

II-330 - USO DA CLARIFICAÇÃO COMO ALTERNATIVA DE PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATORES UASB

Silvânia dos Santos Lucas ⁽¹⁾

Tecnóloga em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal do Ceará. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande. Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Professora Adjunta da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Martina de Sousa Maia ⁽²⁾

Química Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba. Mestranda em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba.

Camila Bonfim Miranda ⁽³⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande.

Lincoln Soares Mota ⁽⁴⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande.

Rodrigo de Andrade Barbosa ⁽⁵⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Pesquisador do Instituto Nacional do Semiárido – INSA.

Endereço⁽¹⁾: Rua das Violetas, 675 – Capim Macio – Natal – RN – CEP: 58.078-160 – Brasil – Tel (83) 99625-3398 - e-mail: silvania_sls@hotmail.com

RESUMO

A necessidade de produzir efluentes de qualidade, é crescente, seja para o lançamento em corpos hídricos ou para reuso urbano, agrícola ou industrial. No Brasil o lançamento de efluentes seguem os padrões do conselho nacional do meio ambiente através da resolução CONAMA nº 430/2011. Uma tecnologia de baixo custo para o tratamento de esgoto é o reator UASB (do inglês, Upflow Anaerobic Sludge Blanket), ele possui as vantagens de remover matéria orgânica e operar em alta taxa, e como desvantagem destaca-se a dificuldade do efluente atender aos padrões de lançamentos, evidenciando a necessidade de um pós-tratamento para adequar o efluente final. Dentre as opções de pós-tratamento, este trabalho irá estudar a clarificação convencional, composta de quatro operações unitárias, sendo estas coagulação, floculação, sedimentação e filtração. A clarificação busca a remoção de sólidos totais e suspensos, turbidez, cor e fósforo. Em busca da otimização dessas operações unitárias utilizou-se o planejamento experimental fatorial com três pontos centrais como forma de encontrar o ponto ótimo para remoção de fósforo, DQO (Demanda Química de Oxigênio), SST (Sólidos Suspensos Totais) e turbidez. Associando as respostas experimentais e os diagramas de pareto e superfícies de respostas com o auxílio do software STATISTICA obtiveram-se uma remoção acima de 90% de remoção de fósforo total e turbidez, 60% de remoção de DQO e 55% de SST.

PALAVRAS-CHAVE: Reator UASB, Pós tratamento, planejamento experimental, reúso.

INTRODUÇÃO

A escassez dos recursos hídricos frente à sua crescente demanda para suprir as necessidades básicas da população tem sido motivo de preocupação e estudo no mundo. A situação torna-se ainda mais abrangente em regiões semiáridas, a exemplo do Nordeste brasileiro, que dispõe de poucos recursos hídricos e apresenta baixos índices pluviométricos, não favorecendo o aumento das águas nos corpos hídricos naturais (rios, lagos e lagoas) e nos reservatórios. Além da baixa disponibilidade hídrica a poluição dessas águas com esgoto é fator preponderante para intensificar o fenômeno da eutrofização e reduzir ainda mais a quantidade, bem como a qualidade deste recurso.

Um dos maiores problemas causadores da poluição dos corpos aquáticos superficiais no Brasil é a falta de saneamento básico, causando assim o lançamento inadequado de águas residuárias geradas pela população. Em torno de 51% dos domicílios brasileiros ainda não tem acesso à coleta de esgoto, e com relação ao tratamento, apenas 46% do esgoto produzido no país é tratado, e 54% é descartado na natureza, sem tratamento (SNIS, 2017). Diante da problemática enfrentada, uma alternativa viável seria o reúso das águas residuárias, uma vez que essa prática tem potencial para suprir parte desta demanda.

Com o tratamento adequado das águas residuárias é possível reutilizá-las, aplicando técnicas de reúso para fins menos restritivos, como é o caso da agricultura, dependendo do tipo de cultura, aquicultura e para o setor industrial, reduzindo assim a demanda de água sob os mananciais (MIERZWA; HESPANHOL, 2005). Dentre as tecnologias de tratamento biológico disponíveis, o tratamento do esgoto pode ser realizado através de sistemas anaeróbio, aeróbio ou pela combinação de ambos. No entanto, para fins mais restritivos, a utilização de processo físico-químico combinado aos processos biológicos busca melhorar a remoção de fósforo, sólidos suspensos e totais e turbidez de forma mais eficiente. Uma das grandes vantagens do processo físico-químico é a sua flexibilidade, sendo de fácil adaptação nas operações unitárias de um projeto, já os biológicos são mais complexos, requerendo assim uma maior complexidade operacional (FILHO; PIVELI, 2009).

Dentre os sistemas de tratamento anaeróbio o reator de fluxo ascendente e manta de lodo (do inglês, Upflow Anaerobic Sludge Blanket – UASB) apresentam-se como bom removedor de material orgânico, operando a alta taxa, ou seja, alta carga orgânica. No entanto, o efluente gerado neste tipo de reator não atende aos padrões estabelecidos pela resolução Nº 430/ 2011 do CONAMA, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, haja vista que não ocorre remoção de nutrientes e patógenos, havendo assim a necessidade de pós-tratamento adequado para o reúso e/ou recarga de aquíferos (CHERNICHARO, 2007). O pós-tratamento visa dar um polimento na qualidade desse efluente, removendo constituintes ainda indesejáveis.

A maioria das tecnologias de pós-tratamento é composta por operações unitárias, as quais possuem vários níveis de tratamento, custos e sofisticação, a depender da qualidade do efluente requerido. Uma alternativa para o pós-tratamento do efluente de reator UASB é o sistema de clarificação convencional, utilizado no tratamento de água de abastecimento, este é composto por quatro unidades operacionais (coagulação, floculação, decantação e filtração) que objetivam a remoção dos sólidos suspensos e das partículas coloidais por processos físicos e químicos (FABRETI, 2006).

A coagulação é a desestabilização das partículas coloidais e suspensas, essa desestabilização ocorre a partir da ação de um agente coagulante que vai formar floco, pois este coagulante fornece carga iônica oposta ao coloide, causando assim aglomeração entre elas, formando flocos. Esta é a primeira etapa do processo, uma operação de mistura rápida. Sua eficiência influi no desempenho das outras etapas do tratamento, pois favorecendo a qualidade do efluente, aumentando assim a duração das carreiras de filtro (LIBÂNIO, 2008)

Alguns fatores devem ser levados em consideração para aplicação da coagulação, como o tipo de coagulante, pH, alcalinidade, natureza e o tamanho das partículas causadoras de odor, turbidez e uniformização da mistura dos produtos químicos ao efluente (LIBÂNIO, 2008).

O coagulante escolhido deve levar em consideração o tipo de efluente, a tecnologia de tratamento, custo do coagulante e dos produtos químicos associados como auxiliares de coagulação. Geralmente são constituídos por cátions polivalentes (Al^3 , Fe^3 , Fe^2 , Ca^2 , etc.) que neutralizam as cargas elétricas das partículas presentes, pois geralmente as águas residuais possuem carga negativa. Os coagulantes convencionais mais utilizados são o sulfato de alumínio, cloreto férrico, cloreto ferroso, entre outros devido a eletropositividade dos elementos químicos. Os flocos formados sofrem aumento com a adição de polieletrólitos que formam uma “ponte” entre a partícula floculada e os polímeros presentes (LIBÂNIO, 2008; CAVALCANTE, 2009, METCALF e EDDY, 2003).

A floculação constitui um conjunto de fenômenos físicos, que devem ser avaliados o tempo de detenção e o gradiente de velocidade. Nesta etapa vai acontecer a formação mais robusta dos flocos. O crescimento dos flocos acontece até um tamanho limite no qual se equivalem as tensões de cisalhamento e as forças de aglutinação que mantêm as partículas desestabilizadas à estrutura do floco (LIBÂNIO, 2008).

Sedimentação pode ser considerada a operação unitária mais simples de todo o processo, consiste em fazer a separação das partículas utilizando as forças gravitacionais, assim as partículas com densidade superior da água irão dirigir-se ao fundo do decantador com o auxílio da força gravitacional.

Na busca por respostas eficientes percebe-se a necessidade do uso de métodos estatísticos para a otimização de produtos e processos (PIMENTA *et al.*, 2014), como forma de reduzir os custos, o tempo de processo, o rendimento e avaliar as variáveis independentes e a interação entre elas.

Diante do exposto, esta pesquisa tem por objetivo avaliar o estudo da clarificação convencional como alternativa de pós-tratamento do efluente de reator UASB utilizando o coagulante policloreto de alumínio (PAC), determinando assim as condições operacionais que se adequam ao tratamento deste, utilizando o planejamento experimental e a metodologia de superfície de resposta como forma de otimizar e encontrar o ponto ótimo das variáveis.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução da pesquisa está sendo utilizado o efluente do reator UASB modificado segundo Santos *et al.* (2016), presente na Figura 7, com volume de 2,5 m³, altura de 1,7 m e capacidade de tratar até 10 m³/dia, onde o mesmo encontra-se em operação e está estabilizado. Inicialmente foi realizada a caracterização desse efluente, verificando os parâmetros DQO (Demanda química de oxigênio), DBO (Demanda bioquímica de oxigênio), fósforo total, turbidez, pH, frações de nitrogênio e sólidos totais, todos de acordo com APHA *et al.* (2012), exceto alcalinidade que foi feito de acordo com o método de Kapp descrito por Buchauer (1988).

Para os ensaios de coagulação, floculação e sedimentação foi utilizado o *Jar test* da marca Quimis, como apresentado na Figura 1, com 6 jarros, onde foi incluído no jarro 1L do efluente de reator UASB. Em seguida, adicionou-se o coagulante policloreto de alumínio (PAC) a 1%, em quantidades reguladas de acordo com o planejamento experimental.



Figura 1 - Análise experimental via jar test.

Foi executado um planejamento experimental com o coagulante PAC, um fatorial 2³ com três pontos centrais, de acordo com as variáveis selecionadas da Tabela 1, totalizando 11 experimentos como no delineamento exposto na Tabela 2, tendo como variáveis independentes a concentração de coagulante (A), gradiente de velocidade da floculação (B) e tempo de sedimentação (C). Para o gradiente de velocidade da coagulação foi estabelecido uma rotação de 100 RPM (rotação por minuto), durante 30 segundos e o tempo de floculação de 5 minutos.

Tabela 1: Matriz de planejamento fatorial $2^3 + 3$ P.C.

VARIÁVEIS	NÍVEIS		
Concentração de Coagulante - A (mg/L)	-	0	+
Gradiente de Velocidade da Floculação - B (RPM)	10	25	40
Tempo de Sedimentação - C (min)	20	25	30
	5	10	15

Tabela 2: Delineamento Experimental.

	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

Foram selecionados cinco parâmetros físico-químicos, que seriam as variáveis respostas a serem estudados e avaliados, sendo estes apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros físico-químicos.

Parâmetro	Métodos Analíticos	Referência
DQO ¹	Titulométrico Refluxação Fechada	5220 C. / APHA et al. (2012)
Fósforo total	Ácido Ascórbico	4500-P E / APHA et al. (2012)
pH	Potenciométrico	4500 / APHA et al. (2012)
Sólidos	Gravimétrico	2540 D / APHA et al. (2012)
Turbidez	Turbidímetro	-

DQO¹: Demanda química de oxigênio.

A influência das variáveis independentes foi avaliada utilizando a análise estatística com o auxílio do *software* STATISTICA, com o objetivo de verificar o parâmetro otimizado que melhor se ajusta ao efluente de reator UASB.

RESULTADOS

Na Tabela 4, são apresentados os valores da caracterização do esgoto bruto doméstico e do efluente do reator UASB. O reator está em funcionamento a aproximadamente um ano e já se encontra estável, portanto os dados apresentados são uma média das análises realizadas nos meses de janeiro, fevereiro e março. Os parâmetros contemplados foram os seguintes: DQO (Demanda Química de Oxigênio), DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), pH (Potencial Hidrogeniônico), Amônia, turbidez, Alcalinidade total, Fósforo total e sólidos totais.

Tabela 4: Caracterização do esgoto bruto e do efluente do reator UASB.

<i>Parâmetro</i>	<i>Esgoto Bruto</i>	<i>Efluente UASB</i>
DBO (mg/L)	376,6	116,2
DQO (mg/L)	546,01	161,11
pH	7,31	7,25
Amônia (mg/L)	56,88	61,13
Turbidez (NTU)	98	32,2
Alcalinidade total (mg/L)	369,72	438,12
Fósforo total (mg/L)	5,96	6,22
Sólidos Totais (mg/L)	291,2	109,5

O efluente do reator UASB apresenta-se com uma carga orgânica reduzida em relação ao esgoto bruto, como foi apresentado anteriormente, porém encontra-se turvo, com uma presença elevada de sólidos em suspensão, nutrientes e patógenos. Sendo assim, após o estudo das suas características, foi avaliado a eficiência da clarificação para redução de turbidez, sólidos totais, DQO remanescente e fósforo, com o uso de planejamento experimental associado a metodologia de superfície de resposta.

O fato do efluente ser proveniente de um processo biológico, este sofre variações portanto no início do planejamento foi feito uma caracterização no dia da análise, para as respectivas comparações com os dados do planejamento, como apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Caracterização do efluente UASB, antes dos experimentos com *Jar test*.

	pH	Turbidez (NTU)	Fósforo total (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
EFLUENTE UASB	7,5	33	8,62	229,3	104

O planejamento fatorial 2³ acrescidos de 3 pontos centrais teve como variáveis respostas a remoção, em porcentagem, do fósforo total, turbidez, DQO e SST. A Tabela 6 apresenta as remoções alcançadas utilizando o primeiro planejamento experimental.

Tabela 6: Planejamento fatorial 2³ acrescidos de 3 PC com variáveis de resposta.

<i>Exp.</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>pH</i>	<i>Remoção de turbidez %</i>	<i>Remoção de fósforo total %</i>	<i>Remoção de DQO%</i>	<i>Remoção de SST%</i>
1	-1	-1	-1	7,44	84	29	41	48
2	1	-1	-1	6,65	88	85	44,3	71
3	-1	1	-1	7,39	78	34	31,8	52
4	1	1	-1	6,84	88	87	42,0	41
5	-1	-1	1	7,37	85	35	38,1	77
6	1	-1	1	6,61	85	86	38,1	54
7	-1	1	1	7,47	88	33	31,5	70
8	1	1	1	6,89	90	92	36,9	38
9	0	0	0	7,16	79	69	43,5	7
10	0	0	0	7,11	78	64	41,5	4
11	0	0	0	7,20	79	68	41,8	7

Após obter os resultados dessas remoções realizou-se a análise estatística com o auxílio do *software* STATISTICA para cada parâmetro, investigando assim o melhor caminho para o ponto ótimo de remoção. O parâmetro pH se encontra presente, mas não é uma variável dependente, pois este era medido para analisar se após a adição do PAC haveria uma mudança brusca no seu valor, no entanto, percebe-se que a variação é muito

pequena, sendo essa uma das vantagens do PAC, sua aplicação em uma vasta faixa de pH e pequena variação nos seus valores (SANTOS, 2011).

As variáveis independentes (concentração de coagulante, gradiente de velocidade da floculação e tempo de sedimentação) influenciam no parâmetro turbidez de acordo com o diagrama de Pareto na Figura 2.

Segundo Mothe *et al* (2005), o diagrama de Pareto está associado as interações de cada variável, sejam elas de forma individual ou de duas em duas, sendo assim para obter um valor significativo mediante o planejamento, a barra deve encontrar-se em uma posição à direita que ultrapasse a linha vermelha, onde o nível de significância é 95%. Observa-se então na Figura 2, que a curvatura, concentração de coagulante, tempo de sedimentação e as interações entre concentração de coagulante versus tempo de sedimentação, tempo de sedimentação versus gradiente de velocidade da floculação e concentração de coagulante versus gradiente de velocidade de floculação, apresentaram-se todos significativos para o planejamento.

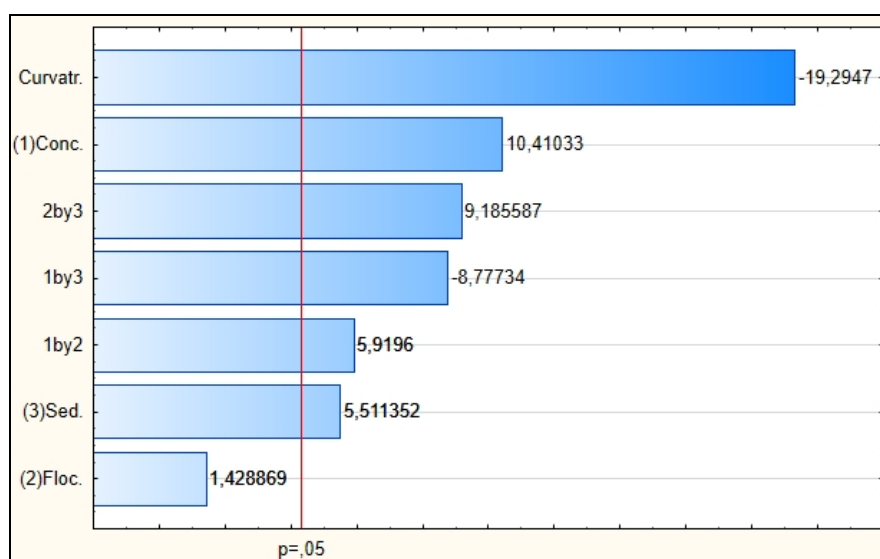
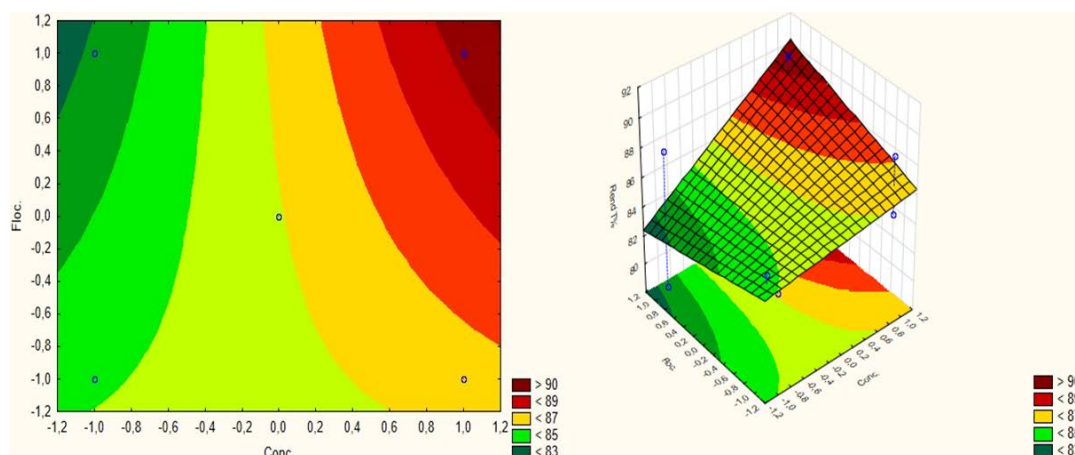


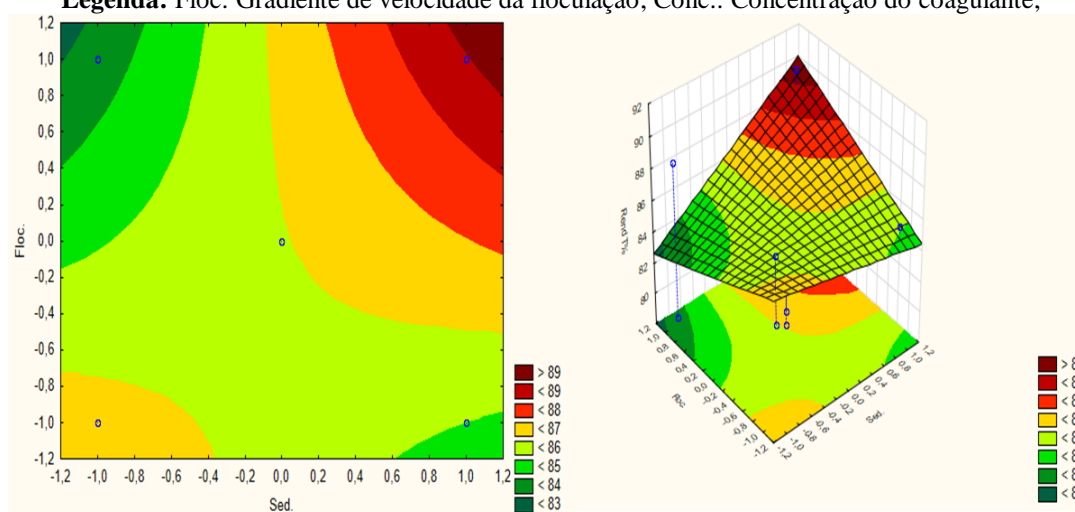
Figura 2: Diagrama de Pareto para remoção de turbidez (%).

Legenda: (1) Conc.: Concentração do coagulante; (2) Floc: Gradiente de velocidade da floculação; (3) Sed.: Tempo de sedimentação.

A variável curvatura apresenta-se significativa, pois essa representa que no modelo podem ser adicionados pontos quadráticos, sendo estes pontos axiais que se adicionados trariam uma melhor resposta para o modelo. As concentrações de coagulante juntamente com o tempo de sedimentação apresentaram-se significativos, pois estes nos mostram que se aumentássemos esses fatores obteríamos uma maior remoção de turbidez. Em concordância com o digrama de Pareto temos as curvas de contorno e as superfícies de resposta, que são apresentadas na Figura 3.



Legenda: Floc: Gradiente de velocidade da floculação; Conc.: Concentração do coagulante;



Legenda: Floc: Gradiente de velocidade da floculação; Sed.: Tempo de sedimentação.

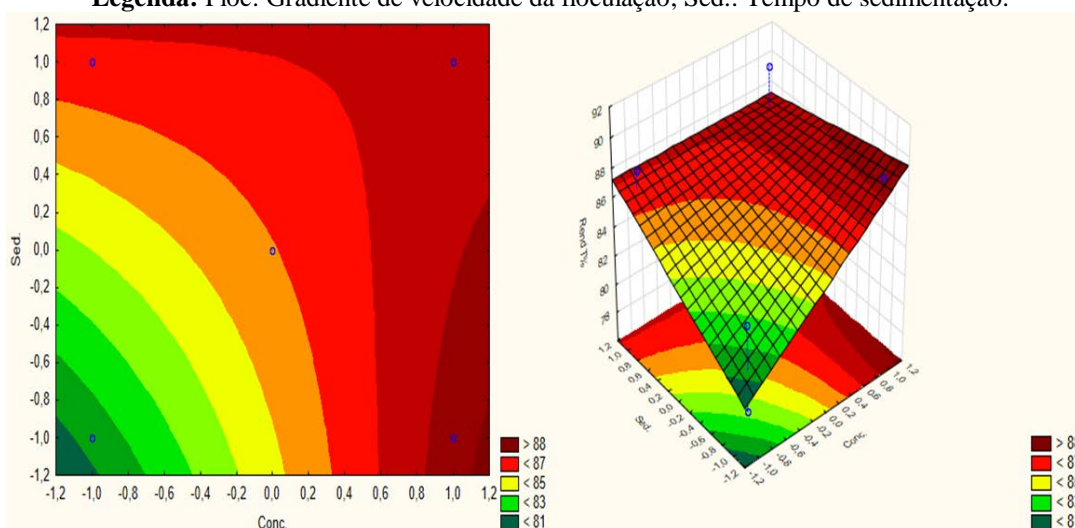


Figura 3: Curvas de contorno associada a superfície de resposta para remoção de turbidez.

Legenda: Sed.: Tempo de sedimentação.; Conc.: Concentração do coagulante.

De acordo com a Figura 3 é possível perceber que na interação entre gradiente de velocidade de floculação e concentração do coagulante e entre gradiente de velocidade de floculação e tempo de sedimentação, obtemos uma melhor remoção, em torno de 90%, quando estes se encontram nos maiores níveis, ou seja, maior concentração de coagulante, maior gradiente de velocidade e maior tempo de sedimentação, já a interação entre

concentração de coagulante e tempo de sedimentação os melhores resultados são obtidos para maiores concentração do coagulante e menores tempos de sedimentação, concordando com o diagrama de Pareto, que apresenta essa interação significativa.

Uma das formas mais comuns e rápidas de remoção de fósforo é a precipitação química, por sais de ferro e alumínio, pois a precipitação química apresenta um efluente clarificado parcialmente livre de matéria orgânica em suspensão ou em estado coloidal (TCHOBANOGLIOUS, 2003). Para verificar a influência dos fatores no parâmetro fósforo total foi utilizado o diagrama de Pareto, Figura 4, avaliando assim as influências de cada parâmetro e suas interações.

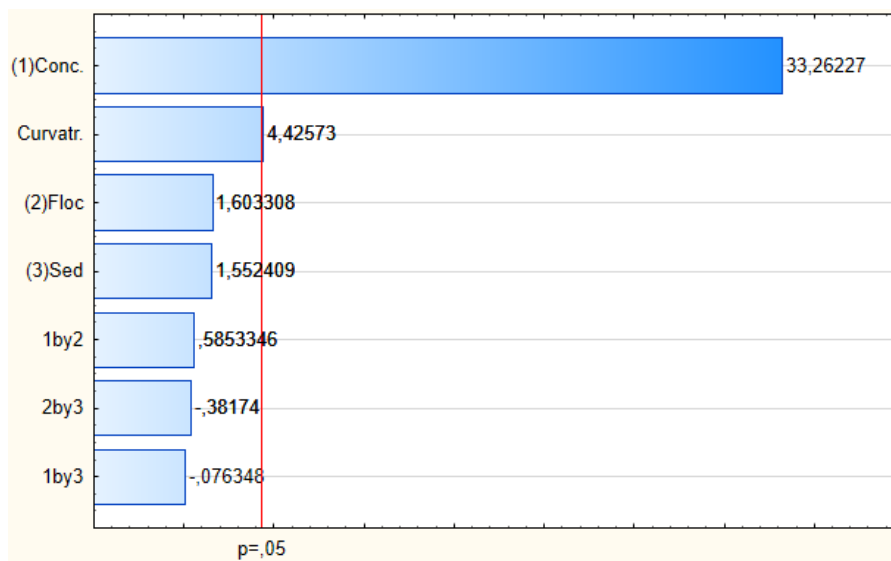
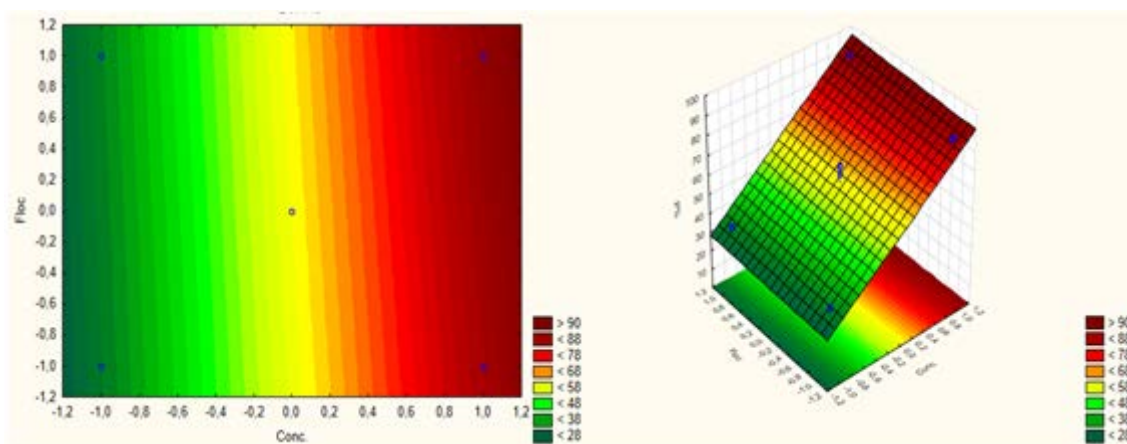


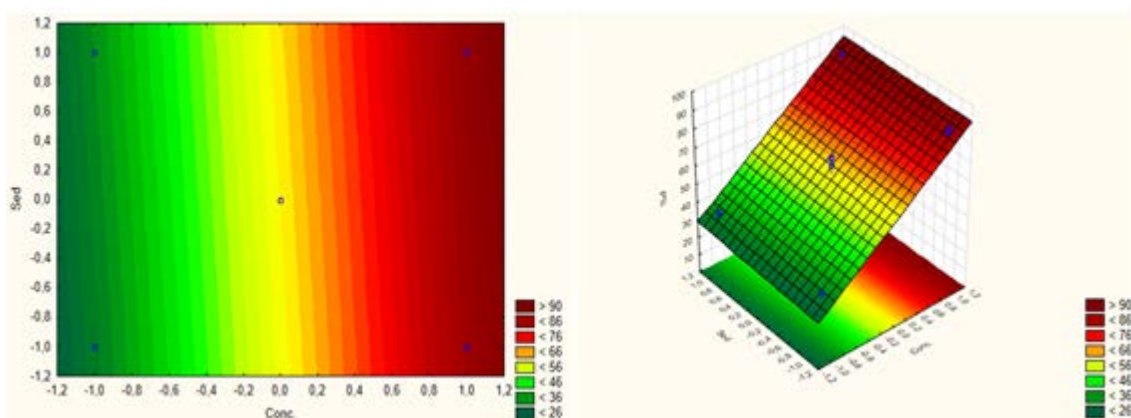
Figura 4: Diagrama de Pareto para remoção de fósforo.

Legenda: Conc.: Concentração de coagulante; Floc.: Gradiente de velocidade da floculação; Sed.: Tempo de sedimentação.

Para a remoção de fósforo apenas a concentração de coagulante e a curvatura, foram significativos. Porém o diagrama aponta que se houvesse um aumento do tempo de sedimentação e um aumento do gradiente de velocidade da floculação obteríamos uma melhor remoção de fósforo, no entanto o aumento do gradiente de velocidade não pode ser brusco, pois este pode causar a quebra dos flocos. Para um melhor delineamento a respeito de qual caminho seguir para uma maior remoção de fósforo, apresentam-se as curvas de contorno e superfície de resposta, Figura 5, que vão ajudar a otimizar o experimento.



Legenda: Conc.: Concentração do coagulante; Floc.: Gradiente de velocidade da floculação.



Legenda: Sed.: Tempo de sedimentação; Conc.: Concentração do coagulante.

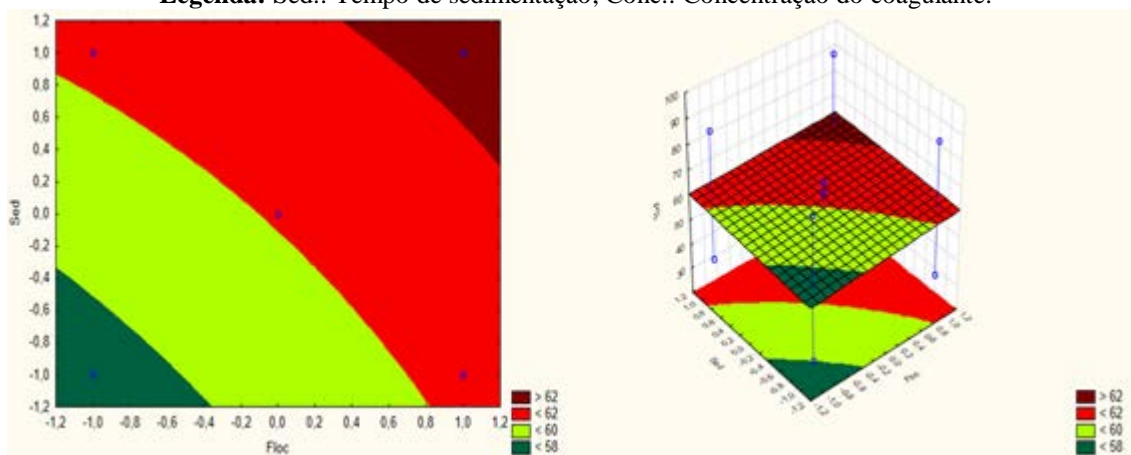


Figura 5: Curvas de contorno e superfície de resposta para remoção de fósforo.

Legenda: Sed.: Tempo de sedimentação; Floc.: Gradiente de velocidade da floculação.

A partir da figura 5, podemos concluir que na interação entre concentração de coagulante e gradiente de velocidade da floculação temos a concentração de coagulante em maior nível, ou seja, maior concentração como a variável influenciável para a remoção de fósforo, já o gradiente de velocidade apresentou-se sem significância para remoção de fósforo, pois mesmo em seu nível menor ou maior, apresentou a mesma resposta, não havendo variação no seu fator, quando interagiu com a concentração do coagulante. Na interação entre tempo de sedimentação e concentração do coagulante obteve-se o mesmo comportamento com relação a concentração de coagulante e o tempo de sedimentação não foi influenciável, porém em associação com o diagrama de Pareto podemos extrair a informação de que um aumento dessa variável aumentaria a remoção de

fósforo. A interação entre tempo de sedimentação e gradiente de velocidade da floculação, apresentou-se significativa apenas nos níveis máximos para remoção de fósforo.

Mediante os dados apresentados percebe-se que para obter uma maior remoção de fósforo é necessário o aumento da concentração de coagulante, aumento do tempo de sedimentação e pode-se haver um controle do gradiente de velocidade da floculação perante a faixa apresentada neste planejamento.

O material orgânico geralmente está associado as substâncias húmicas, o grau em que a coagulação pode remover o material orgânico depende do tipo de material presente, mas em geral as espécies de menor peso molecular, como os ácidos fúlvicos, são mais difíceis de remover por coagulação, no entanto os ácidos húmicos com peso molecular mais elevado tender a ser mais fáceis de serem removidas (BRATBY, 2016). Como este sistema se trata de um efluente de UASB, este já tem uma remoção significativa de matéria orgânica, no entanto a coagulação tende a remover uma pequena parcela ainda presente, mesmo assim um material remanescente permanece presente.

O diagrama de Pareto (Figura 6) apresenta as três variáveis independentes como significativas, e é possível observar que quanto maior a concentração de coagulante maior será a remoção de DQO, e se houver uma diminuição do gradiente de velocidade da floculação ocorrerá um melhor resultado, porém na variável tempo de sedimentação este apresenta-se contraditório ao processo físico, pois ele nos mostra que se houver uma diminuição no tempo de sedimentação terá uma melhor remoção de DQO, no entanto fisicamente sabe-se que a medida que aumenta-se o tempo de sedimentação teremos uma menor quantidade de sólidos suspensos e assim uma menos quantidade de matéria orgânica.

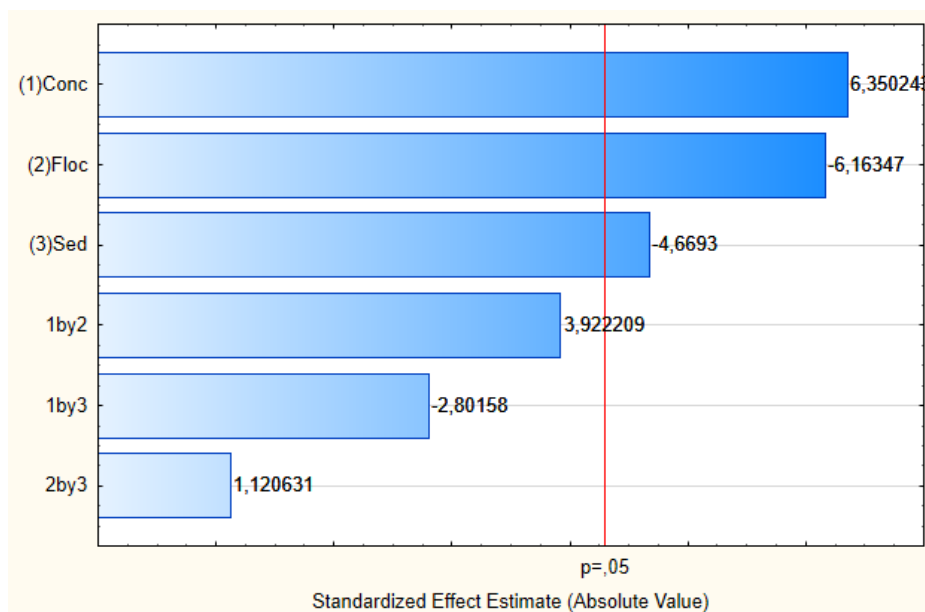
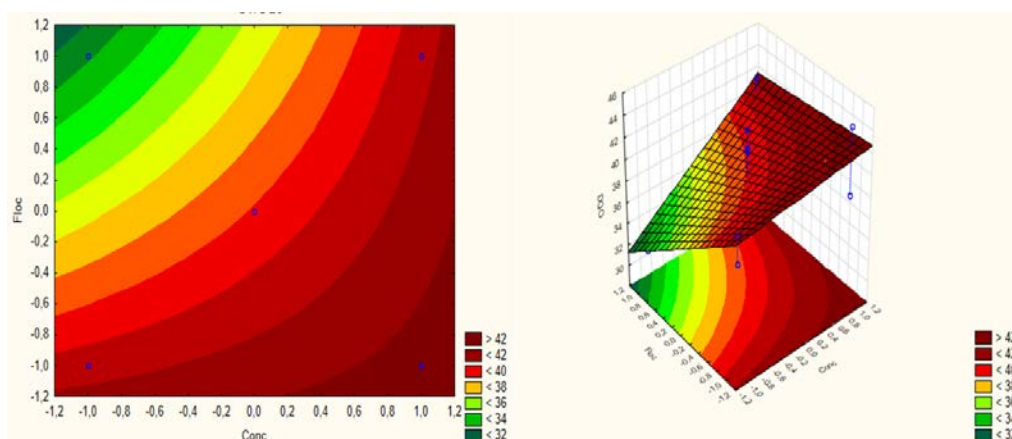


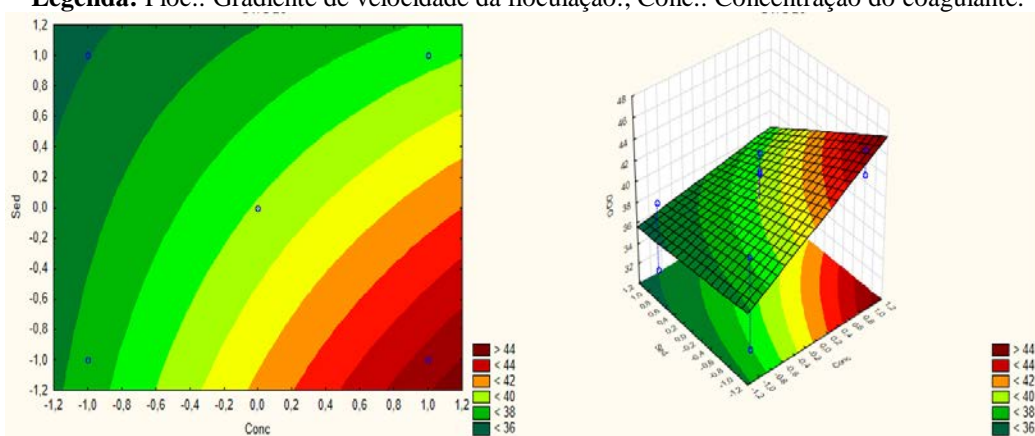
Figura 6: Diagrama de Pareto para remoção de DQO.

Legenda: (1) Conc.: Concentração de coagulante; (2) Floc: Gradiente de velocidade da floculação; (3) Sed.: Tempo de sedimentação; 1by2: Interação entre Conc. e Floc.; 1by3: Interação entre Conc. e Sed.; 2by3: Interação entre Floc. e Sed.

A Figura 7 com as superfícies de respostas e as curvas de contorno apresentaram que a melhor remoção de DQO ocorreu quando o experimento se encontrava no maior nível de concentração de coagulante (+1), e menor tempo de sedimentação (-1) e gradiente de velocidade de floculação (-1).



Legenda: Floc.: Gradiente de velocidade da floculação.; Conc.: Concentração do coagulante.



Legenda: Sed.: Tempo de sedimentação.; Conc.: Concentração do coagulante.

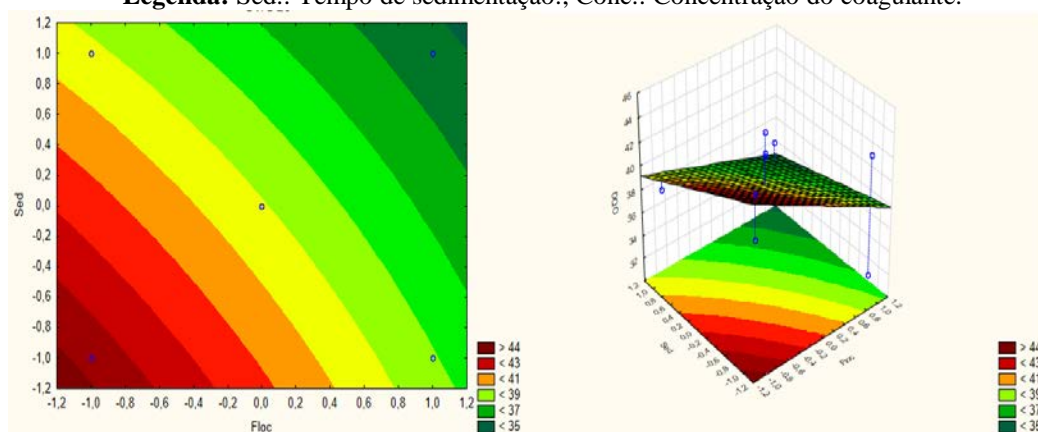


Figura 7: Curvas de contorno e superfície de resposta para remoção de DQO.

Legenda: Sed.: Tempo de sedimentação.; Floc: Gradiente de velocidade da floculação.

No processo de coagulação ocorre a desestabilização das partículas coloidais com a adição de coagulantes, essas partículas rapidamente se aglomeram e formam flocos (METCALF & EDDY, 2003). Sendo assim, ocorre a diminuição de sólidos presentes no efluente. Mediante essa informação foi realizado o estudo sendo a variável resposta, sólidos totais, no qual o diagrama de Pareto demonstrado na Figura 7, apresentou as variáveis significativas para remoção de sólidos.

O modelo apresentou a curvatura como significativa mostrando que este pode haver pontos axiais para melhor responder ao modelo, ao gradiente de velocidade assim como a concentração de coagulante podem ser diminuídos para que ocorra uma melhor remoção de sólidos, o que é esperado, pois se houver um aumento de coagulante ele aumentará a quantidade de sólidos desestabilizados e o aumento do gradiente de velocidade da

floculação fará com que esses flocos se quebrem, não favorecendo a sedimentação. A variável tempo de sedimentação correspondeu ao esperado, que seria um aumento do seu tempo de sedimentação par a uma melhor remoção de sólidos totais.

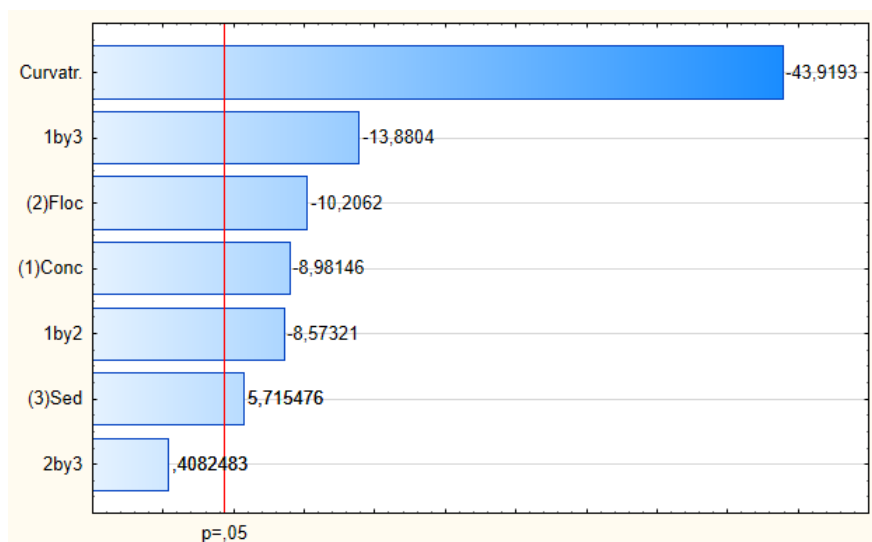
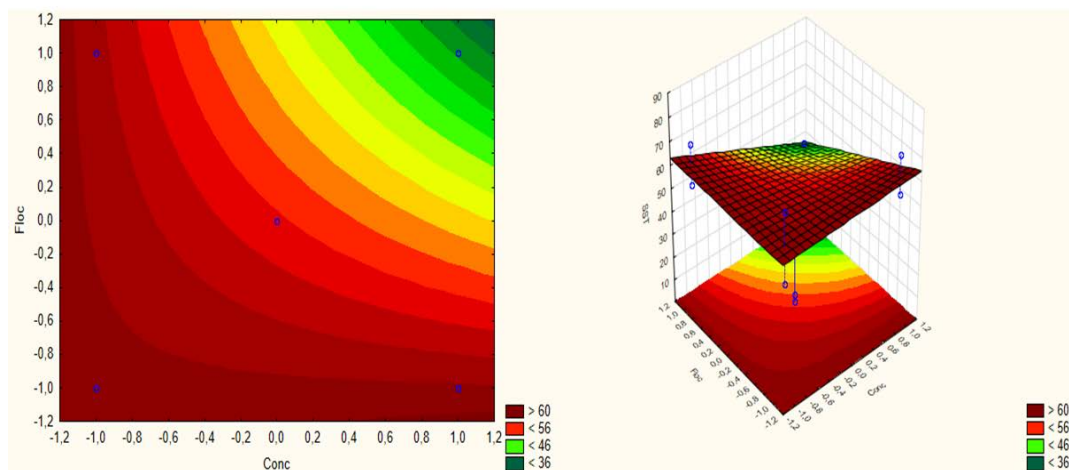
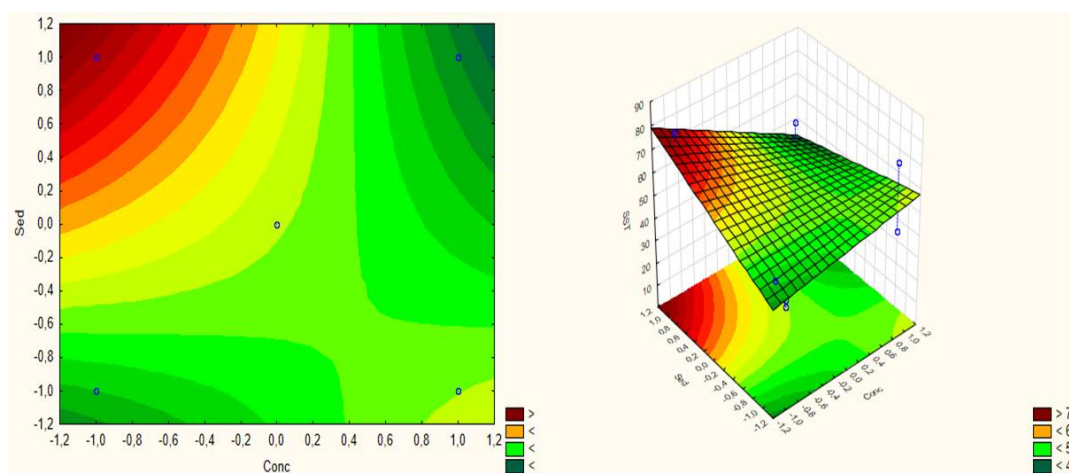


Figura 8: Diagrama de Pareto para remoção de sólidos totais.

A partir das curvas de contorno e da superfície de resposta na Figura 9, podemos perceber que na interação entre gradiente de velocidade de floculação e concentração de coagulante, em qualquer faixa, desde o menor nível (-1) até o nível máximo (+1) obtiveram-se remoções significativas de sólidos, porém quando essa interação é feita com a variável dependente tempo de sedimentação, só se consegue uma maior remoção quando esta apresenta o nível máximo do planejamento experimental, respondendo assim as informações apresentadas no diagrama de Pareto.



Legenda: Floc: Gradiente de velocidade da floculação; Conc.: Concentração de coagulante.



Legenda: Sed.: Tempo de sedimentação.; Conc.: Concentração de coagulante.

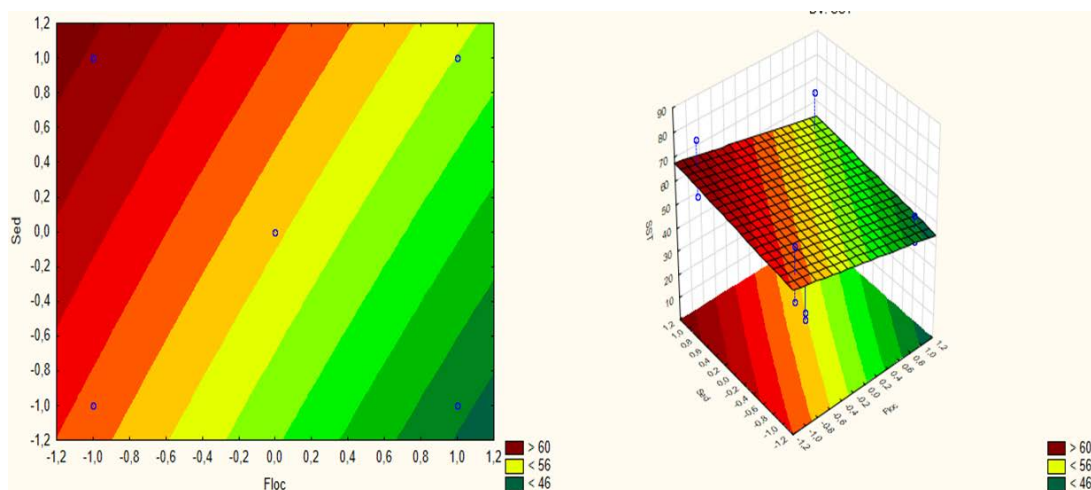


Figura 9: Curvas de contorno e superfície de resposta para remoção de sólidos totais.

Legenda: Sed.: Tempo de sedimentação.; Floc: Gradiente de velocidade da floculação.

CONCLUSÕES

A busca pela otimização das variáveis respostas nos planejamentos fatoriais como remoção de fósforo, turbidez, DQO e SST, foram necessárias para que estas atendessem os padrões de lançamento impostos pela resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, pois embora esta não especifique o limite máximo de fósforo em sua resolução, no artigo 17 afirma que é de competência do órgão ambiental definir padrões específicos para disposição do parâmetro fósforo em corpos receptores.

As variáveis dependentes concentração de coagulante, gradiente de velocidade da floculação e tempo de sedimentação foram otimizadas, e mediante os dados apresentados com o auxílio do *software* ESTATISTICA, percebeu-se que a maior concentração de coagulante e tempo de sedimentação foram os mais significativos em representação do conjunto de dados, já o parâmetro gradiente de velocidade da floculação mostrou-se insignificante estatisticamente na faixa de 20 a 30 RPM, pois no mínimo ou máximo demonstrou a mesma eficiência, sendo assim adotado o parâmetro de 30 RPM como fixo durante a floculação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, 2012. **Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater**, 22nd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC.
2. BRATBY, J. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. IWA PUBLISHING, 3ª ed, 2016
3. CAVALCANTI, J. E.. W. A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. São Paulo: Engenho, 2009. 453p.
4. CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. 2 ed, v. 5, Belo Horizonte-MG: DESA, UFMG, 2007, 380p.
5. CONAMA, Resolução nº 357. Ministério do Meio Ambiente - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Diário Oficial da União – DOU, nº 053, págs. 58-63, Brasil, 18 de março de 2005.
6. CONAMA, Resolução nº 430. Ministério do Meio Ambiente - Conselho Nacional de Meio Ambiente. Diário Oficial da União – DOU nº 92, de 16/05/2011, pág. 89, Brasil, 13 de maio de 2011.
7. DIAGNOSTICO SNIS 2017- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Disponível em : <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2017> Acesso em : Março de 2019.
8. FABRETI, Aline Akabochi; **Pós-tratamento de efluentes de lagoas anaeróbias e facultativas com sulfato de alumínio e decantação acelerada**. 2006. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
9. FILHO, S. S. F.; MARGUTI, A. L.; PIVELI, R. P.; Produção de lodo e comportamento químico de sais de ferro empregados no pós-tratamento de esgoto sanitário por precipitação química. Revista de Engenharia Sanitária Ambiental. V.13, n.4, p. 307-315, 2009.
10. LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2ª ed. Campinas: Editora Átomo, 2008. 444 p.
11. METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.
12. MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I.; **Reúso de água: uso racional e reúso**. São Paulo: Oficina de textos, 2005. p129.
13. SANTOS, G. R. **Estudo da Clarificação de Água de Abastecimento Público e Otimização da Estação de Tratamento de Água**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Rio de Janeiro. 2011.
14. SANTOS, S. L.; SIMÕES, J. P. O.; PAIVA, F. P.; VAN HAANDEL, A. Design optimization of a simple single Family anaerobic sewage treatment system. **Water Practice and Technology**, 2016. (Aceito para publicação)
15. PIMENTA, C. D.; SILVA, M. B.; RIBEIRO, R. B.; CLARO, F. A. E. **Planejamento de experimentos em blocos aplicado às propriedades mecânicas de arames de aço para molas**. Production, v. 24, n. 1, p. 71-83, jan./mar. 2014.
16. TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. (2003) **Wastewater Engineer: Treatment and Reuse**. McGraw-Hill Inc., 4ed., New York