

II-258 - TRATAMENTO COMBINADO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO E ESGOTO DOMÉSTICO POR PROCESSO PACT®: MODELAGEM MATEMÁTICA DA REMOÇÃO DE COR

Ángel Santiago Fernández Bou

Engenheiro Agrônomo pela UPM (Espanha), Mestre em Engenharia de Biosistemas (UFF) e Doutorando em Engenharia Civil (COPPE/UFRJ).

Barbara Costa Pereira

Graduanda em Engenharia Química (UFRRJ).

Leonardo Duarte Batista da Silva

Engenheiro Agrícola (UFV), Engenheiro Ambiental (USS), Doutor em Agronomia (ESALQ/USP) e Professor Associado do Departamento de Engenharia da UFRRJ.

Juacyara Carbonelli Campos

Engenheira Química (EQ/UFRJ), Doutora em Engenharia Química (COPPE/UFRJ) e Professora Associada do Departamento de Processos Inorgânicos da EQ/UFRJ.

Alexandre Lioi Nascentes⁽¹⁾

Engenheiro Civil e Sanitarista (UERJ), Mestre em Saneamento Ambiental (ENSP/FIOCRUZ), Doutor em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (EQ/UFRJ) e Professor Adjunto do Departamento de Engenharia da UFRRJ.

Endereço⁽¹⁾: UFRRJ, Rodovia BR 465, km 7 - Seropédica - RJ - Brasil. Email: alexandrelio@gmail.com

RESUMO

Este trabalho avaliou o tratamento combinado de esgoto sanitário com lodos e Carvão Ativado em Pó (CAP), tecnologia conhecida como *Powdered Activated Carbon Treatment* (PACT®). O objetivo foi analisar como o tratamento combinado atua na qualidade do efluente final na redução da cor e realizar a modelagem matemática da superfície de resposta do processo. Para tal, foi utilizado um aparato experimental que se constituiu de 8 reatores com volume de 1000 mL, funcionando em batelada e em escala de bancada. A estes reatores foram aplicadas misturas de lixiviado/esgoto de 0%, 2%, 5% e 10% e concentrações de CAP de 0 g·L⁻¹, 2 g·L⁻¹, 4 g·L⁻¹ e 6 g·L⁻¹. Os reatores foram inoculados com lodo biológico adaptado, fixando a idade do lodo de 28 dias e TRH de 40 horas. Os sistemas eram aerados por meio de compressores de aquário conectados a pedras porosas para promover a difusão de ar. Após 23 horas, a aeração era interrompida, ocorrendo a sedimentação do lodo. Em seguida, 600 mL do efluente tratado eram retirados e ocorria a realimentação dos reatores com as misturas lixiviado/esgoto. Com o intuito de controlar a idade do lodo, fez-se o descarte diário de 35 mL de lodo com reposição do CAP descartado juntamente com o lodo excedente de cada reator, respectivamente. De posse dos resultados obtidos, os quais foram utilizados no programa Design Expert, conclui-se que a adição de CAP ao sistema de lodos ativados, quando feita em concentrações de até 4 g·L⁻¹ em misturas lixiviado/esgoto de até 5% de concentração promove melhoria na eficiência de remoção de cor.

PALAVRAS-CHAVE: Carvão ativado, tratamento aeróbico com lodos, água residual, tratamento de lixiviado.

INTRODUÇÃO

O aumento da geração de resíduos sólidos tem se dado numa celeridade maior que o crescimento populacional brasileiro (IBGE, 2000; IBGE, 2008; IBGE 2015). A questão se torna ainda mais preocupante quando se leva em conta que a composição desses resíduos tem se mostrado cada vez mais complexa, demandando assim grandes esforços para uma destinação final adequada.

Os aterros sanitários constituem uma técnica de disposição final de resíduos sólidos que não necessita de grande aporte econômico e tem sido largamente empregada no Brasil. O lixiviado proveniente desses aterros sanitários deve ser tratado adequadamente, porém segundo Mannarino (2010), a variabilidade da composição que o lixiviado pode adquirir ao longo do tempo de operação de um aterro e a possível presença de substâncias recalcitrantes, tornam as técnicas de tratamento tradicionais pouco eficientes ou muito onerosas.

Recentemente, têm sido observadas experiências bem sucedidas de tratamento combinado de lixiviado e esgotos domésticos em diversas localidades, demonstrando que essa técnica surge como uma alternativa promissora (DEL BORGHI et al, 2003). No entanto, segundo Bocchiglieri (2010), a sobrecarga causada pela presença do lixiviado pode causar alterações significativas nas condições operacionais do sistema de tratamento, podendo comprometer sua eficiência.

Dentre as vantagens do processo PACT® estão a estabilidade do sistema durante choques de carga, a redução dos poluentes refratários prioritários, a remoção de cor, odor e amônia e a melhora da sedimentabilidade do lodo (MAIA, 2012).

Diante disto, esse trabalho avaliou o processo PACT®, *Powdered Activated Carbon Treatment* (FLYNN e STADNIK, 1979), que consiste na adição de carvão ativado em pó ao reator do processo de lodos ativados. Este tratamento, que fora desenvolvido originalmente para tratamento de esgotos, já teve a eficiência de remoção de DQO modelada (Fernandez Bou et al., 2015) e neste trabalho modelou-se a remoção de cor.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais foram conduzidos no Laboratório de Monitoramento Ambiental I - Água e Efluentes, localizado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. As análises foram realizadas conforme as recomendações da APHA (APHA, 2005), utilizando um espectrofotômetro Hach DR3900 e o método 2120C para a obtenção dos valores de cor da mistura e do efluente tratado.

O lixiviado foi coletado no Aterro Dois Arcos, localizado no município de São Pedro da Aldeia (RJ). O esgoto sintético foi preparado com base nas recomendações de Holler e Trösch (2001), sendo estas adaptadas visando atender às características típicas do esgoto doméstico descritas por Von Sperling (2002). A composição do esgoto doméstico está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição do esgoto sintético

Componentes	Concentração (mg·L ⁻¹)
Peptonas de caseína	360
Extrato de carne	250
Ureia	100
Fosfato monobásico de potássio	26
Cloreto de sódio	14
Cloreto de cálcio di-hidratado	8
Sulfato de magnésio hepta-hidratado	4

Fonte: adaptado de Holler e Trösch (2001)

O carvão ativado em pó utilizado no experimento foi de origem vegetal de fabricação nacional e da marca Carbomafra, tipo 118 CB AS n° 170. As características deste carvão foram estudadas por Campos et al. (2014) na Universidade Federal do Rio de Janeiro, e são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Características do carvão Carbomafra

Parâmetros de Caracterização	Resultados
Área BET	726,68 m ² ·g ⁻¹
Área de microporo	560,59 m ² ·g ⁻¹
Área externa	166,08 m ² ·g ⁻¹
Volume de microporo	0,266 cm ³ ·g ⁻¹
Tamanho de microporo	25,6 Å

Fonte: Campos et al. (2014)

O experimento foi realizado em duas baterias, com 8 reatores cada, permitindo assim 16 configurações diferentes de CAP e de concentração de lixiviado de aterro sanitário na mistura, conforme descrito na Tabela 3. O reator RI1 não sofreu adição de CAP nem de lixiviado, funcionando como controle.

Tabela 3: Estrutura das baterias de experimentos

		Bateria I		Bateria II	
		Entre 02/12/2013 e 03/01/2014		Entre 15/01/2014 e 07/02/2014	
		Porcentagem de lixiviado na mistura			
		0%	2%	5%	10%
Concentração de CAP (g·L ⁻¹)	0	R1I	R5I	R1II	R5II
	2	R2I	R6I	R2II	R6II
	4	R3I	R7I	R3II	R7II
	6	R4I	R8I	R4II	R8II

Estrutura das baterias, em que *Rnb* indica o reator, *n* o número do reator {1,2,3,4,5,6,7,8}, e *b* a bateria {I,II}.

Os reatores consistiram em oito provetas graduadas de 1.000 mL, com aeração fornecida por compressores de ar, permitindo que os níveis de OD, fossem mantidos acima de 2 mg·L⁻¹. Com o intuito de controlar a idade do lodo de 28 dias, foi feita a remoção diária de 35 mL do licor misto. O TRH de 40 horas foi determinado pelo tratamento 600 mL·d⁻¹ no reator de 1.000 mL. Houve reposição diária de CAP para se que sua concentração se mantivesse constante.

RESULTADOS

Na Figura 1 estão representados os valores médios de cor de cada uma das quatro misturas utilizadas como entradas no experimento. O menor valor mostrado, 275 uH, corresponde à cor do esgoto sem adição de lixiviado de aterro sanitário. À medida que se aumentou a proporção de lixiviado da mistura, a leitura da cor aumentou, atingindo seu valor seu máximo quando a proporção de lixiviado na mistura foi de 10%.

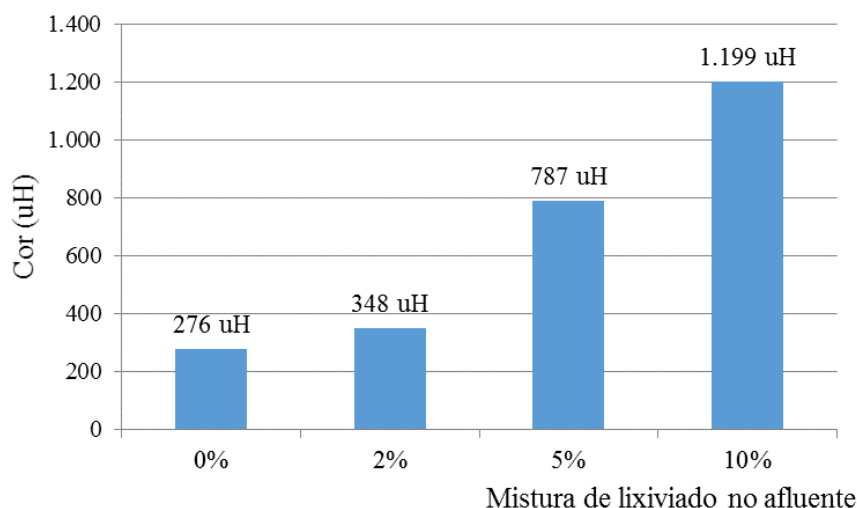


Figura1: Cor das misturas de entrada

Valores de cor das entradas, ou seja, das misturas de esgoto sintético e lixiviado de aterro sanitário utilizadas como afluentes para alimentar os reatores.

A Tabela 4 e a Figura 2 apresentam os resultados das análises de cor realizadas com os afluentes, ou seja, as misturas de esgoto sintético e lixiviado de aterro sanitário com as quais os reatores eram alimentados.

Tabela 4: Cor dos afluentes

Bateria I (resultados em uH)

Proporção de lixiviado	12/12/13*	19/12/13*	Média	Desvio padrão
0%	212	339	275,5	63,5
2%	322	374	348	26

Bateria II (resultados em uH)

Proporção de lixiviado	16/01/14	23/01/14	Média	Desvio padrão
5%	915	659	787	128
10%	1.294	1.104	1.199	95

Cor dos quatro grupos de reatores estudados, classificados de acordo com a proporção de lixiviado na mistura. O símbolo * nesta tabela significa que os dados são médios de todas as medidas da semana.

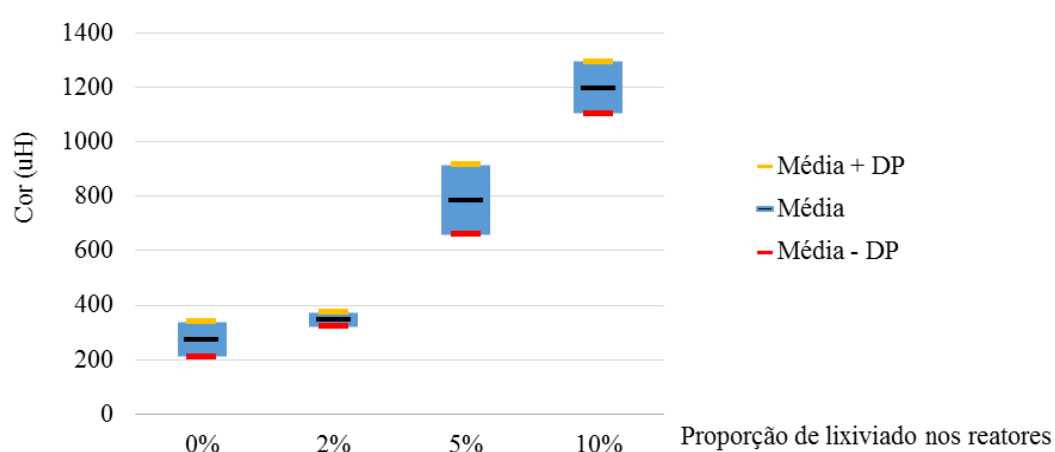


Figura 2: Cor dos afluentes

Na Figura 3 encontram-se os resultados obtidos nas análises de cor após o tratamento.

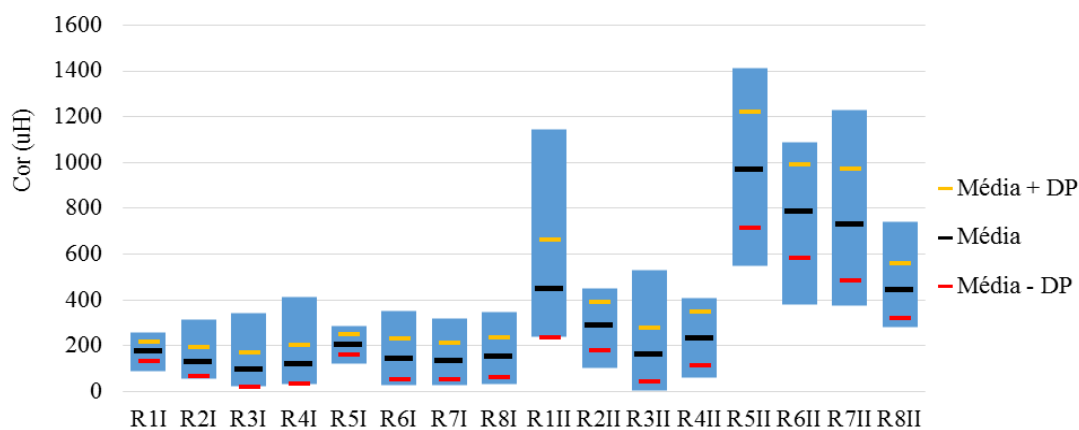


Figura 3: Cor nos reatores após o tratamento PACT®

Observa-se que, quando a proporção de lixiviado foi maior, o reator com menor concentração de CAP foi o que apresentou maior instabilidade na remoção de cor, medida pelo desvio padrão. Quando a proporção de lixiviado foi 10%, todos os reatores apresentaram maior instabilidade, com exceção do reator com 6 g·L⁻¹ de CAP.

A Tabela 5 mostra os valores médios de cor final do efluente após o tratamento. Observa-se que a cor final aumenta conforme aumenta a proporção de lixiviado aplicado à mistura, e diminui conforme aumenta a concentração de CAP nos reatores, esse comportamento, porém não é visto nos reatores R1II, R2II e R3II, os três com 4 g·L⁻¹, que tiveram um desempenho melhor para a mesma proporção de lixiviado que os reatores correspondentes com 6 g·L⁻¹, ou seja, R5II, R6II e R7II. Observa-se que o reator R3II (4 g·L⁻¹ de CAP e 5% de lixiviado) teve desempenho particularmente melhor na remoção de cor.

Tabela 1: Cor final do efluente após o tratamento PACT[®]

Proporção de lixiviado → ↓ CAP (g·L ⁻¹)	0%	2%	5%	10%
	Cor do efluente tratado (uH)			
0	175,3	205,8	449,8	970,5
2	129,6	142,1	287,1	787,1
4	97,6	132,3	160,2	729,4
6	119,9	152,2	232,1	442,1

Resultados de cor do efluente depois do tratamento PACT[®].

A Figura 4 apresenta os pontos correspondentes às repetições das análises de cor do efluente. Os reatores estão representados pelos eixos verticais, enquanto a superfície representa a média dos resultados de cor final dos reatores. A tendência da média dos resultados dos reatores R4I, R8I, R4II e R8II, com 6 g·L⁻¹, apresenta a menor inclinação se comparada com os outros grupos de reatores com a mesma concentração de CAP. O grupo de reatores com 0 g·L⁻¹ teve a maior inclinação. Comparando os grupos de reatores pela proporção de lixiviado, os grupos com 0% e 2% tiveram comportamentos similares e homogêneos. Ou seja, a aplicação de CAP e de lixiviado não teve efeito expressivo no funcionamento do sistema para a remoção da cor, enquanto que para os grupos com proporções de lixiviado de 5% e 10% o efeito da aplicação de lixiviado foi mais pronunciado, apesar de ser atenuado pela aplicação de CAP.

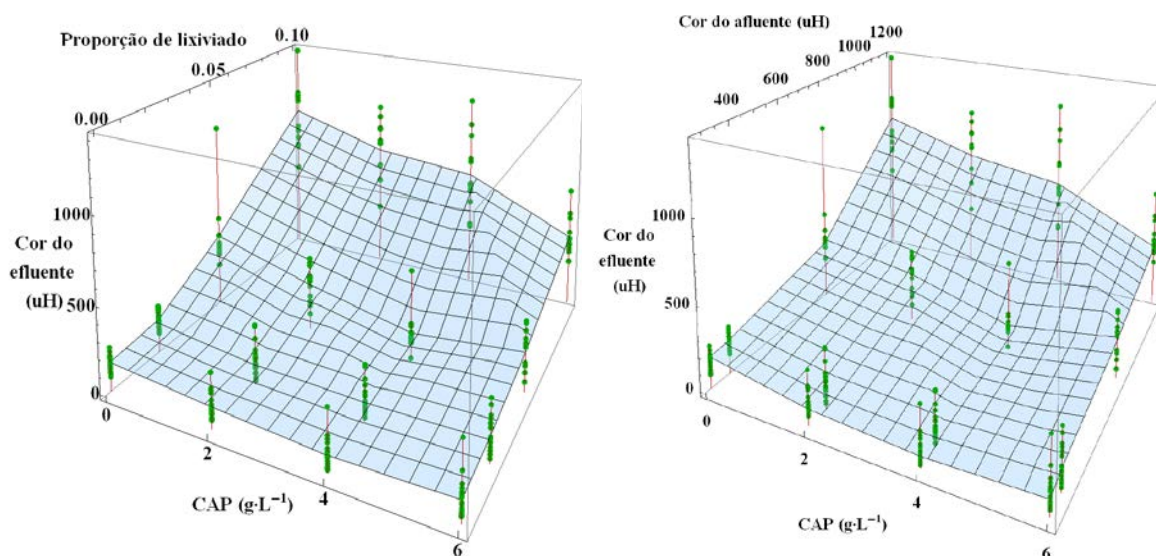


Figura 4: Cor final do efluente após o tratamento PACT[®]

Na Tabela 6 estão os valores de eficiência de remoção de cor em cada um dos reatores. Todos os reatores tiveram suas maiores eficiências quando a proporção de lixiviado foi 5%. Os resultados mais baixos foram observados quando a proporção de lixiviado aplicada foi de 10%, com a exceção do grupo de reatores com 6 g·L⁻¹, onde os resultados obtidos quando a proporção de lixiviado era de 0% e 2% foram os piores do grupo, mas ainda relativamente próximos aos obtidos com a proporção de lixiviado de 10%.

O melhor desempenho para remoção da cor se deu no reator R3II (5% de lixiviado e 4 g·L⁻¹ de CAP), onde a eficiência ficou próxima de 80%. Esse valor é quase o dobro que o obtido no reator de controle, portanto, sem CAP, para o grupo de reatores com proporção de lixiviado de 5%, que foi levemente superior a 40%. O pior desempenho aconteceu no reator R5II, com a maior proporção de lixiviado (10%) e sem CAP, que não atingiu 20% de eficiência. Esta é uma indicação de que a quantidade de lixiviado na mistura pode ter sido nociva à população de bactérias presentes no lodo. Tal raciocínio pode ser estendido aos reatores R6II e R7II, onde a proporção de lixiviado também foi maior; a presença de CAP amorteceu o efeito do lixiviado parcialmente, pois a eficiência foi quase o dobro, mas foi, aproximadamente, a metade que quando a proporção de lixiviado era 5%. Para o caso de proporção de lixiviado 10%, é notório que a maior aplicação de CAP foi fator preponderante na eficiência da remoção da cor.

Tabela 62: Eficiência na remoção da cor

Proporção de lixiviado → ↓ CAP (g·L ⁻¹)	0%	2%	5%	10%
Eficiência na remoção da cor (%)				
0	36,4%	40,9%	42,8%	19,1%
2	53,0%	59,2%	63,5%	34,4%
4	64,6%	62,0%	79,6%	39,2%
6	56,5%	56,3%	70,5%	63,1%

Eficiência de cada reator na remoção de cor pelo tratamento PACT®. O número de análises foi 22 nos reatores com 0% e 2% de lixiviado e 13 nos reatores com 5% e 10%.

A remoção média da cor por dia e reator é apresentada na Tabela 7. A maior remoção aconteceu nos reatores com proporção de lixiviado de 5%, exceto para o grupo de reatores com concentração de CAP de 6 g·L⁻¹, em que a maior remoção aconteceu quando a proporção de lixiviado foi 10%. A análise das Tabela 6 e Tabela 7, sugere que os grupos de reatores com 0 g·L⁻¹, 2 g·L⁻¹ e 4 g·L⁻¹ de CAP alcançaram sua máxima eficiência e a maior remoção absoluta de cor quando a proporção de lixiviado foi 5%. No entanto, o grupo de reatores com 6 g·L⁻¹ conseguiu sua maior remoção de cor quando a proporção de lixiviado foi 10%, apesar de que a maior eficiência aconteceu quando a proporção de lixiviado era 5%. Isto sugere que a adição de CAP no R8II amorteceu o efeito negativo do lixiviado na mistura, mas não o suficiente como para manter a eficiência apresentada no R4II. De novo, destaca a remoção absoluta conseguida pelo reator R3II (5% de lixiviado e 4 g·L⁻¹), que foi a segunda maior, logo após a do reator R8II, superando inclusive o resultado do reator R4II.

Tabela 3: Remoção média da cor em cada reator

Proporção de lixiviado → ↓ CAP (g·L ⁻¹)	0%	2%	5%	10%
Remoção média da cor (uH)				
0	100,2	142,2	337,2	228,5
2	145,9	205,9	499,9	411,9
4	177,9	215,7	626,8	469,6
6	155,6	195,8	554,9	756,9

Cor removida por reator e dia, representada pela diferença entre a cor média das entradas e a das saídas.

Na Figura 5 os pontos representam os dados de remoção de cor diária por reator, e a superfície é a média da remoção de cor utilizada para a modelagem. Pode observar-se que, com exceção do grupo de reatores com $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, os melhores resultados de remoção de cor foram obtidos quando a proporção de lixiviado era 5%.

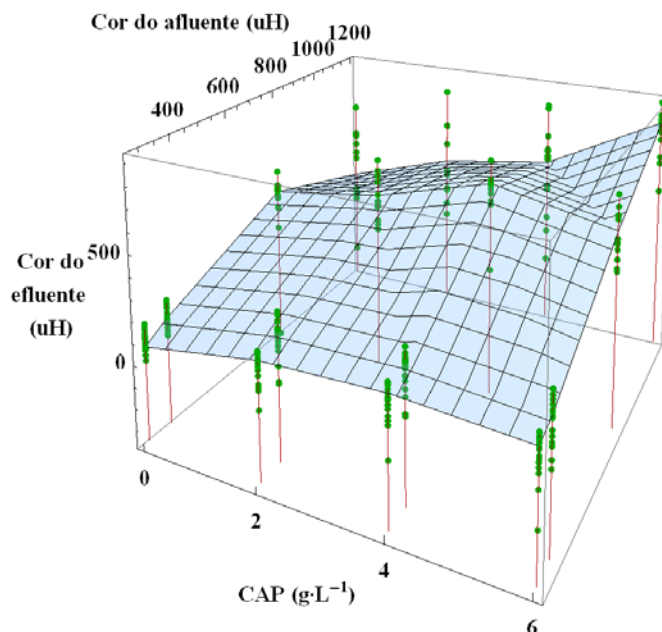


Figura 5: Superfície de remoção de Cor por reator

Representação gráfica da cor removida de cada reator por dia, calculada pela diferença entre a cor média das entradas (afluentes) e a cor média das saídas (efluentes). A superfície representa a remoção média e os pontos os resultados de cada análise.

Modelo COR 1: concentração de CAP e proporção de lixiviado como variáveis independentes

A Equação 1 descreve o comportamento do sistema para a remoção de cor quando as variáveis independentes foram a concentração de CAP e a proporção de lixiviado na mistura lixiviado/esgoto de entrada. Os limites recomendados para a utilização deste modelo são de entre $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de CAP e uma proporção de lixiviado entre 0% e 10%.

$$CORs = +96,6 + 1,93 \cdot CAP + 7747 \cdot Lixiviado + 776 \cdot CAP \cdot Lixiviado - 63242 \cdot Lixiviado^2 \quad (1)$$

Em que $CORs$ é a remoção de cor em uH, CAP a concentração de CAP em $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $Lixiviado$ a proporção unitária de lixiviado.

Limites de utilização do modelo: $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \leq CAP \leq 6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $0 \leq Lixiviado \leq 0,1$.

A solução da Equação 1 está representada na Figura 6, por dois ângulos diferentes, como sendo a superfície de resposta do sistema para as entradas utilizadas.

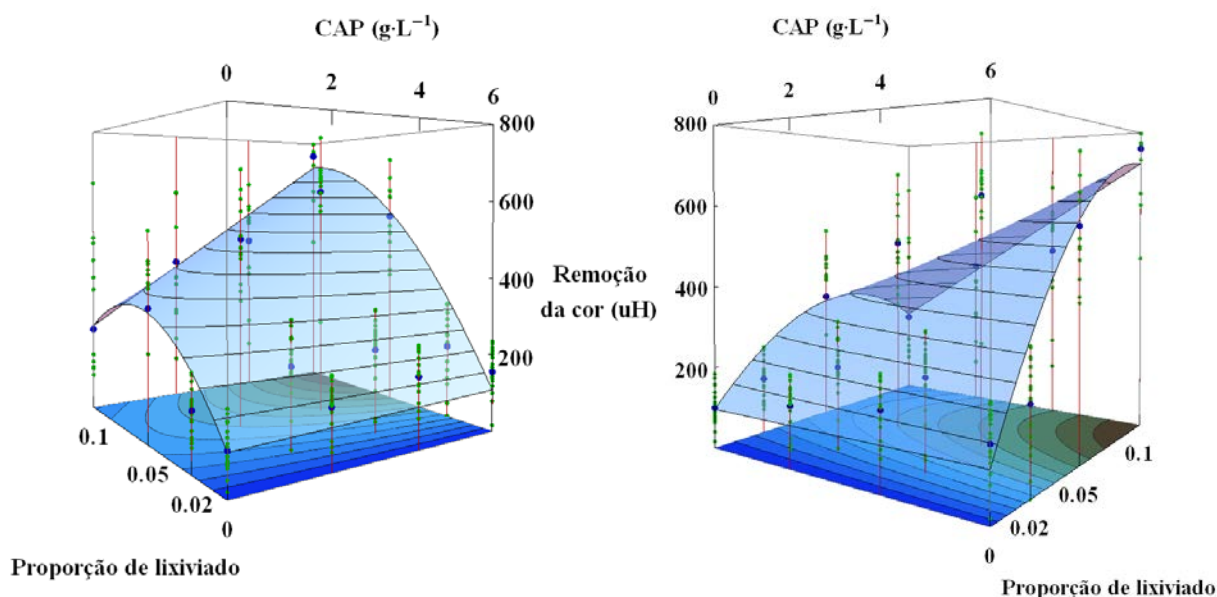


Figura 1: Superfície de resposta do modelo Cor 1 e dados médios do experimento

Representação gráfica da superfície de resposta equivalente à equação do modelo 1, em que as variáveis independentes foram a concentração de CAP ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) e a proporção de lixiviado (adimensional, %). A projeção horizontal mais escura, próxima ao ponto $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de CAP e 10% de lixiviado, indica que a remoção de cor é maior. Cada linha vertical indica as coordenadas dos reatores.

Análise estatística por ANOVA do modelo Cor 1

A análise detalhada por ANOVA do modelo 1 é apresentada na Tabela 8. A “Prob > F” < 0,0001 significa que a probabilidade de que o ajuste seja devido a ruído é menor de 0,01%. Foi testado um ajuste mediante equação polinomial de terceiro grau. O R^2 ajustado foi melhor (0,92), mas o R^2 previsto foi muito pior (0,51) e o termo CAP ficou como não significativo de acordo com o teste F de Fisher. Portanto, a equação polinomial de terceiro grau foi descartada. Para a primeira equação de segundo grau que foi calculada, o termo PAC^2 ficou como não significativo, e foi descartado. A retirada deste termo da equação melhorou o R^2 ajustado e o R^2 previsto enquanto que nenhum outro termo se tornou não significativo.

Tabela 4: Análise estatística do modelo 1 de remoção de cor

p-value Prob > F	Desv. Pad.	C.V. %	R^2	R^2 ajust.	R^2 prev.	Precisão adeq.
< 0,0001	86,43	26,47	0,8649	0,8158	0,7524	12,819

Em que Prob > F é a probabilidade de encontrar um valor de F do teste de Fisher maior que o valor do modelo sendo a hipótese nula verdadeira (falta de ajuste não significativa); R^2 é o coeficiente de determinação; R^2 ajust. é o coeficiente de determinação ajustado; R^2 prev. é o coeficiente de determinação previsto; Precisão adeq. é uma medida do ruído que, quando é suficientemente elevada (acima de 4) indica que o modelo pode ser utilizado para navegar no espaço desenhado.

A Figura 7 apresenta o ajuste do modelo confrontando os dados previstos e os dados observados. Existe uma clara correlação, o que significa que o modelo representa o comportamento do sistema.

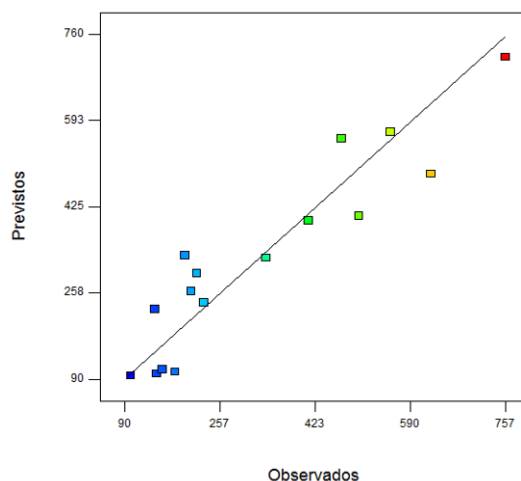


Figura 2: Dados previstos versus dados observados do modelo Cor 1

Apresentação do ajuste do modelo baseado na confrontação dos dados observados (abscissas, em uH) com os dados previstos (ordenadas, em uH). O ajuste é tanto melhor quanto mais próximo a 1 seja o coeficiente angular da linha de tendência linear dos pontos.

A Figura 8 representa a distribuição da probabilidade dos resíduos, que deve aproximar-se a uma linha reta para que a distribuição seja normal.

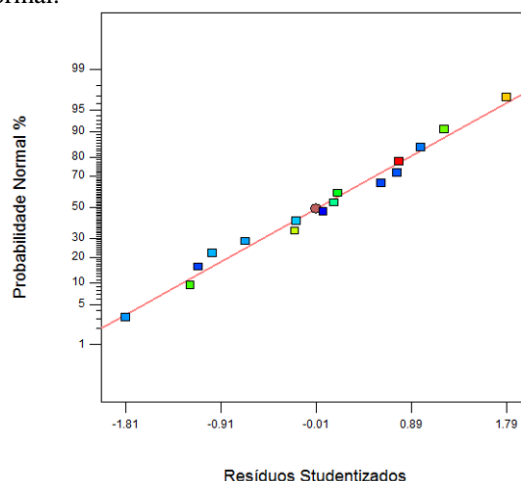


Figura 8: Gráfico normalizado dos resíduos do modelo Cor 1

Distribuição da probabilidade dos resíduos, que é normal quando os pontos formam uma linha aproximadamente reta. Não existem tendências na distribuição dos resíduos.

A Figura 9 apresenta os resíduos Studentizados frente aos valores previstos. Ambas as Figuras 8 e 9 mostram que o erro é normal, que não existem tendências na distribuição dos resíduos, que poderiam significar algum tipo de viés na modelagem.

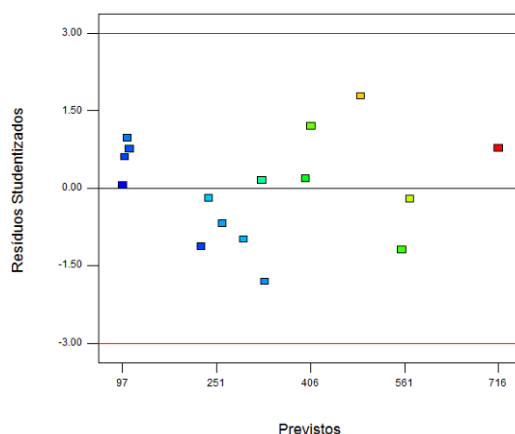


Figura 3: Resíduos Studentizados versus valores previstos do modelo Cor 1

Gráfico de resíduos Studentizados frente a valores previstos (em uH). Não existem tendências na distribuição dos resíduos.

Modelo COR 2: concentração de CAP e Cor de entrada como variáveis independentes

A Equação 2 descreve o comportamento do sistema para a remoção de cor quando as variáveis independentes foram a concentração de CAP e a cor da mistura. Os limites recomendados para a utilização deste modelo são de entre 0 g·L⁻¹ e 6 g·L⁻¹ de CAP e cor entre 275 uH e 1.200 uH.

$$CORs = -206 - 16,9 \cdot CAP + 1,40 \cdot CORE + 0,08 \cdot CAP \cdot CORE - 0,000863 \cdot CORE^2 \quad (2)$$

Em que *CORs* a cor removida em uH, *CAP* a concentração de CAP em g·L⁻¹ e *CORE* a cor de entrada da mistura lixiviado/esgoto.

Limites de utilização do modelo: 0 g·L⁻¹ ≤ *CAP* ≤ 6 g·L⁻¹ e 275 uH ≤ *CORE* ≤ 1.200 uH.

A Equação 2 está representada na Figura 10 em 3D, como sendo a superfície de resposta do sistema para as entradas utilizadas.

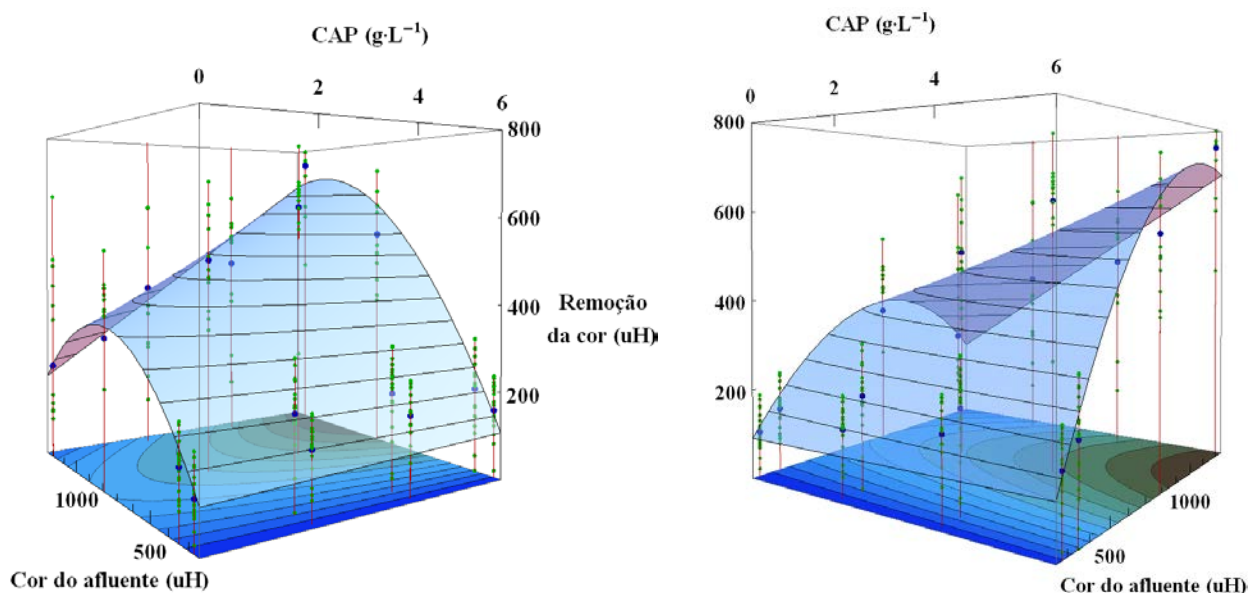


Figura 4: Superfície de resposta do modelo Cor 2 e dados médios do experimento

Representação gráfica da superfície de resposta equivalente à equação do modelo 2, em que as variáveis independentes foram a concentração de CAP ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) e a cor das entradas (uH). A projeção horizontal mais escura, próxima a $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de CAP e 1200 uH, indica que a remoção de cor é maior. As linhas verticais indicam as coordenadas dos reatores.

Análise estatística por ANOVA do modelo Cor 2

A análise detalhada por ANOVA do modelo 2 é apresentada na Tabela 9. A “ $\text{Prob} > F$ ” $< 0,0001$ significa que a probabilidade de que o ajuste seja devido a ruído é menor de 0,01%. Foi testado um ajuste mediante equação polinomial de terceiro grau. O R^2 ajustado foi similar (levemente pior), o R^2 previsto foi muito pior (0,43) e o termo CAP ficou como não significativo de acordo com o teste F de Fisher. Portanto, a equação polinomial de terceiro grau foi descartada. Para a primeira equação de segundo grau que foi calculada, o termo PAC^2 ficou como não significativo, e foi descartado. A retirada deste termo da equação melhorou o R^2 ajustado e o R^2 previsto enquanto que nenhum outro termo se tornou não significativo.

Tabela 9: Análise estatística do modelo 4 de remoção de Cor

p-value Prob > F	Desv. Pad.	C.V. %	R^2	R^2 ajust.	R^2 prev.	Precisão adeq.
< 0,0001	53,48	16,38	0,9483	0,9295	0,8749	19,693

Em que $\text{Prob} > F$ é a probabilidade de encontrar um valor de F do teste de Fisher maior que o valor do modelo sendo a hipótese nula verdadeira (falta de ajuste não significativa); R^2 ajust. é o coeficiente de determinação ajustado; R^2 prev. é o coeficiente de determinação previsto; *Precisão adeq.* é uma medida do ruído que, quando é suficientemente elevada (acima de 4) indica que o modelo pode ser utilizado para navegar no espaço desenhado.

A Figura 11 apresenta o ajuste do modelo confrontando os dados previstos e os dados observados. Existe uma clara correlação, o que significa que o modelo representa o comportamento do sistema.

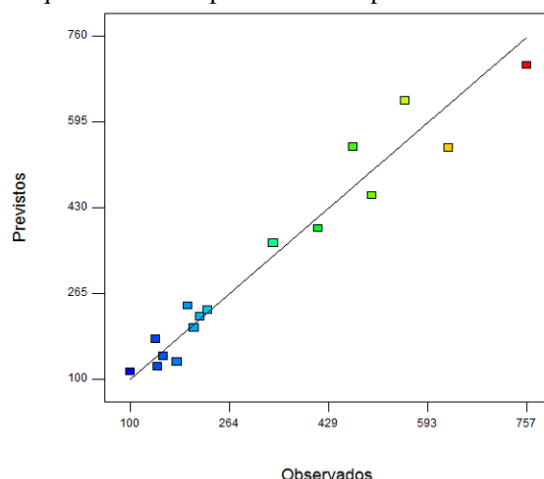


Figura 5: Dados previstos versus dados observados do modelo Cor 2

Apresentação do ajuste do modelo 2 baseado na confrontação dos dados observados (abscissas, em uH) com os dados previstos (ordenadas, em uH). O ajuste é tanto melhor quanto mais próximo a 1 seja o coeficiente angular da linha de tendência linear dos pontos.

A Figura 12 representa a distribuição da probabilidade dos resíduos, que deve aproximar-se a uma linha reta para que a distribuição seja normal.

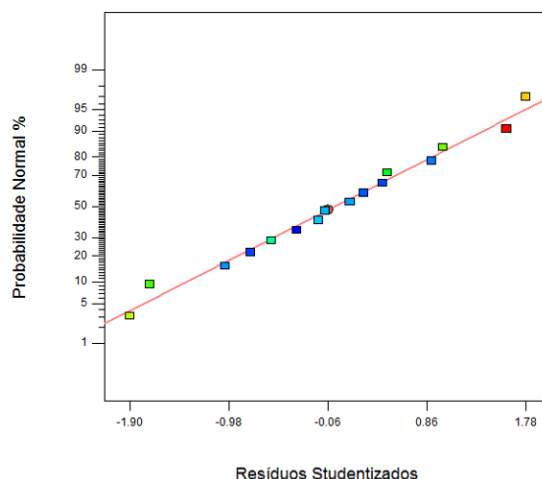


Figura 62: Gráfico normalizado dos resíduos do modelo Cor 2

Distribuição da probabilidade dos resíduos, que é normal quando os pontos formam uma linha aproximadamente reta. Não existem tendências na distribuição dos resíduos.

A Figura 13 apresenta os resíduos Studentizados frente aos valores previstos. Ambas as Figuras 12 e 13 mostram que o erro é normal, que não existem tendências na distribuição dos resíduos, que poderiam significar algum tipo de viés na modelagem.

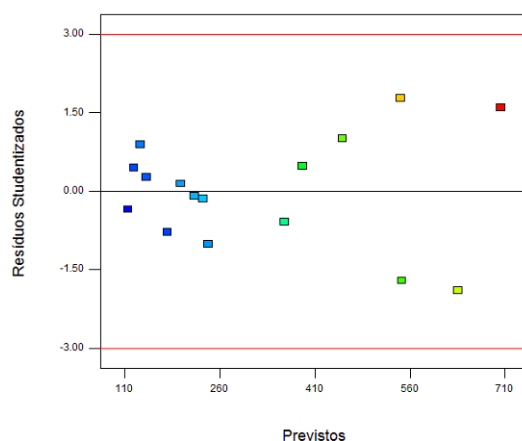


Figura 73: Resíduos Studentizados versus valores previstos do modelo Cor 2

O gráfico de resíduos studentizados frente a valores previstos (em uH) indica que não existem tendências na distribuição dos resíduos, validando, portanto o modelo.

CONCLUSÕES

Em geral, concentrações maiores de CAP promoveram uma melhor remoção de cor nos reatores. Porém, na ausência de lixiviado no efluente de entrada, observou-se que a aplicação de CAP não melhorou a remoção de cor.

Quando a proporção de lixiviado foi 5% para os reatores com $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, e $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, foram obtidos os melhores resultados de remoção de cor. A eficiência da remoção de cor diminuiu notavelmente quando a proporção de lixiviado aplicada foi 10%, com exceção do reator com $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de CAP, que teve a maior remoção absoluta de cor do experimento, o que indica que a proporção de lixiviado aplicada teve efeito nocivo na atividade biológica, porém a maior concentração de CAP foi capaz de minimizar tal efeito. As conclusões consideram o intervalo de variáveis utilizado deste trabalho.

Os modelos desenvolvidos apresentaram elevado R^2 ajustado. No entanto, o modelo baseado na cor das entradas teve melhor desempenho que o baseado na proporção de lixiviado das entradas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st. Washington DC, USA: 2000.
2. BOCCHIGLIERI, M.M. O lixiviado dos aterros sanitários em estações de tratamento dos sistemas públicos de esgotos. Tese de Doutorado em Saúde Pública. USP, 2010.
3. CAMPOS, J. C. et al. Evaluation of an Activated Sludge Process Combined with Powdered Activated Carbon for the Treatment of Oil Refinery Wastewater. J. Int. Environmental Application & Science, v. 9, n. 1, p. 13, 2014.
4. DEL BORGHI, A.; BINAGHI, L.; CONVERTI, A.; DEL BORGHI, M. Combined Treatment of Leachate from Sanitary Landfill. Chem. Biochem. Eng. Q. 17 (4) 277-283, 2003.
5. FERNÁNDEZ BOU, A.S.; NASCENTES, A.L.; PEREIRA, B.C.; SILVA, L.D.B.; FERREIRA, J.A.; CAMPOS, J.C. Mathematical modeling of COD removal via the combined treatment of domestic wastewater and landfill leachate based on the PACT process. J Environ Sci Heal A, v. 50, n. 4, p. 378-384, 2015.
6. FLYNN, B.P.; STADNIK, J.G. Start-up of a powdered activated carbon-activated sludge treatment system. J. Water Pollut. Con. F., p. 358-369, 1979.
7. HOLLER, S.; TRÖSCH, W. Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates. Journal of Biotechnology, v. 92, n. 2, p. 95-101, 12/28/ 2001.
8. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000. Rio de Janeiro, 2002.
9. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro, 2010.
10. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censos demográficos entre 1872 e 2010. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=4&uf=00> > (consultado em março de 2015).
11. METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse. Metcalf & Eddy, Inc. 3 Ed., 1991.
12. MAIA, L.S. Uso de carvão ativado em pó no tratamento biológico de lixiviado de aterro de resíduos. Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. EQ/UFRJ, 2012.
13. MANNARINO, C.F. Avaliação do tratamento combinado de lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos e esgoto doméstico utilizando indicadores físico-químicos e biológicos. Tese de Doutorado. Fundação Oswaldo Cruz, 2010.
14. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 4-Lodos Ativados, DESA, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2002.