

II-255 - TRATAMENTO COMBINADO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO E ESGOTO DOMÉSTICO POR PROCESSO PACT®: MODELAGEM MATEMÁTICA DA REMOÇÃO DE DQO

Ángel Santiago Fernández Bou

Engenheiro Agrônomo pela UPM (Espanha), Mestre em Engenharia de Biossistemas (UFF) e Doutorando em Engenharia Civil (COPPE/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/UFRRJ), Doutora em Engenharia Química (COPPE/UFRRJ) e Professora Associada do Departamento de Processos Inorgânicos da EQ/UFRRJ.

João Alberto Ferreira

Mestre em Engenharia Ambiental (Manhattan College NY/USA), Doutor em Saúde Pública (ENSP/FIOCRUZ) e Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da UERJ.

Alexandre Lioi Nascentes⁽¹⁾

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

Endereço⁽¹⁾: Rodovia BR 465, km 7 - CEP: 23.890-000 - Seropédica - RJ – Brasil. alexandrelio@gmail.com

RESUMO

Este estudo consistiu no tratamento combinado de diferentes proporções de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico sintético utilizando o processo PACT® (*Powdered Activated Carbon Treatment*) em 16 reatores em batelada. O objetivo foi medir e modelar matematicamente a remoção de DQO mediante dois modelos: o primeiro combinou as variáveis concentração de CAP (entre 0 g·L⁻¹ e 6 g·L⁻¹) e proporção de lixiviado na mistura (entre 0% e 10%), e o segundo modelo combinou concentração de CAP e a DQO do afluente (entre 531 mg·L⁻¹ e 2001 mg·L⁻¹). A modelagem foi calculada mediante a Metodologia da Superfície de Resposta, utilizando o programa Design-Expert, com equações polinomiais de segundo grau. O esgoto doméstico foi elaborado sob condições controladas no laboratório em que o experimento foi desenvolvido. Os resultados indicaram que a adição de CAP não teve influência na remoção de DQO quando o afluente não continha lixiviado. No entanto, à medida que aumentou a proporção de lixiviado na mistura, maiores concentrações de CAP resultaram em maiores remoções de DQO. Ambos os modelos apresentaram R² superiores a 0,95.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem da remoção de DQO, tratamento de lixiviado, processo PACT.

INTRODUÇÃO

O recente avanço nas políticas ambientais e sanitárias no Brasil, unido à sensibilização social e ambiental, resultou numa redução na disposição de resíduos nos vazadouros a céu aberto em favor da disposição em aterros. Em 2013, de acordo com a ABRELPE (2013), 58% dos resíduos sólidos gerados tiveram como destino final aterros sanitários. Este dado difere da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE, realizada em 2008, que defendia que 65% dos resíduos gerados no Brasil eram destinados a aterros sanitários (IBGE, 2010). A discrepância entre ambas as fontes pode explicar-se pelas diferenças entre as metodologias que cada uma utiliza para realizar o cálculo.

De qualquer maneira, a Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), no artigo 54, concedeu 4 anos de prazo para que os municípios brasileiros se adequaram à lei, e a disposição dos resíduos fosse ambientalmente correta. O prazo não foi cumprido, e teve que ser dilatado por parte do governo federal. Além do mais, existe um relatório do

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) baseado em dados do ano 2012 e anteriores, que indica que ainda existiam 2.906 lixões em 2.810 cidades (IPEA, 2012).

Portanto, é possível inferir a partir dos dados do IPEA, IBGE e ABRELPE que a maior parte dos aterros sanitários está concentrada nas grandes cidades, que dão tratamento adequado, mas que a maioria dos municípios brasileiros não têm a infraestrutura necessária para realizar esse tipo de tratamento.

Por outro lado, de acordo com AQUASTAT - Sistema Global de Informação sobre a Água da Food and Agricultural Organization, FAO, o Brasil tem o maior volume de precipitação do mundo com, aproximadamente, 15.000 km³ de chuva por ano. Assim, o território brasileiro contém os 12,8% da água doce disponível no mundo (AQUASTAT, 2015). Alguns grandes núcleos urbanos, onde são geradas grandes quantidades de resíduos sólidos, como São Paulo ou Rio de Janeiro, têm precipitação média na faixa dos 1.400 mm a 1.500 mm por ano (RAMOS et al., 2009). Como a produção de lixiviado de aterro sanitário depende diretamente da quantidade de precipitação, locais com maiores precipitações tendem a produzir maiores volumes de lixiviado. Por este motivo, após a Lei 12.305/2010 proibir os vazadouros a céu aberto (lixões) e estabelecer a obrigatoriedade de colher e tratar o lixiviado de aterro sanitário, Brasil tem enfrentado um novo desafio para conseguir processar todo o volume de lixiviado gerado. Antes da nova legislação, grande parte do mesmo se perdia para o solo, pois não existiam mecanismos de contenção da percolação nos lixões.

Este trabalho avaliou o tratamento combinado de lixiviado e esgoto doméstico pelo processo PACT®, *Powdered Activated Carbon Treatment* (FLYNN e STADNIK, 1979), consistente na aplicação de carvão ativado em pó, CAP, a um tratamento aeróbico de lodos ativados. Este tratamento, que fora desenvolvido originalmente para tratamento de esgotos, foi usado para analisar e modelar a remoção de DQO.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes, da Universidade Federal Rural de Rio de Janeiro, UFRRJ. As análises realizadas seguiram as recomendações da APHA (2005). O método utilizado para obter os valores de cor da mistura e do efluente tratado foi o 2120-C, realizado com um espectrofotômetro Hach DR3900.

O lixiviado foi coletado em julho de 2013 no Aterro Dois Arcos, em São Pedro da Aldeia (RJ). O esgoto doméstico sintético foi produzido seguindo as recomendações de Holler e Trosch (2001), adaptadas de acordo com Von Sperling (1996) às características mais comuns dos esgotos brasileiros (Tabela 1).

Tabela 1: Receita para elaboração 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

Componentes e quantidades para a produção de esgoto doméstico sintético, seguindo recomendações de Von Sperling (1996) e Holler e Trösch (2001). DQO média de 531 mg·L⁻¹ e cor média de 276 uH. Fonte: adaptado de Holler e Trösch (2001)

O carvão ativado em pó (CAP) utilizado no experimento foi 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.

O experimento foi estruturado em duas baterias de 8 reatores cada uma, ou seja, com 16 configurações diferentes de concentração de CAP e proporção de lixiviado de aterro sanitário na mistura (Tabela 2). O reator de controle foi RI1, sem adição de CAP nem de lixiviado.

Tabela 2: Baterias de experimentos

		Tabela 2: Baterias de experimentos			
		Bateria I		Bateria II	
		Percentagem 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

Rnb indica o reator, em que *n* o número do reator, e *b* a bateria.

Os reatores foram oito provetas graduadas com um volume útil de 1.000 mL. A idade do lodo foi fixada em 28 dias. Consequentemente, 3,57% do lodo era removido por dia. Os níveis de oxigênio dissolvido (OD) se mantiveram acima de 2 mg·L⁻¹ durante o experimento para que não constituir um fator limitante ao metabolismo dos microrganismos (ECKENFELDER, 1989; METCALF AND EDDIE, 2003). O tempo de retenção hidráulica foi de 40 horas, mediante retirada dos 60% do efluente tratado a cada 24 horas. O lodo inoculado nos reatores apresentou 5.780 mgSST·L⁻¹, sendo 200 mL aplicados em cada reator. Desta maneira, a concentração final de cada reator foi de 2.499 mgSST·L⁻¹. Os reatores passaram por um período de duas semanas de adaptação, em que foram alimentados exclusivamente com esgoto sintético, antes de se começar a aplicação das diferentes concentrações de CAP e misturas lixiviado e esgoto.

OPERAÇÃO DOS REATORES

O esgoto doméstico sintético era preparado diariamente a partir de concentrado, e diferentes volumes de lixiviado de aterro sanitário eram adicionados para atingir a proporção planejada. A aeração operava 23 horas por dia, usando compressores de ar de uso em aquários. Antes de se desligar a aeração, mediam-se o pH, temperatura e OD, e 35 mL de licor eram retirados de cada reator para manter a idade planejada de lodo em 28 dias. Depois, a aeração era parada e o lodo decantava no fundo dos reatores. Após uns 45 minutos, o sobrenadante era retirado até a medida de 400 mL, evitando-se retirar os flocos de lodo e 50 mL do efluente tratado eram coletados analisar o parâmetro cor. Em seguida, de acordo com as configurações de cada reator, era realizada a reposição do CAP que fora descartado na retirada do licor e eram adicionados 600 mL da mistura de esgoto doméstico e lixiviado de aterro sanitário. O pH dos reatores era corrigido com KOH para 8.

TRATAMENTO DOS DADOS E MODELAGEM

A eficiência do sistema para a remoção de cor foi calculada de acordo com a Equação 1.

$$\text{Eficiência Remoção DQO (\%)} = \frac{DQO_{\text{entrada}} - DQO_{\text{saída}}}{DQO_{\text{saída}}} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que:

DQO_{entrada} é a DQO em mg·L⁻¹ da mistura afluyente; e

DQO_{saída} é a DQO em mg·L⁻¹ do efluente tratado.

A Equação 2 representa a remoção de cor de cada reator cada dia.

$$\text{Remoção de DQO por dia e reator} = (DQO_{\text{entrada}} - DQO_{\text{saída}}) \cdot 0,6 \frac{\text{L}}{\text{reator} \cdot \text{dia}} \quad (2)$$

Em que:

DQO_{entrada} é a DQO em mg·L⁻¹ da mistura afluyente; e

DQO_{saída} é a DQO em mg·L⁻¹ do efluente tratado.

O coeficiente 0,6 significa que a cada 24 h retiravam-se os 60% do conteúdo de cada reator, após o tratamento, constituindo um tempo de residência hidráulica de 40 h.

Para modelar o comportamento da remoção de DQO foi aplicada a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) mediante o programa Design Expert (versão *trial*). Dois modelos foram desenhados: o primeiro utilizando como variáveis independentes a concentração de CAP e a mistura de lixiviado e esgoto, e o segundo a concentração de CAP e a DQO de entrada. Em ambos os modelos a resposta utilizada foi a média da DQO removida. O ajuste para definir o comportamento do tratamento foi feito com uma equação polinomial, sendo o critério de seleção a significância estatística de acordo com o teste F de Fisher. Os termos não significativos foram descartados do modelo (quando “Prob > F” > 0,1). A qualidade do ajuste dos dados ao modelo polinomial foi representada pelo coeficiente de determinação ajustado, R^2 . A ANOVA foi usada para analisar os resultados, utilizando-se o software Design-Expert.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

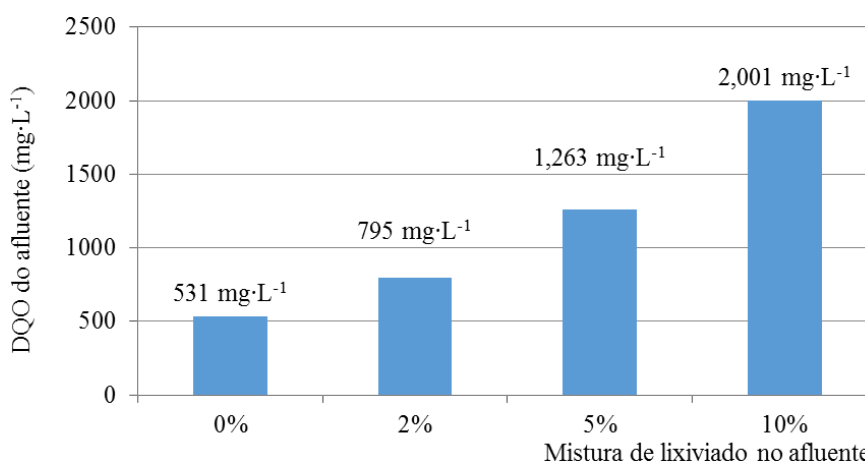
As características básicas do lixiviado são apresentadas na Tabela 3. O lixiviado apresentou $15.047 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO. Este valor de DQO para o lixiviado é relativamente elevado se comparado com uma amostra coletada em março de 2012 no mesmo aterro sanitário, com DQO de $3.267 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. A diferença se explica pela época do ano, já que a amostra utilizada neste experimento foi coletada numa época seca, e a outra amostra foi coletada em março de 2012, durante a época de chuvas. Esta variabilidade justifica modelar a superfície de resposta utilizando a variável independente “DQO da entrada”, no segundo modelo, no lugar da variável “proporção de lixiviado”.

Tabela 3: Características do lixiviado utilizado

Parâmetro	Medida	Unidade
DQO	15.047	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
pH	7,986	-
Cor	8656	uH
Turbidez	85	uT

Características principais do lixiviado coletado no aterro sanitário
Dois Arcos, São Pedro da Aldeia – RJ, em julho de 2013.

A Figura 1 indica a DQO média das entradas, ou seja, a DQO correspondente a cada uma das 4 misturas distintas utilizadas no experimento. O menor valor, $531 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, corresponde à DQO do esgoto sanitário doméstico dentro dos padrões brasileiros, conforme foi descrito por Von Sperling (1996). Pode-se observar como a adição de lixiviado aumenta de forma substancial a DQO da mistura até quase quadruplicá-la quando a proporção de lixiviado foi 10%.



Valores de DQO das entradas, isto é, das misturas de esgoto sintético e lixiviado de aterro sanitário utilizadas como afluentes para alimentar os reatores.

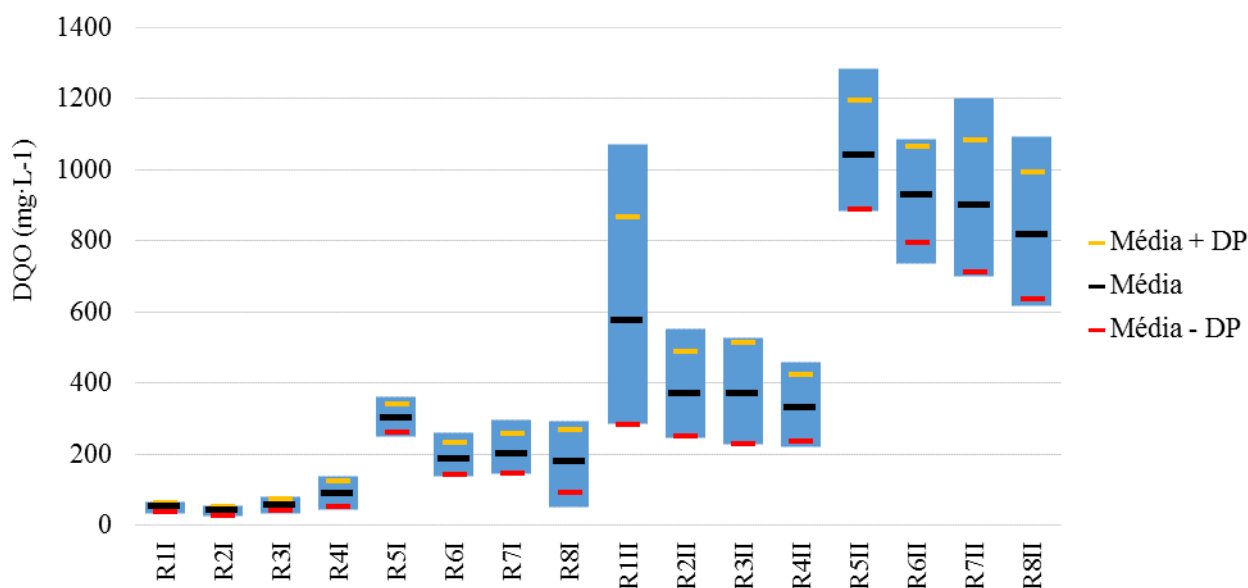
Figura 1: DQO dos afluentes

A Tabela 4 e a Figura 2 apresentam os resultados das análises de DQO dos efluentes tratados pelo processo PACT® em ambas as baterias de experimentação.

Tabela 4: DQO dos efluentes após o tratamento PACT®

Bateria I (resultados em mg·L ⁻¹)					Bateria II (resultados em mg·L ⁻¹)				
Reator	10/12/13	11/12/13	17/12/13	18/12/13	Reator	24/01/14	30/01/14	31/01/14	06/02/14
R1I	33	57	65	50	R1II	445	308	484	1071
R2I	29	53	54	26	R2II	394	246	286	552
R3I	53	80	65	33	R3II	237	226	528	497
R4I	137	107	43	65	R4II	219	263	380	457
R5I	361	294	249	298	R5II	1283	1063	883	939
R6I	260	139	178	175	R6II	1025	1087	873	737
R7I	177	149	185	297	R7II	884	1200	814	700
R8I	293	51	157	222	R8II	1094	836	616	720

DQO após o tratamento PACT® em ambas as baterias. Os resultados da primeira bateria são claramente menores aos da segunda bateria, devido à menor proporção de lixiviado na mistura. Ainda, os resultados dos reatores com maiores concentrações de CAP são, em geral, mais baixos que os dos reatores com menor concentração de CAP.



DQO nos reatores depois do tratamento PACT®. A figura representa também a média ± desvio padrão. Podem observar-se quatro grupos de quatro reatores cada um, diferenciados pela proporção de lixiviado na mistura. Maiores proporções de lixiviado e menores concentrações de CAP resultaram em maiores DQO.

Figura 2: DQO final nos reatores após o tratamento PACT®

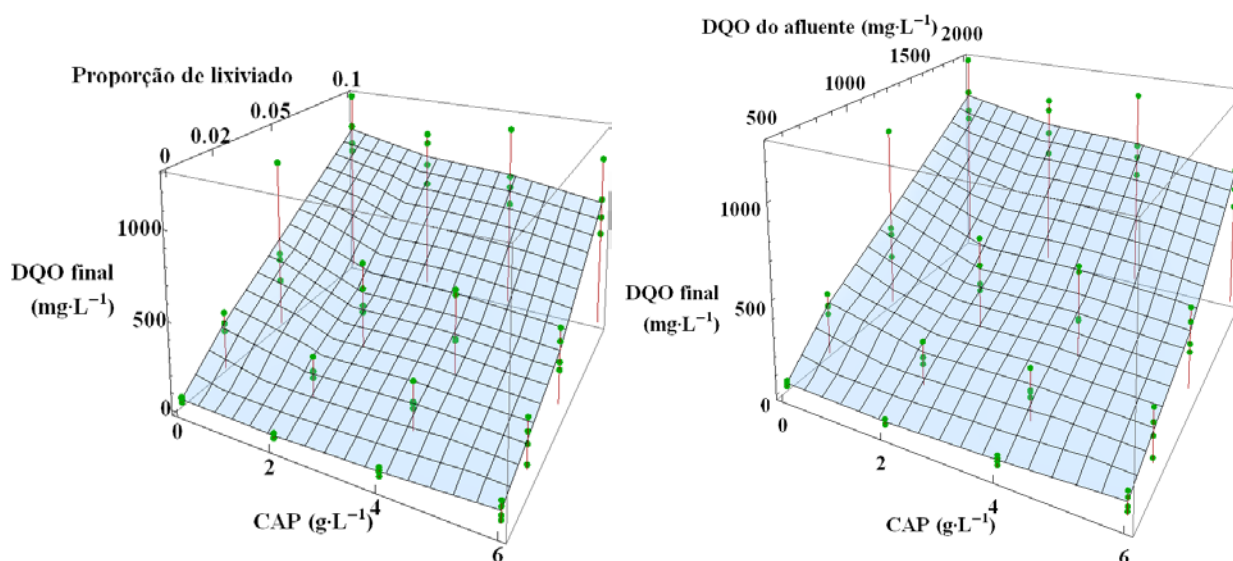
A Tabela 5 mostra os resultados das análises da DQO dos reatores depois do tratamento pelo processo PACT®. A Figura 3 também apresenta os resultados médios de DQO obtidos após o tratamento do efluente nos dezesseis reatores mediante a superfície, e os resultados de cada análise mediante pontos. A DQO final aumenta conforme aumenta a proporção de lixiviado na mistura, ou seja, a DQO de entrada. No entanto, observa-se que a DQO final aumenta em ritmo menor quanto maior é a concentração de CAP no reator. A adição de CAP nos reatores amortecia o efeito tóxico do lixiviado e melhora o funcionamento do reator, criando uma sinergia com os lodos, que podem consumir mais matéria orgânica. Observa-se que, quando não houve aplicação de lixiviado, a DQO final nos reatores foi muito similar. Porém à medida que a mistura ia recebendo uma proporção maior de lixiviado, a inclinação da função de crescimento da DQO final é maior quanto menor foi a aplicação de CAP, sendo máxima no caso de ausência do mesmo. Também pode-se

observar como, à medida que aumenta a aplicação de lixiviado, aumenta a variabilidade dos resultados. Isso pode ser devido à reação do lodo diante do aumento de toxicidade.

Tabela 5: DQO final do efluente após o tratamento PACT®

Proporção de lixiviado → ↓ CAP ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0%	2%	5%	10%
	DQO do efluente tratado ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			
0	51	301	577	1042
2	40	188	370	930
4	58	202	372	900
6	88	181	330	816

Resultados de DQO do efluente depois do tratamento PACT®.



Resultados de DQO do efluente depois do tratamento PACT®. A superfície representa a DQO média e os pontos os resultados de DQO de cada análise.

Figura 3: DQO final do efluente após o tratamento PACT®

A Tabela 6 apresenta a eficiência de cada reator na remoção de DQO. A mistura com menor DQO (sem adição de lixiviado) foi utilizada nos reatores R1I a R4I na primeira bateria. Em todos os casos a eficiência foi superior a 85%, com exceção do R4I, com concentração de CAP de $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, que só atingiu uma eficiência de 83,4%. Os melhores resultados foram obtidos com o R2I, com $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; no entanto, os resultados do R1I, com $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ foram tão próximos que o ganho de eficiência não justificaria provavelmente os custos do CAP quando não há adição de lixiviado na mistura afluente.

A aplicação de 2% de lixiviado na mistura diminuiu a eficiência de todos os reatores. O melhor comportamento foi o do R8I, com $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de CAP. A eficiência do R5I, onde a concentração de CAP era de $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, foi notavelmente pior que a do R2I, diminuindo de 90,3% na ausência de lixiviado para 62,2% quando a aplicação de lixiviado foi 2% na mistura.

Quando a mistura foi de 5% de lixiviado a eficiência foi pior, mas a diminuição da eficiência entre o tratamento de 2% e 5% foi menor que entre 0% e 2%. De novo, o melhor reator foi o que continha $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de CAP, R4II, com 73,9% de eficiência; R2II e R3II comportaram-se de maneira muito similar, e o reator sem CAP, R1II, teve o pior desempenho.

Os resultados de eficiência dos reatores quando a proporção de lixiviado na mistura foi de 10% foram os piores do experimento, como era esperado. Nenhum dos reatores atingiu os 60% de eficiência, sendo o R8II,

com $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de CAP, o que apresentou melhor desempenho. R5II, que não continha CAP, teve a pior eficiência entre todas as configurações de reatores do experimento, com 47,9% de eficiência.

Tabela 6: Eficiência na remoção de DQO

Proporção de lixiviado → ↓ CAP ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0%	2%	5%	10%
Eficiência na remoção de DQO (%)				
0	90,3	62,2	54,3	47,9
2	92,4	76,3	70,7	53,5
4	89,1	74,6	70,5	55,0
6	83,4	77,2	73,9	59,2

Eficiência de cada reator na remoção de DQO pelo tratamento PACT[®]. O número de análises foi 04 nos reatores com 0% e 2% de lixiviado e 03 nos reatores com 5% e 10%.

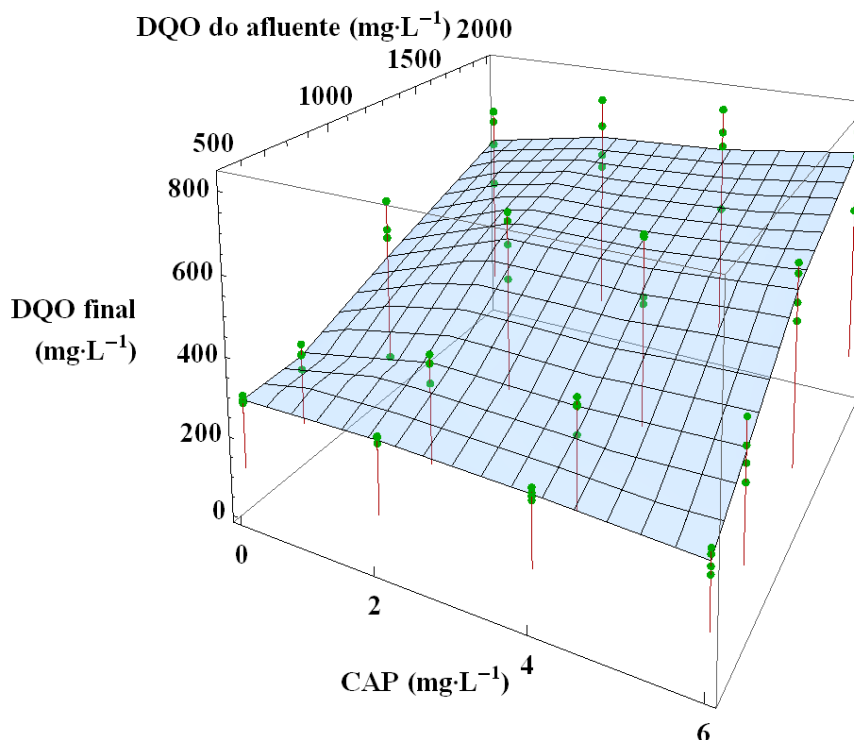
A massa removida de DQO por dia e reator é apresentada na Tabela 7. Os resultados indicam que quando a DQO da mistura de esgoto sanitário e lixiviado foram superiores, a massa removida de DQO foi também maior. Quando a adição de CAP foi superior, a tendência foi remover mais DQO, com algumas exceções: (1) para a mistura com 0% de lixiviado, o melhor desempenho foi para $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, mas o desempenho de todos os reatores foi superior a 80%, não influenciando a adição de CAP na remoção de DQO; (2) quando a mistura de lixiviado foi de 2%, o melhor comportamento foi o do reator com $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, mas os resultados de remoção de DQO dos reatores com $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ foram muito próximos; (3) quando a mistura de lixiviado foi 5% e 10% o comportamento dos reatores com $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ foi muito similar. Este comportamento similar dos reatores R6I e R7I e dos reatores R2II e R3II pode significar que o efeito da aplicação de $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ não influencia de forma notável no rendimento do sistema quando a aplicação de lixiviado é baixa ou média. No entanto, quando a aplicação de lixiviado foi maior, o reator com maior concentração de CAP (R7II com $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) foi melhor do que o que continha menos (R6II com $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$).

Tabela 7: Massa de matéria orgânica removida representada pela DQO removida

Proporção de lixiviado → ↓ CAP ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0%	2%	5%	10%
Massa de matéria orgânica removida (mg por reator e dia)				
0	288	296	412	576
2	294	364	536	643
4	284	355	535	661
6	265	368	560	711

Massa de matéria orgânica removida de cada reator por dia, representada pela diferença entre a DQO média das entradas (afluentes) e a DQO média das saídas (efluentes).

Na Figura 4 são representados como pontos os resultados de remoção de DQO diária por reator durante o experimento. A superfície é a média dos dados de remoção de DQO para cada reator por dia. De forma análoga ao observado na Figura 3, os resultados quando não houve aplicação de lixiviado são muito similares, mas a inclinação que descreve o crescimento na remoção de DQO para cada concentração de CAP foi menor para $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e maior para $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, portanto, o CAP melhorou o rendimento do sistema quanto maior foi a aplicação de lixiviado.



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

Figura 4: Massa de matéria orgânica removida representada pela DQO

MODELO DQO 1: CONCENTRAÇÃO DE CAP E PROPORÇÃO DE LIXIVIADO COMO VARIÁVEIS INDEPENDENTES

A Equação 3 descreve o comportamento do sistema quando as entradas foram a concentração de CAP e a proporção de lixiviado de aterro sanitário na mistura. Os limites recomendados para a utilização deste modelo são uma concentração de entre 0 g·L⁻¹ e 6 g·L⁻¹, e uma proporção unitária de lixiviado de entre 0 e 0,1 (0% e 10%).

$$DQOs = 264 + 2,61 \cdot CAP + 4477 \cdot Lixiviado + 232 \cdot CAP \cdot Lixiviado - 13849 \cdot Lixiviado^2 \quad (3)$$

Em que

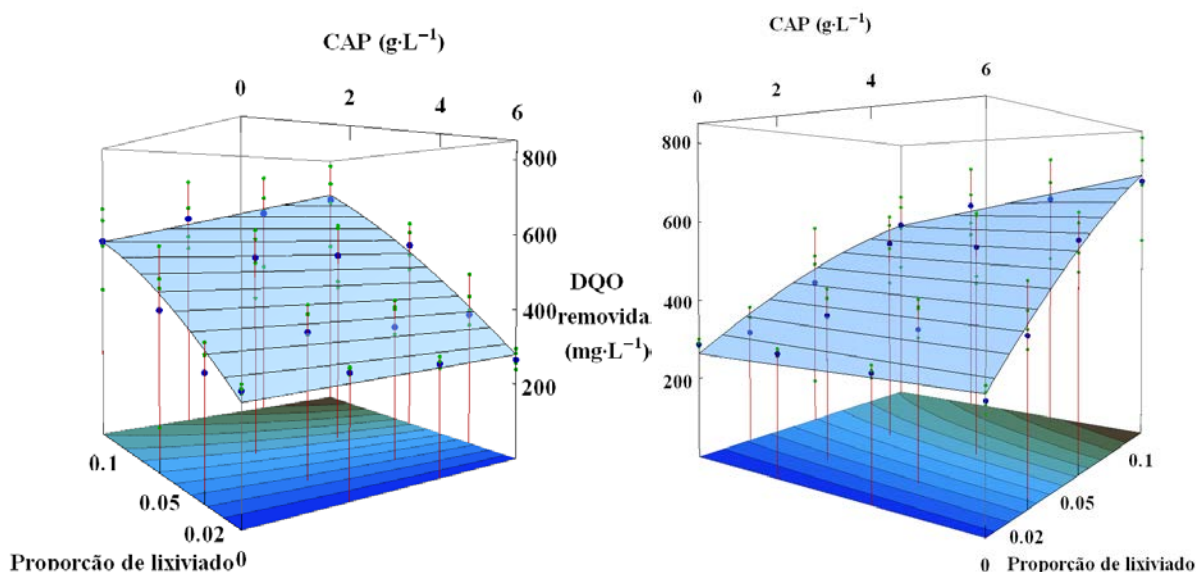
DQOs é a DQO removida em mg·L⁻¹,

CAP a concentração de CAP em g·L⁻¹ e

Lixiviado a proporção unitária de lixiviado.

Limites de utilização do modelo: 0 g·L⁻¹ ≤ CAP ≤ 6 g·L⁻¹ e 0 ≤ Lixiviado ≤ 0,1.

A Equação 3 está representada na Figura 5 em 3D, como superfície de resposta dados como entradas a concentração de carvão em pó ativado e a proporção de lixiviado.



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 indica com a cor mais escura, próxima ao ponto $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de CAP e 10% de lixiviado, que a remoção de DQO é maior. Cada linha vertical indica as coordenadas dos reatores.

Figura 5: Superfície de resposta do modelo DQO 1 e dados médios do experimento

Análise estatística por ANOVA do modelo DQO 1

A análise detalhada por ANOVA do modelo DQO 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 foi levemente melhor, mas 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 enquanto que nenhum outro termo se tornou não significativo.

Tabela 8: Análise estatística do modelo 1 de remoção de DQO

p-value Prob > F	Desv. Pad.	C.V. %	R^2	R^2 ajust.	R^2 prev.	Precisão adeq.
< 0,0001	32,65	7,31	0,9667	0,9546	0,9333	25,4

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.

Análises estatísticas mais detalhadas podem ser encontradas em (FERNÁNDEZ BOU *et al.*, 2015).

MODELO DQO 2: CONCENTRAÇÃO DE CAP E DQO DA MISTURA COMO VARIÁVEIS INDEPENDENTES

A Equação 4 descreve o comportamento do sistema quando as entradas foram a concentração de CAP e a DQO da mistura de esgoto sanitário sintético e lixiviado de aterro sanitário. Os limites recomendados para a utilização deste modelo são uma concentração de CAP entre $0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, e uma DQO de entrada de entre $530\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ e $2.000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

$$DQOs = 76,5 - 5,38 \cdot CAP + 0,39 \cdot DQOi + 0,0156 \cdot CAP \cdot DQOi - 7,262 \cdot 10^{-5} \cdot DQOi^2 \quad (1)$$

Em que:

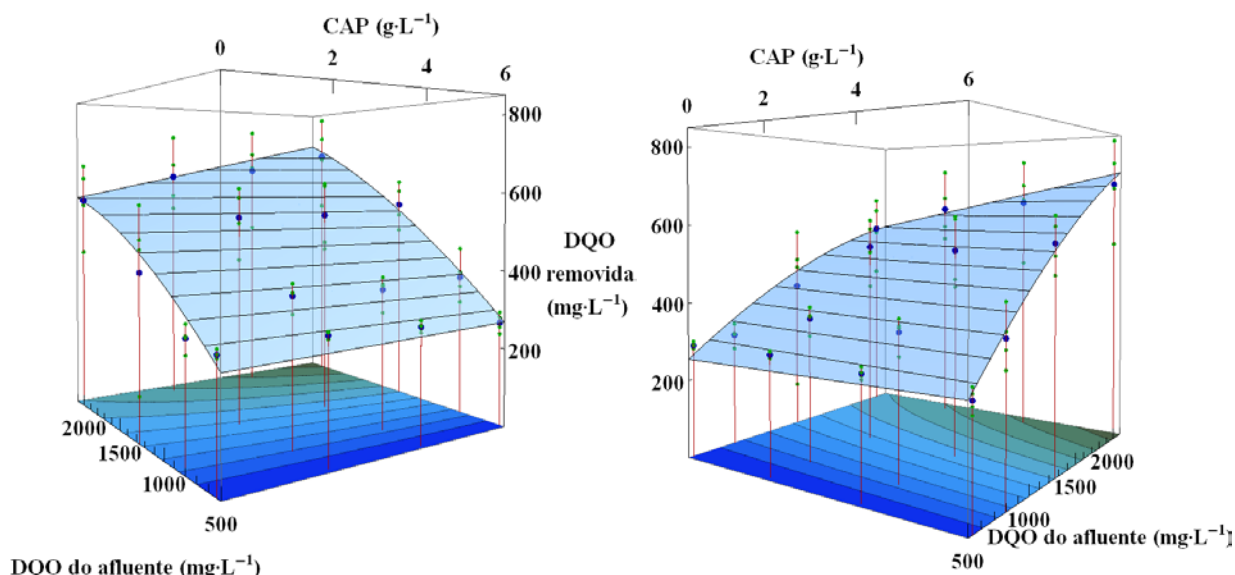
DQO_s é a DQO removida em $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

CAP é a concentração de CAP em $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ e

DQO_i é a DQO da entrada da mistura de esgoto sanitário e lixiviado de aterro sanitário.

Limites de utilização do modelo: $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \leq CAP \leq 6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ e $530 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \leq DQO_i \leq 2.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

A Equação 4 está representada na Figura 6 em 3D, como superfície de resposta dados como entradas a concentração de CAP e a DQO da mistura de entrada.



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 DQO das entradas (afluentes, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). A projeção horizontal indica com a cor mais escura, próxima ao ponto $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de CAP e $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de DQO, que a remoção de DQO é maior. As linhas verticais indicam as coordenadas dos reatores e os pontos as repetições.

Figura 6: Superfície de resposta do modelo DQO 2 e dados médios do experimento

Análise estatística por ANOVA do modelo DQO 2

A análise detalhada por ANOVA do modelo DQO 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 foi levemente pior 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, como no modelo 1. A retirada deste termo da equação melhorou o R^2 ajustado enquanto que nenhum outro termo se tornou não significativo.

Tabela 9: Análise estatística do modelo 2 de remoção de DQO

p-value Prob > F	Desv. Pad.	C.V. %	R^2	R^2 ajust.	R^2 prev.	Precisão adeq.
< 0,0001	30,59	6,85	0,9708	0,9602	0,9397	27,033

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 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.

Análises estatísticas mais detalhadas podem ser encontradas em (FERNÁNDEZ BOU *et al.*, 2015).

CONCLUSÕES

A adição de maiores concentrações de CAP resultou em uma melhor remoção de DQO nos reatores. No entanto, quando a proporção de lixiviado foi zero, sem lixiviado no efluente de entrada, a aplicação de CAP não melhorou a remoção de DQO.

Os resultados do experimento indicaram que proporções de lixiviado maiores estão associadas a maiores remoções de DQO, apesar de a eficiência do tratamento diminuir. As conclusões consideram o intervalo de variação das variáveis deste trabalho.

Os dois modelos desenvolvidos apresentaram elevado R^2 ajustado. No entanto, o modelo baseado na DQO das entradas (modelo 2) teve melhor desempenho que o baseado na proporção de lixiviado das entradas. Ainda, por causa da natureza variável do lixiviado, o modelo 2 pode ser mais precisos em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21a Ed.; APHA/AWWA/WEF: Washington, D.C., 2005.
2. AQUASTAT, FAO. Freshwater Availability - Precipitation and Internal Renewable Water Resources (IRWR); banco de dados online de AQUASTAT. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>> (consultado em janeiro de 2015).
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS, ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012; São Paulo, 2013.
4. BRASIL, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.
5. CAMPOS, J.C.; MACHADO, C.R.A.; COUTO, J.M.S.; FLORIDO, P.L.; CERQUEIRA, A.C.F.P.; SANTIAGO, V.M.J. Evaluation of an Activated Sludge Process Combined with Powdered Activated Carbon for the Treatment of Oil Refinery Wastewater. J Int Environ Appl Sci, v. 9, n. 1, p. 24-36, 2014.
6. ECKENFELDER, W.W. Industrial water pollution control; McGraw-Hill: Singapore, 1989.
7. 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.
8. 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.
9. HOLLER, S.; TRÖSCH, W. Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates. J Biotechnol, v. 92, n. 2, p. 95-101, 2001.
10. IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro, 2010.
11. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, IPEA. Plano Nacional de Resíduos Sólidos: diagnóstico dos resíduos urbanos, agrosilvopastoris e a questão dos catadores. Comunicados do IPEA nº 145. IPEA: Brasília, 2012.
12. METCALF AND EDDY INC. Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse, 4a Ed.; McGraw - Hill: New York, 2003; 1848pp.
13. RAMOS, A.M.; DOS SANTOS, L.A.R.; FORTES, L.T.G. Normais climatológicas do Brasil 1961-1990: edição revista e ampliada; Instituto Nacional de Meteorologia: Brasília, 2009.
14. VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, 2a Ed.; Editora UFMG: Belo Horizonte, 1996; Vol. 1, 452 pp.