

ANÁLISE DA EFICÁCIA TÉCNICA E AMBIENTAL DO TRATAMENTO DE CHORUME POR OSMOSE REVERSA NA CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE SÃO GONÇALO, RJ

Agatha Cristinne Prudêncio Soares¹, Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro¹, Ricardo Soares^{1,2}

(Universidade Veiga de Almeida, Rua Ibituruna, 108, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, CEP:20271-020, soaresacp@hotmail.com,¹ Instituto Estadual do Ambiente²)

RESUMO

A decomposição da matéria orgânica de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários resulta na formação do líquido percolado de aterro, também conhecido como lixiviado de aterro ou chorume. Devido ao seu potencial de contaminação do solo, do lençol freático e dos corpos d'água, o tratamento do chorume é fundamental para evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública, uma vez que possui baixo potencial de biodegradação e alta carga de compostos orgânicos tóxicos. Por esta razão, a partir da norma NBR 8419/1992 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu-se os critérios de tratamento de chorume em aterros sanitários, o qual deve ser separado do material orgânico através de drenagem para lagoas de armazenamento temporário e, em seguida, destinado para uma Estação de Tratamento de Chorume (ETC). Após o tratamento, este efluente deve seguir critérios e padrões de lançamento em meio hídrico conforme instituído pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e pela Norma Técnica (INEA) NT-202 R-10. Dentre as diferentes técnicas para tratamento desse efluente, a osmose reversa consiste na separação física de substâncias contidas em líquido através de um sistema de membranas. No processo de osmose o chorume bruto filtrado pelas membranas é separado em permeado e concentrado. O presente estudo visa analisar a eficácia técnica e ambiental da tecnologia de osmose reversa para tratamento terciário de chorume em clima tropical, com base em dados da ETC implantada na Central de Tratamento de Resíduos de São Gonçalo, RJ. A qual possui capacidade de tratamento de 120 m³ de chorume por dia e, após o tratamento, obtém-se água destilada, que é utilizada para umidificação das vias da própria CTR. Dentre as amostras analisadas a técnica mostrou-se eficaz para o tratamento de todos os parâmetros, com exceção somente do fenol em três campanhas. Entretanto, os resultados encontrados na caracterização do efluente analisado enquadram o mesmo nos padrões estabelecidos pela legislação, tendo sido atingida eficácia de remoção entre 97,5 e 99,4% de parâmetros como nitrogênio amoniacal, DBO, DQO, sólidos suspensos totais e condutividade. A qualidade da água obtida após o tratamento permite que esta seja utilizada tanto para fins de umidificação das vias, quanto para processos que demandem água destilada, ou o lançamento direto em corpo hídrico em conformidade com a legislação brasileira

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, tratamento de efluentes, poluição ambiental.

INTRODUÇÃO

Em decorrência de processos como o crescimento populacional, o desenvolvimento econômico e a urbanização, os modos de produção e consumo, assim como o estilo de vida da população, vêm sofrendo alterações. Como consequência, tem-se o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), que representa um dos maiores problemas ambientais, sociais e econômicos da sociedade contemporânea em todo o mundo (Gouveia 2012; Silva *et al.* 2016). Tal aumento está relacionado tanto à quantidade, quanto à diversidade de tipologia, sendo a composição desses resíduos um fator preocupante, uma vez que pode incluir compostos sintéticos danosos aos ecossistemas e à saúde humana (Gouveia 2012).

A Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), define resíduos sólidos, em seu art. 3º, inciso XVI (Brasil, 2010), como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

A PNRS estabelece, ainda, a classificação dos resíduos sólidos urbanos em relação à origem (art. 13, inciso I), sendo assim considerados: os resíduos domiciliares, que consistem naqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas, e aqueles provenientes da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, e outros serviços de limpeza urbana. Além destes, os resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, podem ser equiparados aos domiciliares pelo poder público municipal desde que sejam caracterizados como não perigosos (Brasil, 2010).

No Brasil, a geração média de RSU é de cerca de 1 kg por habitante/dia. Segundo dados de 2015 da Abrelpe (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), a geração anual foi de 79,9 milhões de toneladas no país (Figura 1). Deste total, 90,8% (72,5 milhões de toneladas) são coletados, enquanto cerca de 7 milhões de toneladas de resíduos não são destinadas apropriadamente. Da fração coletada, 58,7% (42,6 milhões de toneladas) foram dispostos em aterros sanitários - que constituem as unidades adequadas de destinação final -, enquanto cerca de 30 toneladas foram dispostas em vazadouros a céu aberto, os chamados lixões, ou em aterros controlados. Tais destinos não possuem o conjunto de sistemas necessário para minimizar os potenciais impactos, como a contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas, do ar e da

população humana (ABRELPE 2015; Gouveia 2012). É importante considerar, ainda, que a produção de RSU possui perfil de ascensão, estimada em 7% ao ano, o qual é superior ao crescimento da população urbana observado recentemente no país, cujo valor é de 1% anual (ABRELPE 2010; IBGE 2010).

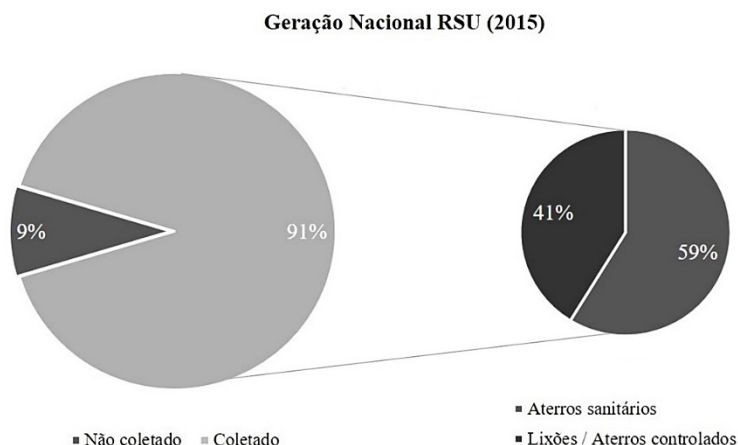


Figura 1: Representação gráfica da geração nacional de Resíduos Sólidos Urbanos segundo a destinação do total coletado (Dados: ABRELPE 2015).

Diante desta problemática, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei 12.305/2010), constitui um instrumento essencial na busca de soluções para a destinação inadequada dos resíduos sólidos. Tal lei estabeleceu diretrizes relacionadas à gestão integrada e ao gerenciamento adequado de resíduos sólidos (art. 1º), bem como a erradicação dos lixões a céu aberto e a substituição destes por aterros sanitários até o ano de 2014 em todo o país (art. 54). Contudo, o uso de locais impróprios para a disposição ainda ocorre em 3.326 municípios brasileiros (ABRELPE 2015).

A preocupação da destinação e disposição inadequadas dos RSU deve-se aos riscos a estes associados, dentre os quais destacam-se: a emissão de gases de efeito estufa (GEE), principalmente o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), os quais contribuem para as mudanças climáticas globais - embora a principal fonte desses gases seja a queima de combustíveis fósseis -; a proliferação de vetores e agentes transmissores de doenças; e a geração de chorume (Gouveia 2012). Este último, também denominado lixiviado ou líquido percolado, consiste em um líquido de coloração escura e odor desagradável resultante da decomposição dos resíduos sólidos junto à percolação da água que lixívia constituintes orgânicos e inorgânicos através destes resíduos (Orlando 2014; MMA 2005; IPT/CEMPRE 2000). As fontes de umidade envolvidas na formação do chorume podem ser: aquela naturalmente retida nos resíduos através da absorção capilar, ou de origem externa, como águas de chuvas, superficiais e de mananciais subterrâneos, ou mesmo de bactérias cujas enzimas expelidas dissolvem a matéria orgânica para a formação de líquidos (Samuel-Rosa *et al.* 2012; Telles 2010; MMA, 2009).

Trata-se de um material altamente recalcitrante à degradação devido à complexidade de sua composição, a qual consiste principalmente de compostos orgânicos, amônia, íons inorgânicos, metais potencialmente tóxicos e compostos tóxicos (Silva *et al.* 2016) - embora o total de compostos identificados seja estimado na ordem de 100.000 produtos (Öman & Junestedt 2008). É importante citar, ainda, que a toxicidade e a atividade estrogênica de patógenos presentes no chorume também devem ser consideradas ao se tratar da caracterização deste efluente (Baun *et al.* 2000; Svensson *et al.* 2003).

A composição do lixiviado de aterros sanitários é muito diversificada e está relacionada à tipologia dos resíduos aterrados, aos processos de decomposição, ao clima e a variações sazonais características da região, bem como pela idade e pelo tipo de operação do aterro (Brito-Pelegrini *et al.* 2011; PROSAB 2009). A qualidade deste efluente resulta da combinação entre processos biológicos, físicos e químicos ocorridos no interior da massa de resíduos, com a composição e o regime hídrico específicos de cada aterro (Plácido & Marinheiro, 2014). Segundo Kurniawan (2006), para cada tonelada de RSU é gerado 0,2 m³ de líquido percolado. No entanto, é complexo estimar com precisão a geração de lixiviados em aterros sanitários, uma vez que diversos fatores e variáveis estão relacionados, como os regimes pluviométrico e hídrico da região na qual o aterro está localizado (Orlando 2014).

Se descartado de maneira inadequada, este efluente representa expressiva ameaça à saúde e à natureza por meio da contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, sendo o seu potencial de contaminação 200 vezes superior ao do esgoto doméstico (Gouveia 2012; MMA 2005).

Assim, tendo em vista os potenciais impactos ambientais relacionados ao lixiviado de aterro sanitário, justifica-se a importância do tratamento deste efluente. Tal tratamento, no entanto, é considerado um desafio

devido à heterogeneidade dos resíduos dispostos, à idade do aterro, à modificação da qualidade e da quantidade com o passar do tempo, e pelo aumento da exigência dos critérios e padrões para lançamento do efluente tratado em um corpo hídrico (Plácido & Marinheiro 2014; Serafim *et al.* 2003), os quais são estabelecidos pelos seguintes instrumentos legislativos federais e estadual para o Rio de Janeiro: Resolução CONAMA nº430/2011 (art. 16) (Brasil 2011) e norma NT-202 R-10 (FEEMA 1986). Enquanto que a NBR 8419/1992 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) dispõe sobre as condições mínimas para a apresentação de projetos de aterros sanitários de RSU, exigindo que o projeto inclua um sistema de coleta, drenagem e tratamento de líquidos percolados (ABNT 1992).

Para atender a legislação ambiental, comumente é necessário combinar diferentes métodos de tratamento, sendo as alternativas mais convencionais: os processos biológicos aeróbios ou anaeróbios (lodos ativados, lagoas, filtros biológicos); os físico-químicos (filtração, diluição, coagulação, floculação, adsorção, precipitação, sedimentação, troca iônica, oxidação química, evaporação e queima) (Serafim 2003; IPT/CEMPRE 2000); e os Processos Oxidativos Avançados (POAs), dentre estes o foto-fenton, os quais são baseados no uso da irradiação UV na presença de íon ferro para a formação de radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), que devido ao seu alto potencial de redução é capaz de oxidar diversos compostos orgânicos a CO_2 , H_2O e íons inorgânicos (Cavalcanti *et al.* 2015; Nogueira *et al.* 2007).

O chorume também pode ser encaminhado para Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), desde que a carga adicional não prejudique o processo de tratamento destas ETEs (MMA 2009; Elk 2007). Além disso, o co-tratamento pode influenciar na performance e eficácia das ETEs, devido às seguintes questões: aumento significativo da carga orgânica ao efluente final, podendo ultrapassar o limite de projeto e comprometendo o alcance dos limites de descarga estabelecidos pela legislação; potencial input de elevadas concentrações de amônia e de compostos biodegradáveis presentes no chorume, podendo refletir no efluente final caso a remoção de tais componentes não esteja projetada na planta da ETE; possível presença de substâncias tóxicas oriundas do chorume, principalmente se o aterro do qual o chorume provém tenha depositado resíduos não urbanos; possível presença de contaminantes metálicos, os quais inibem a cinética de bactérias nitrificantes, desnitrificantes e heterotróficas utilizadas no tratamento biológico de esgoto (Plácido & Marinheiro 2014).

Devido às limitações das técnicas convencionais e à necessidade de tratamento subsequente, o tratamento físico por sistema de osmose reversa surge como uma solução mais adequada à remoção dos poluentes presentes no chorume - o que se deve à retenção e à qualidade atingidas por esta técnica através da execução em até três etapas de purificação (Plácido 2016). Porém, deve-se ter em mente que não necessariamente a técnica adotada para determinado aterro será aplicável a outros (Serafim *et al.* 2003), devendo-se, portanto, avaliar a eficácia técnica e ambiental para cada caso.

A eficiência técnica consiste na otimização do uso de insumos, de modo que as possibilidades técnicas pelas quais os fatores de produção são transformados em produtos sejam viáveis. Isto é, os critérios técnicos devem estar de acordo ao uso pretendido e relacionados ao aumento de produtividade (Couto 2014). No que se refere à eficiência ambiental, esta é representada pelo menor potencial de determinada tecnologia causar danos ambientais e/ou uso insustentável de recursos naturais (Couto 2014). A eficácia, por sua vez, está relacionada ao alcance dos objetivos através dos recursos disponíveis. Isto é, um processo eficaz direciona-se aos resultados por meio da escolha certa para determinado problema ou necessidade (Chiavenato 1994; Bio 1996).

Tendo em vista que as concentrações de metais, ametais, compostos orgânicos, entre outros, na água podem ser utilizadas como indicadores sensíveis do grau de contaminação de um sistema hidrológico (Soares *et al.* 2016), uma maneira de avaliar a eficácia ambiental de determinada técnica é determinar parâmetros diversos no efluente pós-tratamento e compará-los aos padrões estabelecidos pela legislação para lançamento de efluentes em corpos hídricos.

Assim, o presente estudo tem por objetivo avaliar a eficácia técnica e ambiental da tecnologia de osmose reversa para tratamento do lixiviado da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de São Gonçalo, Rio de Janeiro, durante amostragem entre 2014 e 2016.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e Caracterização da Área

A eficácia técnica e ambiental da osmose reversa para tratamento de lixiviado de aterro sanitário foi avaliada com base nos resultados de análises mensais de chorume bruto e permeado (tratado) conduzidas pela empresa Haztec® Tecnologia e Planejamento Ambiental, contratada pela Central de Tratamento de Resíduos Alcântara S.A. (CTR São Gonçalo, Rio de Janeiro).

A área de enfoque deste estudo, CTR São Gonçalo (UTM 7470700 N / 706400 E), ocupa uma área de 1.471.765 m² (Figura 2). O entorno caracteriza-se pela presença de pastagens e áreas com remanescentes de vegetação secundária. Áreas de pastagens e vegetação rasteira delimitam a área ao norte, leste e oeste, sendo registrada a ocorrência de vegetação primária nas drenagens principais e de algumas residências ao limite oeste. Ao Sul, a área é delimitada por uma pedreira, da qual é extraída brita para a construção civil. A morfologia é

acidentada e o empreendimento situa-se em uma área caracterizada pela atividade industrial (pedreira e usina de asfalto), no bairro Anaia Pequeno.

A classificação climática de São Gonçalo, segundo Köppen-Geiger, é Aw - tropical com chuvas de verão (Köppen 1948 *apud* EMBRAPA 2003), o qual caracteriza-se por estação chuvosa no verão e nítida estação seca no inverno, sendo julho o mês mais seco, a temperatura média do mês mais frio é 18°C e as precipitações são superiores a 750 mm anuais (EMBRAPA 2003). Em São Gonçalo, a temperatura e a pluviosidade médias são, respectivamente, 23,3°C e 1257 mm anuais.



Figura 2: Localização da Central de Tratamento de Resíduos de São Gonçalo, Rio de Janeiro.

Dois corpos hídricos superficiais ocorrem na região: um afluente do Rio Alcântara (à jusante), e o açude do morro do Anaia (a leste da área do empreendimento), sendo estes tributários da Baía de Guanabara. No que se refere às águas subterrâneas, o sentido do fluxo na região é de Sul para Norte.

Técnica de Osmose Reversa

A técnica empregada para tratamento do lixiviado na ETC avaliada neste estudo é a osmose reversa, que consiste em um processo de separação com membranas (PSM), no qual as membranas atuam como uma barreira seletiva ao transporte para a separação de duas bases fluidas. Na osmose, um fenômeno físico-químico essencial ao funcionamento celular, a água movimenta-se de um meio hipotônico para um meio hipertônico através de uma membrana semipermeável, de modo que os meios se tornem isotônicos. Enquanto que na osmose reversa, através de uma pressão externa superior à pressão osmótica, força-se o fluxo contrário da água, isto é, uma solução altamente concentrada é forçada através de uma membrana para uma região de baixa concentração de solutos (Cunha *et al.* 2014; Chamon 2011). Assim, obtém-se duas correntes de alimentação do sistema, concentrado e permeado (tratado), e a separação ocorre devido à diferença de tamanho entre as partículas e moléculas, sendo utilizadas membranas porosas através das quais os compostos são retidos e a água é capaz de atravessar (Costa 2009). O concentrado consiste na porção onde estão retidas as substâncias presentes no chorume, sendo este tratado através de: recirculação no aterro, evaporação ou solidificação.

As vantagens desta técnica estão relacionadas aos rendimentos de purificação próximos a 100% para diversos parâmetros estabelecidos pela legislação (Tabela 1), além disso, garante a retenção até mesmo de sais monovalentes, como o cloreto, devido ao alto limite de separação das membranas (< 0,001 µm). A construção modular do sistema de osmose reversa, por sua vez, confere flexibilidade e mobilidade, além de demandar pouco espaço físico.

Tabela 1: Eficácia de remoção de alguns parâmetros por diferentes técnicas de tratamento de lixiviado de aterro sanitário (Dados: Fornieles & Espinheira s.d.).

Processo	DBO	DQO	Cl ⁻	NH ₄ ⁺
Biológicos	60%	95%	10%	99%
Oxidação química	80%	80%	0%	0%
Leito fixo	80%	80%	10%	0%
Eletrocoagulação	50%	50%	50%	50%
Evaporação	90%	95%	99%	20%
Stripping	0%	0%	0%	50%

Osmose reversa	99%	99%	99%	99%
----------------	-----	-----	-----	-----

Estação de Tratamento de Chorume (ETC)

A estação de tratamento de chorume avaliada no presente estudo consiste em um sistema modular instalado em container pela empresa AST Ambiente Soluções e Tecnologia®. A capacidade de tratamento de chorume desta ETC é de 120 m³/dia, e a mesma é composta pelos seguintes sistemas integrados (Figura 3): pré-tratamento físico (filtração), osmose reversa em três fases, lavador de gases. A separação por membranas ocorre pelo mecanismo de exclusão segundo a diferença de tamanho entre as partículas (COSTA, 2009), ocorrendo o transporte através de membranas porosas.

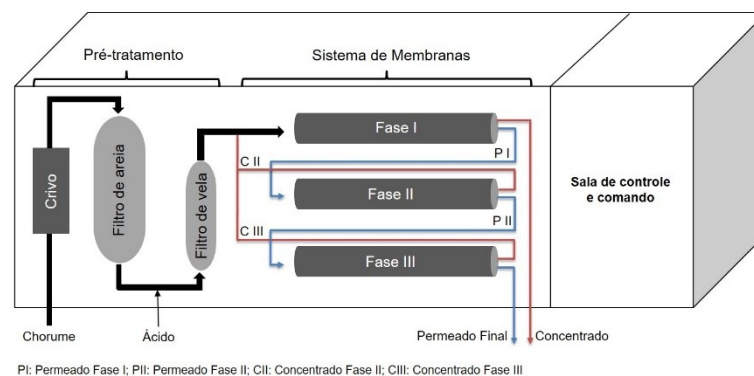


Figura 3: Esquema representando a Estação de Tratamento de Chorume (ETC) da CTR São Gonçalo. (Fonte: modificado de Plácido 2015).

A operação da osmose reversa demanda a realização de um pré-tratamento, de modo que o efluente seja filtrado para atingir os padrões necessários de alimentação no sistema de membranas. Isto se dá da seguinte maneira: o chorume armazenado em uma lagoa é bombeado para um tanque, onde inicia-se o processo de pré-tratamento, o efluente é filtrado duas vezes (filtro de areia e filtro de vela) e, então, bombeado para o sistema de membranas, onde ocorre a osmose reversa (Cunha *et al.* 2014).

Após o tratamento, o permeado final é reutilizado para umidificação das vias da CTR São Gonçalo, enquanto que o concentrado é recirculado para o aterro. A produtividade obtida pelo tratamento é expressa pelas taxas de permeado e concentrado gerados, as quais variam de acordo com a condutividade do chorume ao entrar no sistema.

Na ETC avaliada, a alternativa adotada para tratamento do concentrado gerado é a recirculação para a massa de resíduos devido a esta ser uma solução mais econômica. Entretanto, é seguido um manual de boas práticas para evitar o efeito de concentração por recirculação, visto que concentrações muito altas podem interferir no rendimento da técnica (Plácido 2016; Lima 2006; Serafim *et al.* 2003).

A recirculação do chorume no aterro propicia a atenuação de seus componentes devido à atividade biológica e a reações físico-químicas que ocorrem no interior da massa residual (Lima, 2006; Ferreira *et al.* 2001). O efeito de acelerar a estabilização da matéria orgânica presente nos resíduos aterrados já foi relatado por diversos autores (Chugh *et al.* 1998; Reinhart, 1996; Reinhart & Al-Yousfi 1996; Mcbean *et al.* 1995), e é favorecido pelas condições ambientais de regiões tropicais, como é o caso do Brasil, pois aumentam a evaporação do chorume, reduzindo o seu volume expressivamente (Ferreira *et al.*, 2001).

Amostragem e análise do chorume

Foi realizada a coleta de amostras de chorume bruto e permeado para análise dos parâmetros físico-químicos e biológicos visando a avaliação dos mesmos com os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pelas Resolução CONAMA n° 430/2011, e pela Norma Técnica NT-202 R-10 (FEEMA 1986). As amostras foram acondicionadas em frascos esterilizados e mantidas em caixas térmicas sob uma temperatura de 4±2 °C, utilizando gelo e com monitoração constante com termômetro.

As amostras coletadas foram enviadas para laboratório acreditado obedecendo às condições de preservação, e analisadas segundo os prazos de validade estabelecidos. A fim de assegurar que as análises foram realizadas de acordo com o método analítico, foram empregados os seguintes controles de qualidade para todos os parâmetros: brancos de análise; amostras fortificadas com uma concentração conhecida do analito de interesse (*spike*). Para os compostos orgânicos voláteis (COVs, do inglês Volatile Organic Compounds - VOCs) utilizou-se, ainda, o método da análise de traçador (*surrogate*), o qual consiste na adição de uma substância de

concentração conhecida cujo comportamento cromatográfico é semelhante aos compostos em análise, porém não presente na amostra em questão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisadas seis amostras de lixiviado permeado coletadas no período de julho/2014 a março/2016, referentes às campanhas: janeiro/2014; março e novembro/2015; janeiro, fevereiro e março/2016. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos na caracterização deste efluente.

Durante as análises foram determinados, ainda, os seguintes parâmetros: arsênio, bário, cádmio, cianeto livre, cromo⁶⁺, estanho, ferro dissolvido, fluoreto, magnésio, mercúrio, níquel, prata, selênio, sólidos sedimentáveis e os compostos orgânicos voláteis (1,1-dicloroetano; benzeno; cis-1,2-dicloroetano; clorofórmio; estireno; etilbenzeno; m,p-xilenos; o-xilenos; tetracloreto de carbono; tolueno; trans-1,2-dicloroetano; tricloroetano). Os mesmos não são apresentados na Tabela 2 devido às concentrações, em todas as campanhas, terem sido inferiores aos limites de detecção e quantificação dos métodos analíticos. Sendo importante sinalizar que tais limites são inferiores aos valores máximos permissíveis (VMP) estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 para esses parâmetros. Logo, considerando tais resultados e os valores satisfatórios obtidos nos controles de qualidade empregados, a técnica de osmose reversa mostrou-se eficaz para a redução desses parâmetros.

Tabela 2: Caracterização do lixiviado permeado proveniente da ETC - CTR São Gonçalo e os respectivos valores máximos permissíveis (VMP) estabelecidos pela legislação.

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	VMP
<i>Inorgânicos (µg/L)</i>					
Boro	976	1345	1145,15	135,52	5000 ^(1,2)
Cálcio	< 0,02	192	130	87,68	-
Chumbo	< 4	28	*	*	500 ⁽¹⁾
Cianeto	< 50	23,50	*	*	1000 ⁽¹⁾
Cloreto	0,90	4900	1560,18	1929,32	-
Cobre dissolvido	< 1	26	*	*	1000 ⁽¹⁾
Cromo	< 1	15	11	1,41	1000 ⁽¹⁾
Cr ³⁺	< 5	13	9	5,65	1000 ⁽¹⁾
Fósforo	0,02	180	64	68,77	1000 ⁽²⁾
Manganês dissolvido	< 3	58	*	*	1000 ^(1,2)
Nitrogênio amoniacal	3720	14600	10853,33	4219,15	20000 ⁽¹⁾
Sódio	3383	26613	11592,40	9229,46	-
Sulfeto	< 3	8	5,40	2,07	1000 ⁽¹⁾
Zinco	< 4	16	*	*	5000 ⁽¹⁾ 1000 ⁽²⁾
<i>Outros</i>					
Alcalinidade	46,5	85660	42785,34	40450	-
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	0,104	0,25	0,164	0,06	-

DBO (µg/L)	5000	69000	35666,67	23432,17	Remoção de 60% ⁽¹⁾
DQO (µg/L)	81,59	75220	35080,39	31172,7	-
Fenol (µg/L)	13,50	513,70	198,95	177,62	500 ⁽¹⁾ 200 ⁽²⁾
MBAS (µg/L)	< 0,01	60	*	*	-
Óleos e Graxas minerais (µg/L)	< 2000	10000	*	*	20000 ^(1,2)
Óleos e Graxas totais (µg/L)	< 2000	28000	*	*	20000 ⁽¹⁾
Óleos e Graxas vegetal (µg/L)	< 2000	17140	*	*	50000 ⁽¹⁾ 30000 ⁽²⁾
pH	6,93	8,07	7,71	0,42	5 > pH < 9 ^(1,2)
Sólidos Suspensos Totais (µg/L)	3000	18000	7000	7348,46	Remoção de 20% ⁽¹⁾
Fator de toxicidade (UT) - <i>Danio rerio</i>	1	2	1,4	0,54	CECR ≤ (CL50/3)
Toxicidade - <i>Daphnia similis</i> (%)	78,07	100	87,02	10,11	CECR ≤ (CL50/3)

'<': valor inferior ao limite de quantificação indicado; *: somente em uma campanha o resultado foi superior ao LQ, o que impossibilitou a obtenção de média e desvio padrão; (1): valores orientadores da Resolução CONAMA nº 430 para lançamento de efluentes; (2): valores orientadores da Norma Técnica NT-202.R10, do INEA, para lançamento de efluentes; '-': sem informação; CECR: concentração de efluente no corpo receptor; CL50: concentração letal mediana.

A alta variabilidade observada em alguns parâmetros pode estar relacionada a variações climáticas entre as diferentes campanhas de coleta, conforme aponta outro estudo de caracterização de lixiviado de aterro (TELLES, 2010). Contudo, é importante observar que em todas as campanhas do presente estudo, o efluente permeado apresentou consonância com a legislação para todos os parâmetros, exceto, somente, o parâmetro "fenol" em novembro/2015 (513 µg/L), tendo em vista o VMP estabelecido pela Res. CONAMA 430 (500 µg/L) - no entanto, considerando a NT-202.R10 (200 µg/L), a qual é mais restritiva para o parâmetro em questão, os resultados em janeiro e março/2016 (231,4 e 229,2 µg/L, respectivamente) também foram superiores ao estabelecido.

Com relação aos parâmetros nitrogênio amoniacal, DBO, DQO, condutividade, sólidos suspensos totais (SST) e pH, estes foram analisados tanto no efluente bruto quanto no permeado (Tabela 3), o que permitiu avaliar a eficácia de remoção dos mesmos.

Tabela 3: Parâmetros analisados em efluente bruto e permeado segundo a campanha de amostragem.

Campanha	Efluente	Nitrogênio	DBO	DQO	Condutividade	SST	pH
		Amoniacal (mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mS.cm ⁻¹)	(mg/L)	
jul/14	Bruto	5143,23	7922	na	26	122	7,55
	Permeado	7,76	69	na	0,11	< 3	6,93
mar/15	Bruto	683,54	2162	4828,57	27,9	122	8,04

	Permeado	3,72	5	na	0,104	< 3	7,55
nov/15	Bruto	na	na	na	na	na	na
	Permeado	14,60	20	26,77	0,12	4	7,95
jan/16	Bruto	na	12325	22,95	na	na	na
	Permeado	13,36	50	0,08	0,21	3	8,07
fev/16	Bruto	na	na	6552,94	27,70	451	na
	Permeado	13,26	24	38,25	0,25	3	7,87
mar/16	Bruto	1592,31	4243	7521,86	30,80	na	7,96
	Permeado	12,43	46	75,22	0,19	18	7,90

‘<’: valor inferior ao limite de quantificação indicado; ‘na’: não analisado.

Foram verificadas concentrações anômalas de nitrogênio amoniacal (> 20 mg/L) nas amostras de chorume bruto das seguintes campanhas: jul/14, mar/15 e mar/16. Contudo, em todas as campanhas o chorume permeado apresentou concentrações inferiores ao valor de referência estabelecido, e a eficácia de remoção foi entre 99,2 e 99,9%.

Com relação à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), em todas as campanhas foram obtidos valores de remoção entre 98,9 e 99,8%, sendo estes superiores ao mínimo estabelecido pela legislação (60%).

No que se refere ao parâmetro DQO (Demanda Química de Oxigênio), este não é mencionado nos instrumentos legislativos que dispõem sobre os critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos. Entretanto, para as campanhas jan-mar/16, os valores de DQO de chorume permeado indicam uma remoção entre 98,9 e 99,4% em relação aos valores de chorume bruto.

As taxas de remoção de DBO e DQO obtidas no presente estudo corroboram o comparativo apresentado por Fornieles & Espinheira (s.d.) da osmose reversa em relação a outros métodos de tratamento de lixiviado de aterro (Tabela 1).

A redução da condutividade entre efluente bruto e permeado foi expressiva em todas as campanhas nas quais os dois efluentes foram analisados (entre 99 e 99,6%). O mesmo foi observado para os sólidos suspensos totais, cuja taxa de remoção foi entre 97,5 e 99,3% - considerando o valor de chorume permeado de 3 mg/L -, sendo 20% o limite mínimo estabelecido pela Res. CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011). Quanto à leitura de pH, em todas as amostragens os valores de leitura também foram condizentes à faixa de referência, isto é, entre 5 e 9.

CONCLUSÃO

Considerando que os padrões estabelecidos pela legislação foram atendidos quase que integralmente, exceto somente pelo fenol, e as taxas de remoção de nitrogênio amoniacal, DBO, DQO, condutividade e sólidos suspensos totais foram superiores a 97,5% em todas as campanhas, os resultados obtidos permitem inferir que a técnica de osmose reversa (OR) possui altas eficácias técnica e ambiental no tratamento do lixiviado da CTR São Gonçalo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O efluente permeado, isto é, a água obtida após o tratamento, possui qualidade que permitiria o seu uso para fins mais nobres que a umidificação das vias, como o uso em indústrias com a necessidade de água com alto padrão de destilação. Tal possibilidade pode ser avaliada como uma oportunidade de parceria entre a CTR em questão e indústrias de interesse.

O alto potencial de remoção de compostos e a capacidade de gerar água tratada de elevada qualidade além de caracterizarem a osmose reversa como uma tecnologia viável, justificam a crescente adoção desta tecnologia em plantas de tratamento de lixiviado, principalmente em países europeus e asiáticos, e, com base nos dados obtidos no presente estudo, capaz de ser implementada com maior frequência nos aterros sanitários brasileiros com características semelhantes ao de São Gonçalo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2015) Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil - 2015. São Paulo.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2010) Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil - 2010. São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1992) NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 7 p.
- Baun A, Jensen SD, Bjerg P, Christensen TH., Nyholm N (2000) Toxicity of organic chemical pollution in groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science & Technology*. v. 34, p. 1647-1652.
- Bio SR (1996) Sistemas de Informação: um enfoque gerencial. São Paulo: Atlas. p. 20-23.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (2005) Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA.
- BRASIL. Lei nº 12305, de 02 de agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Presidência da República Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. 2010.
- Brito-Pelegrini NN, Paterniani JESP, Brota GA, Pelegrini RT (2011) Avaliação da redução da poluição do chorume tratado por processo fotoquímico. *Augmdomus*, v. 3, p. 20-30.
- Cavalcanti AS, Filho HJI, Guimarães OLC, Siqueira AF (2015) Modelagem neural e análise estatística do processo de degradação de chorume por foto-fenton solar. *Revista Ambiente e Água*, v. 10, n. 1, p. 89-106.
- Chamon RP (2011) Pós tratamento de lixiviado de aterro industrial pelo processo de osmose reversa: estudo de caso. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Setor de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Chiavenato I (1994). Recursos humanos na Empresa: pessoas, organizações e sistemas. 3.ed. São Paulo: Atlas. p. 67-76.
- Chugh S, Clarke W, Pullammanappallil P, Rudolph V (1998) Effect of Recirculated Leachate Volume on MSW Degradation. *Waste Management & Research*, v.16, p. 564-573.
- Costa ACM (2009) Desenvolvimento de membranas de osmose inversa resistentes à deposição de matéria orgânica e bioincrustações. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro.
- Couto F (2014) Eficiência técnica, econômica e sustentabilidade ambiental. Federação da Agricultura e Pecuária de Goiás (Faeg). Disponível em: <<http://sistemafaeg.com.br/noticias/artigos/10773-eficiencia-tecnica-economica-e-sustentabilidade-ambiental>>. Acesso em: 10/01/2017.
- Cunha WF, Silva ML, Amadeu SG (2014) Tratamento do chorume pelo processo de osmose reversa na área do aterro sanitário de resíduos urbanos domiciliares. 7º Encontro Nacional de Tecnologia Química, Vitória/ES.
- Elk AGHP van (2007) Redução de emissões na disposição final. 40 p. Em: SEGALA, K. Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos. Rio de Janeiro: IBAM (Instituto Brasileiro de Administração Municipal).
- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2003) Zoneamento agroecológico do Estado do Rio de Janeiro. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, n.33, 113p.
- FEEMA. NT-202.R-10, aprovada pela Deliberação CECA nº1007, de 04 de dezembro de 1986. Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos. Diário Oficial (do Estado do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro. 1986.
- Ferreira JA, Gandhi G, Ritter E, Rosso TCA, Campos JC, Lima PZM (2001) Uma revisão das técnicas de tratamento de chorume e a realidade do estado do Rio de Janeiro. In: Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa, PB.
- Fornieles JA, Espinheira P (s.d.) Tratamento de chorume, osmose reversa. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (ABLP). Disponível em: <http://www.ablp.org.br/pdf/Juan-Fornieles-151123V1.0_Tratamento-de-Chorume.pdf>. Acesso em: 12/01/2017.
- Gouveia N (2012) Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17(6), p. 1503-1510.
- Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (IBGE) (2010) Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, PNSB-2008. Rio de Janeiro.
- Instituto De Pesquisas Tecnológicas (IPT) / Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE) (2000) Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 370 p.
- Kurniawan TA, Lo WH, Chan GYS (2006) Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 129, p. 80-100.
- Lima WS (2006) Avaliação do desempenho de remoção de poluentes de lixiviados: um estudo de caso para o sistema de tratamento do aterro municipal de Betim, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- Mcbean EA, Rovers FA, Farquhar GJ (1995) Solid Waste Landfill Engineennig and Design. Prentice Hall PTR, USA.
- Ministério Do Meio Ambiente (MMA) (2009) Programa Nacional de capacitação de gestores ambientais: Módulo específico licenciamento ambiental de estações de tratamento de esgoto e aterros. 67 p.
- Ministério Do Meio Ambiente (MMA) (2005) Lixo - Um grave problema no mundo moderno, Cap. 7, p. 113-134. Em: MMA, Cidadania e Consumo Sustentável.
- Nogueira RFP, Trovó AG, Silva RA, Villa RD (2007) Fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-fenton. *Química Nova*, v. 30, n. 2, p. 400-408.
- Öman CB, Junestedt C (2008) Chemical characterization of landfill leachates: 400 parameters and compounds. *Waste Management*. v. 28, p. 1876-1891.
- Orlando LM (2014) Avaliação de desempenho da estação de tratamento de lixiviado da central de tratamento de resíduos da Zona da Mata – Juiz de fora/MG. 2014. Trabalho final de curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Juiz de Fora, MG.
- Plácido W, Marinheiro LM (2014) Co-tratamento de chorume dos aterros sanitários em estações convencionais de tratamento de esgoto: uma análise crítica. *Ambiente Legal*. Disponível em: <<http://www.ambientelegal.com.br/chorume-de-aterro-nao-e-esgoto-precisa-de-tratamento-adequado/>>. Acesso em: 03/11/2016.
- Plácido W (2016) Tratamento de chorume e purificação de águas por membranas: aspectos técnicos econômicos e ambientais. In: 7º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, Porto Alegre/RS.
- Programa De Pesquisa Em Saneamento Básico (PROSAB) (2009) Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras - tema 3. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 360 p.
- Reinhart DR (1996) Full-Scale Experiences with Leachate Recirculation Landfills: Case Studies. *Waste Management & Research*, v. 14, p. 347-365.
- Reinhart DR, Al-Yousfi AB (1996) The Impact of Leachate Recirculation on Municipal Solid Waste Landfill Operating Characteristics. *Waste Management & Research*, v. 14, p. 337-346.
- Samuel-Rosa A, Dalmolin RSD, Copetti ACC (2012) A poluição causada por aterros de resíduos sólidos urbanos sobre os recursos hídricos. *Ciência e Natura - Universidade Federal de Santa Maria*, v. 34, p. 107-118.

- Serafim AC, Gussakov KC, Silva F, Coneglian CMR, Brito NN, Sobrinho GD, Tonso S, Pelegrini R (2003). Chorume, impactos ambientais e possibilidades de tratamentos. III Fórum de Estudos Contábeis 2003 - Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET), UNICAMP.
- Silva JO, Silva VM, Cardoso VL, Machado AEH, Trovó AG (2016) Treatment of Sanitary Landfill Leachate by Photo-Fenton Process: Effect of the Matrix Composition. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 27, nº 12, p. 2264-2272.
- Svensson A, Allard A-S, Ek M (2003) Removal of estrogenicity in Swedish municipal sewage treatment plants. *Water Research*. v. 37, p. 4433-4443.
- Telles CAS (2010) Processos combinados para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.