

III-197 - OTIMIZAÇÃO FINANCEIRA E AMBIENTAL NO TRATAMENTO DE DESCARTE DE ANÁLISE DE DQO EM REFLUXO FECHADO UTILIZANDO GÁS SULFÍDRICO PROVENIENTE DE BIODIGESTOR ANAERÓBICO – UM ESTUDO DE CASO

Tiago Chagas de Oliveira Tourinho⁽¹⁾

Biólogo pelo Instituto de Biologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Especialista em Gestão Ambiental pela Escola Politécnica da UFRJ / Instituto Brasil PNUMA. Mestrando em Engenharia Ambiental pela UFRJ. Analista da Qualidade da Gerência de Tratamento de Esgotos da CEDAE – RJ.

Alexandre Pereira de Souza⁽¹⁾

Químico Industrial pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Mestre em Ciências, em Planejamento Energético – COPPE. Analista da Qualidade da Gerência de Tratamento de Esgotos da CEDAE – RJ.

Átila Santana da Silva⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. Técnico em Química. Técnico de Laboratório da Gerência de Tratamento de Esgotos da CEDAE – RJ.

Endereço⁽¹⁾: Rua Bulhões Marcial, 975–Vigário Geral–Rio de Janeiro–RJ – CEP: 21241-366 – Brasil – Tel: +55 (21) 3451-7953 / +55 (21) 3451-7938 – e-mail: tiago-tourinho@cedae.com.br.

RESUMO

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um dos principais parâmetros utilizados para o controle ambiental e análise de efluentes. A determinação deste parâmetro, em refluxo fechado, gera um resíduo extremamente ácido devido à presença de ácido sulfúrico, além de conter metais pesados como prata, cromo e mercúrio. Com isto, o descarte deste resíduo não é permitido sem que haja um tratamento prévio do mesmo.

Este trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia de uma alternativa, junto com seus resultados, para tratamento do descarte da análise de DQO utilizando um biodigestor anaeróbico como fonte geradora de sulfeto para a precipitação dos metais. Além disso, foi realizada a análise comparativa do procedimento atualmente empregado com o novo procedimento proposto, onde considerou-se os aspectos econômicos envolvidos e, através de um ambiente computacional de avaliação do ciclo de vida (ACV), avaliou-se a redução do impacto ambiental potencial relacionado ao transporte do resíduo remanescente para a central de tratamento de resíduos (CTR).

Através dos resultados das análises de espectrometria de emissão atômica (ICP-ótico), foi possível observar uma redução dos percentuais de metais de até 99,99% tanto para os íons prata, como para os íons mercúrio, em até 120h de experimento para a solução sintética e em até 200h para a solução real de DQO.

Para a análise comparativa dos impactos ambientais potenciais resultantes do transporte deste resíduo à CTR, foi utilizado um software de ACV, o SimaPro 7.2. Posteriormente, os dados foram agregados, normalizados e ponderados, para que se pudesse transformá-los em uma pontuação única. Observou-se o impacto ambiental potencial causado pelo transporte do resíduo tratado é 48 vezes menor, em relação ao não-tratado.

PALAVRAS-CHAVE: Biodigestor anaeróbico, resíduo de DQO, precipitação, gás sulfídrico, metais pesados.

INTRODUÇÃO

Para monitorar e avaliar a eficiência do tratamento nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), muitas unidades contam com laboratórios de controle de qualidade, com o objetivo de realizar análises físico-químicas e microbiológicas, caracterização do efluente sanitário recebido na estação, assim como o monitoramento diário do processo e o controle dos parâmetros legais para o lançamento de efluentes nos corpos receptores, atendendo às exigências estabelecidas na licença de operação.

Periodicamente, são realizadas análises de alguns parâmetros tais como pH, turbidez, cor, oxigênio dissolvido, série nitrogenada, série de sólidos, óleos e graxas, surfactantes, DBO₅ e DQO. Apesar de, em cada laboratório,

variar a metodologia empregada para a determinação desses parâmetros, grande parte das análises geram resíduos químicos, em maior ou menor quantidade, com diferentes graus de toxicidade.

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um dos principais parâmetros utilizados para o controle ambiental e análise de efluentes. A análise para a determinação deste parâmetro, em refluxo fechado, gera um resíduo extremamente ácido devido à presença de ácido sulfúrico, além de conter metais pesados como prata, cromo e mercúrio (APHA/ AWWA/ WEF, 5220D, 2005). Com isto, o descarte deste resíduo não é permitido sem que haja um tratamento prévio do mesmo (MARTINEZ *et alii*, 2005).

Muitos laboratórios recorrem à incineração como alternativa de tratamento do descarte gerado. Todavia, este processo gera elevado custo ao laboratório, e como a tendência das empresas é a valorização do meio ambiente, visando, concomitantemente, a redução de custos tanto a curto quanto a longo prazo, faz-se necessário a elaboração de pequenos procedimentos "verdes", que impliquem num retorno ecologicamente correto e com custos reduzidos.

Uma forma de redução do custo de tratamento destes resíduos é realiza-lo no próprio local da geração. Visando a precipitação dos metais pesados presentes no descarte da análise de DQO, este trabalho utilizou um biodigestor anaeróbico como fonte geradora de sulfeto para a precipitação destes metais. O sulfeto foi produzido pelo metabolismo de bactérias redutoras de sulfato (BRS).

As BRS são microrganismos procariontes, cuja energia provém da oxidação de compostos inorgânicos. Elas reduzem o íon sulfato a sulfeto, na forma de ácido sulfídrico (H_2S) de acordo com a seguinte reação (WIDDEL, 1988¹ apud MEDÍRCIO, 2004):



As bactérias redutoras de sulfato são anaeróbicas estritas, com faixa de temperatura ótima de 25°C a 44°C e pH de 5,5 a 9. Em especial as bactérias do gênero *Desulfovibrio*, podem ser encontradas normalmente formando parte da colônia intestinal de adultos saudáveis, tendo papel significante na degradação de material orgânico no intestino grosso com utilização de lactato, piruvato, etanol e alguns ácidos gordurosos no cólon de alguns indivíduos e de outras espécies de mamíferos (HEGGENDORN *et alii*, 2009).

Este trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia de uma alternativa, junto com seus resultados, para tratamento do descarte da análise de DQO utilizando um biodigestor anaeróbico como fonte geradora de sulfeto para a precipitação e tratamento dos metais. Além disso, apresenta a análise comparativa do procedimento atualmente empregado com o novo procedimento proposto, onde consideram-se os aspectos econômicos envolvidos e, através de um ambiente computacional de avaliação do ciclo de vida (ACV), permite-se avaliar a redução do impacto ambiental potencial relacionado ao transporte do resíduo remanescente para a central de tratamento de resíduos (CTR).

MATERIAIS E MÉTODOS

A remoção dos metais se deu por precipitação química, utilizando um biodigestor anaeróbico como fonte geradora de sulfeto (LUPTAKOVA *et alii*, 2012; CAMPOS *et alii*, 1999; VON SPERLING, 1996). Para a realização deste experimento de bancada, o sistema foi montado da seguinte maneira: um biorreator de vidro, vedado para manter condições anaeróbicas, acoplado a um kitassato por meio de uma mangueira para a passagem do gás gerado.

A capacidade máxima do biorreator era de 10 litros, contendo 6 litros de lodo primário, proveniente de uma ETE situada no município do Rio de Janeiro e 1 litro de lodo proveniente de um biodigestor anaeróbico rico em biomassa, que serviu como semente para o experimento. O sistema permitia apenas uma saída, na qual uma mangueira de silicone, acoplada a um tubo inserido no interior do kitassato, permitia a liberação do gás gerado, na solução. O sistema foi envolto, para evitar a incidência de luz.

¹ WIDDEL, F. (1988). Produção de ácido sulfídrico por bactérias redutoras de sulfato e outras atividades - traduzido por Maria Emilia Costa Lima, do alemão para o português, Universität München.

Em seguida, preparou-se uma solução sintética contendo 400 mg.L^{-1} de mercúrio (Hg^{+2}) e 400 mg.L^{-1} de prata (Ag^+) a partir de sulfato de mercúrio e de sulfato de prata. Esta foi transferida em volumes iguais (150 mL) para cada kitassato do sistema. O ácido sulfídrico liberado no biorreator era borbulhado na solução presente no kitassato, onde reagia quimicamente, precipitando os íons metálicos. (Figura 1).



Figura 1: Sistema de biorreatores acoplados a kitassatos com solução sintética.
(Fonte: Elaboração própria)

Nos biorreatores, foram fornecidas condições mesofílicas para o cultivo, principalmente, das BRS, as quais produzem ácido sulfídrico, a partir do sulfato presente na matéria orgânica do lodo primário.

Considerando que o gás sulfídrico produzido no biorreator, ao borbulhar na solução sintética tende a reagir com os íons Hg^{+2} e Ag^+ , precipitando-os como sulfeto de mercúrio (HgS) e sulfeto de prata (Ag_2S), respectivamente, colocou-se cada biorreator para funcionar por um período pré-determinado, com o objetivo de verificar o tempo mínimo necessário para se obter uma redução significativa da concentração desses metais no sobrenadante. O primeiro sistema permaneceu em funcionamento por 65 h, o segundo por 90 h e o terceiro por 120 h. Finalizada esta etapa, fez-se análise da concentração residual dos metais presentes no sobrenadante de cada um dos kitassatos, comparando-a com a concentração original na solução sintética sem tratamento.

Em seguida, refez-se o experimento anterior, substituindo a solução sintética de DQO, por uma solução real de descarte do laboratório, com prévia diluição de 1:2. Desta vez, o primeiro sistema biorreator-kitassato operou por 40 h, o segundo por 110 h e o terceiro por 200 h. Novas análises foram realizadas com o objetivo de determinar a concentração residual dos metais no sobrenadante e compará-la com o descarte sem tratamento. Tais resultados foram analisados e a partir destes, cálculos teóricos foram realizados e os aspectos econômicos e ambientais foram considerados e relacionados.

Outro problema identificado neste estudo para o descarte da solução de DQO refere-se à sua elevada acidez, com pH próximo de zero. Percebeu-se então a necessidade de neutralização do sobrenadante da solução tratada, fazendo-o, no entanto, a um baixo custo. Tendo em vista que a ETE deste estudo de caso recebe cerca de 30 m^3 diários de lixiviado de aterro sanitário, com pH aproximado de 8, para cotratamento com esgoto doméstico, a proposta inclui o lançamento do sobrenadante ácido do descarte da análise de DQO concomitantemente ao lançamento do lixiviado, na entrada da ETE, ambos em dosagem controlada, possibilitando a neutralização ao longo do processo.

Para a realização da análise comparativa dos aspectos econômicos, levou-se em consideração o volume de resíduo da análise de DQO gerado no ano de 2012, assim como os valores apresentados na proposta orçamentária feita pela empresa contratada para a realização do serviço de incineração dos resíduos. Comparou-se o custo envolvido para coleta, tratamento e destinação final da solução de descarte de DQO gerada com o custo referente à coleta e destinação final do precipitado gerado, por assumir que a etapa de tratamento – precipitação e neutralização – ficou a cargo do próprio laboratório.

Para a análise comparativa dos impactos ambientais potenciais resultantes do transporte deste resíduo à CTR, foi utilizado um ambiente computacional de avaliação do ciclo de vida (ACV), o SimaPro 7.2 (GOEDKOOP *et alii*, 2008). Este *software* utiliza a base de dados suíça *Ecoinvent*, que apresenta em torno de 4000 conjuntos de dados para produtos, serviços e processos comumente utilizados nos estudos de caso de ACV (FRISCHKNECHT *et alii*, 2007), incluindo transportes e tratamento de resíduos (ETH ZURICH *et alii*, 2014). De acordo com a literatura, este é o *software* mais utilizado para aplicações de ACV (PIERAGOSTINI *et alii*, 2012; LAPINSKIENE & MARTINAITIS, 2013), foi o mais utilizado, em uma revisão de 222 estudos, para analisar ACVs de sistemas de gestão de resíduos sólidos (LAURENT *et alii*, 2013) e é uma poderosa ferramenta de avaliação do impacto potencial gerado.

O método de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) utilizado foi o ReCiPe 2008, o qual representa o estado da arte relacionado a AICV na Holanda (GOEDKOOP *et alii*, 2013).

Após os dados serem inseridos no programa, foram gerados resultados comparativos de impacto potencial causado ao meio ambiente, entre o transporte do resíduo não tratado e do resíduo tratado.

RESULTADOS

A solução real de DQO sem tratamento apresenta, visualmente, uma coloração amarelo-alaranjada devido à presença do cromo (VI). Após borbulhar o gás nas soluções, percebeu-se claramente a precipitação dos metais (Ag e Hg), tornando a solução turva e, posteriormente, a deposição de precipitado negro (Ag_2S e HgS), como pode ser visto na Figura 2. A coloração final azul-esverdeada no sobrenadante permite caracterizar a redução do cromo (VI) a cromo (III).



**Figura 2: Precipitação do mercúrio e prata na solução real de descarte de DQO.
(Fonte: Elaboração Própria)**

Através dos resultados das análises de espectrometria de emissão atômica (ICP-ótico), foi possível observar uma redução dos percentuais de metais no sobrenadante de até 99,99% tanto para Ag^+ como para Hg^{2+} , em até 120h de experimento para a solução sintética (Tabela 1) e em até 200h para a solução real de DQO (Tabela 2).

Tabela 1: Percentual de remoção por precipitação de mercúrio e prata na solução sintética.

Período de trabalho (h)	Solução Sintética			
	Íon Ag ⁺		Íon Hg ⁺²	
	Concentração (mg/L)	% de remoção	Concentração (mg/L)	% de remoção
0	400,2	0	395,1	0
65	<0,01	>99,99	0,178	99,96
90	<0,01	>99,99	0,052	99,98
120	<0,01	>99,99	0,028	99,99

Em relação ao cromo (VI) presente na solução de descarte foi verificado, através de experimentos concomitantes, que este é convertido a cromo (III), ao oxidar o excesso de sulfeto a sulfato, sendo a espécie trivalente menos tóxica e mais estável que a hexavalente (Codd *et al.*, 2001² *apud* CONCEIÇÃO, 2007). A capacidade de redução biológica do cromo (VI) em condições anaeróbias por meio de metabólitos bacterianos como o ácido sulfídrico já foi atestada por Lovley (1993)³ *apud* CASTILHOS *et al.* (2001).

Tabela 2: Percentual de remoção por precipitação e prata na solução real de DQO.

Período de trabalho (h)	Solução Real de DQO			
	Íon Ag ⁺		Íon Hg ⁺²	
	Concentração (mg/L)	% de remoção	Concentração (mg/L)	% de remoção
0	166,70	0	1131	0
40	25,66	84,61	0,685	99,94
110	0,448	99,73	0,195	99,98
200	0,011	99,99	0,076	99,99

Considerando uma produção anual de, aproximadamente, 400 litros de descarte de DQO (por volta de 480 kg), o processo de tratamento do resíduo gerado através da precipitação, seguida da neutralização do sobrenadante, apresentou uma redução de, aproximadamente, 98% em massa, resultando em cerca de 10 kg de precipitado de sulfetos de prata (Ag_2S) e de mercúrio (HgS). Os valores encontrados foram calculados considerando-se as seguintes premissas: o sulfeto produzido foi suficiente para precipitar, estequiométricamente, toda a prata e o mercúrio da solução em estudo; e os rendimentos das reações foram de 100%.

Em relação aos aspectos econômicos, considerando o valor do serviço de incineração de R\$4,50/kg de resíduo, o custo anual da incineração sem o tratamento aplicado seria de R\$2147,76, enquanto o custo com o tratamento do rejeito se reduziria a R\$ 44,64, sendo uma economia de R\$ 2103,12 (Tabela 3).

Tabela 3: Comparação sobre a alternativa proposta e a empregada de tratamento.

Considerações	Resíduo de DQO sem tratamento	Resíduo de DQO após tratamento
Massa total de resíduo (kg/ano)	480	10
Custo de incineração* (R\$)	2147,76	44,64
Desempenho bruto da tonelada por quilômetro (tkm)**	14,32	0,30
Economia anual (R\$)		2103,12
Redução (%)		98
Número de vezes em que a massa foi reduzida		48

* Custo de incineração = R\$ 4,50/kg.

** Esta é uma unidade de medida de transporte de cargas, que representa o transporte de 1 tonelada de mercadorias por um determinado modo de transporte (rodoviário, ferroviário etc.) a uma distância de 1 quilômetro (EUROSTAT, 2013).

Em relação ao sobrenadante ácido resultante da precipitação, observou-se experimentalmente que, cada 0,8 mL deste descarte misturados com 100 mL de lixiviado de aterro sanitário, resultam em um pH superior a 6,0, que

² CODD, R. et al. Studies on the Genotoxicity of Chromium: from the test tube to the cell. Coordination Chemistry Reviews, v.4, n.216, p.537, 2001.

³ LOVLEY, D. Dissimilatory metal reduction. Ann. Rev. Microbiol., 47:276-290, 1993.

é o valor mínimo aceitável para o recebimento deste na estação. Desta forma, os 400 litros de sobrenadante ácido gerados anualmente, podem ser facilmente neutralizados com apenas dois caminhões de lixiviado (60 m³). Todavia, recomenda-se que este processo seja feito gradualmente ao longo do ano.

Quanto ao impacto ambiental potencial gerado pelo transporte dos resíduos, fez-se a comparação do resíduo não tratado, com o resíduo pós-tratamento (a massa de precipitado formada), levando em consideração o desempenho bruto da tonelada por quilômetro (tkm). Sendo 30 km a distância entre a ETE e a CTR, e que a frequência para coleta e transporte do resíduo tratado seja 48 vezes menor comparada à do não tratado, elaborou-se a Tabela 4. Esta apresenta os resultados comparativos dos impactos causados pelo transporte dos descartes em cada categoria de impacto ao meio ambiente, através do método de AICV ReCiPe 2008. Nota-se uma redução considerável dos impactos ambientais neste aspecto.

Tabela 4: Caracterização comparativa dos impactos causados pelo transporte dos diferentes descartes.

Categorias de Impacto	Unidade	Descarte (sem tratamento)	Descarte (com tratamento)
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq (para o ar)	5,11E+00	1,06E-01
Redução da Camada de Ozônio	kg CFC-11 eq (para o ar)	7,13E-06	1,48E-07
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB ⁴ eq (para o ar urbano)	2,53E+01	5,26E-01
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC ⁵ (para o ar)	7,27E-02	1,51E-03
Formação de Material Particulado	kg PM ₁₀ ⁶ eq (para o ar)	1,67E-02	3,48E-04
Radiação Ionizante	kg U ²³⁵ eq (para o ar)	5,80E-01	1,21E-02
Acidificação Terrestre	kg SO ₂ eq (para o ar)	4,63E-02	9,62E-04
Eutrofização na Água Doce	kg P eq (para a água doce)	1,15E-05	2,38E-07
Eutrofização Marinha	kg N eq (para a água doce)	2,00E-02	4,15E-04
Ecotoxicidade Terrestre	kg 1,4-DB eq (para o solo industrial)	6,80E-03	1,41E-04
Ecotoxicidade da Água Doce	kg 1,4-DB eq (para a água doce)	3,16E-03	6,57E-05
Ecotoxicidade Marinha	kg 1,4-DB eq (para a água salgada)	8,56E+00	1,78E-01
Ocupação de Terra Agrícola	m ² a (terra agrícola)	0	0
Ocupação de Solo Urbano	m ² a (solo urbano)	0	0
Transformação de Área Natural	m ² (área natural)	0	0
Depleção Hídrica	m ³ (água)	2,79E-02	5,80E-04
Depleção de Recursos Minerais	kg Fe eq	1,77E-01	3,68E-03
Depleção de Combustíveis Fósseis	kg óleo ⁷ eq	1,75E+00	3,64E-02

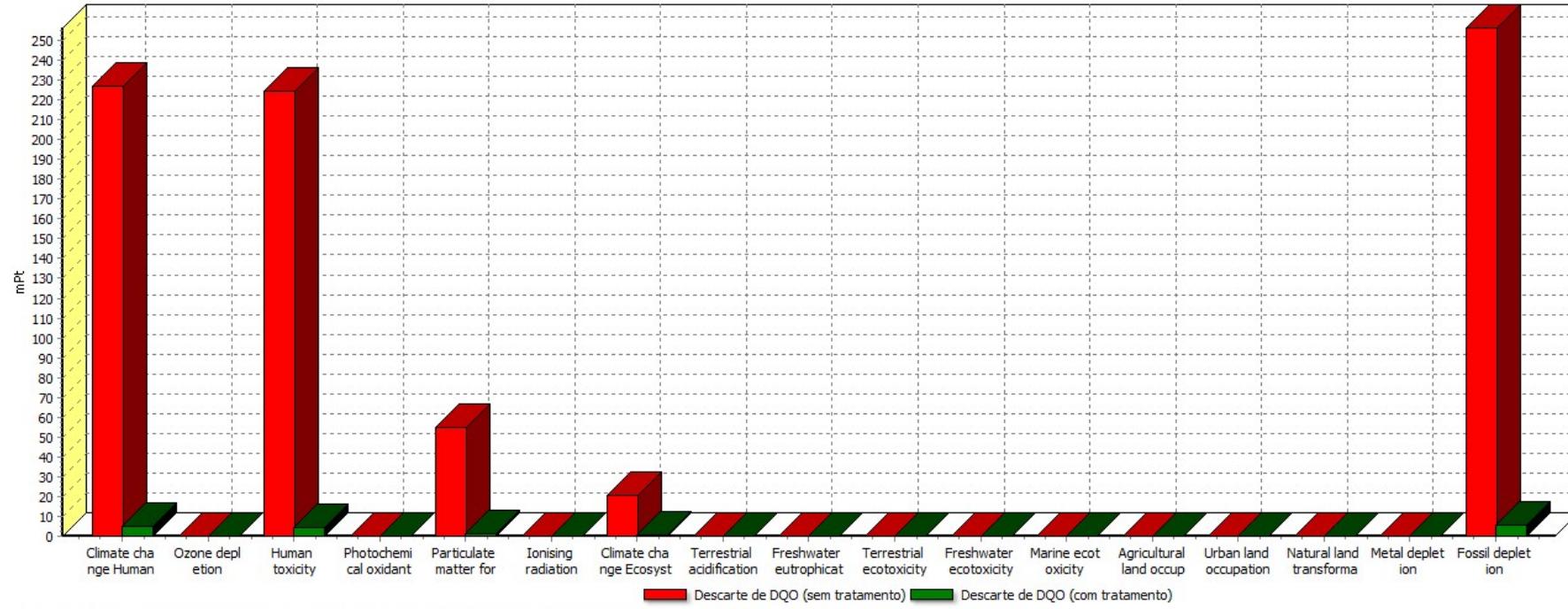
Posteriormente, os dados foram agregados, normalizados e ponderados, para que se pudesse transformá-los em uma pontuação única. Os dados ponderados das categorias de impacto podem ser vistos na Figura 3, enquanto que as pontuações únicas podem ser vistas na Figura 4. Observa-se uma redução de 98% no impacto ambiental potencial causado pelo transporte do resíduo tratado, em relação ao não-tratado.

⁴ 1,4-Diclorobenzeno.

⁵ Non-methane volatile organic compounds ou Compostos orgânicos voláteis não metânicos.

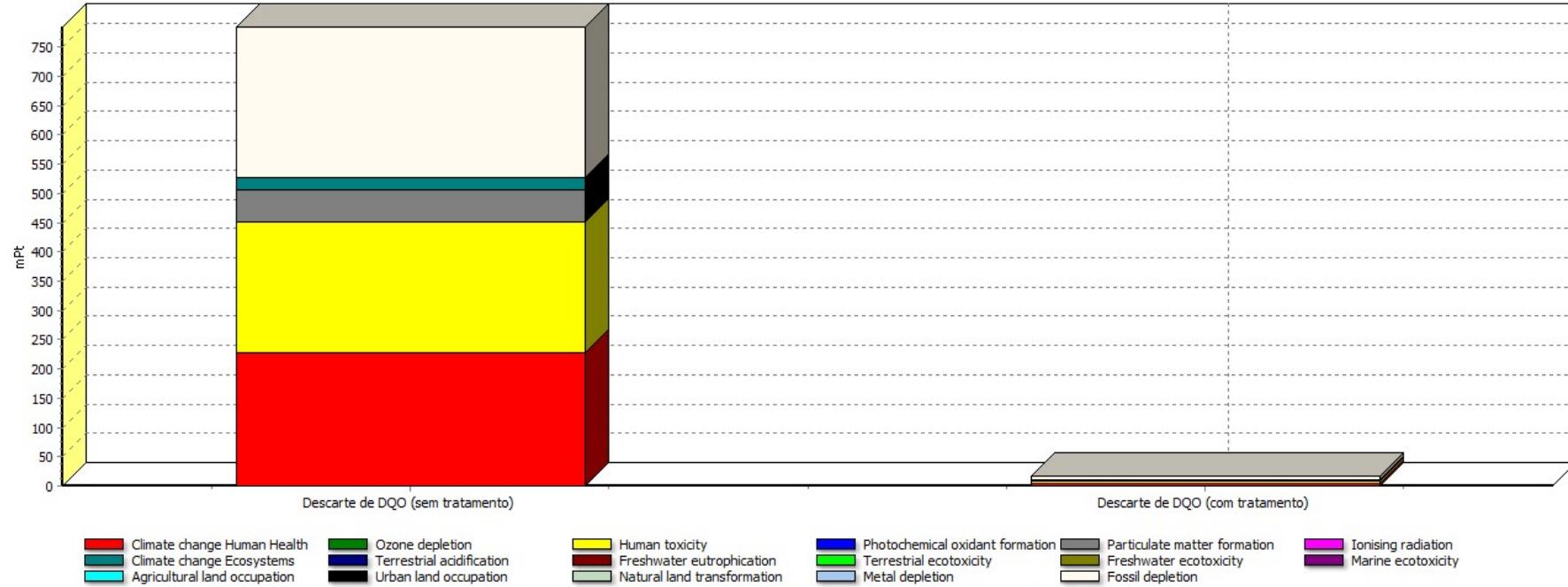
⁶ Material Particulado.

⁷ Petróleo.



A comparar 1 p 'Descarte de DQO (sem tratamento)' com 1 p 'Descarte de DQO (com tratamento)'; Método: ReCiPe Endpoint (E) V1.04 / World ReCiPe E/E / Ponderação

Figura 3: Comparação dos impactos ponderados por categoria de impacto nos transportes dos rejeitos de DQO.
(Em vermelho, descarte sem tratamento; em verde, descarte com tratamento)



A comparar 1 p 'Descarte de DQO (sem tratamento)' com 1 p 'Descarte de DQO (com tratamento)'; Método: ReCiPe Endpoint (E) V1.04 / World ReCiPe E/E / Pontuação única

Figura 4: Comparação das pontuações únicas dos impactos ambientais potenciais gerados pelos transportes dos resíduos de DQO.
(À esquerda, descarte sem tratamento, e à direita, descarte com tratamento)

CONCLUSÕES

A alternativa sugerida neste estudo para o tratamento do descarte da análise de DQO utilizando um biodigestor anaeróbico como fonte geradora de sulfeto, seguido de neutralização do sobrenadante ácido, se apresenta como uma forma mais econômica e de menor impacto ambiental potencial, que a forma atualmente empregada de coleta e incineração de todo o descarte. A economia teórica anual obtida pelo laboratório seria de R\$ 2103,12. Além disso, a redução do impacto ambiental potencial do processo, levando em consideração apenas o transporte, seria de 98%, uma vez que a massa original foi reduzida 48 vezes. Isto implicaria em um desempenho bruto da tonelada por quilômetro menos impactante.

Outra vantagem advinda do tratamento do resíduo no próprio laboratório refere-se ao fato de que, uma vez que o resíduo é tratado em volumes menores, e portanto com mais frequência, evita o armazenamento de grandes volumes de solução no abrigo de resíduos aguardando a contratação do serviço para tratamento externo. O armazenamento deste resíduo, sem tratamento e em grandes volumes, representa perigo de vazamento, liberação de compostos tóxicos e ainda possibilidade de misturas incompatíveis com outros resíduos armazenados no depósito, podendo inclusive resultar em incêndio e explosão.

A redução do impacto torna-se ainda mais significativa se, acrescido aos fatores mencionados, for contabilizado o volume de gás que deixou de ser lançado na atmosfera pela incineração do resíduo sem tratamento. Sugere-se portanto, em pesquisas futuras, a quantificação deste benefício utilizando a mesma metodologia descrita neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 21 ed., Port City Press: Baltimore, Maryland, 2005.
2. CAMPOS, J. R. (coord.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: Abes. 1999. 435 p.
3. CASTILHOS, D. D.; VIDOR, C.; TEDESCO, M. J. Redução química e biológica do cromo hexavalente aplicado ao solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:509-514, 2001.
4. CONCEIÇÃO, D.; JACQUES, R.; BENTO, F.; SIMONETTI, A.; SELBACH, P.; CAMARGO, F. Redução de cromo hexavalente por bactérias isoladas de solos contaminados com cromo. Ciência Rural, Santa Maria, v.37, n.6, p.1661-1667, nov-dez, 2007.
5. ETH ZURICH; EPF LAUSANNE; PSI; EMPA; ART. The ecoinvent Database. 2014. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/database/>>. Acesso em: 05/01/2014.
6. EUROSTAT. Glossary:Tonne-kilometre (tkm) (página eletrônica). 2013. Disponível em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Glossary:Tonne-kilometre>. Acesso em: 29/11/2013 às 16:04h.
7. FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; ALTHAUS, H.-J.; DOKA, G.; HECK, T.; HELLWEG, S.; HISCHIER, R.; NEMECEK, T.; REBITZER, G.; SPIELMANN, M.; WERNET, G. Overview and methodology. Ecoinvent report No. 1. Swiss Centre for LCI, Dübendorf, 2007.
8. GOEDKOOP, M.; DE SCHRYVER, A.; OLE, M. Introduction to LCA with SimaPro 7. Netherlands: PRé Consultants, 2008.
9. GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (version 1.08) Report I: Characterisation; May 2013. Disponível em: <<http://www.lcia-recipe.net/>> Acesso em: 26/12/2013.
10. HEGGENDORN, F. L.; GONÇALVES, L. S.; LUTTERBACH, M. T. S.; DIAS, E. P. Processos fisiológicos e patológicos das bactérias redutoras de sulfato do gênero *Desulfovibrio sp*. Brasília Med, v. 46 (3), p. 247-252, 2009.
11. LAPINSKIENE, V.; MARTINAITIS, V. The Framework of an Optimization Model for Building Envelope. Procedia Engineering, v. 57, p. 670–677, 2013.
12. LAURENT, A.; CLAVREUL, J.; BERNSTAD, A.; BAKAS, I.; NIERO, M.; GENTIL, E.; CHRISTENSEN, T. H.; HAUSCHILD, M. Z. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part II: Methodological guidance for a better practice. Waste Management, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.004>.

13. LUPTAKOVA, A.; UBALDINI, S.; MACINGOVA, E.; FORNARI, P.; GIULIANO, V. Application of physical-chemical and biological-chemical methods for heavy metals removal from acid mine drainage. *Process Biochemistry*, v. 47, p. 1633–1639, 2012.
14. MARTINEZ, M. S.; PASCHOALATO, C. F. P. R.; MENDES, C. R. Procedimento para o tratamento de resíduos de determinações de Demanda Química de Oxigênio. *Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)*, v. 15 (2), p. 73 - 76, 2005.
15. PIERAGOSTINI, C.; MUSSATI, M. C.; AGUIRRE, P. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management*, v. 96, p. 43–54, 2012.
16. MEDÍRCIO, S. N. Redução do teor de sulfato e de metais em águas pela utilização de bactérias redutoras de sulfato. 2004. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. UFOP, Ouro Preto, Dezembro de 2004.
17. VON SPERLING, M. Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 1996.