

Destilação para tratamento de lixiviado: obtenção de subsídios para projeto e avaliação

O lixiviado, devido a elevada carga poluente e complexa composição, é umas das principais fontes de contaminação ambiental. Para minimizar os impactos e atender aos requisitos legais é necessário tratar o lixiviado antes do lançamento nos corpos hídricos. A destilação solar é um processo físico e químico de tratamento indicado para regiões com condições climáticas favoráveis, isto é, onde se tem um clima mais quente e seco. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o sistema de tratamento do lixiviado por evaporação natural e forçada utilizando destilador solar em escala piloto. A metodologia consistiu em analisar a interferência das condições climáticas na destilação solar de lixiviado; determinar a evaporação de lixiviado média diária em um sistema com destilação natural e destilação forçada; e avaliar o efluente destilado de acordo com a legislação vigente. No monitoramento das condições climáticas verificou-se que na destilação natural ocorreu uma diminuição da produção do destilado no período chuvoso quando houve menor radiação solar e precipitação. A destilação forçada não sofreu influência das condições climáticas. A destilação forçada obteve um rendimento de 84 L/dia e a destilação natural de 12 L/dia. Os índices de remoção dos parâmetros analisados são inferiores ao estabelecido pela legislação vigente.

Palavras-chave: Aterro sanitário; Condições climáticas; Processo físico; Resíduos sólidos.

Distillation for leachate treatment: obtaining subsidies for design and evaluation

The landfill leachate, due to the high pollutant load and complex composition, is one of the main sources of environmental contamination. In order to minimize impacts and achieve the requirements of environmental legislation, it is necessary to treat the leachate before launching it into water bodies. In this scenario, solar distillation is a treatment process indicated for regions such as Mato Grosso, with favorable climatic conditions, with a warmer and drier climate. Thus, this work aims to design, build and evaluate the leachate treatment system, by natural and forced evaporation, using a pilot scale solar distiller. The methodology consists in the following steps: i) testing and analyzing the materials (galvanized steel, stainless steel, aluminum, glass and acrylic); ii) analysis of the interference of climatic conditions in the solar distillation of the leachate; iii) determination of the average daily leachate evaporation (L/d) in a system with natural distillation and forced distillation; and iv) evaluate the distilled effluent in accordance with current legislation. According to the results, stainless steel performed better for building the base of the distiller, with less loss of mass, with an average result of 0.03%, and a lower corrosion rate, equaling 0.00054. For the cover of the distiller, the glass presented the best result. In the monitoring of climatic conditions, it was found that, in natural distillation, there was a decrease in production in the rainy season, when there was less solar radiation and precipitation. The forced distillation was not influenced by climatic conditions. Forced distillation achieved a production of 84 L/day and, natural distillation, 12 L/day. The rates of removal of the analyzed parameters are lower than those established by current legislation.

Keywords: Climate conditions; Landfill; Physical process; Solid waste.

Topic: **Engenharia de Recursos Hídricos**

Received: **06/05/2022**

Approved: **26/05/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Everton da Silva Cândido 
Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6807856552579399>
<http://orcid.org/0000-0001-8449-843X>
candidoeverton@hotmail.com

Aldecy de Almeida Santos 
Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3224921282419849>
<http://orcid.org/0000-0003-4361-307X>
aldecy_allmeida@yahoo.com.br

Gabriel Figueiredo de Moraes 
Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8101837260214809>
<http://orcid.org/0000-0002-5137-1421>
gabriel.moraes4@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.005.0008

Referencing this:

CÂNDIDO, E. S.; SANTOS, A. A.; MORAES, G. F.. Destilação para tratamento de lixiviado: obtenção de subsídios para projeto e avaliação. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.13, n.5, p.95-109, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.005.0008>

INTRODUÇÃO

No Brasil foram produzidas aproximadamente 216 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia os quais representam um dos mais graves problemas ambientais uma vez que desse montante, 92% foram coletado e destes apenas 59,5% foram encaminhados para aterros sanitários e 40,5% foram dispostos de forma ambientalmente inadequada (ABRELPE, 2019).

Estima-se que, em média, 50% dos resíduos sólidos urbanos produzidos são constituídos de matéria orgânica Jardim (2018) e que no processo de decomposição produz um líquido denominado de lixiviado. Esse líquido é composto por quantidades significativas de substâncias com características físicas, químicas e microbiológicas danosas ao meio ambiente acarretando problemas de toxicidade em plantas, animais e seres humanos (HENDRYCH et al., 2019; GOMES et al., 2017).

Devido a elevada carga poluente e complexa composição, os lixiviados de aterros sanitários são umas das principais fontes de contaminação ambiental, seja do solo ou das águas superficiais e subterrâneas podendo ser transportados para os mananciais próximos causando impactos aos recursos hídricos e comprometer a qualidade e o ecossistema do entorno (MAO et al., 2018; BATISTA et al., 2016; SILVA, 2016).

Dentre as práticas empregadas na disposição final dos resíduos, a utilização de aterros sanitários é ambientalmente a mais adequada segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) pois, é a opção em que há impermeabilização do solo e controle do lixiviado evitando que atinja os recursos hídricos, desta forma, evita danos ou riscos à saúde pública e à segurança e minimiza os impactos ambientais (LUO et al., 2017; PAULI, 2018).

Atualmente, o lixão de Cuiabá recebe aproximadamente 470 toneladas por dia de resíduos (domiciliares, limpeza pública e de serviços de saúde descaracterizados) (CUIABÁ, 2019) e, no aterro sanitário privado Centro de Gerenciamento de Resíduos Cuiabá (CGR) são recebidos resíduos 88 toneladas por dia de resíduos de todas as classes e armazenamento temporário para os resíduos Classe I e permanente para Classes II A e B (CUIABÁ, 2015).

Com finalidade de minimizar os impactos e atender aos requisitos exigidos pelas legislações ambientais, torna-se necessário realizar o tratamento do lixiviado antes de seu lançamento nos corpos hídricos. Em geral, o tratamento ocorre por meio de métodos físico e químicos, biológicos ou uma combinação dos mesmos (LUO et al., 2020; MARTILDES et al., 2020; GOMES et al., 2019).

A destilação solar é o processo físico e químico de tratamento do lixiviado indicado para regiões com condições climáticas favoráveis, isto é, onde se tem um clima mais quente e seco. Essas variáveis climáticas favorecem ao fenômeno de evaporação do lixiviado produzindo um efluente destilado livre de contaminações (ALMEIDA, 2016). Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o sistema de tratamento do lixiviado por evaporação natural e forçada utilizando destilador solar.

O lixiviado é definido como um líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos (ABNT, 1992) formado pela umidade existente na massa de resíduos, decorrente do processo de degradação biológica, e pela infiltração da água da chuva na massa de resíduos aterrada (MARTILDES et

al., 2020; SALLES et al., 2020; PAIXÃO FILHO, 2017; SANTOS 2011). O composto se caracteriza em uma mistura com elevadas concentrações de substâncias orgânicas e inorgânicas, incluindo ácidos húmicos, amônia, íons e sais inorgânicos, xenobióticos, além de metais pesados (SALLES et al., 2020; LOZINSKI et al., 2019; RASOOL et al., 2016; BATISTA et al., 2016).

Por serem considerados efluentes altamente tóxicos com grande carga orgânica o tratamento é imprescindível, porém pode ser difícil e dispendioso de energia, tempo e custos elevados (DIA et al., 2017; DAMIANO et al., 2014).

Os processos de tratamento físico e químico podem ser destinados à remoção de matéria orgânica, remoção de partículas coloidais, nitrogênio amoniacal, metais pesados e na remoção de amônia (MELO, 2019; REQUE, 2015) (GOMES, 2016; OLIVEIRA, 2011). Dentre esses processos, a evaporação/destilação é recomendada como uma alternativa eficaz e que oferece a vantagem de tratar o lixiviado com o emprego de poucas unidades de operação. Santos (2011) (OLIVEIRA, 2011).

O destilador solar é uma forma eficiente de separação entre líquidos e sólidos (LIED et al., 2018) que utiliza a radiação solar (direta e difusa) para promover o aquecimento e mudança de fase do líquido permitindo a remoção de contaminantes (SÁ, 2008). O processo se dá através do aquecimento do lixiviado pelos raios solares que atravessa a cobertura, produzindo vapor d'água, e este é condensado em uma superfície fria (cobertura) e o líquido condensado escorre pela superfície interna até ser coletado nas canaletas, abandonando os sais, outros minerais e a maioria das impurezas, incluindo microrganismos nocivos à saúde (SÁ et al., 2012).

METODOLOGIA

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido com o lixiviado do aterro sanitário privado localizado na cidade de Cuiabá-MT. O aterro sanitário opera com resíduos Classes IIA e IIB, resíduos de serviço de saúde e sistema de armazenamento temporário de resíduo Classe I (CUIABÁ, 2015). Possui uma área de 20 ha, encontra-se em funcionamento desde 2007.

Projeção e construção do destilador solar

A construção do destilador solar foi conforme metodologia adaptada de Sá et al. (2012), de maneira que as peças se tornem herméticas, formando em sua base dois reservatórios, sendo o maior para armazenar o lixiviado bruto e um menor para armazenamento do efluente tratado.

A cobertura do destilador foi composta por placas com inclinação de 45°, para que proporcione maior escoamento do efluente tratado (BEZERRA et al., 2005). Foi instalada uma torneira no reservatório lateral para coleta do efluente tratado.

As dimensões do destilador foram de 0,50 m de largura por 1,00 m de comprimento e 0,30 m de altura. O reservatório maior de 0,40 m de largura por 1,00 m de comprimento e o menor de 0,10 de largura

por 1,00 m de comprimento (Figura 1).

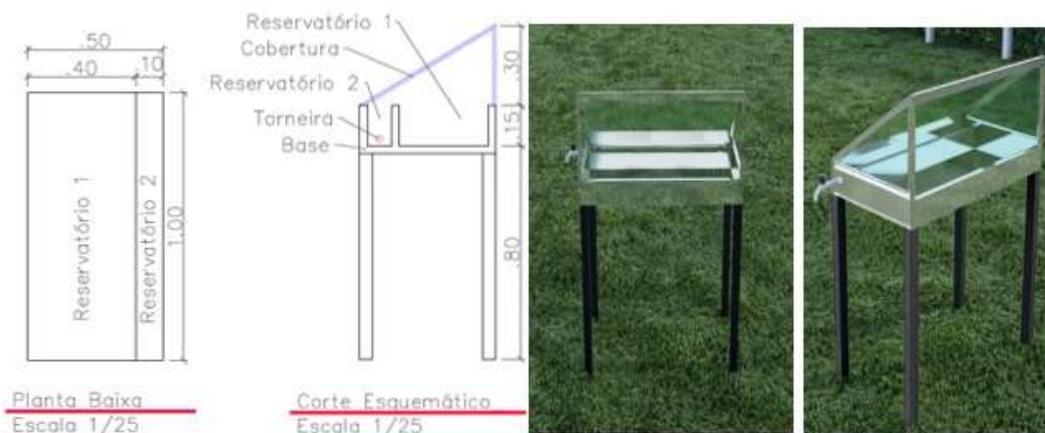


Figura 1: Exemplo protótipo destilador solar.

O sistema de destilação solar foi instalado no *Campus* de Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) posicionado em local que tenha maior aproveitamento da incidência dos raios solares evitando sombras para potencializar o processo de destilação.

Coleta e caracterização do lixiviado

O lixiviado foi coletado diretamente da tubulação de saída da célula. O efluente destilado foi caracterizado por meio dos parâmetros físico e químicos no Laboratório de Análises Físico-química de Água e Resíduos (LAFQAR) e os parâmetros microbiológicos no Laboratório de Microbiologia Sanitária e Ambiental (LAMSA) do *Campus* de Cuiabá-MT da UFMT.

Monitoramento e operação

A destilação do lixiviado foi realizada em dois destiladores no qual em um ocorreu de forma natural e no outro de forma forçada. O tratamento consistiu em adicionar um volume de lixiviado bruto em um destilador no qual foi utilizado apenas a energia solar e em outro destilador além da energia solar foi utilizado um aquecedor elétrico para aumentar a temperatura, forçando a velocidade de destilação. A temperatura do lixiviado bruto do destilador forçado foi controlada através de sensor de temperatura com visor digital. O processo ocorreu em duas etapas, sendo elas no período de seca e no período chuvoso.

O processo de monitoramento foi conforme metodologia adaptada de Almeida (2016), realizado por meio da placa de processamento e armazenamento de dados. Para monitorar a temperatura e umidade do ambiente e do interior do destilador foi utilizado o sensor de umidade e temperatura. A temperatura do lixiviado foi registrada por meio do sensor de temperatura à prova d'água. Para determinar os níveis de radiação ultravioleta foi usado um sensor de raios ultravioleta instalado na parte externa do destilador. Para controlar o nível de evaporação do lixiviado foi utilizado um sensor de distância ultrassônico que realizou a medição de distância e foi usado um relógio de tempo digital para marcar data e hora das medições.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da interferência das condições climáticas na destilação solar de lixiviado

Volume de destilado produzido

A destilação solar do lixiviado foi realizada em duas etapas, referente ao período de seca e de chuva, abrangendo 3 fases para os respectivos períodos. A Figura 2 indica a produtividade de lixiviado tratado, em litros, em função das condições climáticas locais.

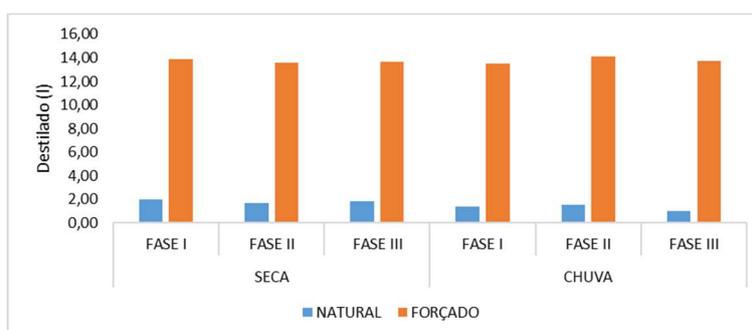


Figura 2: Comparação do volume destilado (L) para as 3 fases durante o período de seca e chuva.

Destilação natural

A água destilada de modo natural (apenas ação solar) não houve diferenças significativas entre as fases, entretanto, nota-se uma queda no volume destilado durante o período chuvoso, justificado pelo aumento de nebulosidade durante as chuvas, que diminuiu a radiação solar direta e conseqüentemente na eficiência do destilador natural (ALCANTRA et al., 2020). Immich (2021) e Almeida (2016) observaram a redução de produção de água destilada durante os meses que tiveram baixos índices de radiação e com queda na temperatura do ar.

Assim, é possível afirmar que a destilação natural sofreu maior influência do período sazonal, isso pode ser justificado pelo aumento de nebulosidade durante as chuvas, que diminuiu a radiação solar direta e conseqüentemente influencia na eficiência do destilador natural (ALCANTRA et al., 2020).

Destilação forçada

No período de seca, obteve-se 13,9 L de destilado e um excedente de 2,10 L de uma massa com agregados sólidos e, no período chuvoso a produção de 14,09 L de destilado. Ao analisar os períodos sazonais, não foi observada diferenças significativas de volume, pois, o equipamento possui um mecanismo de aquecimento, sendo o principal responsável pelo incremento de calor no sistema, diferente do destilador natural, onde apenas a incidência solar atua no processo de destilação.

Outro aspecto a ser destacado foi o tempo médio necessário para evaporar a massa líquida, no qual para o destilador forçado, com 5 horas de experimento já foi possível obter total evaporação.

Volume médio diário de destilado produzido

Período de seca

Nota-se ascendência na produção de destilado em função das horas do dia e também que a evaporação natural e a forçada foram rápidas, com destaque para a última. A condensação (Figura 3) se deu aproximadamente após uma hora do início do experimento, no entanto, a medição do volume do destilado só foi possível a partir das 09:00 horas.



Figura 3: Efluente condensado na cobertura do destilador forçado e natural.

A destilação natural atingiu valor máximo as 14:00 horas com aproximadamente 2 L de efluente tratado acumulado. Entretanto, o desempenho do destilador forçado se mostrou mais satisfatório, com volume acumulado de aproximadamente 14 L, atingindo pico de produção as 16:00 horas.

Um estudo em 2015 também observou o mesmo perfil de produção de água destilada com ascendência e pico por volta de 12:00 e 14:00 horas.

Período chuvoso

Assim como no período de seca, observa-se a ascendência da produção do destilado em função da hora do dia, para ambos os destiladores. Entretanto, para a destilação natural observa-se volume inferior a 2 L, com um aumento mais significativo as 12:00 horas. Por sua vez, a destilação forçada apresentou volume total acumulado satisfatório, com aproximadamente 14 litros e pico de produção as 16:00 horas.

De modo geral, nota-se que a evaporação forçada foi mais acelerada do que a natural em ambos os períodos sazonais. As 10:00 horas, ou seja, com 2 horas de ensaio, a destilação forçada já obteve a produtividade total do destilador natural, com volume de aproximadamente 2 L. Isso indica que o destilador forçado reduz tempo de evaporação devido ao incremento de calor no sistema.

Assim, a diferença de produção de lixiviado pelos dois tipos de destilador se dá pelo mecanismo de funcionamento, no qual, no destilador forçado tem-se um incremento de temperatura e isso promove uma aceleração das reações, com uma parcela maior de evaporado e, conseqüentemente, maior volume de efluente tratado (ROCHA et al., 2019).

Resultados dos parâmetros físicos, químicos e microbiológico do lixiviado bruto e destilados

Resultados dos parâmetros físicos do lixiviado bruto e destilados

Cor

Observa-se resultado médio de 9,50 Pt Co L⁻¹ para o destilado natural e 10,46 Pt Co L⁻¹ para a destilação forçada e eficiência de remoção de 99%. Isso justifica-se pelo processo de evaporação e condensação, que torna o líquido livre de material sólido em suspensão e parte dos dissolvidos. Fronza (2016), Massarotto (2016), Mees et al. (2018) e Sá (2008) também obtiveram 99% de eficiência de remoção do parâmetro cor (Figura 4).

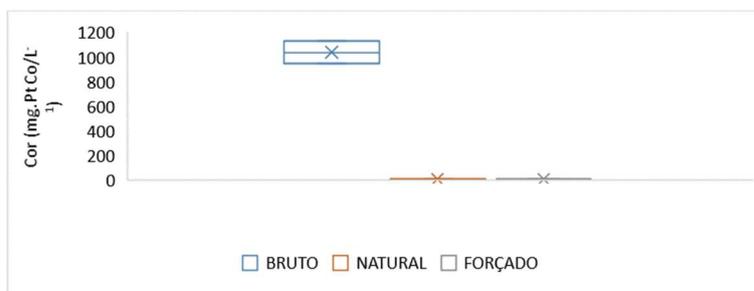


Figura 4: Resultados do parâmetro cor do lixiviado bruto e destilado natural e forçado.

Em relação à sazonalidade no período de seca observou-se mais substâncias húmicas, fúlvicas e materiais orgânicos concentrados no lixiviado. Quando em época de chuva, a concentração dessas substâncias decresce por causa da diluição (MORAVIA, 2010).

A Resolução CONAMA nº 357 de 2005 (CONAMA, 2005), estabelece apenas a cor verdadeira como padrão de qualidade, devendo ser igual ou inferior a 75 mg Pt L⁻¹. Logo, a remoção da cor pelo processo de destilação pode ser considerada satisfatória.

Turbidez

A eficiência de remoção resultou em 99% (Figura 5), sendo caracterizado como satisfatório e dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357 de 2005 (CONAMA, 2005). Isso ocorre porque o lixiviado tratado em destilador solar se torna livre em material em suspensão devido ao processo de evaporação do líquido e condensação na superfície de vidro interior (LIMA et al., 2019; SÁ, 2008).

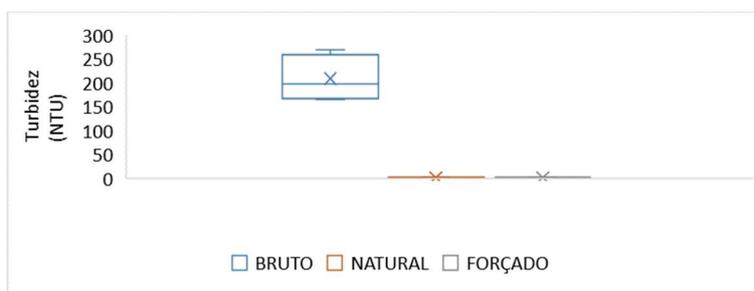


Figura 5: Resultados do parâmetro turbidez do lixiviado bruto e destilado natural e forçado.

Massarotto (2010) obteve resultados de turbidez para o efluente já tratado, inferiores a 2,8 NTU. Sá (2008) encontrou turbidez na faixa de 1,0 - 4,0 NTU e eficiência de remoção de 99%. Fronza (2016), também obteve eficiência em 99% após a destilação do lixiviado. Mesma eficiência de remoção foi obtida por Mees et al. (2018) em seu estudo empregando destilador solar.

A aplicação de destilador em outros tipos de efluentes também apresentaram resultados satisfatórios. Lied et al. (2018) obtiverem cerca de 90% de eficiência de remoção de turbidez. Carvalho (2015) obteve remoção de 95% de turbidez.

Condutividade elétrica

Considerando os resultados para condutividade elétrica na Figura 6, pode-se observar a redução, haja vista que a destilação solar fornece um condensado quase isento de sais, sendo estes, os responsáveis por conferir a condutividade (SÁ et al., 2012).

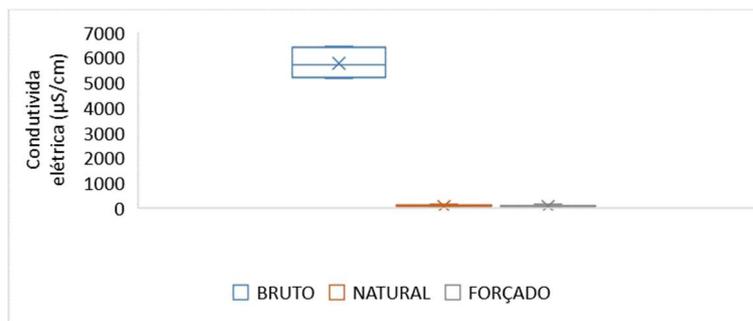


Figura 6: Resultados do parâmetro condutividade elétrica do lixiviado bruto e destilado natural e forçado.

A condutividade elétrica pode indicar possíveis impactos ambientais (SÁ, 2008). Entretanto, a Resolução CONAMA nº 430 (CONAMA, 2010) não define o parâmetro como padrão de lançamento de efluente, porém, a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) indica que águas naturais apresentam teores de condutividade na faixa de 10 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, em ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais os valores podem chegar a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Desta forma, os resultados obtidos para o lixiviado tratado se mostraram adequados, dado o seu valor inferior a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ obtendo eficiência de remoção com 89% e 88%, respectivamente.

Sólidos totais

Com base nos sólidos totais presentes no lixiviado bruto e nos destilados (Figura 7), nota-se que a concentração de sólidos para os destilados foi semelhante, sendo a destilação natural com uma média de 72,0 mg L^{-1} , enquanto a destilação forçada resultou em 70,0 mg L^{-1} . Esses dados representam eficiência de remoção do parâmetro em 99% para ambos os destiladores, o que é muito significativo.

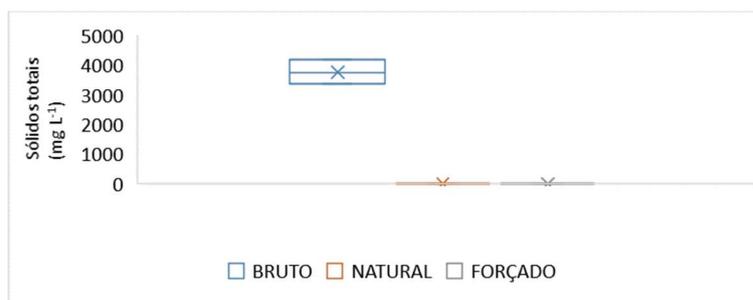


Figura 7: Resultados do parâmetro sólidos totais do lixiviado bruto e destilado natural e forçado.

Resultados de Sá (2008), no qual o tratamento por destilação obteve 100% de eficiência de remoção

e Araújo et al. (2018) obtiveram eficiência de remoção de sólidos totais em 99,54%.

Dada a possibilidade do reuso agrícola do lixiviado, destaca-se que o excesso de sólidos dissolvidos totais na água de irrigação causa diversos problemas, como danos a estrutura do solo e redução da velocidade de infiltração da água, afetando o rendimento da cultura (FERREIRA et al., 2019).

De acordo com Ferreira et al. (2019) a faixa de referência para sólidos totais dissolvidos de 450 a 2.000 mg L⁻¹, portanto, os dados obtidos pela presente pesquisa se adequam aos valores propostos.

Resultados dos parâmetros químicos do lixiviado bruto e destilados

pH

As amostras apresentaram diferenças pouco significativas (Figura 8), com pH entre 8,6 e 10,0, caracterizando-os como alcalino. No destilador forçado, houve um resultado um pouco superior que as amostras do destilador natural. Sá et al. (2012) obtiveram resultado semelhante, com o pH do lixiviado destilado entre 8,5 e 9,7 e associam o pH alcalino com a presença principalmente da amônia, que é transferida por *stripping* do lixiviado bruto para o efluente tratado.

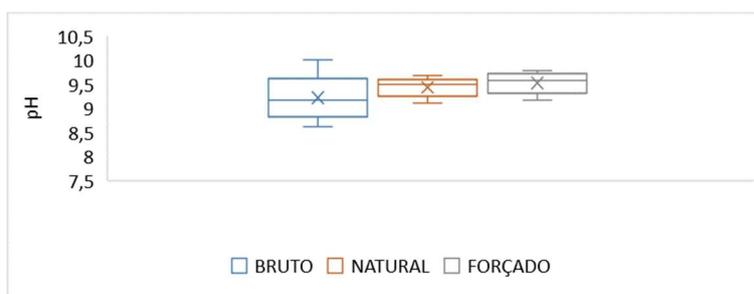


Figura 8: Resultados do parâmetro pH do lixiviado bruto e destilado natural e forçado.

Esses valores de pH sugerem que o lixiviado bruto encontrou-se na fase metanogênica, sendo convertidos em metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), elevando o pH e a temperatura do meio (DINIZ, 2010; TCHOBANOGLOUS et al., 1993) podendo trazer prejuízos para o ambiente (KIM et al., 2020).

Demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅)

Os dados demonstram que ocorreu variação significativa nos resultados da (DBO₅) entre as amostras do lixiviado bruto e dos destilados (Figura 9), mas ao comparar apenas as amostras tratadas, nota-se uma semelhança. A DBO₅ média para a destilação natural resultou em 9 mg L⁻¹ de O₂, enquanto para a destilação forçada, foi de 11 mg L⁻¹ de O₂, representando eficiência de remoção de 99,9 % para ambos.

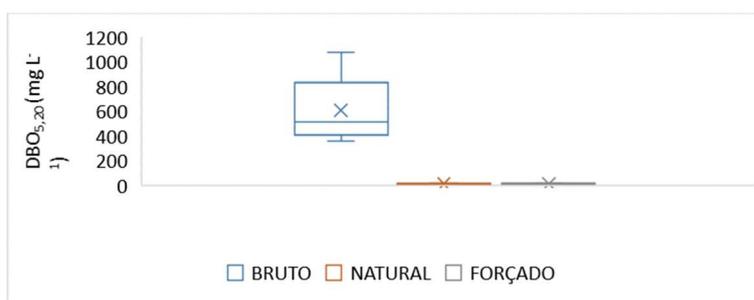


Figura 9: Resultados do parâmetro DBO_{5,20} do lixiviado bruto e destilado natural e forçado.

Alguns autores em 2020 obtiveram eficiência de remoção de DBO_5 em 95,9%. Bezerra et al. (2005) obteve DBO_5 final de 5 mg L^{-1} de O_2 , de acordo com a legislação brasileira. Já Sá (2008) também obteve eficiência de remoção de DBO_5 de 99%.

Segundo Scapin et al. (2013) devido a mudança de estado físico da água pela temperatura, a diferenciação dos teores de oxigênio dissolvido pode ser a responsável pela redução da demanda de oxigênio pelos microrganismos. Sendo assim, a Resolução CONAMA nº 357 de 2005 (CONAMA, 2005), estabelece que a DBO_5 deve ser no máximo de 5 mg L^{-1} . Já no caso de reuso na agricultura, Ferreira et al. (2019) propõe limite de 60 a 120 mg L^{-1} de O_2 , sendo assim, o lixiviado destilado está de acordo com o padrão para tal atividade.

Demanda química de oxigênio (DQO)

Observa-se na **Figura 10** a redução da DQO após a destilação natural e forçada. A DQO média do lixiviado após a destilação natural resultou em 38 mg L^{-1} de O_2 e a destilação forçada, em 57 mg L^{-1} de O_2 . Esses resultados indicam eficiência de remoção de 99,9%.

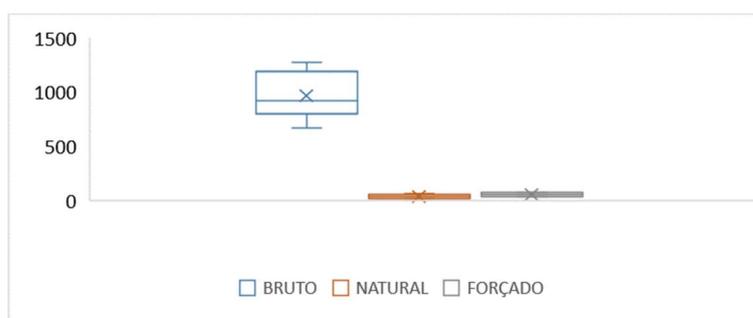


Figura 10: Resultados do parâmetro DQO do lixiviado bruto e destilado natural e forçado.

Oliveira et al. (2017) obtiveram um tratamento por destilação de lixiviado com 97% de eficiência de remoção de DQO. Resultado semelhante foi observado por Mees et al. (2018) com remoção de DQO superior a 98%. Além disso, Sá (2008) também encontrou eficiência, com 99% de remoção do parâmetro. Silva et al. (2019) obtiveram eficiência de remoção de DQO em 90%.

Nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal

O nitrogênio é um dos poluentes mais importante do lixiviado, principalmente em função dos diferentes estados de oxidação que pode assumir. Além disso, a toxicidade que a amônia oferece ao meio ambiente e a possibilidade de fomento do processo de eutrofização, o qual provoca queda do teor de oxigênio dissolvido na água (FENELON, 2011; JENZURA, 2017). Na Figura 11 o nitrito foi considerado como insignificante após o processo de destilação, apresentando concentração média de $19,83 \text{ mg. L}^{-1}$ no lixiviado bruto. Para o nitrato, o resultado foi inferior, com média de $2,73 \text{ mg. L}^{-1}$ e na ordem de $0,10 \text{ mg. L}^{-1}$ para a destilação natural e forçada. Já o nitrogênio amoniacal resultou em $1.414,83 \text{ mg. L}^{-1}$ para o lixiviado bruto e $61,67$ e $67,17 \text{ mg. L}^{-1}$ para a destilação natural e forçada, respectivamente.

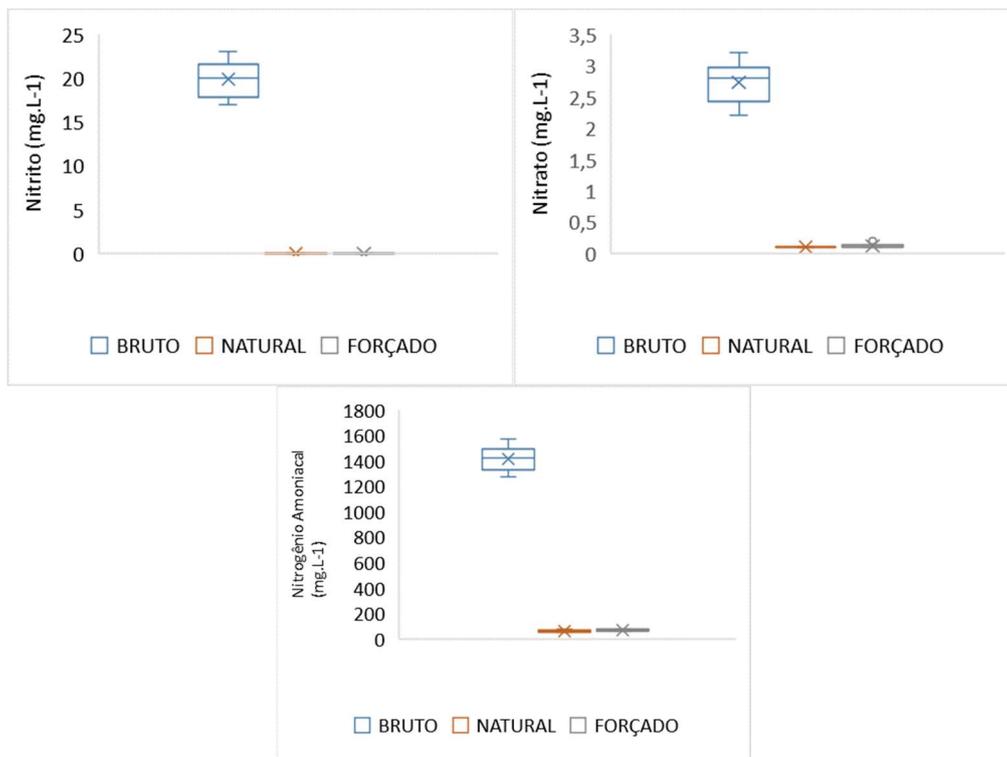


Figura 11: Resultados dos parâmetros nitrito, nitrato e nitrogênio amoniacoal do lixiviado bruto e destilado.

De acordo com Diniz (2010) o lixiviado proveniente de aterro sanitário que já atingiu a fase metanogênica apresenta elevada concentração de nitrogênio amoniacoal, podendo chegar a valores de 3.000 mg L⁻¹, sendo essa uma possível justificativa para tal resultado. Segundo Sá (2008), a amônia é transferida do lixiviado para o destilado por meio da adsorção da amônia na água. De modo geral, com o processo de destilação, observa-se a redução da concentração de nitrito, nitrato e de nitrogênio amoniacoal após o tratamento, indicando a efetividade do sistema.

Coliformes totais e E. coli

Os valores médios de coliformes totais e de E. coli para o lixiviado bruto foi de $1,3 \times 10^5$ NMP 100 mL⁻¹ e $2,5 \times 10^4$ NMP 100 mL⁻¹, respectivamente. Portanto, após os processos de destilação, o resultado de teste Colilert, para esses microrganismos foi de ausência, com eficiência de remoção de 100%.

A remoção ocorre devido ao aquecimento pela radiação solar no qual ocorre a desinfecção do líquido e reduz a contaminação, portanto, essa fonte energética ocasiona a destruição de microrganismos (SÁ, 2008).

Nascimento et al. (2018) demonstrou que houve 100% de remoção após a destilação, estando de acordo com padrão de potabilidade da legislação brasileira, pela USEPA e pela *Health Canada*. Sá (2008) observou a ausência de contaminações microbianas após a destilação no aterro da Muribeca em Recife/PE, Brito (2005) no aterro sanitário da Caximba, em Curitiba/PR e Campos (2002) no Aterro sanitário de Pirai/RJ. Já Soares (2004), obteve 100% de eficiência de remoção e Araújo et al. (2018) com 100% no tratamento de água para consumo.

Metais

Observa-se na Figura 12 que os metais pesados estão dentro da faixa encontrados em aterros

brasileiros com valores de Cromo de 0,003 mg/L a 0,8 mg/L, Chumbo de 0,01 mg/L a 2,8 mg/L, Zinco de 0,01 a 8,0 e Cobre de 0,005 mg/L a 0,6 mg/L (SOUTO et al., 2007).

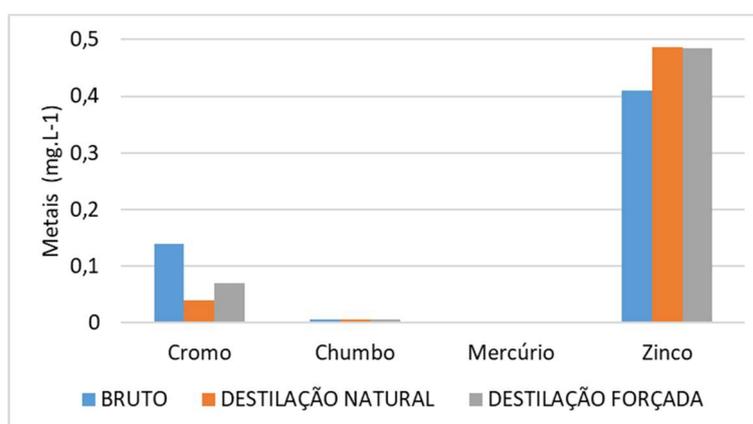


Figura 12: Resultados do parâmetro metais pesados do lixiviado bruto e destilado natural e forçado.

Diante dos resultados, estes se mostraram inferiores ao estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430 de 2011 (CONAMA, 2011). Quanto aos valores de referência apontados por Ferreira et al. (2019) em relação ao reuso agrícola, estes também se mostram inferiores, no qual para o Mercúrio tem-se limite de 0,002 mg L⁻¹, Cromo 0,05 a 0,10 mg L⁻¹ e Zinco 2,0 a 5,0 mg L⁻¹.

CONCLUSÕES

Com o experimento concluiu-se que a destilação natural diminuiu no período chuvoso quando houve menor radiação solar e precipitação e a destilação forçada não sofreu influência das condições climáticas. A destilação forçada obteve um rendimento de 84 L/dia e a destilação natural de 12 L/dia, portanto, a forçada com maior rendimento e referente aos índices de remoção dos parâmetros analisados todos se mostraram inferiores ao estabelecido pela legislação vigente.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019.** São Paulo: ABRELPE, 2019.

ALCANTRA, L. D. S.; CAMPOS, M. S.. Análise dos aspectos sazonais da nebulosidade no projeto de instalações fotovoltaicas fixas em Brasília-DF. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8. **Anais.** Fortaleza, 2020.

ALMEIDA, W. T. P.. **Influência de variáveis climáticas na destilação solar de lixiviado.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016.

ARAÚJO, G. M.; DAMASCENO, L. B. M.. Avaliação de um destilador solar simplificado de baixo custo visando o consumo humano. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL- SIBESA, 14. **Anais.**

Foz do Iguaçu, 2018.

BATISTA, M. M.; CAHINO, A. M.; LUCENA, L. G.; ANDRADE, M. M. A.; ROCHA, E. M. R.. Qualidade do efluente final do sistema de lagoas de estabilização no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7. **Anais.** Campina Grande, 2016.

BEZERRA, M. A. S.; MELO, J. L. S.; MELO, H. N. S.; JUCÁ, T. D. A.. Estudo das taxas de evaporação em destilador solar duas águas com inclinação de 20° e 45°. In: CONGRESSO INTERAMERICANO INGENIERIA QUÍMICA, 21. **Anais.** Lima, 2005.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 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. Brasília: DOU, 2010.

BRITO, I. A.. **Estudo de caso do Aterro sanitário da Caximba.** Monografia (Bacharelado em Ciências biológicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CAMPOS, J. C.. Tratamento do Chorume do Aterro sanitário de Pirai (RJ) utilizando Wetlands. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6. Anais. Vitória, 2002.

CARVALHO, E. K. F.. **Potabilização de água eutrofizada utilizando destilação solar**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2015.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430 de 13 maio 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n.357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Brasília: DOU, 2011.

CUIABÁ. **Plano Básico Ambiental**: programas ambientais. Cuiabá: Centro de Gerenciamento de Resíduos Cuiabá, 2015.

CUIABÁ. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do município de Cuiabá-MT**. Cuiabá: Prefeitura Municipal de Cuiabá, 2019.

DAMIANO, L.; JAMBECK, J. R.; RINGELBERG, D. B.. Municipal solid waste landfill leachate treatment and electricity production using microbial fuel cells. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v.173, p.472-485, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12010-014-0854-x>

DIA, O.; DROGUI, P.; BUELNA, G.; DUBÉ, R.. Strategic approach to prevent ammonia formation during electrocoagulation of landfill leachate obtained from a biofiltration process. **Separation and Purification Technology**, v.189, p.253-257, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.08.023>

DINIZ, D. L. L.. **Remoção de Nitrogênio Amoniacal de Lixiviado de aterro de resíduos sólidos por precipitação química com formação de Estrutiva**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

FENELON, F. F.. **Tratamento de lixiviados de aterro sanitário por evaporação natural em sistema controlado**: estudo em escala piloto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

FERREIRA, D. M.; NAVONI, J. A.; ARAÚJO, A. L. C.; TINOCO, J. D.; AMARAL, V. S.. Wastewater use in agriculture: Analytical limits of sewage for impact control in Brazil. **Rev. Caatinga**, v.32, n.4, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n421rc>

FRONZA, F. L.. **Redução da toxicidade de lixiviado de aterro sanitário por meio do tratamento em um destilador solar**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016.

GOMES, L. P.. Avaliação ambiental do tratamento de lixiviado de aterro sanitário combinado ou não com esgoto doméstico. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 7. Anais. Porto Alegre: Instituto Venturi, 2016.

GOMES, N. A.; ALMEIDA, M. V. A.; MELO, M. C.; MONTEIRO,

V. E. D.; OLIVEIRA, R.. Influência de parâmetros físico-químicos na composição de constituintes tóxicos em lixiviado de aterro sanitário. **Revista Matéria**, v.23, n.3, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0489>

HENDRYCH, J.; HEJRALOVÁ, R.; KROUŽEK, J.; ŠPAČEK, P.; SOBEK, J.. Stabilisation/solidification of landfill leachate concentrate and its residue obtained by partial evaporation. **Waste Management**, v.95, p.560-568. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.046>

IMMICH, V.. **Avaliação do uso de destilador solar piramidal ativo para produção de água para consumo humano em situações emergenciais**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2021.

JARDIM, N. S.. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 4 ed. São Paulo: CEMPRE, 2018.

JENZURA, N. T.. **Remoção de DQO, Nitrogênio e Fósforo de esgoto sanitário em reator de leito estruturado com aeração intermitente em fase única**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017.

KIM, S. H.; JEONG, S.; CHUNG, H.; NAM, K.. Mechanism for alkaline leachate reduction through calcium carbonate precipitation on basic oxygen furnace slag by different carbonate sources: Application of NaHCO₃ and CO₂ gas. **Waste Management**, v.103, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.019>

LIED, E. B.; VASCONCELOS, A. B.; TREVISAN, A. P.; HONÓRIO, J. F.; MOREJON, C. F. M.; ARCEGO, C. V.; SANTOS JUNIOR, E. L.. Destilador solar convencional para efluente agroindustrial. **Revista DAE**, v.66, n.211, 2018. DOI: <http://doi.org/10.4322/dae.2018.014>

LIMA, G. G. C.; LIMA, C. A. P.; MARINHO, P. R. M.; VIEIRA, F. F.. Monitoramento da eficiência de um destilador solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais. Natal, 2019.

LOZINSKI, D.; BOLYARD, S. C.; REINHART, D. R.; MOTLAGH, A. M.. Treatment of leachate organic matter through sunlight driven processes. **Waste Management**, v.94, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.015>

LUO, H. W.; WU, Y. C.; ZHAO, A. Q.; KUMAR, A.; LIU, Y. Q.; CAO, B.; YANG, E. H.. Hydrothermally synthesized porous materials from municipal solid waste incineration bottom ash and their interfacial interactions with chloroaromatic compounds. **J. Clean. Prod.**, v.162, p.411-419. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.082>

LUO, H.; ZENG, Y.; CHENG, Y.; HE, D.; PAN, X.. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. **Science of the Total Environment**, v.703, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135468>

MAO, X.; XIONG, L.; HU, X.; YAN, Z.; WANG, L.; XU, G.. Remediation of ammonia-contaminated groundwater in landfill sites with electrochemical reactive barriers: A bench scale study. **Waste Management**, New York, v.78, p.69-78,

2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.015>

MARTILDES, J. A. L.; FLORÊNCIO, P. R. C.; SILVA, A. F.; LIMA, R. A.; SILVA, R. A. F.; SILVA, E. M.; PAIVA, W.; SANTOS, L. L.. Identificação e avaliação de impactos ambientais na fase de operação do Aterro sanitário de Campina Grande-PB. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.6, n.3, p.13395-13415, 2020. DOI: <http://doi.org/10.34117/bjdv6n3-270>

MASSAROTTO, W. L.. **Avaliação de tecnologias para tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2010.

MEES, J. B. R.; FRONZA, F. L.; LIED, E. B.; CAVALLI, A.. Avaliação da redução da ecotoxicidade de lixiviado de aterro sanitário por meio do tratamento em um destilador solar. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL-SIBESA, 14. **Anais**. Foz do Iguaçu, 2018.

MELO, D. H. A.. **Otimização do tratamento de lixiviado de aterro sanitário via ozonização em reator de leito giratório em escala de bancada**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São João Del-Rei, Ouro Branco, 2019.

MORAVIA, W. G.. **Avaliação do tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de processo oxidativo avançado conjugado com sistema de separação por membranas**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

NASCIMENTO, F. T.; NASCIMENTO, C. A.; SPILKI, F. R.; STAGGEMEIER, R.; LAUER JÚNIOR, C. M.. Efficacy of a solar still in destroying virus and indicator bacteria in water for human consumption. **Rev. Ambiente & Água**, v.13, n.4, 2018. DOI: <http://doi.org/10.4136/ambi-agua.2084>

OLIVEIRA, D. M.. **Análise de aspectos ambientais do processo de evaporação de lixiviados de aterros sanitários**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

OLIVEIRA, J. T.; SANTOS, I. F.; MOREIRA, F. A.; LIMA, M. B. A.. Avaliação do rendimento do destilador solar no tratamento do lixiviado de aterro sanitário do município de Sete Lagoas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 9. **Anais**. São Paulo: Blucher, 2017.

PAIXÃO FILHO, J. L.. **Lixiviado de aterro sanitário: alternativas de tratamento para o cenário brasileiro**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

PAULI, A. R.. **Tratamento em duas fases na purificação de efluentes de lixiviados pela integração dos processos de eletrocoagulação e oxidação biológica**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2018.

RASOOL, M. A.; TAVAKOLI, B.; CHAIBAKHSH, N.;

PENDASHTEH, A. R.; MIRROSHANDEL, A. S.. Use of a plant-based coagulant in coagulation-ozonation combined treatment of leachate from a waste dumping site. **Ecological Engineering**, v.90, p.431-437, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.057>

ROCHA, F. L. M.; LAVOR, O. P.. Aplicação de equações diferenciais na evaporação de líquido com densidade variável. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE E SOCIEDADE, 1. **Anais**. Campina Grande, 2019.

SÁ, L. F.. **Evaporação natural do lixiviado do aterro da Muribeca através de um destilador solar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2008.

SÁ, L. F.; JUCÁ, J. F. T.; MOTTA SOBRINHO, M. A.. Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar. **Revista Ambiente & Água**. Taubaté, v.7, n.1, p.204-217, 2012. DOI: <http://doi.org/10.4136/ambi-agua.815>

SALLES, N. A.; SOUZA, T. S. O.. Aplicabilidade do Activated Sludge Model No. 1 (ASM 1) para simulação do cotratamento de esgoto sanitário e lixiviado de aterro sanitário em lagoas aeradas. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.25, n.2, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522020188723>

SANTOS, J. M.. **Evaporação forçada de lixiviados de aterro sanitário: uma análise das pesquisas desenvolvidas no âmbito nacional e internacional**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SCAPIN, L. A.; PANZIERA, A. G.; BERNARDI, E. C. S.; BURIOL, G. A.; SWAROWKY, A.. Viabilidade de um sistema de purificação de água com uso da radiação solar. **Disciplinarum Scientia**, v.14, n.2, 2013.

SILVA, A. D. S.. **Análise de componentes tóxicos em resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SILVA, R. A.; LESSA, L. C. P.; ALMEIDA, H. S.; LUCENA, W. M.; MACHADO, N. T.. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por meio de evaporação via destilação simples em escala de bancada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30. **Anais**. Natal, 2019.

SOARES, C.. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SOUTO, G. B.; POVINELLI, J.. Características de lixiviados de aterros sanitários no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24. **Anais**. Belo Horizonte, 2007.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, D.. **Integrated solid waste management: engineering and management issue**. McGraw-Hill, 1993.

Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157859378894733313/>