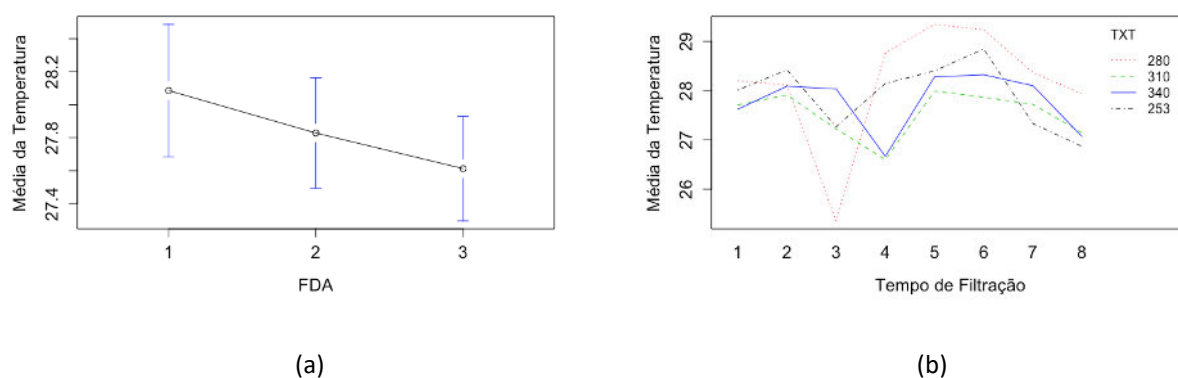


Figura 4.7 - (a) Gráfico da média da temperatura em função do tipo de filtro; (b) gráfico da interação entre tempo de filtração e taxa de filtração para a temperatura.

A Figura 4.8 apresenta os gráficos de resíduos dos resultados da análise da temperatura. Observa-se que grande parte dos resultados aparecem aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero (Figura 4.8 (a) e (d)), como também, estão espalhados de forma aleatória em relação à curva na Figura 4.8 (c) e que os resultados seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.8 (b)). Contudo, em todos os gráficos é possível verificar a existência de pontos distantes da curva. Tais pontos ao serem confrontados com a planilha de dados foram identificados, correspondendo a elevadas temperaturas que podem surgir no período do verão.

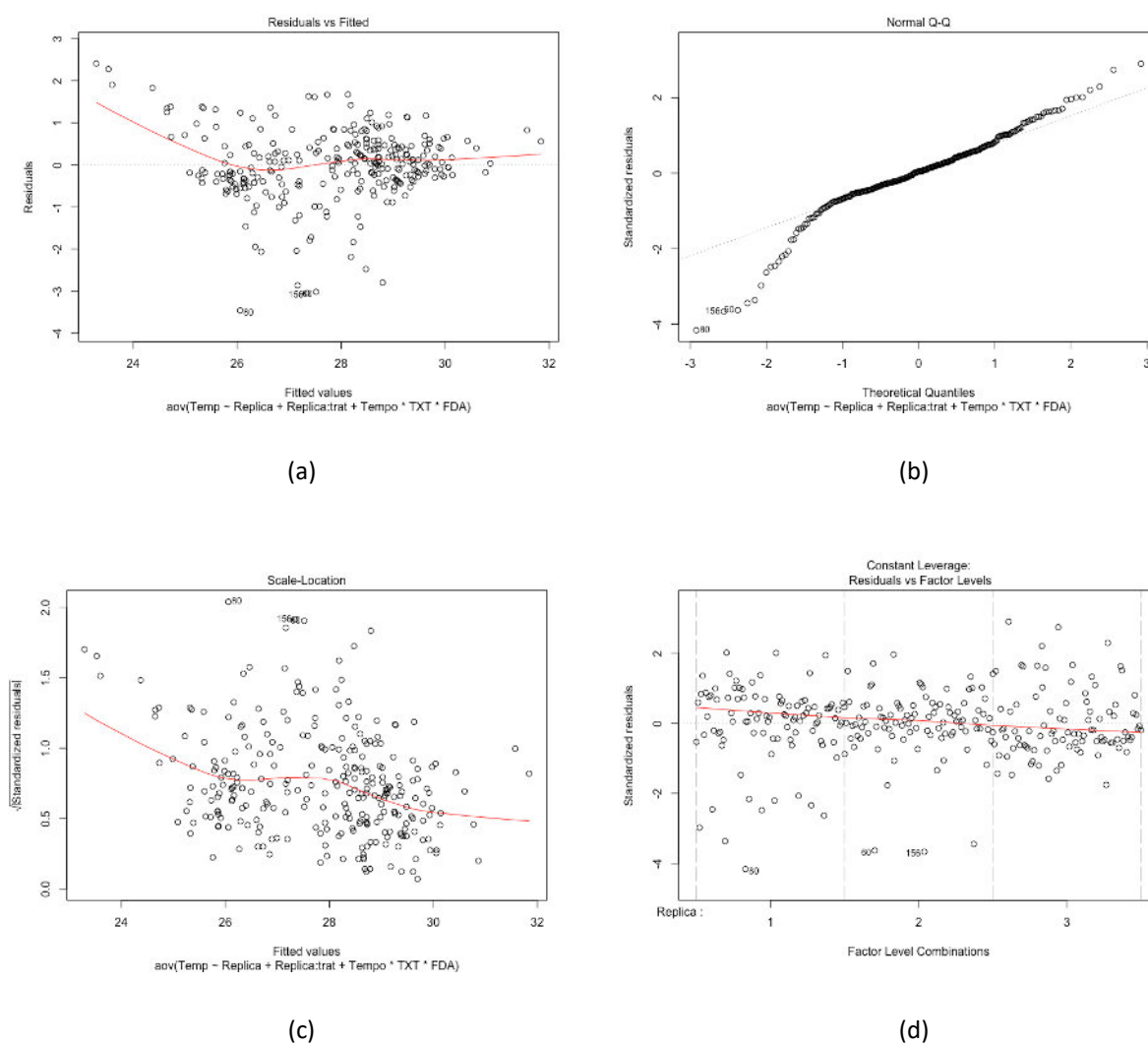


Figura 4.8 - Gráficos de resíduos para a variável resposta temperatura. (a) Gráfico de resíduos em função dos valores ajustados; (b) Gráfico de probabilidade normal; (c) Gráfico de resíduos padronizados em função dos valores ajustados; e (d) Gráfico de resíduos padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.8 mostra a análise de variância para o parâmetro pH. Observa-se que somente o efeito de interação tempo de filtração e taxa de filtração da sub-parcela foi estatisticamente significativos ($p < 0,05$).

Como somente a relação de segunda ordem entre tempo de filtração e taxa de filtração foi significativa, a partir desta interação foi gerado os gráficos da Figura 4.9. Nota-se, uma variação significativa no comportamento das curvas para todas as taxas estudadas. Contudo, a variação dos valores é pequena, devido, segundo Pavanelli (2001 *apud* Lima, 2019), ao coagulante hidroxicloreto de alumínio apresenta pouca variação no pH do meio, devido à hidrólise do hidroxicloreto que libera poucos íons H^+ no meio quando comparado a outros coagulantes, como o cloreto de alumínio, sulfato de alumínio e cloreto férrico.

Tabela 4.8 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para o pH

Error: Parcela (Replica:trat)					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
TXT	0,3975	3	0,13250	2,059	0,135
FDA	0,1631	2	0,08156	1,268	0,301
TXT:FDA	0,0515	6	0,00859	0,133	0,990
Resíduo	1,4155	22	0,06434		
Error: Subparcela					
Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Tempo	0,1696	7	0,02422	1,903	0,071897
Tempo:TXT	0,7539	21	0,03590	2,821	0,000116
Tempo:FDA	0,1020	14	0,00728	0,572	0,883992
Tempo:TXT:FDA	0,1304	42	0,00311	0,244	1,000000

Tabela 4.8 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para o pH

Resíduo	2,1385	168	0,01273
---------	--------	-----	---------

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração

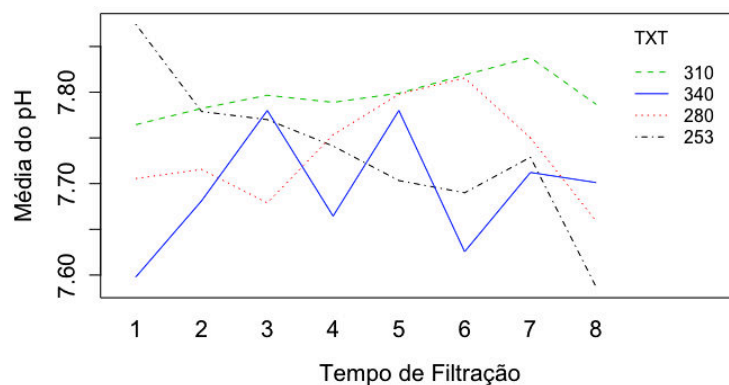
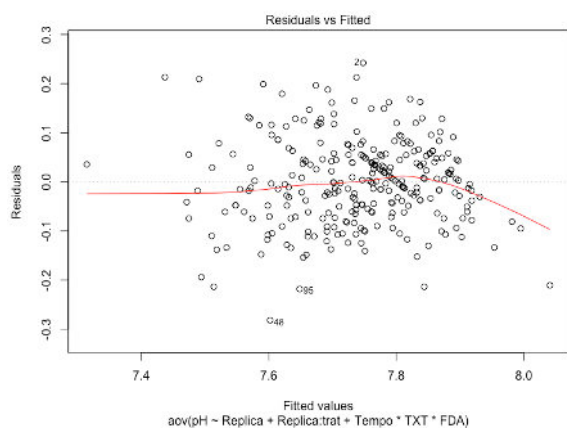
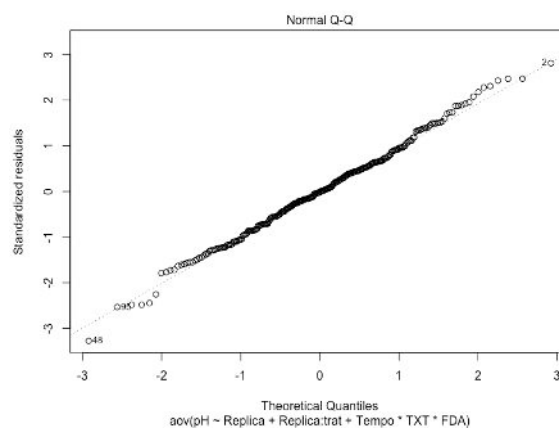


Figura 4.9 - Gráfico da interação entre tempo de filtração e taxa de filtração para o pH.

A Figura 4.10 apresenta os gráficos de resíduos dos resultados da análise de pH. Observa-se que grande parte dos resultados aparecem aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero (Figura 4.10 (a) e (d)), como também, estão espalhados de forma aleatória em relação a curva na Figura 4.10 (c) e que os resultados seguem uma distribuição normal devido os pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.10 (b)). Contudo, em todos os gráficos é possível verificar a existência de pontos distantes da curva. Tais valores podem ser influenciados pelo pH da água bruta.



(a)



(b)

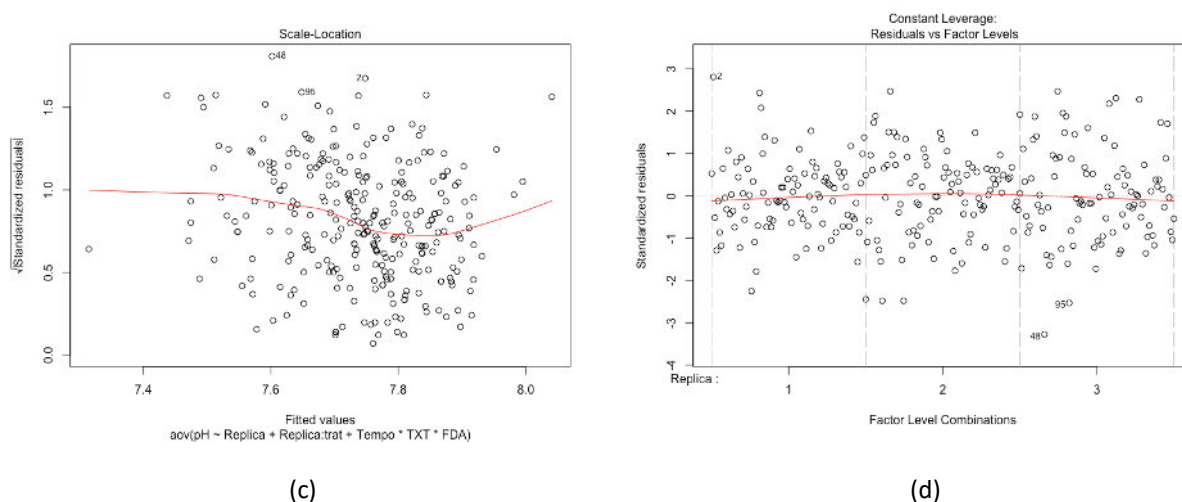


Figura 4.10 - Gráficos de resíduos para a variável resposta pH (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.9 mostra a análise de variância para o parâmetro da vazão. Observa-se, avaliando o valor de P ($p < 0,05$), que na parcela o efeito principal da taxa de filtração e na sub-parcela o efeito principal do tempo de filtração e os efeitos de interação entre tempo de filtração e taxa de filtração e tempo de filtração e granulometria foram estatisticamente significativos ($p < 0,05$).

Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a vazão

Error: Parcela (Replica:trat)					
Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade	Média Quadrática (MQ)	Valor de F	Valor de P
TXT	22697	3	7566	7,841	0,000969
FDA	3667	2	1833	1,900	0,173271
TXT:FDA	9491	6	1582	1,640	0,183527
Resíduo	21226	22	965		
Error: Subparcela					

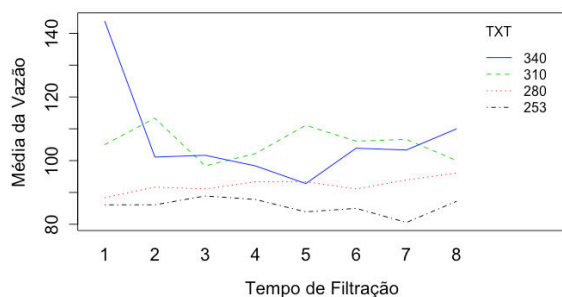
Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento splitplot para a vazão

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade	Média Quadrática (MQ)	Valor de F	Valor de P
Tempo	3197	7	456,7	2,238	0,03353
Tempo:TXT	14855	21	707,4	3,466	$3,4 \times 10^{-6}$
Tempo:FDA	7385	14	527,5	2,585	0,00212
Tempo:TXT:FDA	10690	42	254,5	1,247	0,16566
Resíduo	34285	168	204,1		

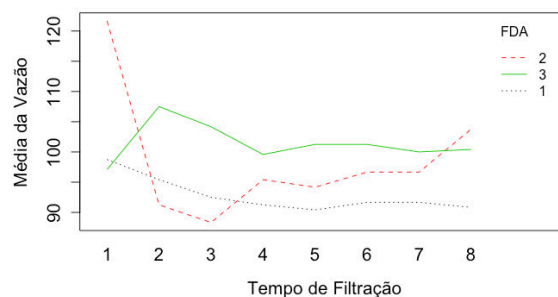
TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração

Na Figura 4.11 (a) nota-se, uma variação significativa no comportamento das curvas entre as taxas estudadas. Contudo, a taxa de filtração de $280 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ apresentou menor variação com relação ao tempo de carreira da filtração. As taxas de 310 e $340 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ apresentaram as maiores variações no seu comportamento durante as carreiras de filtração. Com isso, a taxa menos sensível durante o ensaio foi a taxa de filtração de $280 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

Na Figura 4.11 (b), observa-se uma variação significativa no comportamento das curvas entre os filtros estudados. Tendo o filtro 1, com menor granulometria, a menor variação da vazão durante a carreira de filtração.



(a)



(b)

Figura 4.11 - (a) Gráfico da interação entre o tempo de filtração e a taxa de filtração para a vazão, (b) Gráfico de interação entre o tempo de filtração e os tipos de filtro para a vazão.

A Figura 4.12 apresenta os gráficos de resíduos dos resultados da análise da vazão. Observa-se que grande parte dos resultados aparecem aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero com baixa dispersão (Figura 4.12 (a) e (d)), como também, estão espalhados de forma aleatória em relação à curva na Figura 4.12 (c) e que os resultados seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.12 (b)). Contudo, em todos os gráficos é possível verificar a existência de pontos distantes da curva. Tais valores podem ser influenciados pelo ajuste manual na distribuição das vazões para os três filtros.

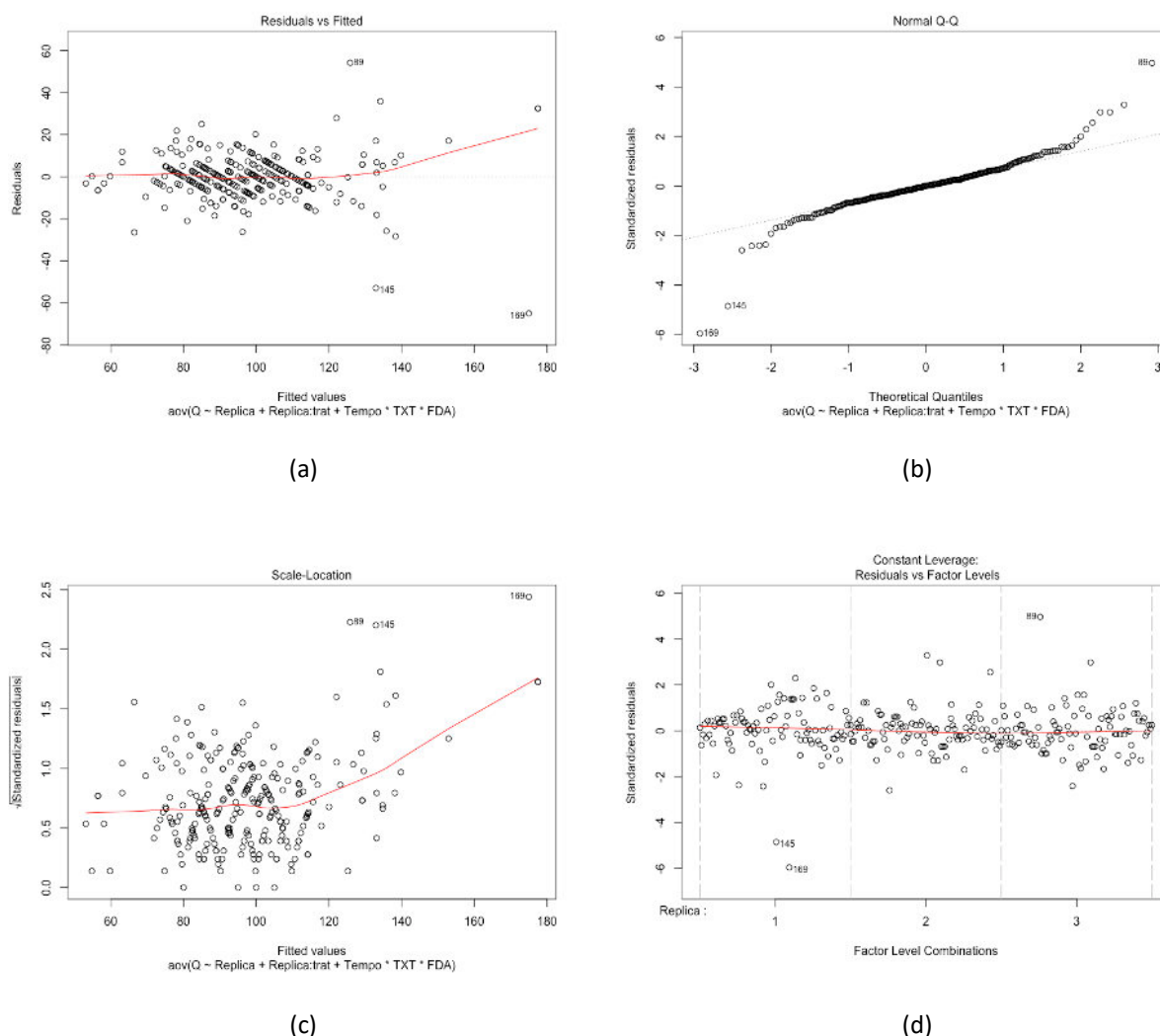


Figura 4.12 - Gráficos de resíduos para a variável resposta da vazão. (a) Gráfico de resíduos em função dos valores ajustados; (b) Gráfico de probabilidade normal; (c) Gráfico de resíduos padronizados em função dos valores ajustados; e (d) Gráfico de resíduos padronizados em função dos níveis dos fatores.

Após a discussão de cada parâmetro, observa-se que a taxa de filtração menos sensível ao longo da carreira de filtração corresponde a taxa de 280 m³/m².dia. Em relação ao tipo de filtro,

que apresenta granulometrias diferentes, só influenciou significativamente o parâmetro da vazão, mostrando que o filtro de menor granulometria foi o menos sensível durante a carreira de filtração. Portanto, diferente das condições ótimas obtidas no trabalho de Lima (2019), desconsiderando a estrutura de experimentos com restrição na aleatorização, a condição mais indicada para novos teste seria utilizando a taxa de $280 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, uma vez que a mesma se mostrou menos sensível ao longo do tempo de filtração. Como, nos ensaios os filtros podem ser utilizados concomitantemente, recomenda-se utilizar os três filtros aumentando o tempo de carreira de filtração para avaliar qual das granulometrias seria obtido o melhor resultado.

4.2.2 Dupla filtração

Com o objetivo de avaliar a robustez e encontrar a condição menos sensível as variações no experimento para os filtros rápidos descendentes de areia, foram avaliados para cada variável resposta quais os efeitos e interações foram significativas, considerando o tempo de filtração como um fator de ruído e para um valor p menor que 0,05 ($\alpha = 5 \%$). Com isso, a análise de cada parâmetro será descrita separadamente.

A Tabela 4.10, mostra a análise de variância para o parâmetro de resposta turbidez. Nota-se que os efeito principal da granulometria (tipo de filtro FDA) na subparcela foi significativo e que o efeito principal do tempo de filtração e a interação de segunda ordem entre tempo de filtração e a relação entre a taxa de filtração e a granulometria do FAP foram significativos na influência dos resultados.

Tabela 4.10 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a turbidez

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Replica	1	6.975	6,9750	2,6667	0,12328
dummy	15	87.021	5,8014	2,218	0,06705
Ea	15	39.234	2,6156		
FDA	2	0,462	0,2308	3,3988	0,04587
Dummy:FDA	30	2,241	0,0747	1,1001	0,39463
Eb	32	2,173	0,0679		

Tabela 4.10 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a turbidez

Tempo	7	3,157	0,4510	5,4894	5,462x10 ⁻⁶
Tempo:dummy	105	18,041	0,1718	2,0913	3,521x10 ⁻⁷
Tempo:FDA	14	1,035	0,0739	0,8997	0,55950
Tempo:dummy:FDA	210	7,680	0,0366	0,4452	1,00000
Ec	336	27,605	0,0822		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração; Ea - erro da parcela (whole plot); Eb - erro da subparcela; Ec - erro da sub-subparcela.

A Figura 4.13 (a), mostra o gráfico da média da turbidez em função da granulometria dos filtros FDA. Percebe-se que o menor valor médio foi obtido no filtro 1, com menor granulometria, e o maior valor médio foi obtido para o filtro 3, com maior granulometria. Contudo, os intervalos e confiança se sobrepõem, indicando que não há uma diferença significativa entre os valores.

Já a Figura 4.13 (b), mostra a média dos valores da turbidez em função da interação entre o tempo de filtração e a relação granulometria do FAP e a taxa de filtração. Nota-se que das condições estudadas, a que apresentou menor variação na média dos valores da turbidez no decorrer do tempo de filtração foi a relação dummy de número 6, que corresponde ao filtro ascendente FAP 2 com taxa de filtração de 280 m³/m².dia. Esta condição apresentou valores médios baixos para turbidez, estando próximo de 1,00. Contudo, observa-se nas Figuras 4.13 (a) e (b), que a média dos valores de turbidez estão acima do valor permitido pela Portaria da Consolidação n° 5/2017 (BRASIL, 2017).

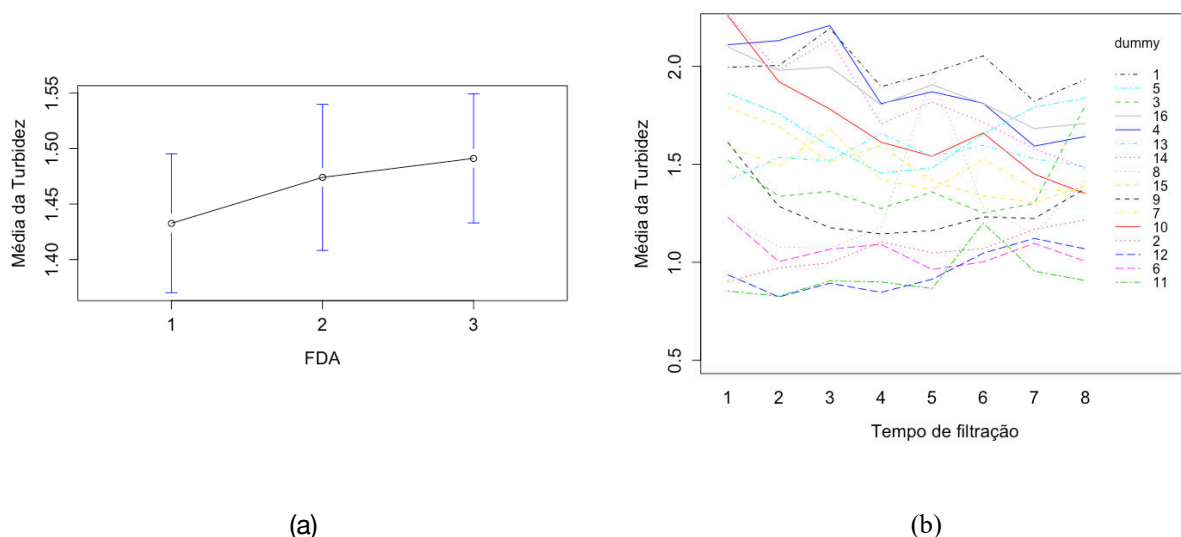
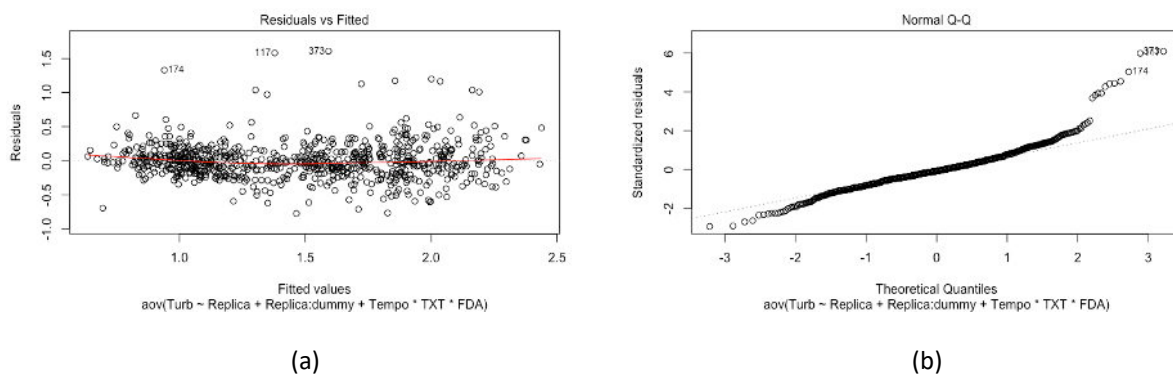


Figura 4.13 - (a) Gráfico do valor médio da turbidez em função da granulometria dos FDAs; (b) em função da interação entre o tempo de filtração e a relação entre taxa de filtração e granulometria dos FAP .

A Figura 4.14, apresenta os gráficos referentes a análise de resíduo, afim de verificar se o modelo é adequado ou não para o parâmetro da turbidez. Observa-se, na Figura 4.14, que grande parte dos resultados aparecem aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero com baixa dispersão (Figura 4.14 (a) e (d)), como também, estão espalhados de forma aleatória em relação à curva na Figura 4.14 (c) e que os resultados seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.14 (b)). Contudo, nota-se a presença de pontos mais distantes da curva, com pontos mais elevados que estão relacionados com o valor elevado da turbidez da água bruta no dia do ensaio.



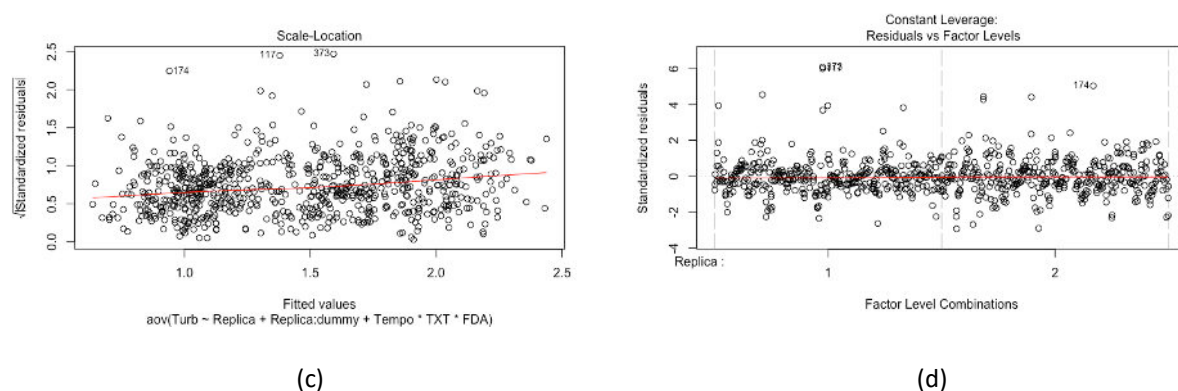


Figura 4.14 - Gráficos de resíduos para a variável resposta cor aparente. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.11, mostra a análise de variância para o parâmetro de resposta cor aparente. Nota-se que os efeitos principais da granulometria (tipo de filtro FDA) e tempo de filtração e a interação de segunda ordem entre taxa de filtração e tempo de filtração foram significativos na influência dos resultados.

A Figura 4.15 (a), mostra o gráfico da média dos resultados da cor aparente em função da granulometria dos filtros descendentes de areia. Nota-se que o maior valor da média para os resultados da cor aparente ocorreu para o filtro FDA 3, que correspondo ao filtro de maior granulometria. Para os filtros 1 e 2, não há uma diferença significativa entre seus valores das médias, indicando que ambas as granulometria apresentaram comportamento semelhante, obtendo valores médios de cor aparente em conformidade com a Portaria da Consolidação nº 5/2017 (BRASIL, 2017).

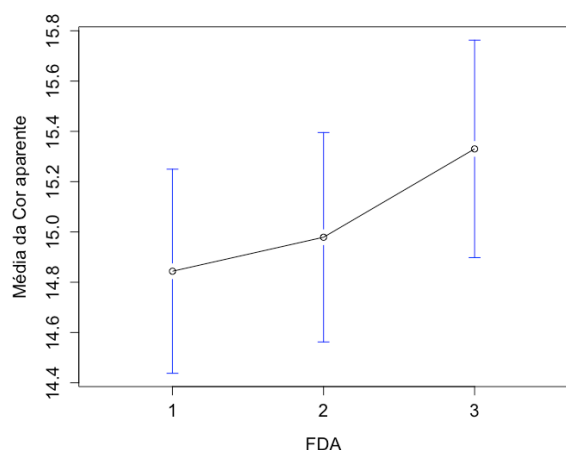
Tabela 4.11 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a cor aparente

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Replica	1	1,00	1,006	0,0059	0,9400052
dummy	15	4372,4	291,494	1,697	0,15835
Ea	15	2576,9	171,796		
FDA	2	32,3	16,144	12,0257	0,0001274
Dummy:FDA	30	50,9	1,697	1,2640	0,2576718

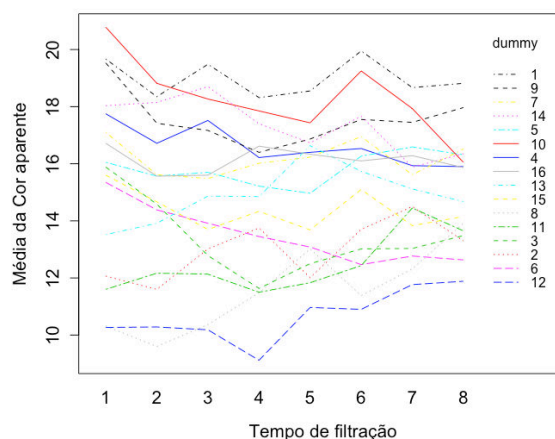
Tabela 4.11 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a cor aparente

Eb	32	43,0	1,342		
Tempo	7	67,9	9,693	3,8081	0,0005376
Tempo:dummy	105	552,1	5,258	2,0659	5,451x10 ⁻⁷
Tempo:FDA	14	34,2	2,439	0,9584	0,4960700
Tempo:dummy:FDA	210	285,6	1,360	0,5344	0,9999994
Ec	336	855,2	2,545		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração; Ea - erra da parcela (whole plot); Eb - erro da subparcela; Ec - erro da sub-subparcela.



(a)



(b)

Figura 4.15 - Gráfico da média dos resultados da cor aparente (a) em função da granulometria do filtro descendente de areia e (b) em função da interação entre o tempo de filtração e a relação entre taxa de filtração e granulometria dos FAP.

Já a Figura 4.15 (b), mostra o gráfico da média dos resultados da cor aparente em função da interação entre o tempo de filtração e a relação entre taxa de filtração e a granulometria do filtro ascendente FAP. Observa-se, que as condições que apresentaram as menores variações nos valores médios da cor aparente correspondem aos dummy de números 4, e 16, ambos com taxas de filtração de 340 m³/m².dia, porém com filtros ascendentes diferentes, estando o dummy 4 relacionado ao FAP 1 e o dummy 16 relacionado ao FAP 4. Contudo, ambas as condições apresentaram valores

médios de cor aparente acima do valor permitido pela Portaria da Consolidação nº 5/2017 (BRASIL, 2017). A condição que apresentou o menor resultado para a média da cor aparente em função do tempo de filtração, foi o dummy de número 12, que corresponde ao FAP 3 com taxa de filtração de $340 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, com uma variação ligeiramente maior do que as condições de dummy 4 e 16. Com isso, tem-se que a taxa de filtração de $340 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, foi a que apresentou menor sensibilidade com o tempo de filtração estudado, tendo o FAP 3 apresentando melhor influência no resultado da cor aparente final do processo.

A Figura 4.16, apresenta os gráficos referentes a análise de resíduo, afim de verificar se o modelo é adequado ou não para o parâmetro de cor aparente. Observa-se, na Figura 4.16, que grande parte dos resultados aparecem aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero com baixa dispersão (Figura 4.16 (a) e (d)), como também, estão espalhados de forma aleatória em relação à curva na Figura 4.16 (c) e que os resultados seguem uma distribuição normal devido os pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.16 (b)). Contudo, nota-se a presença de pontos mais distantes da curva. O ponto mais baixo se refere a interrupção do processo de filtração para a realização de lavagem do filtro, o que impediu a leitura do parâmetro, enquanto os pontos mais elevados estão relacionados com o valor elevado da cor aparente da água bruta no dia do ensaio.

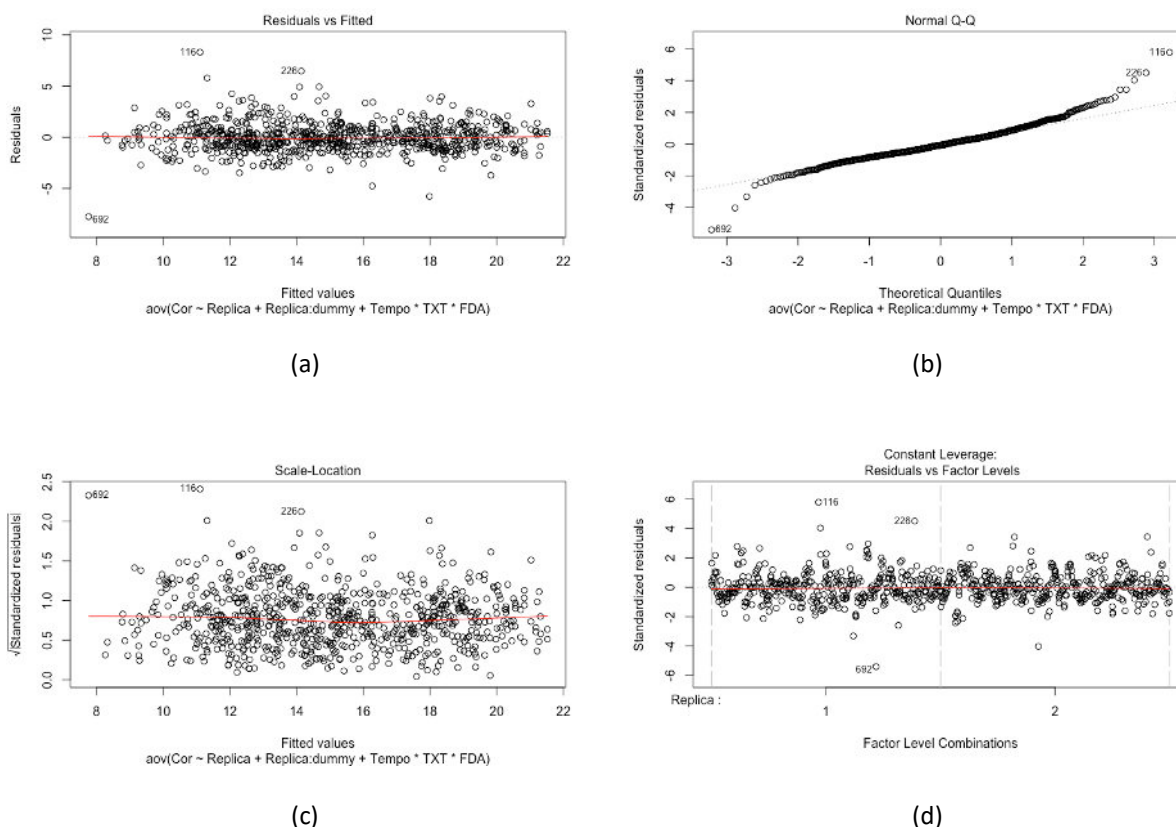


Figura 4.16 - Gráficos de resíduos para a variável resposta cor aparente. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.12, mostra a análise de variância para o parâmetro de resposta cor verdadeira. Nota-se que na parcela principal o efeito correspondente à relação entre a granulometria do FAP e a taxa de filtração e que na sub-subparcela o tempo de filtração foram significativos na influência dos resultados obtidos. Porém, quando aumentamos o valor de alfa para 6%, era possível incluir a interação entre o tempo de filtração e a relação entre taxa de filtração e a granulometria do filtro ascendente FAP, como estatisticamente significantes na influência nos resultados da cor verdadeira.

Tabela 4.12 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a cor verdadeira

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Replica	1	479,6	479,59	5,2096	0,03747
dummy	15	300,54	300,54	3,265	0,01414
Ea	15	1380,9	92,06		
FDA	2	6,6	3,30	1,1025	0,34431
Dummy:FDA	30	100,4	3,35	1,1190	0,37667
Eb	32	95,7	2,99		
Tempo	7	69,8	9,98	7,2353	4,417x10 ⁻⁸
Tempo:dummy	105	184,7	1,76	1,2755	0,05518
Tempo:FDA	14	23,9	1,71	1,2402	0,24416
Tempo:dummy:FDA	210	216,8	1,03	0,7486	0,98888
Ec	336	463,3	1,38		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração; Ea - erro da parcela (whole plot); Eb - erro da subparcela; Ec - erro da sub-subparcela.

A Figura 4.17 (a), mostra os valores da média da cor verdadeira em função da interação entre a relação entre a granulometria do FAP e a taxa de filtração. Observa-se que os menores

valores médios foram obtidos para a relação dummy 11 e 12, que corresponde ao filtro ascendente FAP 3 e as taxas de filtração de 310 e 340 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, respectivamente. Os valores mais elevados foram obtidos para o FAP 1, nas taxas de filtração de 253 (dummy 1) e 340 (dummy 4) $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, para o FAP 3 nas taxas de filtração de 253 (dummy 9) e 280 (dummy 10) $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e para o FAP 4 nas quatro taxas de filtração estudadas (dummy 13 a 16). O filtro ascendente FAP 2 apresentou valores médios intermediários.

Na Figura 4.17 (b), notam-se diversas condições que apresentaram pouca variação nos resultados da cor verdadeira ao longo de tempo de filtração, tais como as curvas 2, 5, 11 e 12, tendo as curvas de número 11 e 12, apresentando as menores variações nos valores para a cor verdadeira.

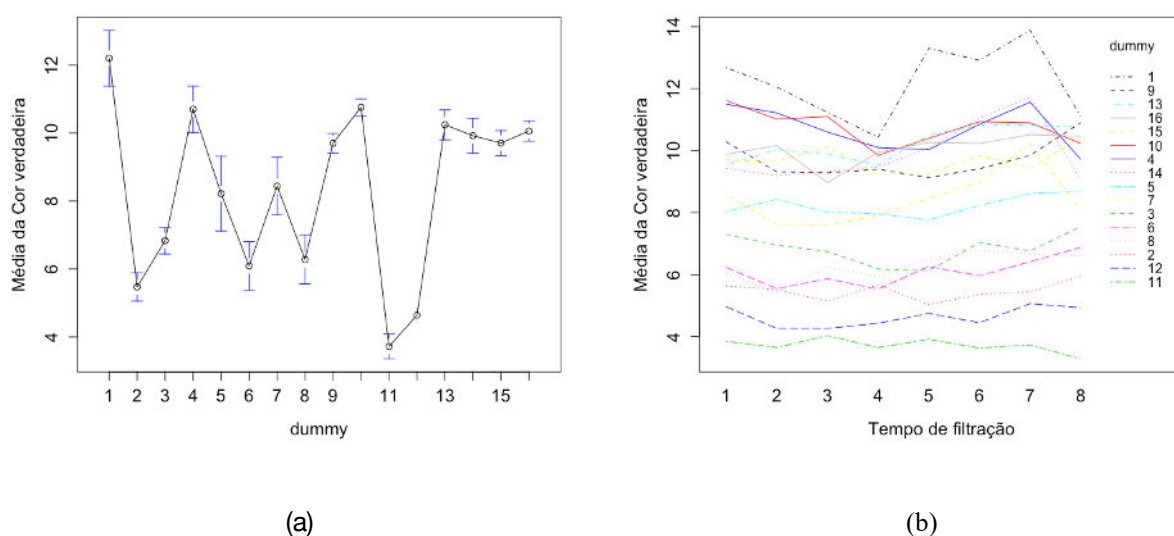


Figura 4.17 - Gráfico da média dos resultados da cor verdadeira (a) em função da interação entre a relação entre a granulometria do FAP e a taxa de filtração (b) em função da interação entre o tempo de filtração e a relação entre taxa de filtração e granulometria dos FAP .

Na Figura 4.18, mostra os gráficos referentes a análise de resíduo, afim de verificar se o modelo é adequado ou não para o parâmetro de cor verdadeira. Nota-se que grande parte dos resultados aparecem aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero com baixa dispersão (Figura 4.18 (a) e (d)), como também, estão espalhados de forma aleatória em relação à curva na Figura 4.18 (c) e que os resultados seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.18 (b)). Contudo, percebe-se a presença de pontos mais distantes da curva. Tais pontos mais elevados estão relacionados com o valor elevado da cor verdadeira da água bruta no dia do ensaio.

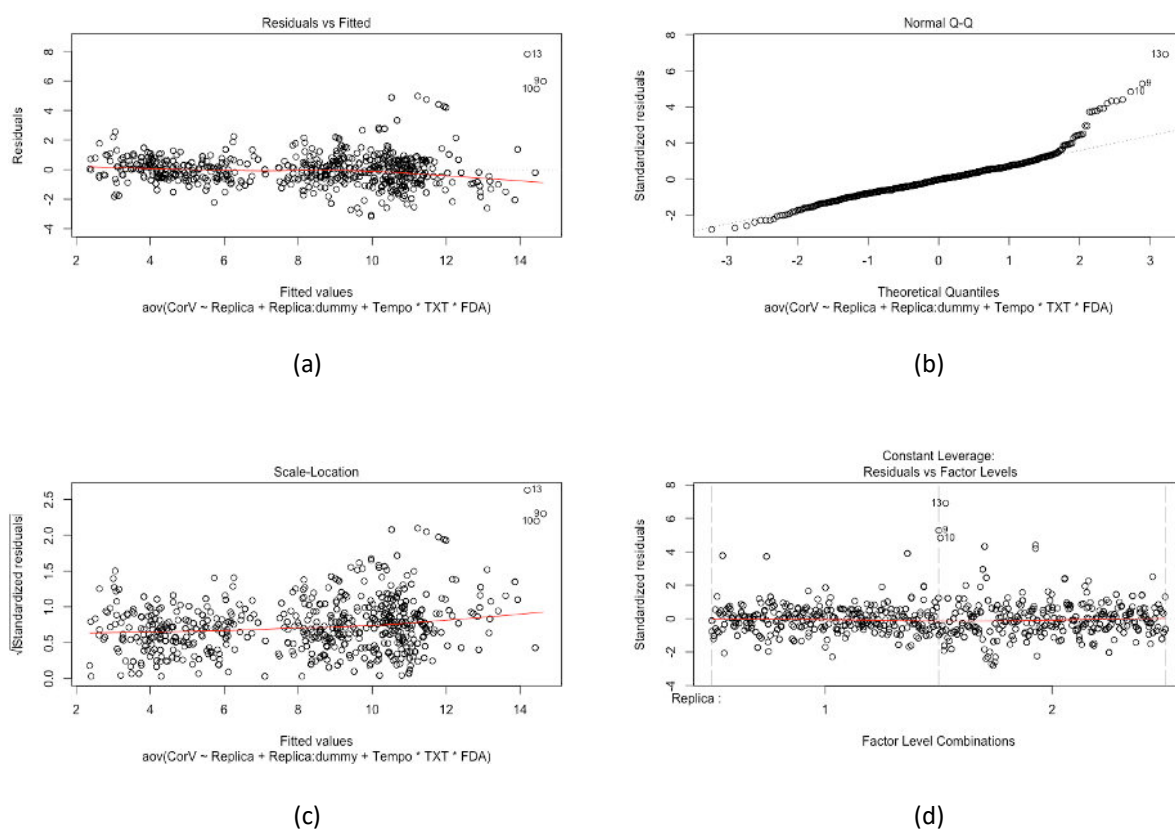


Figura 4.18 - Gráficos de resíduos para a variável resposta cor verdadeira. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.13 apresenta a análise de variância para o parâmetro da absorvância. Nota-se que na sub-subparcela o efeito principal correspondendo ao tempo de filtração e a interação de segunda ordem entre o tempo de filtração e a relação da granulometria do filtro FAP e a taxa de filtração foram significativos, para valores P abaixo de 0,05 ($\alpha = 5\%$). Porém, para um α de 10%, na parcela principal o efeito da relação da granulometria do filtro FAP e a taxa de filtração foi significativo na influência dos resultados da absorvância.

A Figura 4.19 (a) apresenta o gráfico da média da absorvância em função da relação da granulometria do FAP e da taxa de filtração. Percebe-se que o menor valor médio para a absorvância ocorreu para o filtro ascendente FAP 1 com taxa de filtração de $280 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (dummy 2), seguido pelos pontos 6 (FAP 2, taxa de filtração $280 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$), 8 (FAP 2, taxa de filtração $340 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$), 11 (FAP 3, taxa de filtração $310 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$) e 12 (FAP 3, taxa de filtração $340 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$), que devido à sobreposição dos intervalos de confiança não apresentam diferenças significativas entre si. Enquanto, o FAP 4 apresentou valores médio de absorvância elevados para

as quatro taxas de filtração estudadas. Com isso, os FAP 2 e 3 apresentaram comportamento semelhantes para taxas mais elevadas.

Tabela 4.13 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a absorvância

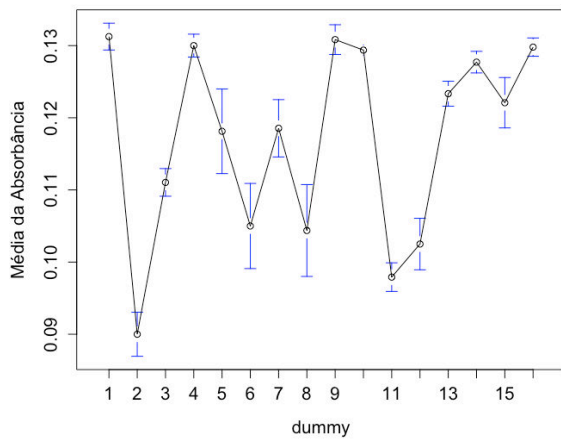
Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Replica	1	0,018901	0,0189012	4,6846	0,04698
dummy	15	0,129925	0,0086617	2,147	0,0752
Ea	15	0,060522	0,0040348		
FDA	2	0,000030	0,0000152	0,2368	0,79049
Dummy:FDA	30	0,001378	0,0000459	0,7140	0,82172
Eb	32	0,002058	0,0000643		
Tempo	7	0,001953	0,0002790	11,3371	6,50x10 ⁻¹³
Tempo:dummy	105	0,007091	0,0000675	2,7441	2,854x10 ⁻¹²
Tempo:FDA	14	0,000078	0,0000056	0,2260	0,99865
Tempo:dummy:FDA	210	0,002747	0,0000131	0,5316	1,00000
Ec	336	0,008269	0,0000246		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração; Ea - erro da parcela (whole plot); Eb - erro da subparcela; Ec - erro da sub-subparcela.

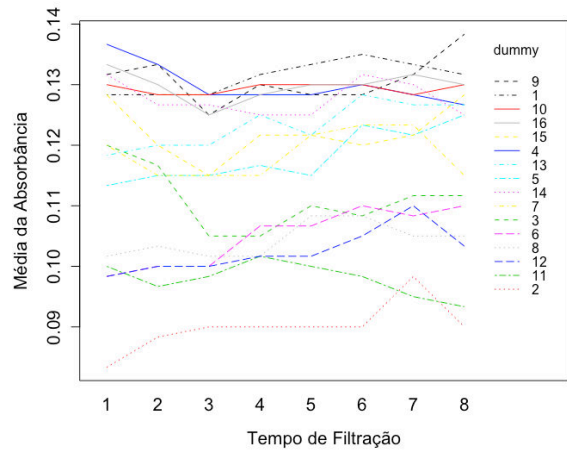
Na Figura 4.19 (b), observa-se que as curvas com menores variações no valor da média da absorvância ao longo do tempo de filtração foram as curvas 10 e 11, que correspondem ao filtro FAP 3 com taxas de filtração de 280 e 310 m³/m².dia, respectivamente. Contudo, a curva 11 (FAP 3, taxa de filtração de 310 m³/m².dia) apresentou o menor valor médio da absorvância ao longo das 8 horas da carreira de filtração. Tal comportamento é semelhante ao observado nos parâmetros de cor aparente e cor verdadeira, indicando que a melhor remoção de substâncias orgânicas dissolvidas ocorreram na taxa de filtração foi a de 310 m³/m².dia com o filtro FAP 3.

Na Figura 4.20 mostra-se os gráficos referentes à análise de resíduo para o parâmetro da absorvância. Nota-se que os resultados estão aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero com baixa dispersão (Figura 4.20 (a) e (d)), como também, os resultados estão espalhados de forma

aleatória em relação à curva na Figura 4.20 (c) e que seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.20 (b)).

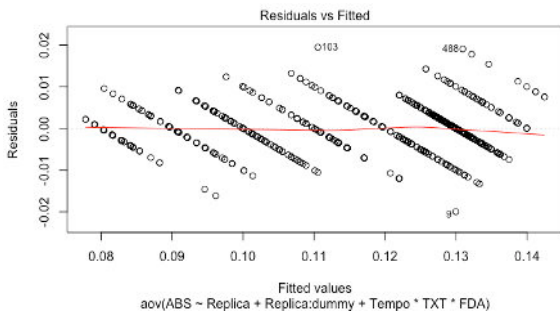


(a)

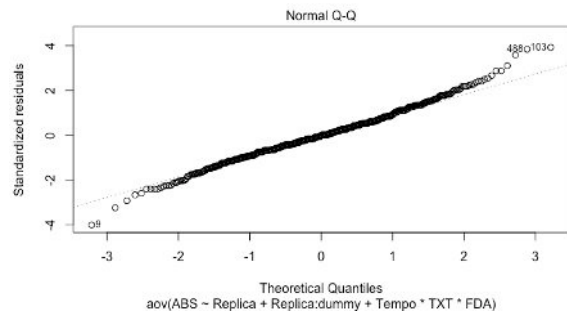


(b)

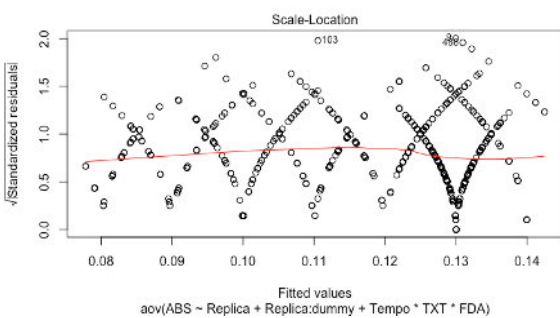
Figura 4.19 - Gráfico da média da absorbância em função da relação entre a granulometria do FAP e a taxa de filtração (b) em função da interação entre o tempo de filtração e a relação da granulometria do filtro FAP e a taxa de filtração foram significativos.



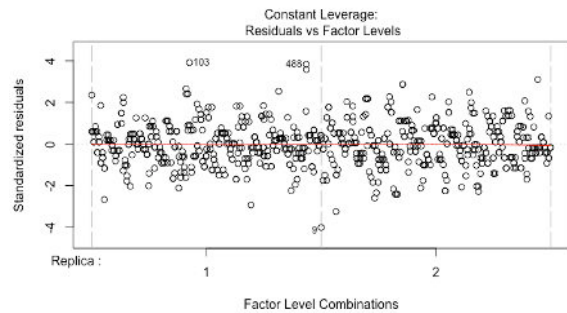
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.20 - Gráficos de resíduos para a variável resposta absorbância. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.14 apresenta a análise de variância para o parâmetro da matéria orgânica natural. Nota-se que o efeito principal correspondendo ao tempo de filtração e a interação de segunda ordem entre o tempo de filtração e a relação entre taxa de filtração e a granulometria do FAP foram significativos.

Tabela 4.14 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a Matéria orgânica natural

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Replica	1	0,163	0,1630	0,0256	0,8749045
dummy	15	187,063	12,4709	1,962	0,1017603
Ea	15	95,361	6,3574		
FDA	2	0,236	0,1179	0,2972	0,7449524
Dummy:FDA	30	9,137	0,3046	0,7675	0,7655716
Eb	32	12,698	0,3968		
Tempo	7	3,528	0,5040	2,7298	0,0091024
Tempo:dummy	105	31,813	0,3030	1,6411	0,0005113
Tempo:FDA	14	1,033	0,0738	0,3996	0,9746361
Tempo:dummy:FDA	210	31,064	0,1479	0,8012	0,9602364
Ec	336	62,032	0,1846		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração; Ea - erro da parcela (whole plot); Eb - erro da subparcela; Ec - erro da sub-subparcela.

Na Figura 4.21, mostra o comportamento da média dos resultados para a matéria orgânica natural em função da interação entre o tempo de filtração e a relação entre taxa de filtração e a granulometria dos filtros ascendentes FAP. Percebe-se que a curva de número 11, que corresponde ao FAP 3 com taxa de filtração de 310 m³/m².dia, apresenta um comportamento menos sensível à variação do tempo de filtração. Como também, obteve baixos valores médio de MON após o processo de dupla filtração.

Na Figura 4.22 mostram-se os gráficos referentes à análise de resíduo para o parâmetro da matéria orgânica natural. Nota-se que os resultados estão aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero com baixa dispersão (Figura 4.22 (a) e (d)), como também, os resultados estão espalhados de forma aleatória em relação à curva na Figura 4.22 (c) e que seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.22 (b)).

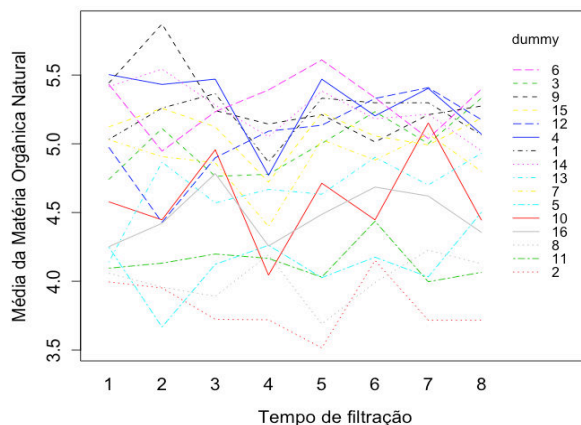


Figura 4.21 - Gráfico da média dos valores da MON em função da interação entre tempo de filtração e a relação taxa de filtração e granulometria dos FAP.

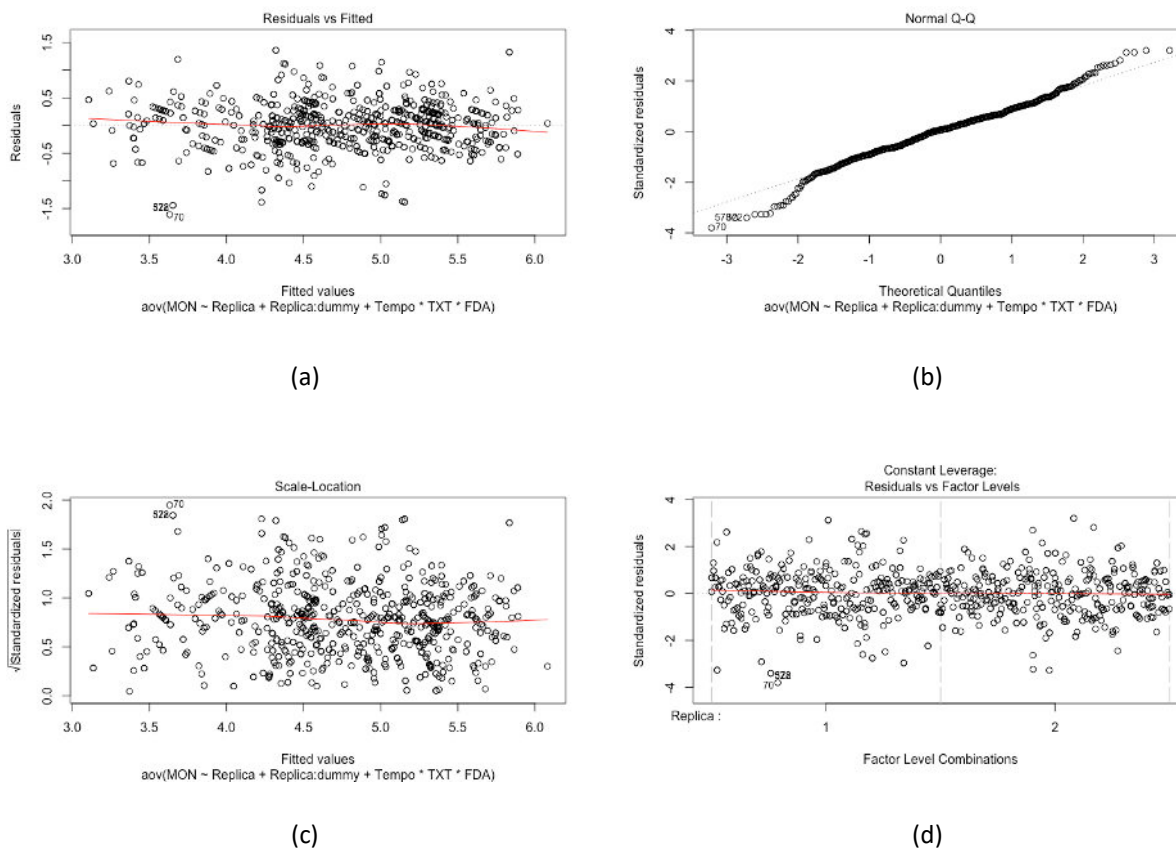


Figura 4.22 - Gráficos de resíduos para a variável resposta MON (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.15, apresenta a análise de variância para o parâmetro pH. Observa-se que os efeitos principais e os efeitos de interação não apresentaram significância estatística, pois os valores p estão acima de 0,05. Isto indica que os níveis dos fatores estudados não influenciaram nos resultados do pH da água tratada. Como os valores de F para os efeitos principais e de interação na sub-subparcela estão próximos de 1, isto indica uma baixa variabilidade em que as médias apresentam valores próximos com média próxima de 7,83.

Tabela 4.15 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para o pH.

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Replica	1	0,0525	0,05250	0,1411	0,7124
dummy	15	6,5815	0,43877	1,179	0,3767
Ea	15	5,5805	0,37203		
FDA	2	0,0775	0,03876	0,4816	0,6222
Dummy:FDA	30	2,6736	0,08912	1,1072	0,3878
Eb	32	2,5758	0,08049		
Tempo	7	0,7421	0,10602	1,1603	0,3252
Tempo:dummy	105	11,5130	0,10965	1,2001	0,1156
Tempo:FDA	14	1,3645	0,09747	1,0667	0,3870
Tempo:dummy:FDA	210	18,0218	0,08582	0,9392	0,6888
Ec	336	30,6998	0,09137		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração; Ea - erro da parcela (whole plot); Eb - erro da subparcela; Ec - erro da sub-subparcela.

A Tabela 4.16 mostra a análise de variância para os resultados do parâmetro temperatura. Observa-se que na subparcela o efeito principal correspondente à granulometria do filtro FDA e a na sub-subparcela o tempo de filtração e a interação de segunda ordem entre tempo de filtração e

a relação taxa de filtração e granulometria do FAP foram estatisticamente significante, considerando valores P menores do 0,05.

A Figura 4.23 (a), mostra o gráfico da média dos valores da temperatura em função da granulometria dos filtros FDA. Nota-se que a média dos valores da temperatura diminuem com o aumento da granulometria dos filtros, contudo os intervalos de confiança se sobrepõem, indicando que não a uma diferença significativa entre os valores.

Tabela 4.16 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a Temperatura.

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Replica	1	1,49	1,492	0,0178	0,89564
dummy	15	727,85	48,523	0,579	0,84964
Ea	15	1257,37	83,825		
FDA	2	17,25	8,627	4,8346	0,01463
Dummy:FDA	30	55,74	1,858	1,0411	0,45416
Eb	32	57,10	1,784		
Tempo	7	87,65	12,522	5,4398	6,263x10 ⁻⁶
Tempo:dummy	105	541,37	5,156	2,2398	2,63x10 ⁻⁸
Tempo:FDA	14	13,66	0,976	0,4238	0,96684
Tempo:dummy:FDA	210	277,30	1,320	0,5736	0,99999
Ec	336	773,45	2,302		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração; Ea - erro da parcela (whole plot); Eb - erro da subparcela; Ec - erro da sub-subparcela.

Já a Figura 4.23 (b), mostra o gráfico da média dos valores da temperatura em função da interação entre tempo de filtração e a relação taxa de filtração e granulometria dos FAP. Nota-se que diversas curvas apresentaram pouca variação na média da temperatura ao longo das 8 horas de filtração. Esse comportamento pode estar relacionado com fato dos ensaios na estação piloto começarem no início da manhã e terminarem no final da tarde, envolvendo os turnos matutino e

vespertino. Como alguns ensaios foram realizados em dias com períodos de chuvas, isso faz com que a média tenha uma diminuição no seu valor em algumas horas do dia.

Na Figura 4.24 mostra-se os gráficos referentes a análise de resíduo para o parâmetro da temperatura. Nota-se que os resultados estão aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero com baixa dispersão (Figura 4.24 (a) e (d)), como também, os resultados estão espalhados de forma aleatória em relação à curva na Figura 4.24 (c) e que seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.24 (b)).

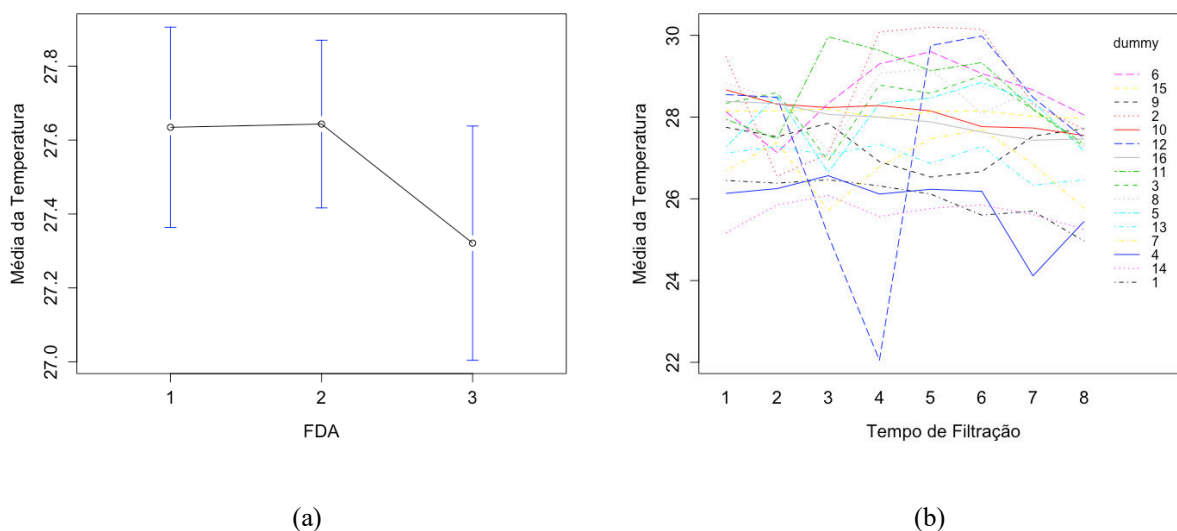
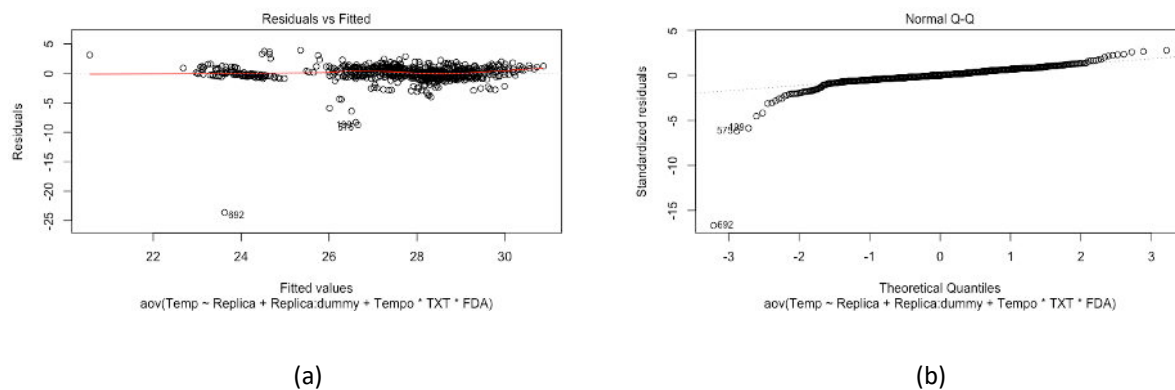


Figura 4.23 - Gráfico da média dos valores da temperatura (a) em função da granulometria dos filtros FDA e (b) em função da interação entre tempo de filtração e a relação taxa de filtração e granulometria dos FAP.



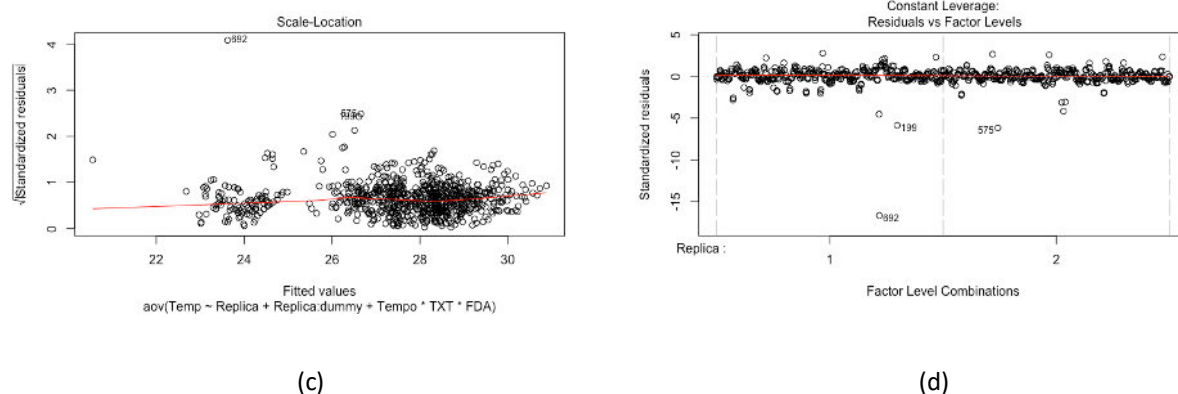


Figura 4.24 - Gráficos de resíduos para a variável resposta temperatura. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.

A Tabela 4.17 mostra a análise de variância para os resultados da vazão. Nota-se que para uma significância de 5% (valor de p menor que 0,05) o efeito principal, na parcela, da relação entre taxa de filtração e da granulometria dos filtros FAP, e, na subparcela, o efeito da granulometria dos filtros FDA, foram significativos. Porém, aumentou o percentual de significância para 10 % (valor de p menor que 0,1), a interação entre tempo de filtração e a relação taxa de filtração e granulometria dos FAP passam a ter influência significativa no comportamento da vazão. Com isso, para uma melhor discussão a cerca da influência dos fatores de controle estudados, o valor p adotado para esse parâmetro será o valor de 0,1, de modo que seja inserido na discussão deste parâmetro, o gráfico da interação entre tempo de filtração e a relação taxa de filtração e granulometria dos FAP.

Tabela 4.17 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a vazão.

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados (SQ)	Quadrado médio (QM)	Valor de F	Valor de P
Replica	1	57	57,4	0,1670	0,6885821
dummy	15	78522	5234,8	15,223	1,939x10 ⁻⁶
Ea	15	5158	343,9		
FDA	2	6894	3447,1	9,1476	0,0007211
Dummy:FDA	30	15341	511,4	1,3570	0,1987227

Tabela 4.17 - Análise de variância (ANOVA) do planejamento split-split-plot para a vazão.

Eb	32	12059	376,8		
Tempo	7	752	107,4	0,6661	0,7008021
Tempo:dummy	105	20743	197,6	1,2249	0,0915663
Tempo:FDA	14	1953	139,5	0,8650	0,5976882
Tempo:dummy:FDA	210	35174	167,5	1,0386	0,3768238
Ec	336	54190	161,3		

TXT - Taxa de Filtração; FDA - Filtro descendente de areia; Tempo - tempo da carreira de filtração; Ea - erro da parcela (whole plot); Eb - erro da subparcela; Ec - erro da sub-subparcela.

A Figura 4.25 (a), apresenta o gráfico da média das vazões em função da granulometria dos filtros descendentes FDA. Nota-se que o filtro de FDA 3 apresentou maior valor médio da vazão e os FDA 1 e FDA 2 apresentaram valores médios semelhantes. Isto está relacionado com a granulometria do FDA 3 ser maior do que dos outros filtros FDA, apresentando maior número de espaços vazios, facilitando a percolação da água no meio filtrante.

Já a Figura 4.25 (b), mostra o gráfico da média das vazões em função da interação entre tempo de filtração e a relação taxa de filtração e granulometria dos FAP. Nota-se que as taxas de filtração de 280 (curvas 2 e 10) e 340 (curva 4) $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ foram as taxas que apresentaram as menores variações em relação à alteração da granulometria dos filtros FAP. Contudo, as variações na vazão podem ser afetadas pelo controle manual dos registros de entrada e saída de água dos filtros, tanto do FAP como do FDA, uma vez que durante os ensaios ocorriam a abertura de registros de entrada maiores de um filtro para o outro na busca de estabilizar a vazão para os filtros FDA.

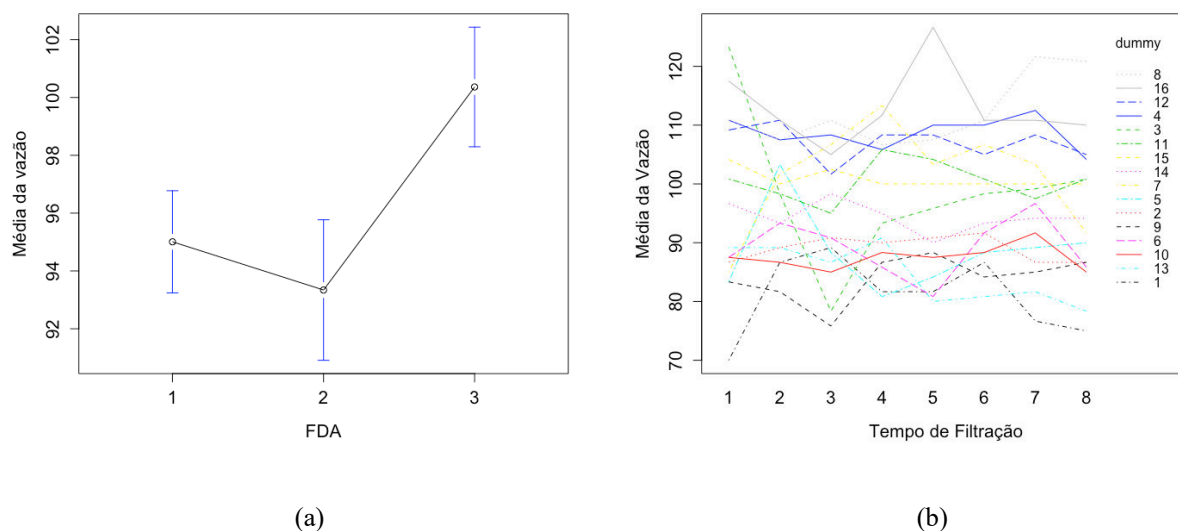
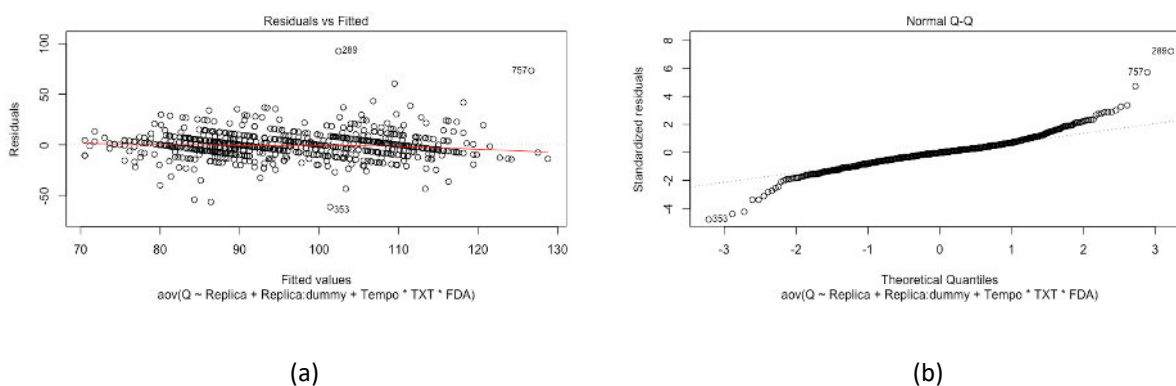


Figura 4.25 - Gráfico da média dos valores da vazão (a) em função da granulometria dos filtros FDA e (b) em função da interação entre tempo de filtração e a relação taxa de filtração e granulometria dos FAP.

Na Figura 4.26 mostram-se os gráficos referentes a análise de resíduo para o parâmetro da vazão. Nota-se que os resultados estão aleatoriamente espalhados em ambos os lados de zero com baixa dispersão (Figura 4.26 (a) e (d)), como também, os resultados estão espalhados de forma aleatória em relação à curva na Figura 4.26 (c) e que seguem uma distribuição normal devido aos pontos se aproximarem de uma linha reta (Figura 4.26 (b)). Observa-se nos gráficos das Figura 4.26, a existência de pontos distantes da curva. Tais valores podem ser influenciados pelo ajuste manual na distribuição das vazões para os três filtros.



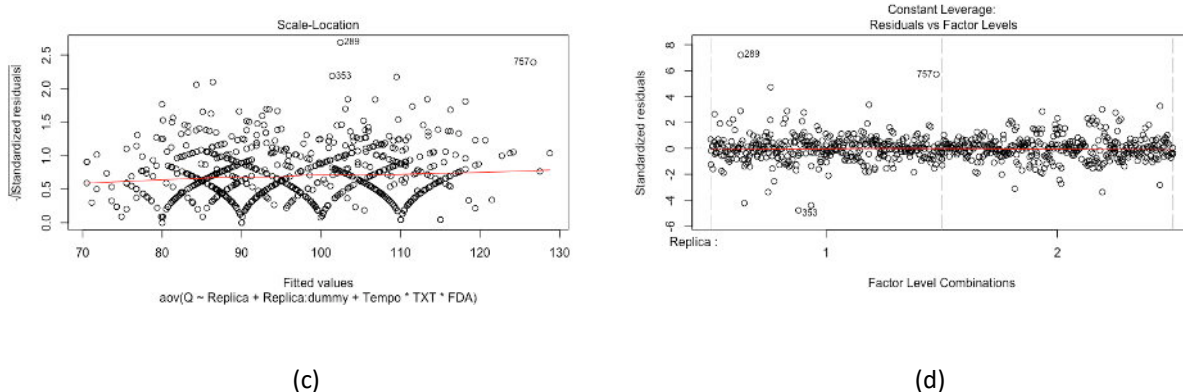


Figura 4.26 - Gráficos de resíduos para a variável resposta vazão. (a) em função dos valores ajustados; (b) de probabilidade normal; (c) padronizados em função dos valores ajustados; e (d) padronizados em função dos níveis dos fatores.

Após a discussão de cada parâmetro para a configuração de dupla filtração, tem-se que para os parâmetros cor aparente e pH apresentaram resultados em conformidade com a Portaria de Consolidação nº 5 de 2017, sendo que os valores de pH não foram estatisticamente influenciados pelos níveis dos fatores estudados. Já os valores da cor aparente sofreram influência dos níveis dos fatores estudados, tendo o FAP 3 os melhores resultados para cor aparente, o FDA 1 (média de 14,8) e o FDA2 (média de 14,9) comportamentos semelhantes e a taxa de filtração de 340 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ sendo a menos sensível as variações do sistema estudado e obtendo médias em conformidade com a legislação.

Para os parâmetros de cor verdadeira, absorvância e matéria orgânica natural, o filtro ascendente FAP 3 e a taxa de filtração de 340 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ apresentaram a menor sensibilidade as condições estudadas, enquanto que para o filtro descendente não influenciou estatisticamente esses parâmetros.

Já, para os resultados do parâmetro turbidez não foram obtidos valores em conformidade com a legislação nas condições estudadas. Os valores para a turbidez sofreram influência da granulometria dos filtros FAP e FDA, com os três filtros FDA apresentando médias semelhantes. No filtro FDA 1 foi obtido um valor médio ligeiramente menor do que nos filtros FDA 2 e FDA 3. Porém, durante os ensaios, o filtro FDA 1 precisou ser lavado diminuindo sua carreira de filtração, de modo que, para uma estação real, isto torna a granulometria inviável. Para o filtro ascendente, o filtro FAP 2 apresentou ser menos sensível as condições estudadas. A taxa de filtração mais indicada, por ser mais robusta, corresponde a taxa de 340 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, mesmo se destacando junto com as taxa de 253 e 280 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, pois taxas maiores permite o uso de menores unidades filtrantes.

Em relação aos resultados dos filtros ascendentes e descendentes, as conclusões obtidas foram semelhantes as obtidas no trabalho de Duarte (2018). Contudo, em relação às taxas de filtração a taxa mais elevada ($340 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$) influenciou nos resultados e apresentou ser menos sensível a variações no decorrer do tempo de filtração durante os ensaios realizados.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO GERAL

5. CONCLUSÃO GERAL

No presente estudo a água bruta da lagoa de extremoz/RN foi caracterizada como sendo de baixa turbidez, cor elevada e pH levemente alcalino, enfatizando que a água bruta utilizada para o tratamento nas duas configurações apresentaram características semelhantes, sem sofrer alterações bruscas no ambiente.

Nas duas configurações estudadas tem-se que os níveis dos fatores de controle avaliados influenciaram nos resultados obtidos para os parâmetros estudados e o fator de ruído tempo de filtração se apresentou como uma variável importante, pois, também influenciou os resultados de diversos parâmetros.

Em relação aos parâmetros de temperatura e pH, ambas as configurações apresentaram resultados semelhantes, sendo a temperatura influenciada pelas condições do clima e não pelo processo, e o pH apresentou valores levemente alcalinos, porém, não foram influenciados pelos fatores estudados, estando em conformidade com a legislação vigente.

Na filtração direta, a condição mais robusta, ou seja, mais estável ocorreu para taxa de filtração de 280 m³/m².dia. Nessa taxa de filtração, também foram obtidos os melhores resultados para cor aparente, cor verdadeira e absorvância 254 nm. Já a granulometria dos filtros descendentes de areia não influenciaram estatisticamente os resultados. Contudo, o filtro FDA3 é o mais indicado por apresentar resultados em conformidade com a legislação para a cor aparente e pH, e por possibilitar maiores carreiras de filtração devido à maior granulometria do que os outros filtros. Porém, para o parâmetro de turbidez não foi possível obter resultados em conformidade com a legislação.

Para a dupla filtração a taxa de filtração mais elevada (340 m³/m².dia) apresentou ser a mais estável no decorrer do processo. O uso do filtro ascendente permitiu a utilização de taxa mais elevadas, sendo o FAP 3 a condição mais robusta. Porém, o uso do FAP não fez com que o parâmetro de turbidez atende-se a legislação, mesmo apresentando valores menores do que na filtração direta. E o filtro descende de areia mais indicado é o filtro FDA2 por apresentar resultados em conformidade com a legislação para a cor aparente e pH, e por possibilitar maiores carreiras de filtração devido à maior granulometria do que o FDA1.

Em relação, ao método estatístico split-plot e os conceitos de Taguchi têm-se que ambos consistiram em ferramentas importantes para identificar as condições de maior robustez do processo, de modo que, o fator tempo de filtração, não levado em consideração em trabalhos anteriores sobre a estação piloto, se mostrou um fator importante a ser considerado, influenciando nos resultados. Com isso, foi possível verificar a existência de condições dos fatores de controle com baixa variação no seu comportamento durante a realização dos ensaios.

Como não foi obtido valores para o parâmetro de turbidez em conformidade com a legislação, será necessário realizar novos estudos de pré-oxidação e coagulação, para obter novas condições que se ajustem com as variações na qualidade da água, e assim realizar novos ensaios em ambas as configurações estudadas. Como também, sugere-se adicionar o processo de adsorção a estação piloto para buscar aumentar a remoção de substâncias orgânicas dissolvidas, uma vez que, a presença destas substâncias na etapa de desinfecção com cloro pode gerar subprodutos da cloração indesejados, como os trihalometanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ADAMSON, A. W., **Physical Chemistry of Surfaces**, A Wiley –Interscience Publication, 1997;

APHA, **Standard Methods for the examination of water and wastewater**, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 20th ed. Washinton, 2012;

ASGARI, G.; DAYARI, A.; GHASEMI, M.; SEID-MOHAMMADI, A.; GUPTA, V. K. e AGARWAL, S., **Efficient fluoride removal by preparation, characterization of pyrolysis bone: Mixed level design experiment and Taguchi L8 orthogonal array optimization**, Journal of Molecular Liquids, 275, 251–264, 2019;

BABI, K.G.; KOUMENIDES, K.M.; NIKOLAOU, A.D.; MAKRIA, C.A.; TZOUMERKAS, F.K.; LEKKASA, T.D.; **Pilot study of the removal of THMs, HAAs and DOC from drinking water by GAC adsorption**, Desalination, v.210, 215–224, 2007.

BARROS NETO B. de; SCARMINIO, I. S. e BRUNS, R. E., **Como Fazer Experimentos**, UNICAMP, 3ed. São Paulo, SP, 2007.

BHATNAGAR, A.; SILLANPÄÄ, M.; **Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption e - A review**, Chemosphere, 166, 497-510, 2017.

BOLTO, B.; GREGORY, J., **Organic polyelectrolytes in water treatment**, Water research, 41, 2301 – 2324, 2007;

BRASIL, Ministerio da Saúde, **Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 de 03 de outubro de 2017**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília, 2017.

BOND, T., GOSLAN, E.H., PARSONS, S.A., Jefferson, B., **Treatment of disinfection by-product precursors**. Environ. Technol. 32 (1–2), 1–25, 2011.

CIRNE, J. R. R., **Influência da granulometria e taxas de filtração no tratamento de água utilizando dupla filtração**. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

CHUNMEI LI, DONGHONG WANG, XIONG XU, ZIJIAN WANG, **Formation of known and unknown disinfection by-products from natural organic matter fractions during chlorination, chloramination, and ozonation**, Science of the Total Environment 587–588, 177–184, 2017.

DAVIS, M.L., **Water and wastewater engineering**, 2010;

DANIEL, C. R. A., **Estudo do desempenho de métodos de Lenth na análise de planos do tipo split-plot na ausência de réplicas**, Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de estatística, 2008.

DUARTE, M. A. C., **Tratamento de água para consumo humano de reservatório eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração**. Tese (Doutorado

– Programa de Pós-graduação e Área de Concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento)
– Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

DUARTE, G. M. C., **Simulação em instalação piloto da adequação de eta convencional para dupla filtração**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

DI BERNARDO, L. (Coord.), BRANDÃO, C. C. S., HELLER, L. **Tratamento de águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas**. Volume 1, PROSAB. Rio de Janeiro, RiMa, 2005a.

DI BERNARDO, L. (Coord.), BRANDÃO, C. C. S., HELLER, L. **Tratamento de águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas**. Volume 2, PROSAB. Rio de Janeiro, RiMa, 2005b.

DI BERNARDO, L. **Filtração direta aplicada a pequenas comunidades**. PROSAB. São Carlos, 1999.

DI BERNARDO, L. e DANTAS, A. DI B., **Métodos e técnicas de tratamento de água**, 2ª edição, São Carlos, RiMa, 2005;

DI BERNARDO, A. S., **Desempenho de sistema de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada**, Tese de doutorado, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004;

FREITAS, A. P. B. R. de, **Aplicação do método estatístico de Taguchi no estudo dos Processos Oxidativos Avançados (Fe^{+2} / H_2O_2 / O_3 / UV) no pré-tratamento de efluentes fenólicos**, Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, 2012;

JONES, B. E NACHTSHEIM, C. J., **Split-plot designs: What, Why and How**, Carlson School of Management, University of Minnesota, Minneapolis, Journal of Quality Technology, Vol. 41, No. 4, October 2009;

LEE, C. S., ROBINSON, J. E CHONG, M. F., **A review on application of flocculants in wastewater treatment**, *Process Safety and Environmental Protection*, 2014;

LIMA, J. K. L, **Avaliação da filtração direta descendente no tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada**, Dissertação de mestrado, Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais, Natal, 2019;

LIMA, A. B. P. de, **Avaliação da associação da filtração lenta com a filtração rápida no tratamento de água de uma lagoa litorânea tropical com baixa turbidez e cor moderada**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Natal 2019.;

HUA, G., RECKHOW, D.A., **Characterization of disinfection byproduct precursors based on hydrophobicity and molecular size**. *Environ. Sci. Technol.* 41, 3309–3315, 2007.

MA, D., GAO, B., SUN, S., WANG, Y., YUE, Q., LI, Q., **Effects of dissolved organic matter size fractions on trihalomethanes formation in MBR effluents during chlorine disinfection**. *Bioresour. Technol.* 136, 535–541, 2013.

MACHADO, B. M., **Potabilização de água com elevada densidade de cianobacterias e microalgas através de Sistema de dupla filtração em meio granular utilizando filtro de lavagem contínua**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação Engenharia Ambiental) –Universidade de Santa Catarina, 2011.

MELO, G. H. N de, **Métodos de Lenth para análise de planos strip-block com estruturas fatoriais 2^k**, Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCEN. Estatística, 2007.

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

MEYER, S.T., **O uso de cloro na deisnfeção de água, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais á saúde publica**. Caderno Saúde Publica, Rio de Janeiro, n. 10, v.1:99-110, 1994.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 8ª Edição. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2013.

MUSTAFAI, F. A.; BALOUCH, A.; ABDULLAH; JALBANI, N.; BHANGER, M. I.; JAGIRANI, M. S.; KUMAR, A. e TUNIO, A., **Microwave-assisted synthesis of imprinted polymer for selective removal of arsenic from drinking water by applying Taguchi statistical method**, European Polymer Journal, 109, 133–142, 2018;

NBR 12216, **Projeto de estação de tratamento de Água para abastecimento público**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992;

OLLER,I., **Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination—A review**, Science of the Total Environment 409, 4141–4166, 2011;

QUEIROZ, S. C. B., BENETTI, A. B., DI BERNARDO, L., DANTAS, A. DI B., SILVA, G. G. **Dupla filtração para o tratamento de água entronizada na região norte do Brasil**, Revista DAE , núm. 212, vol. 66, Edição Especial, 2018;

RStudio Team, RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>, 2019;

RICHTER, C.A., **Água: Métodos e tecnologia de tratamento**, 5º reimpressão, São Paulo, Blucher, 2017;

SEMARH, - **Secretaria do meio Ambiente e dos Recursos Hídricos**, Disponível em: <http://www.semeh.rn.gov.br>, Acesso em: 14/11/2016;

SILVA, G.G.; NAVAL, L.P.; DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. DI B., **Tratamento de água de reservatório por dupla filtração, oxidação e adsorção em carvão ativado granular**, Eng Sanit Ambient, v.17, n.1,71-80, jan/mar, 2012.

STROHER, A.P., MENEZES, M.L., PEREIRA,N.C. e BERGAMASCO,R., **Utilização de coagulantes naturais no tratamento de efluentes proveniente de lavagem de jeans**, ENGEVISTA, V. 15, n. 3. p. 255-260, 2013;

VIVACQUA, C. A., **Uma apresentação e crítica aos métodos de Taguchi em planejamento de experimentos**, Tese de doutorado, Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, UNICAMP, Campinas, São Paulo, 1996.

VON SPERLING, M., **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, 4º Edição, Belo Horizonte, Editora:UFMG, 2014;

ZHENG, D., ANDREWS, R. C., ANDREWS S. A. e TAYLOR-EDMONDS L., **Effects of coagulation on the removal of natural organic matter, genotoxicity, and precursors to halogenated furanones**, Water Research v.70, 118-129, 2015.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 - SCRIPT APLICADO AOS DADOS OBTIDOS NA FILTRAÇÃO DIRETA

#Script para o planejamento FDA

```
dados<-read.csv2("~/Desktop/STAT_FDD_Tabela2.csv", sep = ";", dec = ",", header = T)
```

```
View(dados)
```

```
dados$Tempo<-as.factor(dados$Tempo)
```

```
dados$ID<-as.factor(dados$ID)
```

```
dados$Replica<-as.factor(dados$Replica)
```

```
dados$FDA<-as.factor(dados$FDA)
```

```
dados$TXT<-as.factor(dados$TXT)
```

```
dados$TXR_Média<-as.factor(dados$TXR_Média)
```

```
dados$trat[dados$FDA==1&dados$TXT==253]<-1
```

```
dados$trat[dados$FDA==1&dados$TXT==280]<-2
```

```
dados$trat[dados$FDA==1&dados$TXT==310]<-3
```

```
dados$trat[dados$FDA==1&dados$TXT==340]<-4
```

```
dados$trat[dados$FDA==2&dados$TXT==253]<-5
```

```
dados$trat[dados$FDA==2&dados$TXT==280]<-6
```

```
dados$trat[dados$FDA==2&dados$TXT==310]<-7
```

```
dados$trat[dados$FDA==2&dados$TXT==340]<-8
```

```
dados$trat[dados$FDA==3&dados$TXT==253]<-9
```

```
dados$trat[dados$FDA==3&dados$TXT==280]<-10
```

```
dados$trat[dados$FDA==3&dados$TXT==310]<-11
```

```
dados$trat[dados$FDA==3&dados$TXT==340]<-12
```

```
dados$trat<-as.factor(dados$trat)
```

#####Início da análise da variável resposta Turbidez (repetir o script para todas as outras variáveis resposta.

```
summary(aov(Turb~Error(Replica+Replica:trat)+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
```

```
#gráfico da interação taxa e tempo, em relação a turbidez
```

```
with(dados, interaction.plot(Tempo,TXT,Turb,col=1:4,cex.axis=1.3,cex.lab=1.3,xlab = "Tempo
de Filtração",ylab = "Média da Turbidez"))
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(Turb~Replica+Replica:trat+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#####Fim da análise da Turbidez

#####Inicio da análise da variável resposta Cor Aparente
summary(aov(CorA~Error(Replica+Replica:trat)+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#gráfico da interação taxa e tempo, em relação a Cor Aparente
plotmeans(dados$CorA~dados$TXT,n.label = F, xlab = "Taxa de filtração", ylab = "Média da cor
aparente",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
plotmeans(dados$CorA~dados$Tempo,n.label = F, xlab = "Tempo de filtração", ylab = "Média
da cor aparente",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
#####Fim da análise do Cor Aparente

#####Inicio da análise da variavel resposta Cor Verdadeira
summary(aov(CorV~Error(Replica+Replica:trat)+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#gráfico da interação taxa e tempo, em relação a Cor verdadeira
library(gplots)
plotmeans(dados$CorV~dados$TXT,n.label = F, xlab = "Taxa de filtração", ylab = "Média da cor
verdadeira",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
#####Fim da análise do Cor Verdadeira

#####Inicio da análise da variável resposta Temperatura
summary(aov(Temp~Error(Replica+Replica:trat)+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#gráfico da interação taxa e tempo, em relação a Temperatura
with(dados, interaction.plot(Tempo,TXT,Temp,col=1:4,cex.axis=1.3,cex.lab=1.3,xlab = "Tempo
de Filtração",ylab = "Média da Temperatura"))
plotmeans(dados$Temp~dados$FDA,n.label = F, xlab = "FDA", ylab = "Média da Tempera-
tura",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
```

```
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(Temp~Replica+Replica:trat+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#####Fim da análise do Temperatura

#####Inicio da análise da variável resposta pH
summary(aov(pH~Error(Replica+Replica:trat)+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#gráfico da interação taxa e tempo, em relação a pH
with(dados, interaction.plot(Tempo,TXT,pH,col=1:4,cex.axis=1.3,cex.lab=1.3,xlab = "Tempo de
Filtração",ylab = "Média do pH"))
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(pH~Replica+Replica:trat+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#####Fim da análise do pH

#####Inicio da análise da variavel resposta ABS
summary(aov(ABS~Error(Replica+Replica:trat)+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#gráfico da taxa, em relação a ABS
plotmeans(dados$ABS~dados$TXT,n.label = F, xlab = "Taxa de filtração", ylab = "Média da Ab-
sorbância 254nm",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
plotmeans(dados$ABS~dados$Tempo,n.label = F, xlab = "Tempo de filtração", ylab = "Média da
Absorbância254nm",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
#####Fim da análise de ABS

#####Inicio da análise da variavel resposta MON
summary(aov(MON~Error(Replica+Replica:trat)+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#gráfico da taxa, em relação a MON
plotmeans(dados$MON~dados$Tempo,n.label = F, xlab = "Tempo de filtração", ylab = "Média
da Matéria Orgânica Natural",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
#####Fim da análise de MON

#####Inicio da análise da variável resposta Q
summary(aov(Q~Error(Replica+Replica:trat)+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#gráfico da interação taxa e tempo, em relação a Q
```

```
with(dados, interaction.plot(Tempo,TXT,Q,col=1:4,cex.axis=1.3,cex.lab=1.3,xlab = "Tempo de
Filtração",ylab = "Média da Vazão"))
with(dados, interaction.plot(Tempo,FDA,Q,col=1:4,cex.axis=1.3,cex.lab=1.3,xlab = "Tempo de
Filtração",ylab = "Média da Vazão"))
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(Q~Replica+Replica:trat+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
#####Fim da análise da Q
```


APÊNDICE 2 - SCRIPT APLICADO AOS DADOS OBTIDOS NA DUPLA FILTRAÇÃO

```
##Script para Dupla Filtração
dados<-read.csv2("~/Desktop/Dados_DF.csv", sep = ",", dec = ".", header = T,stringsAsFactors
= F)
dados$Tempo<-as.factor(dados$Tempo)
dados$ID<-as.factor(dados$ID)
dados$Replica<-as.factor(dados$Replica)
dados$FDA<-as.factor(dados$FDA)
dados$TXT<-as.factor(dados$TXT)
dados$Turb<-as.numeric(dados$Turb)
dados$Cor<-as.numeric(dados$Cor)
dados$CorV<-as.numeric(dados$CorV)
dados$Temp<-as.numeric(dados$Temp)
dados$pH<-as.numeric(dados$pH)
dados$ABS<-as.numeric(dados$ABS)
dados$MON<-as.numeric(dados$MON)
dados$Q<-as.numeric(dados$Q)

dados$dummy[dados$FAP=="1"&dados$TXT=="253"]<-(1)
dados$dummy[dados$FAP=="1"&dados$TXT=="280"]<-(2)
dados$dummy[dados$FAP=="1"&dados$TXT=="310"]<-(3)
dados$dummy[dados$FAP=="1"&dados$TXT=="340"]<-(4)
dados$dummy[dados$FAP=="2"&dados$TXT=="253"]<-(5)
dados$dummy[dados$FAP=="2"&dados$TXT=="280"]<-(6)
dados$dummy[dados$FAP=="2"&dados$TXT=="310"]<-(7)
dados$dummy[dados$FAP=="2"&dados$TXT=="340"]<-(8)
dados$dummy[dados$FAP=="3"&dados$TXT=="253"]<-(9)
dados$dummy[dados$FAP=="3"&dados$TXT=="280"]<-(10)
dados$dummy[dados$FAP=="3"&dados$TXT=="310"]<-(11)
dados$dummy[dados$FAP=="3"&dados$TXT=="340"]<-(12)
dados$dummy[dados$FAP=="4"&dados$TXT=="253"]<-(13)
dados$dummy[dados$FAP=="4"&dados$TXT=="280"]<-(14)
dados$dummy[dados$FAP=="4"&dados$TXT=="310"]<-(15)
dados$dummy[dados$FAP=="4"&dados$TXT=="340"]<-(16)

dados$dummy<-as.factor(dados$dummy)

###Fazendo o delineamento split-split-plot para o parâmetro turbidez
library(agricolae)
library(xtable)
with(dados, ssp.plot(Replica,dummy,FDA,Tempo,Turb))
library("gplots")
with(dados,interac-
tion.plot(Tempo,dummy,Turb,col=1:16,ylim=c(.5,2.2),cex.axis=1.3,cex.lab=1.3,xlab="Tempo
de filtração",ylab="Média da Turbidez",xpd = F))
plotmeans(dados$Turb~dados$FDA,n.label = F, xlab = "FDA", ylab = "Média da Turbi-
dez",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(Turb~Replica+Replica:dummy+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
```

```
###Fim da análise da Turbidez
```

```
###Fazendo o delineamento split-split-plot para o parâmetro cor aparente
```

```
library(agricolae)
with(dados, ssp.plot(Replica,dummy,FDA,Tempo,Cor))
library("gplots")
with(dados, interaction.plot(Tempo,dummy,Cor,col=1:16,cex.axis=1.3,cex.lab=1.3,
xlab="Tempo de filtração",ylab="Média da Cor aparente",xpd=F))
plotmeans(dados$Cor~dados$FDA,n.label = F, xlab = "FDA", ylab = "Média da Cor apa-
rente",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(Cor~Replica+Replica:dummy+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
###Fim da análise da cor aparente
```

```
###Fazendo o delineamento split-split-plot para o parâmetro cor verdadeira
```

```
library(agricolae)
with(dados, ssp.plot(Replica,dummy,FDA,Tempo,CorV))
library("gplots")
with(dados, interaction.plot(Tempo,dummy,CorV,col = 1:16,cex.axis = 1.3,cex.lab = 1.3, ylab =
"Média da Cor verdadeira", xlab = "Tempo de filtração"))
plotmeans(dados$CorV~dados$dummy,n.label = F, xlab = "dummy", ylab = "Média da Cor ver-
dadeira",cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(CorV~Replica+Replica:dummy+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
###Fim da análise da cor verdadeira
```

```
###Fazendo o delineamento split-split-plot para o parâmetro absorbância
```

```
library(agricolae)
with(dados, ssp.plot(Replica,dummy,FDA,Tempo,ABS))
library("gplots")
with(dados, interaction.plot(Tempo,dummy,ABS,col = 1:16, cex.axis = 1.3, cex.lab = 1.3, xlab =
"Tempo de Filtração", ylab = "Média da Absorbância", xpd = F))
plotmeans(dados$ABS~dados$dummy,n.label = F, cex.axis = 1.3, cex.lab = 1.3, xlab =
"dummy", ylab = "Média da Absorbância")
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(ABS~Replica+Replica:dummy+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
###Fim da análise da absorbância
```

```
###Fazendo o delineamento split-split-plot para o parâmetro MON
```

```
library(agricolae)
with(dados, ssp.plot(Replica,dummy,FDA,Tempo,MON))
library("gplots")
with(dados, interaction.plot(Tempo,dummy,MON, col = 1:16, cex.axis = 1.3, cex.lab = 1.3, xlab =
"Tempo de filtração", ylab = "Média da Matéria Orgânica Natural", xpd = F))
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
plot(aov(MON~Replica+Replica:dummy+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
###Fim da análise de MON
```

```
###Fazendo o delineamento split-split-plot para o parâmetro pH
```

```
library(agricolae)
with(dados, ssp.plot(Replica,dummy,FDA,Tempo,pH))
```

```
##Fim da análise de pH
```

```
###Fazendo o delineamento split-split-plot para o parâmetro Temperatura
```

```
library(agricolae)
```

```
with(dados, ssp.plot(Replica,dummy,FDA,Tempo,Temp))
```

```
library("gplots")
```

```
with(dados, interaction.plot(Tempo,dummy,Temp,col=1:16,cex.axis=1.3,cex.lab=1.3, xlab =  
"Tempo de Filtração", ylab = "Média da Temperatura", xpd = F))
```

```
plotmeans(dados$Temp~dados$FDA,n.label = F, xlab = "FDA", ylab = "Média da Tempera-  
tura", cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
```

```
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
```

```
plot(aov(Temp~Replica+Replica:dummy+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
```

```
##Fim da análise de Temperatura
```

```
###Fazendo o delineamento split-split-plot para o parâmetro vazão
```

```
library(agricolae)
```

```
with(dados, ssp.plot(Replica,dummy,FDA,Tempo,Q))
```

```
library("gplots")
```

```
with(dados, interaction.plot(Tempo,dummy,Q,col=1:16, cex.axis=1.3,cex.lab=1.3, xlab =  
"Tempo de Filtração", ylab = "Média da Vazão", xpd = F))
```

```
plotmeans(dados$Q~dados$FDA,n.label = F, xlab = "FDA", ylab = "Média da vazão",  
cex.axis=1.3,cex.lab=1.3)
```

```
#analisar os resíduos (averiguar se o modelo esta adequado)
```

```
plot(aov(Temp~Replica+Replica:dummy+Tempo*TXT*FDA, data = dados))
```

```
##Fim da análise de vazão
```