

# Remoção da cor no tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico via processo PACT®

*Color removal in the combined treatment of landfill leachate and domestic sewage via PACT® process*

Ángel Santiago Fernández Bou<sup>1</sup>, Bárbara Costa Pereira<sup>2</sup>, Leonardo Duarte Batista da Silva<sup>3</sup>, João Alberto Ferreira<sup>4</sup>, Juacyara Carbonelli Campos<sup>5</sup>, Alexandre Lioi Nascentes<sup>6</sup>

## RESUMO

Misturas diferentes de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico foram aplicadas em 16 reatores em batelada usando o processo PACT® (lodos ativados com adição de carvão ativado em pó - CAP). O objetivo do trabalho foi representar a remoção de cor utilizando dois ajustes matemáticos: o primeiro combinou as variáveis concentração de CAP (0 a 6 g.L<sup>-1</sup>) e mistura lixiviado/ esgoto (0 a 10%, em volume); e o segundo, a concentração de CAP e a cor da mistura (276 a 1199 uH). A metodologia de superfície de resposta (MSR) foi escolhida para representar a resposta dos ajustes. Os resultados indicaram que, conforme a concentração de lixiviado aumentou até 5%, a adição de CAP resultou em um maior percentual de remoção de cor. No entanto, para a mistura com 10% de lixiviado, os reatores perderam eficácia, com exceção do reator com 6 g.L<sup>-1</sup> de CAP, que apresentou os melhores resultados de remoção de cor.

**Palavras-chave:** chorume; superfície de resposta; processo biológico; carvão ativado em pó; adsorção.

## ABSTRACT

Sixteen batch reactors fed with different mixtures of landfill leachate combined with synthetic wastewater were treated using the PACT® process (activated sludge process plus powdered activated carbon addition - PAC). The objective was to measure the color removal using two mathematical adjustments: the first adjustment combined the variables PAC concentration (0 to 6 g.L<sup>-1</sup>) and landfill leachate concentration in the wastewater (0 to 10%, in volume); and the second model combined PAC concentration and the influent color (276 to 1199 uH). The response surface methodology was used to describe the response of both adjustments. The results indicated that as the proportion of leachate was increased up to 5%, higher PAC concentrations resulted in a better color removal in the reactors. When the leachate proportion was 10%, the reactors were less efficacious, except for the one with 6 g.L<sup>-1</sup>, which presented the highest color removal within the experiment.

**Keywords:** landfill leachate; response surface methodology; biological process; powder activated carbon; adsorption.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil vem experimentando um crescimento econômico que tem repercutido na geração dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2014), entre 2012 e 2013, a taxa de geração de RSU (4,1%) foi maior do que a taxa de crescimento da população (3,7%).

A complexidade para administrar as quantidades cada vez maiores de RSU vem exigindo grandes esforços dos gestores, que também têm sido pressionados para atenderem às condições de gestão adequada estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), promulgada em 2010. Consta-se que o número de aterros sanitários vem aumentando de forma significativa, principalmente nos municípios de grande porte e nas regiões metropolitanas, colocando para seus

<sup>1</sup>Doutorando, Universidade de California Merced - Merced (California), USA.

<sup>2</sup>Mestranda em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) - Seropédica (RJ), Brasil.

<sup>3</sup>Professor Associado, UFRRJ - Seropédica (RJ), Brasil.

<sup>4</sup>Pesquisador visitante do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>5</sup>Professora, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>6</sup>Professor, UFRRJ - Seropédica (RJ), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Alexandre Lioi Nascentes - Departamento de Engenharia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Rodovia BR 465, km 7 - Campus Universitário - 23897-000 - Seropédica (RJ), Brasil - E-mail: alexandrelioi@gmail.com

**Recebido em:** 03/06/2015 - **Aceito em:** 13/02/2017 - **Reg. ABES:** 150425

operadores o desafio de obedecer aos limites estabelecidos, pela legislação ambiental, para os efluentes líquidos e gasosos desses aterros.

Os lixiviados dos aterros sanitários que necessitam ser tratados adequadamente possuem uma variabilidade nas suas características ao longo da operação de um aterro, com a possível presença de substâncias recalcitrantes, que tornam as técnicas de tratamento tradicionais pouco eficientes ou muito onerosas (MANNARINO *et al.*, 2013). O tratamento combinado de lixiviado de aterro com esgoto doméstico surge como uma alternativa que visa à redução dos custos operacionais dos aterros (GOMES, 2009).

A cor em lixiviados de aterros sanitários está relacionada à concentração de substâncias húmicas presentes, que conferem recalcitrância a esse efluente (CHEIBUB; CAMPOS; FONSECA, 2014). Mesmo não havendo, na legislação ambiental, exigências quanto a essas substâncias, seu acompanhamento se mostra relevante e pode ser realizado indiretamente por meio da avaliação da cor. Por conta da presença dessas substâncias recalcitrantes, o monitoramento das estações de tratamento de esgoto que recebem cargas de lixiviados constantes ou eventuais necessita de mais atenção (ÇEÇEN; AKTAS, 2004). O estudo de Kang, Shin e Park (2002) aponta a relação das substâncias húmicas com a idade do aterro, sendo essa informação de grande relevância para a otimização de tratamento de lixiviados e para a remediação de águas subterrâneas contaminadas por esse efluente. Os lixiviados são tratados normalmente mediante processos biológicos, como lagoas de estabilização ou lodos ativados e também utilizando membranas, e outros processos são mencionados na literatura, como adsorção, coagulação e floculação. No entanto, devido à natureza variável do lixiviado, não existe um método consensualmente considerado como o melhor tratamento (CAMPOS *et al.*, 2013).

O processo *Powdered Activated Carbon Treatment* (PACT<sup>®</sup>) foi desenvolvido pela companhia Du Pont (FLYNN & STADNIK, 1979) e consiste na adição de carvão ativado em pó em um reator aeróbio de lodos ativados para o tratamento de esgoto doméstico. Essa tecnologia confere estabilidade ao sistema, além de promover a remoção de cor, odor, nitrogênio amoniacal e compostos recalcitrantes, atenuando, ainda, efeitos inibitórios causados por compostos tóxicos presentes em alguns efluentes (METCALF & EDDY INC., 2003). No experimento apresentado neste trabalho, o processo PACT<sup>®</sup> foi utilizado no tratamento combinado de 16 reatores de esgoto doméstico aplicando diferentes concentrações de lixiviado e de carvão ativado em pó (CAP). O ajuste da equação que representa a remoção da demanda química de oxigênio (DQO) lançando mão do mesmo aparato experimental foi objeto de outro artigo já publicado (FERNÁNDEZ BOU *et al.*, 2015). A metodologia de superfície de resposta (MSR) foi adotada para a apresentação dos resultados por ser uma abordagem prática que contempla os efeitos das variáveis no desempenho do sistema analisado (AGHAMOHAMMADI *et al.*, 2007).

O objetivo deste artigo foi obter o ajuste da equação que representa a remoção de cor usando a MSR no tratamento combinado de lixiviado e esgoto doméstico.

## METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Monitoramento Ambiental I – Água e Efluentes, da Universidade Federal Rural de Rio de Janeiro (UFRRJ). As análises seguiram as recomendações da *American Public Health Association* (APHA, 2005). O método 2120-C foi utilizado para obter os valores de cor da mistura e do efluente tratado. As amostras tiveram o valor do pH ajustado para  $\approx 7,6$  e foram submetidas à filtração a vácuo para a remoção de turbidez, conforme as recomendações do método. A análise foi realizada utilizando um espectrofotômetro Hach DR3900.

O lixiviado de aterro sanitário foi coletado no Aterro Dois Arcos, no município de São Pedro da Aldeia, Rio de Janeiro. O esgoto doméstico sintético foi elaborado com objetivo de evitar variações inerentes a amostragens em diferentes épocas. Ele foi preparado de acordo com as recomendações de Holler e Trösch (2001), adaptadas às características físico-químicas dos esgotos brasileiros descritas por Von Sperling (1996), e sua composição é detalhada na Tabela 1.

O CAP utilizado no experimento foi da marca Carbomafra, tipo 118 CB AS n° 170. As características desse carvão foram estudadas por Campos *et al.* (2014) e são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 1** – Composição do esgoto sintético para uma demanda química de oxigênio média de 530 mg.L<sup>-1</sup>.

| Componente                          | Concentração (mg.L <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 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.

**Tabela 2** – Características do carvão Carbomafra 118 CB AS n° 170.

| Parâmetro de caracterização       | Resultado                               |
|-----------------------------------|---|
| Área Brunauer-Emmett-Teller (BET) | 726,680 m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> |
| Área de microporo                 | 560,590 m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> |
| Área externa                      | 166,080 m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> |
| Volume de microporo               | 0,266 cm <sup>3</sup> .g <sup>-1</sup>  |
| Tamanho de microporo              | 25,600 Å                                |

Fonte: Campos *et al.*, 2014.

## Estrutura do experimento

O experimento foi dividido em 2 baterias, cada uma com 8 reatores, totalizando 16 configurações diferentes de CAP e proporção de lixiviado de aterro sanitário na mistura, conforme mostrado na Tabela 3. O reator R1I, sem adição de CAP nem de lixiviado, foi o controle.

A idade do lodo foi definida previamente em 28 dias, ou seja, 3,5% do lodo era removido por dia por meio da retirada de 35 mL do licor misto. Os níveis de oxigênio dissolvido (OD) foram mantidos acima de 2 mg.L<sup>-1</sup> durante todo o procedimento experimental. O tempo de retenção hidráulica foi estabelecido em 40 horas, removendo 60,0% do efluente tratado a cada 24 horas. Os reatores consistiram em 8 provetas graduadas com um volume útil de 1.000 mL. Cada reator foi inoculado com 200 mL de lodo com concentração de sólidos suspensos totais (SST) de 5.780 mg.L<sup>-1</sup> e, em seguida, os reatores foram complementados com esgoto sintético até se atingir o volume útil, resultando em uma concentração final de SST de 2.499 mg.L<sup>-1</sup>. Os reatores foram alimentados exclusivamente com esgoto sintético durante duas semanas, antes de começar a aplicação das diferentes concentrações de CAP e misturas lixiviado/esgoto para aclimação do lodo.

## Operação do sistema

O esgoto doméstico sintético era preparado diariamente e diferentes volumes de lixiviado de aterro sanitário eram adicionados. A aeração operava 23 horas por dia, utilizando-se compressores de ar convencionais, de uso em aquários, com o objetivo de manter o OD acima de 2 mg.L<sup>-1</sup> e, assim, garantir que não fosse um fator limitante ao metabolismo dos microrganismos (ECKENFELDER, 1989; METCALF & EDDY INC., 2003). Antes de se desligar a aeração, realizavam-se medições do pH, da temperatura e do OD, e 35 mL de licor eram removidos de cada reator, para o controle da idade de lodo. Em seguida, a aeração era desligada e o lodo sedimentava no fundo do reator. O sobrenadante era retirado até a medida de 400 mL, evitando-se retirar os flocos de lodo, sendo que 50 mL eram destinados à análise do parâmetro cor. Na sequência, a reposição do CAP, que era descartado com o lodo excedente, era realizada e eram adicionados 600 mL da mistura de esgoto doméstico e lixiviado de aterro sanitário, de acordo com as

**Tabela 3** - Estrutura dos reatores utilizados para realização dos experimentos.

| Concentração de carvão ativado em pó (g.L <sup>-1</sup> ) | Porcentagem de lixiviado na mistura* |     |      |      |
|---|--------------------------------------|-----|------|------|
|   | 0%                                   | 2%  | 5%   | 10%  |
| 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).

configurações de cada reator. O pH dos reatores era, posteriormente, corrigido para em torno de 7 a 8 com solução de NaOH (1 g.L<sup>-1</sup>), caso fosse necessário.

## Tratamento dos dados e ajuste da equação

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

$$\text{Eficiência de remoção} = \frac{\text{COR}_{\text{entrada}} - \text{COR}_{\text{saída}}}{\text{COR}_{\text{entrada}}} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

$\text{COR}_{\text{entrada}}$  = COR em uH na mistura afluyente; e

$\text{COR}_{\text{saída}}$  = COR em uH no efluente tratado.

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

$$\text{Cor removida [por dia e por reator]} = \text{COR}_{\text{entrada}} - \text{COR}_{\text{saída}} \quad (2)$$

Para obter o ajuste da equação que representa o comportamento da remoção da cor, foi utilizada a MSR com o programa Design-Expert (versão *free trial*). Essa metodologia considera apenas os valores médios da cor afluyente e da cor efluente, e não a dispersão dos valores observados. Desenharam-se dois ajustes distintos: o primeiro teve como variáveis independentes a concentração de CAP e a mistura lixiviado/esgoto; e o segundo, a concentração de CAP e a cor de entrada. Em ambos os ajustes a resposta utilizada foi a média da variável dependente analisada, portanto, a cor removida, representada pela diferença entre a cor média afluyente e efluente. O ajuste para definir o comportamento do tratamento foi feito com uma equação polinomial. Testaram-se equações de até terceiro grau, sendo a de segundo grau com duas variáveis independentes a que apresentou maior significância estatística (Equação 3).

$$Z = \alpha_1 X^2 + \alpha_2 Y^2 + \alpha_3 XY + \alpha_4 X + \alpha_5 Y + \alpha_0 + e \quad (3)$$

Em que:

Z = resposta;

X e Y = variáveis independentes;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  e  $\alpha_0$  = coeficientes do modelo; e

e = erro.

A qualidade do ajuste dos dados ao modelo polinomial foi representada pelo coeficiente de determinação ajustado, R<sup>2</sup>, e a significância estatística foi verificada utilizando o teste F de Fisher. Os termos não significativos foram descartados do modelo (quando "Prob>F">0,1). A ANOVA foi usada para analisar os resultados, utilizando-se o *software* Design-Expert.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físico-químicas do lixiviado utilizado neste trabalho são apresentadas na Tabela 4.

Na Tabela 5 estão indicados os valores médios de cor de cada uma das quatro misturas lixiviado/esgoto no afluente. O menor valor, 275,5 uH, corresponde à cor do esgoto sintético (sem adição de lixiviado).

Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios de cor final do efluente após o tratamento em cada um dos reatores. Nas amostras provenientes dos reatores que operaram com 0 e 2% de lixiviado foi realizado um total de 22 análises, enquanto nas amostras dos reatores que operaram com 5 e 10% de lixiviado foram realizadas 13 análises no total. Na Figura 1 estão representados os valores médios de cor final do efluente e

**Tabela 4 - Principais características do lixiviado do aterro Dois Arcos.**

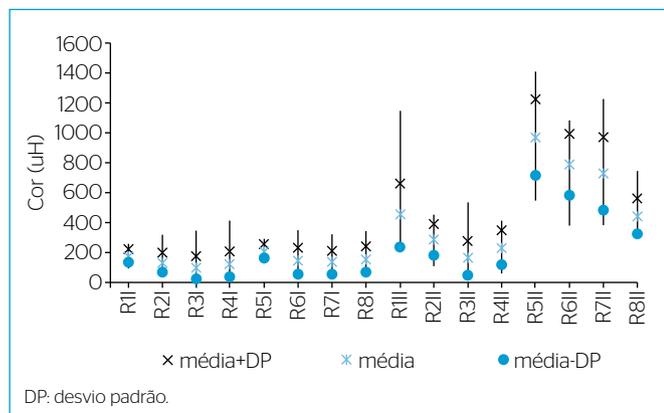
| Parâmetro                   | Medida   | Unidade            |
|-----------------------------|----------|--------------------|
| pH                          | 7,9      | -                  |
| Cor                         | 8.656,0  | uH (unidade Hazen) |
| Demanda química de oxigênio | 15,047,0 | mg.L <sup>-1</sup> |
| Turbidez                    | 85,0     | uT                 |

**Tabela 5 - Valores médios (seis repetições) de cor inicial das misturas de esgoto doméstico e lixiviado de aterro sanitário dos reatores.**

| Proporção de lixiviado | 0%    | 2%    | 5%    | 10%     |
|------------------------|-------|-------|-------|---------|
| Cor inicial (uH)       | 275,5 | 348,0 | 787,0 | 1.199,0 |

**Tabela 6 - Cor final do efluente tratado.**

| Carvão ativado em p (g.L <sup>-1</sup> ) | Proporção de lixiviado       |       |       |       |
|--|------------------------------|-------|-------|-------|
|  | 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 |



**Figura 1 - Valores médios e desvios padrões de cor final do efluente.**

seus respectivos desvios padrões. A cor final aumenta conforme cresce a proporção de lixiviado na mistura e a adição de CAP mostra efeito benéfico na redução desse parâmetro. Destaca-se, ainda, que os reatores que receberam maiores concentrações de CAP apresentaram maior remoção de cor, com exceção dos reatores R4I, R8I e R4II. Os referidos reatores receberam a maior concentração de CAP (6 g CAP.L<sup>-1</sup>), no entanto, apresentaram valores de cor final superiores àqueles observados nos reatores que receberam 4 g CAP.L<sup>-1</sup>. Observa-se que o reator R3II (4 g CAP.L<sup>-1</sup> e 5% de lixiviado) mostrou-se eficiente na remoção de cor. Quando a proporção de lixiviado foi de 10%, todos os reatores apresentaram maior instabilidade (aumento do valor de cor ocasionado pelo impacto da concentração elevada de lixiviado), com exceção do reator com 6 g CAP.L<sup>-1</sup>.

Na Tabela 7 consta a eficiência de remoção de cor em cada um dos reatores. Todos eles tiveram suas maiores eficiências quando a proporção de lixiviado foi de 5%. Os piores resultados aconteceram quando a proporção de lixiviado foi de 10%, com a exceção do grupo de reatores com 6 g CAP.L<sup>-1</sup>, no qual 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 foi observado no reator R3II (5% de lixiviado e 4 g.L<sup>-1</sup> de CAP), no qual a eficiência de remoção de cor máxima se aproximou de 80%. Esse valor é quase o dobro do 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 de remoção de cor. Isso sugere que a quantidade de lixiviado na mistura pode ter ocasionado efeitos deletérios à atividade microbiana até o ponto de diminuir a população de bactérias presentes na mistura lodo/esgoto. Essa tendência pode ter sido similar nos reatores R6II e R7II, nos quais a proporção de lixiviado também era maior; a presença de CAP amorteceu parcialmente o efeito do lixiviado. É possível que os compostos responsáveis por inibir a atividade biológica tenham sido adsorvidos, pois a eficiência de remoção de cor foi quase o dobro daquela observada no reator com 10% e sem CAP (R5II), no entanto, foi aproximadamente a metade do reator no qual a proporção de lixiviado era de 5%. Aghamohammadi *et al.* (2007), avaliando a biodegradação aeróbia e semiaeróbia de lixiviado de um aterro sanitário situado na Malásia

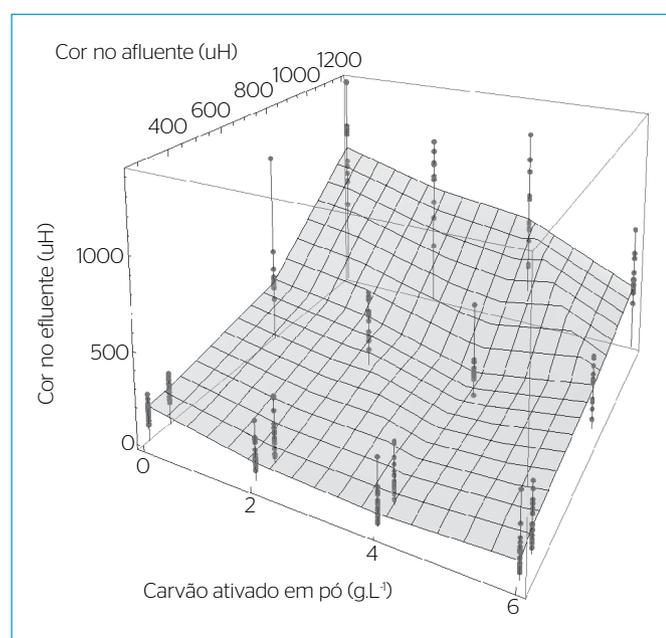
**Tabela 7 - Resultados de eficiência de remoção de cor nos 16 reatores.**

| Carvão ativado em pó (g.L <sup>-1</sup> ) | Proporção de lixiviado           |      |      |      |
|---|----------------------------------|------|------|------|
|   | 0%                               | 2%   | 5%   | 10%  |
|   | Eficiência de remoção de 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 |

e utilizando dois reatores em paralelo (um recebendo CAP e o outro não), também constataram que o reator que contou com a adição de CAP conferiu maior remoção de cor. Para o caso de proporção de lixiviado 10%, observa-se claramente que a maior concentração de CAP influenciou de forma importante na eficiência de remoção de cor. Assim como indicado por Machado (2010) e Florido (2011), que utilizaram o processo PACT® para tratar efluente de refinaria de petróleo, a adição do CAP confere maior estabilidade ao sistema diante da presença de compostos tóxicos. Segundo Sher, Arbuckle e Sher (2000), ocorre um efeito sinérgico entre os fenômenos de oxidação biológica e adsorção física. Esses fenômenos ocorrem de maneira simultânea e o carvão ativado aumenta a assimilação biológica, sendo ainda regenerado biologicamente.

Na Figura 2 estão apresentados os pontos correspondentes às repetições das análises de cor no efluente. Cada linha vertical corresponde a um reator. A superfície representa a média dos resultados de cor do efluente final dos reatores. Comparando os grupos de reatores pela cor no afluente, ou seja, pela proporção de lixiviado, os grupos até 348 uH (proporção de lixiviado até 2%) tiveram comportamentos similares e homogêneos. Isso quer dizer que a aplicação do CAP e do lixiviado não alterou muito o funcionamento do sistema para a remoção da cor, enquanto para os grupos com cor acima de 787 uH (proporções de lixiviado de 5 e 10%) o efeito da mistura de lixiviado foi mais evidente, apesar de ser atenuado pela aplicação de CAP. Na Figura 2 constata-se, ainda, que a tendência da média dos resultados dos reatores que operaram com 6 g.L<sup>-1</sup> de CAP apresentou a menor inclinação, se comparada com os outros grupos de reatores, sendo o grupo de reatores com 0 g.L<sup>-1</sup> de CAP o que apresentou a maior inclinação.

A cor removida, em unidades uH, é apresentada na Tabela 8. A maior remoção aconteceu nos reatores com proporção de lixiviado de 5%, exceto



**Figura 2** - Resultados de cor no afluente e no efluente dos reatores.

para o grupo de reatores com concentração de CAP de 6 g.L<sup>-1</sup>, em que a maior remoção aconteceu quando a proporção de lixiviado foi de 10%. A análise das Tabelas 7 e 8 sugere que os grupos de reatores com 0, 2 e 4 g CAP.L<sup>-1</sup> alcançaram sua máxima eficiência e a maior remoção absoluta de cor quando a proporção de lixiviado foi de 5%. No entanto, o grupo de reatores com 6 g CAP.L<sup>-1</sup> conferiu a maior remoção de cor quando a proporção de lixiviado foi de 10%, apesar de que a maior eficiência de remoção de cor aconteceu quando a proporção de lixiviado era 5%. Isso sugere que a adição de CAP no R8II amorteceu o efeito negativo do lixiviado na mistura, mas não o suficiente para manter a eficiência de remoção de cor apresentada no R4II.

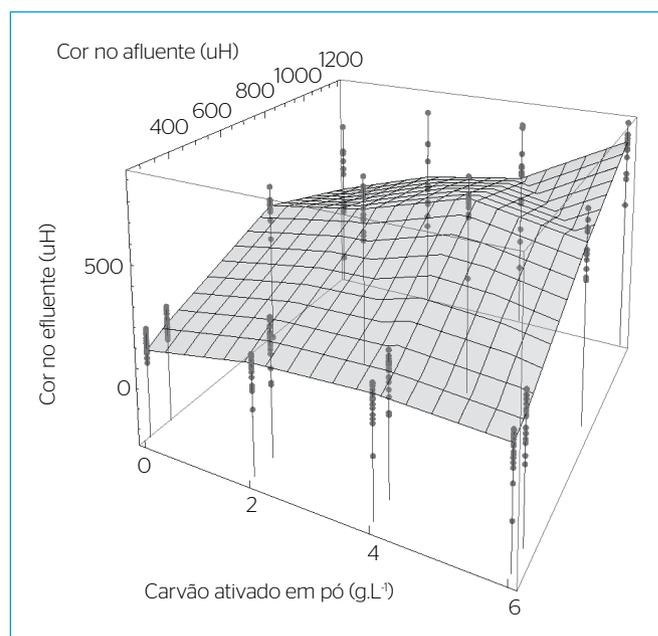
Novamente, destaca-se o valor de cor removida atingido no reator R3II (5% de lixiviado e 4 g.L<sup>-1</sup>), sendo esse valor o segundo maior, logo após o do reator R8II, superando, inclusive, o resultado do reator R4II.

Na Figura 3, os pontos representam os dados de remoção de cor diária por reator, e a superfície é a média da remoção de cor utilizada

**Tabela 8** - Valores médios de cor removida em cada reator.

| Carvão ativado em pó (g.L <sup>-1</sup> ) | Proporção de lixiviado |       |       |       |
|---|------------------------|-------|-------|-------|
|   | 0%                     | 2%    | 5%    | 10%   |
|   | Cor removida* (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, representada pela diferença entre a cor média afluente e efluente.



**Figura 3** - Superfície de cor removida de cada reator, 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 retratam os resultados de cada análise por reator.

para o ajuste. Pode-se observar que, com exceção do grupo de reatores com 6 g CAP.L<sup>-1</sup>, os melhores resultados de remoção de cor foram obtidos quando a proporção de lixiviado foi de 5%.

### Ajuste 1: concentração de carvão ativado em pó e proporção de lixiviado como variáveis independentes

A Equação 4 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 desse ajuste são de 0 e 6 g CAP.L<sup>-1</sup> e uma proporção de lixiviado entre 0 e 10%.

$$CORs = +96,6 + 1,93.CAP + 7747.Lixiviado + 776.CAP.Lixiviado - 63242.Lixiviado^2 \tag{4}$$

Em que:

CORs = remoção de cor em uH;

CAP = concentração de CAP em g.L<sup>-1</sup>;

Lixiviado = proporção unitária de lixiviado (volume de lixiviado/volume total mistura lixiviado e esgoto).

Limites de utilização do ajuste: 0 g.L<sup>-1</sup> ≤ CAP ≤ 6 g.L<sup>-1</sup> e 0 ≤ Lixiviado ≤ 0,1.

A Equação 4 está representada na Figura 4 em três dimensões, como a superfície de resposta do sistema para as entradas utilizadas. A figura apresenta também sua rotação em 90°.

### Análise estatística por ANOVA do ajuste 1

A análise detalhada por ANOVA do ajuste 1 é apresentada na Tabela 9. A “Prob>F” < 0,0001 significa que a probabilidade de que

o ajuste seja devido a ruído é menor que 0,01%. Foi testado um ajuste mediante equação polinomial de terceiro grau. O R<sup>2</sup> ajustado foi melhor (0,92), mas o R<sup>2</sup> 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<sup>2</sup> ficou como não significativo e foi descartado, como já acontecera no ajuste da equação que representa a remoção de DQO (FERNÁNDEZ BOU et al., 2015). A retirada desse termo da equação melhorou o R<sup>2</sup> ajustado e o R<sup>2</sup> previsto, enquanto nenhum outro termo se tornou não significativo.

### Ajuste 2: concentração de carvão ativado em pó e cor de entrada como variáveis independentes

A Equação 5 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 desse ajuste são de entre 0 e 6 g CAP.L<sup>-1</sup> e cor do afluente entre 275 e 1.200 uH.

Tabela 9 – Análise estatística do ajuste 1 de remoção de cor.

| Valor p Prob>F | Desvio padrão | Coefficiente de variação (%) | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> ajustado | R <sup>2</sup> previsto | Precisão adeq. |
|----------------|---------------|------------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| <0,0001        | 86,4300       | 26,4700                      | 0,8649         | 0,8158                  | 0,7524                  | 12,8190        |

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

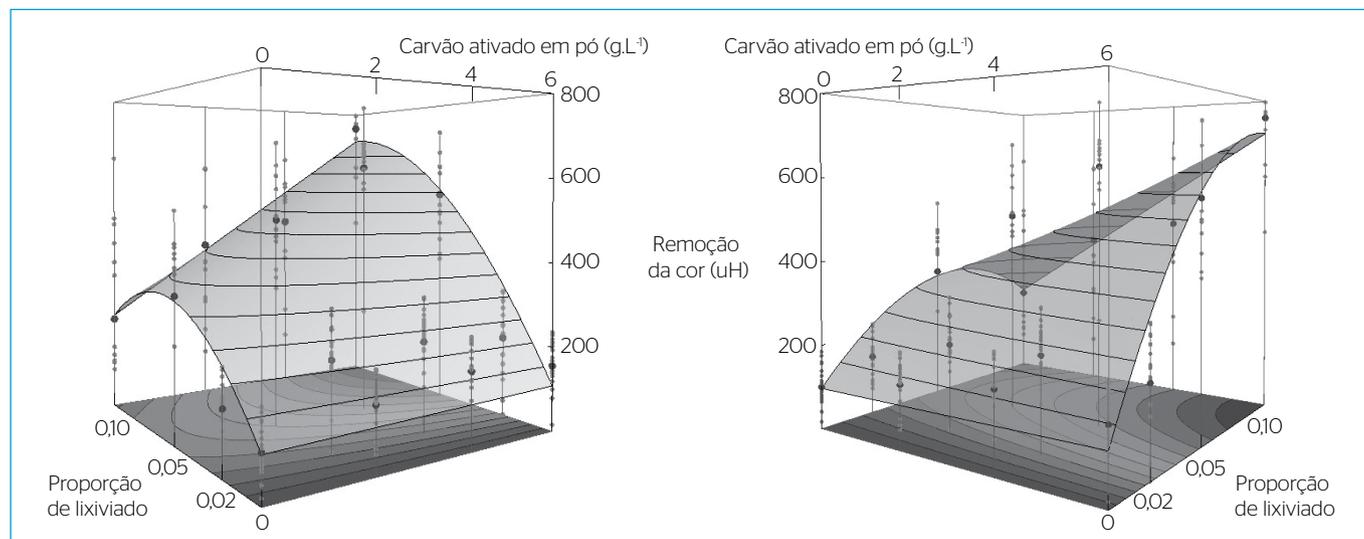


Figura 4 – Representação gráfica da superfície de resposta equivalente à equação do ajuste 1, em que as variáveis independentes foram a concentração de carvão ativado em pó (g.L<sup>-1</sup>) e a mistura lixiviado/esgoto (%). A projeção horizontal mais escura, próxima ao ponto 6 g.L<sup>-1</sup> de CAP e 10% de lixiviado, indica que os valores de cor removida são maiores. Cada linha vertical indica as coordenadas dos reatores.

$$\text{CORs} = -206 - 16,9 \cdot \text{CAP} + 1,40 \cdot \text{CORE} + 0,08 \cdot \text{CAP} \cdot \text{CORE} - 0,000863 \cdot \text{CORE}^2$$

Em que:

CORs = cor removida em uH;

CAP = concentração de CAP em g.L<sup>-1</sup>;

CORE = cor de entrada da mistura lixiviado/esgoto.

Limites de utilização do modelo: 0 g.L<sup>-1</sup> ≤ CAP ≤ 6 g.L<sup>-1</sup> e

275 uH ≤ CORE ≤ 1.200 uH.

A Equação 5 está representada na Figura 5 em três dimensões, como a superfície de resposta do sistema para as entradas utilizadas. A figura apresenta também sua rotação em 90°.

### Análise estatística por ANOVA do ajuste 2

A análise detalhada por ANOVA do ajuste 2 é apresentada na Tabela 10. A “Prob>F” < 0,0001 significa que a probabilidade de que o ajuste seja devido a ruído é menor que 0,01%. Foi testado um ajuste mediante equação polinomial de terceiro grau. O R<sup>2</sup> ajustado foi similar (levemente pior), o R<sup>2</sup> 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<sup>2</sup> ficou como não significativo e foi descartado, como já acontecera no ajuste 1. A retirada desse termo da equação melhorou o R<sup>2</sup> ajustado e o R<sup>2</sup> previsto, enquanto nenhum outro termo se tornou não significativo.

Na Figura 6 estão representados os valores de cor removida por grama de CAP aplicada nas seguintes proporções de lixiviado:

(5) 0% (Figura 6A), 2% (Figura 6B), 5% (Figura 6C) e 10% (Figura 6D). Observa-se que, de maneira geral, o parâmetro cor removida/massa de CAP (uH.g<sup>-1</sup>) tende a apresentar valores cada vez menores conforme aumenta a concentração de CAP. Esse fato indica que há uma concentração ótima de CAP para cada sistema e que incrementos de massa de carvão acima dessa concentração não apresentarão melhoria nos valores de cor removida. Para as proporções de lixiviado de 5 e 10%, são atingidos os maiores valores desse parâmetro.

## CONCLUSÕES

A adição de maiores concentrações de CAP resultou, em geral, em maiores valores de remoção de cor nos reatores. Os maiores valores de cor removida foram atingidos quando a proporção de lixiviado foi de 5% para os reatores com 0; 2; 4 e 6 g CAP.L<sup>-1</sup>. A eficiência de remoção de cor diminuiu notavelmente quando a proporção de lixiviado aplicada foi de 10%, com exceção do reator com 6 g CAP.L<sup>-1</sup>, que teve o maior valor de cor removida do experimento. As conclusões consideram o intervalo de variação das variáveis deste trabalho.

Tabela 10 – Análise estatística do ajuste 2 de remoção de cor.

| Valor p Prob>F | Desvio padrão | Coefficiente de variação (%) | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> ajustado | R <sup>2</sup> previsto | Precisão adeq. |
|----------------|---------------|------------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| <0,0001        | 53,4800       | 16,3800                      | 0,9483         | 0,9295                  | 0,8749                  | 19,6930        |

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

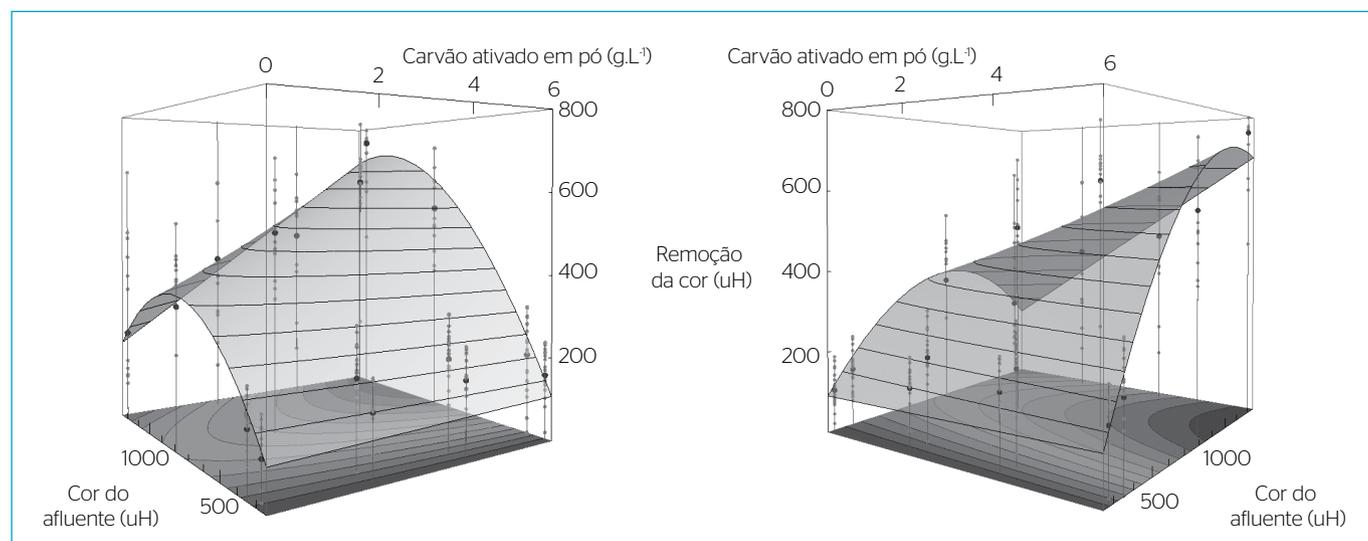
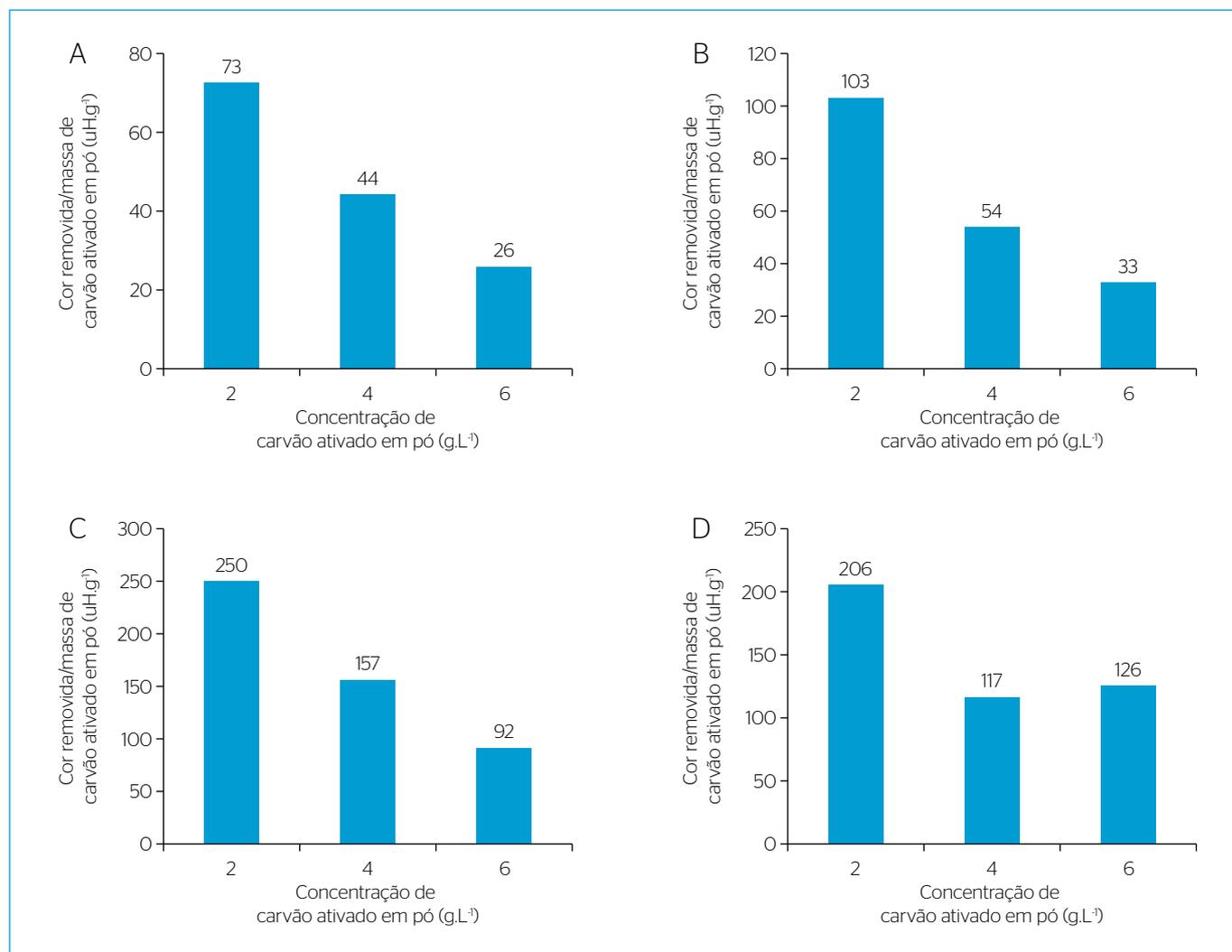


Figura 5 – Representação gráfica da superfície de resposta equivalente à equação do ajuste 2, em que as variáveis independentes foram a concentração de carvão ativado em pó (g.L<sup>-1</sup>) e a cor das entradas (uH). A projeção horizontal mais escura, próxima a 6 g.L<sup>-1</sup> de carvão ativado em pó e 1.200 uH, indica que os valores de cor removida são maiores. As linhas verticais indicam as coordenadas dos reatores



**Figura 6** – Representação gráfica de cor removida por grama de carvão ativado em pó aplicada nas proporções de lixiviado: 0% (A), 2% (B), 5% (C) e 10% (D).

Os ajustes desenvolvidos apresentaram elevado  $R^2$  ajustado. No entanto, o ajuste baseado na cor das entradas teve melhor desempenho que o baseado na proporção de lixiviado das entradas. Realizar o ajuste tomando por referência a cor afluente pode

ser uma abordagem mais precisa, uma vez que a mesma proporção de lixiviado pode conferir valores muito distintos em virtude das grandes variações de composição às quais esse tipo de efluente está sujeito.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. (2014) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2013*. São Paulo: ABRELPE.

AGHAMOHAMMADI, N.; AZIZ, H.B.A.; ISA, M.H.; ZINATIZADEH, A.A. (2007) Powdered activated carbon augmented activated sludge process for treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology. *Bioresource Technology*, v. 98, n. 18, p. 3570-3578. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.037>

APHA – American Public Health Association. (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington, D.C.: APHA/AWWA/WEF.

CAMPOS, J.C.; MACHADO, B.D.S.; BLONSKI, M.E.D.; BILA, D.M.; FERREIRA, J.A. (2013) Evaluation of coagulation/flocculation process in the landfill leachate treatment at the Municipal Wastewater Treatment Plant. *Ambiente e Água*, v. 8, n. 3, p. 43-53. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1187>

- CAMPOS, J.C.; MACHADO, C.R.A.; COUTO, J.M.S.; FLORIDO, P.L.; CERQUEIRA, A.C.F.P.; SANTIAGO, V.M.J. (2014) Evaluation of an Activated Sludge Process Combined with Powdered Activated Carbon for the Treatment of Oil Refinery Wastewater. *Journal of International Environmental Application and Science*, v. 9, n. 1, p. 24-36.
- ÇEÇEN, F.; AKTAS, Ö. (2004) Aerobic Co-Treatment of Landfill Leachate with Domestic Wastewater. *Environmental Engineering Science*, v. 21, n. 3, p. 303-312. <https://doi.org/10.1089/109287504323066941>
- CHEIBUB, A.F.; CAMPOS, J.C.; FONSECA, F.V. (2014) Removal of COD from a stabilized landfill leachate by physicochemical and advanced oxidative process. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic Hazardous Substances and Environmental Engineering*, v. 49, n. 14, p. 1718-1726. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.951259>
- ECKENFELDER, W.W. (1989) *Industrial Water Pollution Control*. Singapore: McGraw-Hill.
- FERNÁNDEZ BOU, A.S.; NASCENTES, A.L., PEREIRA, B.C.; SILVA, L.D.; FERREIRA, J.A.; CAMPOS, J.C. (2015) Mathematical modeling of COD removal via the combined treatment of domestic wastewater and landfill leachate based on the PACT process. *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic Hazardous Substances and Environmental Engineering*, v. 50, n. 4, p. 378-384. <https://doi.org/10.1080/10934529.2015.987533>
- FLORIDO, P.L. (2011) *Tratamento do Efluente de Refinaria pelo Processo Combinado de Adsorção em Carvão Ativado e Biorreator com Membranas*. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- FLYNN, B.P.; STADNIK, J.G. (1979) Start-up of a powdered activated carbon-activated sludge treatment system. *Journal of Water Pollution Control Federation*, v. 51, n. 2, p. 358-369.
- GOMES, L.P. (Coord.) (2009) *Resíduos Sólidos: estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras*. Rio de Janeiro: ABES. (PROSAB, v. 5).
- HOLLER, S.; TRÖSCH, W. (2001) Treatment of urban wastewater in a membrane bioreactor at high organic loading rates. *Journal of Biotechnology*, v. 92, n. 2, p. 95-101. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00351-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00351-0)
- KANG, K.H.; SHIN, H.S.; PARK, H. (2002) Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. *Water Research*, v. 36, n. 16, p. 4023-4032. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00114-8
- MACHADO, C.R.A. (2010) *Avaliação do processo de lodos ativados combinado com carvão ativado em pó no tratamento de efluente de refinaria de petróleo*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 128 p.
- MANNARINO, C.F.; MOREIRA, J.C.; FERREIRA, J.A.; ARIAS, A.R.L. (2013) Avaliação de impactos do efluente do tratamento combinado de lixiviado de aterro de resíduos sólidos urbanos e esgoto doméstico sobre a biota aquática. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 18, n. 11, p. 3235-3243. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-81232013001100014>
- METCALF & EDDY INC. (2003) *Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse*. 4. ed. Nova York: McGraw-Hill. 1848 p.
- SHER, M.I.; ARBUCKLE, W.B.; SHEN, Z. (2000) Oxygen Uptake Rate Inhibition with PACT™ Sludge. *Journal of Hazardous Materials*, v. 73, p. 129-142. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00177-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00177-6)
- VON SPERLING, M. (1996) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG. v. 1. 452 p.