



# Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo

Water treatment plant sludge: possibility for soil application

L. B. G. A. Morselli\*; L. A. G. Carmo; M. S. Quadro; R. Andrezza

*Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 96010-610, Pelotas-RS, Brasil*

*\*luiza\_morselli@hotmail.com*

*(Recebido em 08 de fevereiro de 2022; aceito em 04 de maio de 2022)*

A crescente demanda por água potável, devido ao desenvolvimento econômico e populacional, ocasiona aumento na geração do lodo de estação de tratamento de água (ETA), que é um resíduo sólido Classe II A e deve receber um destino adequado ambientalmente, conforme a legislação brasileira NBR 1004/2004. Uma alternativa sustentável de descarte é a aplicação do lodo como substituto ao solo, fertilizante ou adsorvente de metais pesados em solos degradados. Objetivando fornecer parâmetros para o reaproveitamento do lodo de ETA Santa Bárbara (LSB), de Pelotas/RS, o resíduo foi caracterizado físico-quimicamente e sua geração foi estimada. A partir das caracterizações, foi analisado seu potencial agrônomo através da Resolução nº 498/2020 do CONAMA, seu potencial para adsorção de metais pesados, e possibilidade de uso em camada impermeabilizante e cobertura de aterros sanitários. A geração *per capita* do LSB, com teor de umidade de 94,96%, foi estimada em 315 L hab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Os metais pesados presentes no lodo apresentaram valores abaixo dos orientadores legais, entretanto, a presença de Al e Fe pode imobilizar o P, nutriente necessário às plantas. O lodo apresentou capacidade de troca catiônica para servir como adsorvente de metais pesados na remediação de solos degradados, e apresentou matéria orgânica, macro e micronutrientes necessários ao desenvolvimento dos vegetais. Como camadas de aterros sanitários, o lodo precisa ser misturado a outros materiais com menores coeficientes de permeabilidade. A reciclagem do lodo de ETA em solos agrícolas, degradados e em aterros sanitários são alternativas promissoras de seu manejo sustentável e reduzem seu impacto ambiental.

Palavras-chave: lodo de ETA, resíduo, reciclagem.

The growing demand for drinking water, due to economic and population development, causes an increase in the generation of water treatment plant sludge (WTPS), which is a solid waste Class II A, and should receive an environmentally appropriate destination, according to Brazilian legislation NBR 10004/2004. A sustainable disposal alternative is the application of stake as a substitute to soil, fertilizer or as adsorbent of heavy metals in degraded soils. Aiming to provide parameters for the reuse of WTPS Santa Bárbara, from Pelotas/RS, the waste was characterized physical and chemically and its generation was estimated. From the characterizations, its agronomic potential was analyzed through CONAMA Resolution nº 498/2020, its potential for adsorption of heavy metals, and the possibility of use in waterproofing layer and coverage of landfills. The per capita generation of WTPS Santa Bárbara, with moisture content of 94.96%, was estimated at 315 L hab<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The heavy metals present in the sludge presented values below the legal advisors, however, the presence of Al and Fe can immobilize the P, nutrient necessary to the plants. The waste showed cation exchange capacity to serve as adsorbent of heavy metals in the remediation of degraded soils, and presented organic matter, macro and micronutrient substances necessary for the development of vegetables. Like landfill layers, the sludge needs to be mixed with other materials with lower permeability coefficients. The recycling of WTPS in agricultural, degraded soils and landfills are promising alternatives to its sustainable management, and reduce its environmental impact.

Key-words: WTP sludge, waste, recycling.

## 1. INTRODUÇÃO

A água potável é essencial à saúde humana, um direito humano fundamental e um componente eficaz para a proteção à saúde [1]. O processo de potabilização da água gera um resíduo, o lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), que se classifica pela norma ABNT NBR 10004:2004 [2] como resíduo sólido Classe II A, não perigoso, não inerte, que pode ter

propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, e que, portanto, deve receber um destino adequado conforme legislação ambiental brasileira [3].

Segundo Caniani et al. (2013) [4] a geração de lodo de ETA no mundo todo é acima de 10.000 t dia<sup>-1</sup>. Apesar da maioria das ETAs brasileiras não dimensionar a quantidade de lodo gerado, não analisar suas características e não o descartar de maneira adequada, a quantificação de sua geração é muito importante, pois fornece parâmetros para análise de viabilidade econômica de sua reciclagem [5].

O alto custo é um dos fatores mais relevantes na definição do destino do lodo de ETA, visto que o lançamento em rios é o método mais barato, apesar de haver parâmetros mais rigorosos na legislação brasileira para o descarte desse resíduo em corpos hídricos, essa vem sendo a escolha mais utilizada pelas ETAs brasileiras [6]. Para Hussein et al. (2021) [7] a gestão ambiental do lodo de ETA, evitando o seu descarte em corpos hídricos, é uma prioridade urgente para muitos países do mundo.

O lançamento do lodo em corpos hídricos devolve os materiais anteriormente removidos, mas por outro lado, os químicos utilizados facilitam a sedimentação desses materiais, causando assoreamento dos rios, baixando a qualidade da água, podendo causar impactos à vida aquática, e causar eutrofização dos corpos hídricos pelos nutrientes presentes [6, 7]. Quando o lodo de ETA é descartado na água, não só a qualidade da água, mas a do solo também é afetada, há traços de metais que se acumulam no solo irrigado com canais que recebem esse lodo, e no verão ocorre alta acumulação de nutrientes, metais, carga orgânica e bactérias na água [7, 8].

Entretanto, algumas formas eficazes de descarte podem ser a aplicação do lodo de ETA no solo, como seu substituto [9], como forma de correção do pH, ou fertilizante [1], ou ainda, o uso do lodo como adsorvente de contaminantes ambientais [10-13] e de metais pesados em solos degradados [14-17]. O lodo de ETA possui capacidade de adsorção de ânions, servindo como adsorvente de contaminantes e de metais pesados na remediação de áreas contaminadas [18-20].

Para Shah et al. (2020) [21] a adição do lodo de ETA no solo melhora as propriedades físicas do solo. Considerando que os lodos de sulfato de alumínio proporcionam uma maior porosidade do solo, maior retenção de umidade, maior coesividade, a aplicação do lodo de ETA no solo pode ser feita de forma a esparramá-lo no solo natural, ou em solo agrícola, de forma líquida, semissólida ou sólida [6].

A inexistência de legislações específicas para a disposição do lodo de ETA no solo torna necessário o embasamento na Resolução nº 498/2020 do CONAMA [22], a qual estabelece parâmetros para o descarte, capacidade máxima de aplicação, valores de concentrações máximas de substâncias inorgânicas e patógenos para os resíduos gerados em Estações e Tratamento de Esgoto e seus produtos derivados, classificados como não perigosos, em solos de uso agrícola [23]. A legislação considera, para a aplicação biossólidos em solos, os seguintes aspectos: potencial agrônômico; redução de atratividade de vetores, substâncias químicas e qualidade microbiológica [22].

Para Ranković et al. (2020) [1], o lodo de ETA mostra potencial para uso como fertilizante no solo, sendo necessário avaliar sua composição de metais pesados e patógenos. Para Botero et al. (2009) [15] o lodo de ETA possui potencial agrícola, no entanto seu aproveitamento depende das características da água bruta e do coagulante utilizado, e o potencial de remoção de metais tóxicos de solos degradados depende da quantidade de substâncias húmicas presentes.

Objetivando o fornecimento de parâmetros para o reaproveitamento do lodo de ETA Santa Bárbara (LSB), realizou-se uma caracterização físico-química e estimou-se sua geração. Foi analisado seu potencial agrônômico, através da Resolução nº 498/2020 do CONAMA [22], seu potencial de adsorção de metais pesados, através de sua capacidade de troca catiônica (CTC), e seu coeficiente de permeabilidade, visando seu emprego em camadas de impermeabilização e de cobertura de aterros sanitários.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A coleta do LSB *in natura* ocorreu na Estação de Tratamento de Água Santa Bárbara, do SANEP, localizada na rua Joana Neutzling Levien, nº 1152, no bairro Três Vendas, na cidade de

Pelotas. A coleta seguiu procedimentos da norma ABNT NBR 10007 [24]. O resíduo foi coletado em galões de 20L e sua secagem ocorreu em estufa microprocessada de modelo Q317M, sob a temperatura de  $(100 \pm 5)$  °C em formas metálicas. Posteriormente, o lodo foi destorroado em moedor de jarro em cerâmica sintetizada, modelo SL-34/1-IFT, por quatro horas. Os parâmetros analisados no LSB estão descritos na Tabela 1, juntamente com seus procedimentos metodológicos.

Tabela 1 - Análises realizadas e seus respectivos métodos.

Parâmetros analisados	Metodologia aplicada/limite de detecção
Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Fixos (STF) e Sólidos Totais Voláteis (STV) ( $\text{mg L}^{-1}$ e %)	Método gravimétrico da <i>Standard methods for the examination of water &amp; wastewater</i> 2540-E [25]
Umidade (%)	Método gravimétrico da <i>Standard methods for the examination of water &amp; wastewater</i> 2540-E [25]
Granulometria (%)	Método do Densímetro de Bouyoucos (1927) [26]
Coefficiente de Permeabilidade (CP) ( $\text{cm s}^{-1}$ )	Em permeâmetro de carga constante, conforme ABNT NBR 14545 (2000) [27]
Densidade Aparente	Método do anel volumétrico de Kopecky [28]
Carbono Orgânico (CO)	Combustão úmida [28]
Matéria Orgânica (MO)	Combustão úmida [28]
pH	<i>Standard methods for the examination of water &amp; wastewater</i> - 4500-H+ A [25]
Capacidade de Troca Catiônica em pH7 ( $\text{CTC}_7$ );	Tedesco et al. (1995) [29]
Nitrogênio (TKN) % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Kjedahl/ 0,01%
Fósforo Total % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)/ 0,01%
Potássio Total % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 0,01%
Cálcio Total % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 0,01%
Enxofre % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 0,01%
Magnésio Total % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 0,01%
Ferro % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 4mg/kg
Manganês % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 4mg/kg
Alumínio % ( $\text{mm}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 20mg/kg
Boro total ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Digestão seca/ ICP-OES/ 1mg/kg
Sódio total ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 10mg/kg
Vanádio total ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Digestão úmida nítrico-perclórica/ ICP-OES/ 0,2mg/kg

O potencial do lodo de ETA para ser aplicado em solo agrícola seguiu especificações da Resolução nº 498/2020 do CONAMA [22]. A estimativa de geração de lodo de ETA líquido foi realizada conforme observações visuais e medidas extraídas dos tanques de decantação. O software estatístico utilizado foi o WinStat.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Quantificação estimada de geração de lodo

Os valores encontrados para as análises físicas realizadas com o LSB estão na Tabela 2, e na Tabela 3 constam os resultados dos parâmetros químicos obtidos. O LSB *in natura* apresentou 95% de umidade, portanto dentro dos 5% de sólidos se encontram as frações obtidas na análise

granulométrica: 67,94% de areia, 5,16% de silte e 26,9% de argila (Tabelas 2 e 5). Valores esses que estão diretamente relacionados à perda de material do solo da barragem Santa Bárbara. Dado que a coleta do resíduo se deu após longos períodos de chuvas, acredita-se que, em períodos de estiagem, a retirada do solo seja maior, pois se faz necessária a captação de água bruta de maiores profundidades.

Tabela 2 - Parâmetros físicos do lodo de ETA Santa Bárbara (LSB).

Determinações	Resultados
ST (%)	5,04 ± 0,1067*
ST (mg L <sup>-1</sup> )	51607 ± 1144,6780*
STF (mg L <sup>-1</sup> )	38302 ± 1490,4656*
STV (mg L <sup>-1</sup> )	13305 ± 1628,1876*
Umidade (%)	94,96 ± 0,1067*
Densidade (kg m <sup>-3</sup> )	726
CP (cm s <sup>-1</sup> )	1,67.10 <sup>-4</sup>

\*Valores são as médias de cinco repetições ± desvio padrão; ST: Sólidos Totais; STF: Sólidos Totais Fixos; STV: Sólidos Totais Voláteis; CP: Coeficiente de Permeabilidade.

Tabela 3 - Resultados de análises químicas do lodo de ETA Santa Bárbara (LSB).

Determinações	Resultados	Determinações	Resultados
Carbono Orgânico % (m m <sup>-1</sup> )	9,6	Ferro % (m m <sup>-1</sup> )	2,4
Nitrogênio (TKN) % (m m <sup>-1</sup> )	0,90	Manganês % (m m <sup>-1</sup> )	0,15
Fósforo Total % (m m <sup>-1</sup> )	0,53	Magnésio Total % (m m <sup>-1</sup> )	0,15
Potássio Total % (m m <sup>-1</sup> )	0,20	Boro total (mg kg <sup>-1</sup> )	4
Cálcio Total % (m m <sup>-1</sup> )	0,10	Sódio total (mg kg <sup>-1</sup> )	863
Enxofre % (m m <sup>-1</sup> )	0,26	Vanádio total (mg kg <sup>-1</sup> )	52

Após o esvaziamento da água dos decantadores para limpeza dos mesmos (Figura 1), pode-se visualizar e medir a profundidade de lodo no dia da coleta (Figura 2). Foi possível estimar a geração de LSB líquido em 3.000 m<sup>3</sup> a cada 20 dias.



Figura 1 - Decantadores com água no início do esvaziamento para limpeza.



Figura 2 - Decantadores com lodo de ETA no fundo.

Considerando pelo menos 18 limpezas por ano, tem-se em torno de  $54.000 \text{ m}^3$  de lodo líquido por ano ou  $147,95 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ . Valor abaixo da geração de  $153,42$  a  $542,75 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ , encontrados por Mattos e Girard (2013) [30] para ETA Bolonha, em Belém/PA. Ao considerar a vazão de 40 milhões de litros de água tratada por dia [31], a geração de lodo líquido com teor de sólidos de 5,04% representa um valor de 0,37% do volume de água tratada pela ETA Santa Bárbara. Valor dentro do estabelecido por Richter (2001) [6], onde a geração de lodo geralmente se encontra entre 0,2 e 5% do volume de água tratada pela ETA, abaixo de 1,87%, encontrado por Mattos e Girard (2013) [30] e abaixo de 6,5% da ETA Rio Grande, em São Paulo, encontrado por Marguti et al. (2018) [32].

Atentando para a quantidade de sólidos de 5% encontrada no LSB e a densidade de  $726 \text{ kg m}^{-3}$  (Tabela 2), pode-se estimar uma geração de lodo seco anual de  $0,13 \text{ kg m}^{-3}$  de água tratada. A geração de massa seca do LSB pode ser medida em mais de  $1.960 \text{ t ano}^{-1}$ , valor bem abaixo da ETA de Ghaziabad, na Índia, a qual gera  $29.700 \text{ t ano}^{-1}$  [5].

Conforme IBGE (2019) [33] Pelotas possuía, em julho de 2019, uma população estimada em 343.132 pessoas. Tendo em vista que a ETA Santa Bárbara abastece 50% da população da cidade [34], pode-se estimar a geração de lodo de ETA líquido per capita em aproximadamente  $0,31474 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , ou  $314,74 \text{ L hab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

### 3.2 Potencial de aplicação em solo agrícola

De acordo com a Resolução nº 498/2020 do CONAMA [22], o lodo de ETA se classifica como resíduo Classe A, pois foram seguidos procedimentos de regime de tratamento “C”, aplicado para lodos com teor de ST menor que 7% e que passam por aquecimento de no mínimo  $50^\circ\text{C}$ , como processo de redução de patógeno [22]. A Tabela 4 apresenta as concentrações de substâncias encontradas no LSB, os requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto ou produto derivado destinado ao uso na agricultura e a carga acumulada teórica permitida para a sua aplicação.

Os valores máximos de substâncias inorgânicas encontradas no lodo LSB seco (Tabela 4) respeitaram os limites máximos de concentração estabelecidos pela legislação quanto ao uso agrícola do resíduo para classe 1. O LSB está adequado para o uso conforme a carga máxima acumulada permitida para a aplicação em  $\text{mg m}^{-2}$  anual e a carga máxima acumulada de substâncias inorgânicas em áreas degradadas. O lodo analisado por Castilhos Júnior et al. (2011) [35] também se mostrou adequado aos padrões de legislações brasileiras para metais, o que, para os autores, é consequência da ausência de efluentes industriais na água bruta.

Tabela 4 - Metais tóxicos do LSB em comparação com a Resolução nº 498/2020 do CONAMA [22].

Substâncias	LSB (mg kg <sup>-1</sup> )	Classe 1 (mg kg <sup>-1</sup> )	TMA (mg m <sup>-2</sup> )	CMA – solos de áreas degradadas (mg m <sup>-2</sup> )
Alumínio	140000	-	-	-
Arsênio	<2	41	200	2000
Bário	141	1300	1300	13000
Cádmio	<0,2	39	190	1900
Chumbo	<2	300	1500	15000
Cobre	23	1500	7500	75000
Cromo	16	1000	15000	150000
Mercúrio	0,04	17	85	850
Molibdênio	<0,2	50	65	650
Níquel	16	420	2100	21000
Selênio	<4	36	500	5000
Zinco	70	2800	14000	140000

LSB: Lodo da Estação de Tratamento de Água Santa Bárbara; TMA: Taxa Máxima Anual (dados adaptados de kg ha<sup>-1</sup> para mg m<sup>-2</sup>); CMA: Carga Máxima Acumulada de substâncias inorgânicas em áreas degradadas (dados adaptados de kg ha<sup>-1</sup> para mg m<sup>-2</sup>).

Pretendendo analisar a disposição do LSB seco em estufa a 105°C, não foram analisados seus aspectos bacteriológicos e patogênicos. Para que o resíduo seja considerado estável, conforme legislação, a relação entre os SV e os ST deve ser inferior a 0,70. Como o resultado encontrado foi de 0,2578, o LSB se considera estável para aplicação em solo agrícola.

O LSB apresentou 140.000 mg kg<sup>-1</sup> de Al, substância presente no coagulante, entretanto a Resolução nº498/2020 do CONAMA [22] não estabelece valores para o elemento e sua fração disponível, fator importante ao se considerar o descarte desse resíduo no solo agrícola. O Al é altamente tóxico ao meio ambiente e à diversas culturas [36, 37] e quando solubilizado, prejudica o sistema radicular das plantas, debilitando os vegetais, causando deficiência nutricional e influenciando de forma negativa a absorção de nutrientes como o P, importante nutriente para o crescimento vegetal [38, 39].

Para Richter (2001) [6], a restrição do uso de lodo com Al está na sua tendência de fixação de P, evitando que o nutriente seja assimilado pelas raízes das plantas, sendo recomendável a aplicação máxima de 2,2 a 4,4 kgm<sup>-2</sup> de lodo nesse caso. Além do Al, o Fe também pode reagir com o P formando fosfatos insolúveis, tornando-os indisponíveis às plantas.

A aplicação de lodo de ETA juntamente com lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em solo agrícola, realizada por Tavares et al. (2019) [40], demonstrou que o aumento da concentração de Al do resíduo aplicado foi proporcional à redução da germinação das sementes de *Lactuca sativa*. Mas que, conforme os autores, o lodo de ETE colaborou para a remoção do Al, fornecendo MO ao composto a partir de técnicas de vermicompostagem. Para Bittencourt et al. (2012) [14], apesar da significativa quantidade de 6,4% de Al no lodo de ETA, as dosagens de 24, 37 e 61 mg ha<sup>-1</sup> resultaram em dosagens de Al relativamente pequenas, comparadas com solos paranaenses estudados.

Para Oliveira et al. (2015) [41], o lodo de ETA foi capaz de reduzir em 20% o índice de saturação do solo por Al, atuando como agente cimentante e coagulante das partículas, proporcionando maior porosidade ao solo, favorecendo sua estrutura e o desenvolvimento de plantas. Para Teixeira et al. (2007) [42] o lodo de ETA pode elevar muito o pH do solo, resultando na indisponibilidade de micronutrientes às plantas. No entanto essa afirmação depende do pH do resíduo aplicado. Bittencourt et al. (2012) [14] analisaram a aplicação de lodo de ETA, com presença e ausência de lodo de ETE, em solo degradado, na produtividade de milho e nas características de fertilidade do solo, no entanto, o lodo de ETA sozinho não apresentou produtividade para o milho, mas a aplicação de lodo de ETE em conjunto, foi favorável à dinâmica do N do solo, neutralizou o Al trocável, elevou o Ca, C, pH, P e a saturação de bases, reduzindo, desta forma, a acidez do solo.

Segundo Malavolta et al. (1997) [43] os micronutrientes considerados essenciais às plantas, entretanto exigidos em proporções pequenas, são: B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni e Zn, e os macronutrientes considerados essenciais são: N, P, K, Ca, Mg, S. Esses nutrientes são absorvidos da solução do solo pelo sistema radicular das plantas em concentrações limitadas entre  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $6,0 \text{ mg kg}^{-1}$  de matéria seca [43]. O LSB apresenta micro e macronutrientes necessários às plantas, sendo que os quatro elementos mais presentes e úteis para as plantas, em lodos de ETA, são C, N, P e K. São elementos indesejáveis: os inorgânicos, contaminantes químicos, e microrganismos patogênicos, mas as maiores restrições para uso agrícola são os metais pesados e os patógenos presentes nos lodos [44].

Ferreira et al. (2017) [23] concluíram que o lodo de ETA aplicado em Latossolo com o cultivo de capim Tifton demonstrou baixa produtividade e sintomas de toxicidade por Mn e Fe, concluindo que o resíduo estudado não apresentou potencial de aplicação agrônômica. A presença de 2,4% de Fe no LSB pode inibir a adsorção de Zn pelas plantas, inclusive por ser o micronutriente de maior teor em solos brasileiros [45], intensificando sua presença. Sendo necessário, portanto, estudos voltados diretamente para cultivares capazes de sobreviver com maiores teores de Fe, ou a aplicação de lodo em solos com baixa presença do elemento. Alguns pesquisadores analisaram lodos de ETAs e o aplicaram no solo (Tabela 5).

Tabela 5 - Comparação de características físico-químicas de lodos de ETA.

Pesquisas	pH	MO (%)	CTC ( $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ )	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
<b>LSB</b>	6,2	16,21	13,46	67,94	5,16	26,9
<b>Gonçalves et al. (2016)</b>	5,1	31,56	16,95	-	-	-
<b>Shah et al. (2020)</b>	8,4	0,78	-	10	50	40
<b>Souza et al. (2017)</b>	6,8	8,2	12,2	33,1	33,9	33

LSB: Lodo Santa Bárbara; MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica.

O pH encontrado para o LSB seco foi de 6,2 (Tabela 5), dentro dos parâmetros estabelecidos por Richter (2001) [6], onde os lodos de ETA de Al possuem características de pH entre 6 e 8. Os valores de pH variaram na literatura, visando o uso de lodo no solo, entre 5,1 e 6,8. A MO é uma grande fonte de N para as plantas, constitui a fração coloidal do solo e é de grande importância, pois tem poder elevado de adsorção de cátions, retendo cátions de forma trocável [45]. Define-se a capacidade de troca catiônica (CTC) como a capacidade que os colóides do solo possuem para reter cátions, sendo diretamente dependente da quantidade de cargas negativas presentes [45], são retidos, portanto, nutrientes e metais pesados.

A  $\text{CTC}_7$  de  $13,46 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Tabela 5) encontrada no LSB está relacionada à quantidade de MO (16,21%) encontrada e aos argilominerais encontrados na fração de 26,9% de argila. A CTC do LSB foi abaixo da encontrada por Gonçalves et al. (2016) [46] para o lodo de Londrina/PR. Este tipo de característica é balizado pelo material de origem dos solos da região da ETA e da fonte de captação de água.

É determinante que a aplicação de lodos de ETAs seja feita em cultivares com capacidade de desenvolvimento em solos com concentrações relativamente altas de Fe e Al [47], ou que seja feito um tratamento para a diminuição de Al e Fe disponíveis no lodo, tornando-o apto a ser aplicado em solos agrícolas em maiores quantidades.

### 3.3 Potencial de adsorção de contaminantes em solo degradado

Ao considerar a aplicação do lodo de ETA em solos degradados é muito importante a realização de análises de metais pesados, a presença de MO e argilominerais, essenciais à CTC do resíduo, tendo em vista que a retenção de metais pesados depende da quantidade de cargas negativas presentes no solo e no resíduo aplicado [45].

A  $\text{CTC}_7$  encontrada para o LSB (Tabela 5) demonstra o potencial de sua aplicação em solos degradados e contaminados com metais pesados, por exemplo, como foi o caso de Souza et al.

(2017) [17], comprovando o poder de adsorção de Pb e Cd do lodo de São Carlos/SP. Ao comparar as características obtidas por Souza et al. (2017) [17] e o LSB, obtêm-se valores muito próximos de fração de argila e pH (Tabela 5), no entanto o LSB possui maior MO, um dos fatores citados pelos autores como responsável pelo poder de adsorção [17]. Se por um lado o alumínio presente no lodo de ETA pode ser prejudicial à nutrição das plantas pois retira o P disponível, ele pode agir como adsorvente do mesmo elemento quando em excesso, evitando a eutrofização de corpos hídricos [12]. Para Haynes e Zhou (2015) [16], a aplicação de lodo de ETA no solo contribui para a redução do P disponível e de metais pesados durante a compostagem realizada.

### 3.4 Potencial de aplicação em aterro sanitário

Para aplicação do lodo em aterro sanitário como substituto ao solo, em camada impermeabilizante, ou como cobertura, duas propriedades muito importantes são o coeficiente de permeabilidade e a CTC. A norma ABNT NBR 13.896 (1997) [48] especifica que, para plano de encerramento ou cobertura de aterros sanitários de resíduos não perigosos, o material utilizado deve possuir um coeficiente de permeabilidade (CP) inferior ao solo natural da área do aterro. E, para a camada impermeabilizante do aterro, o material de predominância do subsolo deve possuir um CP inferior a  $5 \cdot 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ , não sendo avaliada a CTC do material. Para a cobertura de aterros sanitários inexistem normas brasileiras a respeito de padrão geotécnico a ser aplicado.

O LSB apresentou CP de  $1,67 \cdot 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ , superior à legislação e inadequado para ser utilizado sozinho em camada impermeabilizante de aterro sanitário, entretanto, semelhante aos valores de  $k = 10^{-8}$  e  $10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  ou  $k = 10^{-6}$  e  $10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ , encontrados para o lodo de ETA de Caniani et al. (2013) [4]. O LSB ainda apresentou CP inferior ao encontrado para o lodo de alumínio da Malásia, analisado por Bashar et al. (2019) [49], com CP igual a  $4,79 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  ou  $4,79 \cdot 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ . O alto valor de permeabilidade do LSB, inadequado as normas para camada impermeabilizante de aterro sanitário, está relacionado ao tamanho dos grãos do resíduo, devido ao alto teor de areia apresentado (Tabela 5).

Com os resultados apresentados, há uma promissora proposta de que o LSB poderia ser misturado ao solo natural, com menor permeabilidade para esse emprego, como foi realizado na pesquisa de Castilhos Júnior et al. (2011) [35], os quais encontraram um valor de coeficiente de permeabilidade de  $k = 1,24 \cdot 10^{-7} \text{ cm s}^{-1}$  para a mistura em 1:1 de solo e lodo de ETA, comprovando que a mistura se enquadrava na norma. Contudo, há a necessidade de novos trabalhos e testes com a adição de diferentes concentrações e proporções, e também visando analisar o efeito dos contaminantes apresentados no LSB nas plantas, e dinâmicas químicas do solo e soluções do solo.

## 4. CONCLUSÃO

Os metais tóxicos presentes no LSB apresentaram valores abaixo dos orientadores pela legislação ambiental para disposição no solo, demonstrando a possibilidade de sua aplicação, em solos agrícolas. Além da matéria orgânica, o lodo possui macro e micronutrientes necessários ao desenvolvimento dos vegetais. A aplicação do LSB no solo, sem a redução da quantidade de Al, pode ser viável em áreas cujas cultivares sejam capazes de sobreviver na presença de elevadas quantidades de Al e Fe. Além disso, a aplicação de calcário para a elevação do pH, é uma possibilidade para eliminar a toxicidade do Al às cultivares. A redução da alta concentração de Al melhoraria a qualidade do resíduo e ampliaria a quantidade possível de sua aplicação em solos agricultáveis.

O LSB, infelizmente não pode ser utilizado sozinho como camadas de aterros sanitários, mas a sua mistura com solo local poderia ser avaliada, melhorando os coeficientes de permeabilidade e enquadrando-o o como substituto de solo para essa aplicação. Trabalhos futuros podem ser realizados com a análise do lodo quanto à sua capacidade de adsorção de metais tóxicos presentes em resíduos urbanos, depositados nos aterros sanitários.

O manejo sustentável do LSB pode ser feito, também, por meio da sua aplicação em solos contaminados ou degradados, na remediação de áreas degradadas, tendo em vista o potencial de adsorção de metais pesados e nutrientes, demonstrado pela CTC encontrada, evitando a contaminação de lençóis freáticos e de corpos hídricos.

Ao utilizar o lodo de ETA como camadas de aterro sanitário, solo degradado e solo agrícola, promove-se a redução de extração de solo natural e de matérias-primas para a fabricação de fertilizantes, por exemplo, além de promover uma destinação ambientalmente correta para um resíduo que possui sua geração em crescimento proporcional ao desenvolvimento econômico dos centros urbanos.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ranković B, Sagatova A, Vujčić I, Mašić S, Veljović Đ, Pavićević V, et al. Utilization of gamma and e-beam irradiation in the treatment of waste sludge from a drinking water treatment plant. *Rad Phys Chem.* 2020 Dec;177:109174. doi: 10.1016/j.radphyschem.2020.109174
2. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro (RJ): ABNT, 2004.
3. Maraschin M, Ferrari KFSH, da Silva APH, Carissimi E. Aluminum sludge thickening: Novel helical pipes for aggregation by dual flocculation and thickening by filtration applied to water treatment plants. *Separat Pur Technol.* 2020 Jun;241:116560. doi: 10.1016/j.seppur.2020.116560
4. Caniani D, Masi S, Mancini IM, Trulli E. Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications. *Waste Manag.* 2013 Jun;33(6):1461-8. doi: 10.1016/j.wasman.2013.02.007
5. Ahmad T, Ahmad K, Alam M. Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. *Env Monitor Assess.* 2017 Sep;189(9):453. doi: 10.1007/s10661-017-6166-1
6. Richter CA. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo (SP): Editora Edgard Blücher LTDA.; 2001.
7. Hussein AM, Mahmoud RK, Sillanpää M, Abdel Wahed MSM. Impacts alum DWTPs sludge discharge and changes in flow regime of the Nile River on the quality of surface water and cultivated soils in Fayoum watershed, Egypt. *Sci Total Environ.* 2021 Apr;766:144333. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144333
8. Wasserman JC, Silva LO, de Pontes GC, Lima EP. Mercury contamination in the sludge of drinking water treatment plants dumping into a reservoir in Rio de Janeiro, Brazil. *Env Sci Pollut Res.* 2018 Oct;25:28713-24. doi: 10.1007/s11356-018-2899-9
9. Lucena LCL, Silva JDA, Marinho Filho PGT, Portela MG. Monitoramento de parâmetros físicos e ambientais de camadas de solo estabilizadas com lodo de eta e de ete. *Rev Agr Meio Amb.* 2017 Jul;10(3):873-90. doi: 10.17765/2176-9168.2017v10n3p873-890
10. Jo JY, Choi JH, Tsang YF, Baek K. Pelletized adsorbent of alum sludge and bentonite for removal of arsenic. *Environ Pollut.* 2021 May;277:116747. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116747
11. Kang S, Choi JH, Park JG, Baek K. Pellet adsorbent derived from molasses and dewatered alum sludge for arsenic removal. *J CO2 Util.* 2019 Oct;33:31-6. doi: 10.1016/j.jcou.2019.05.002
12. Muisa N, Nhapi I, Ruziwa W, Manyuchi MM. Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: A review. *J Water Proc Eng.* 2020;35:101187. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101187
13. Ren B, Lyczko N, Zhao Y, Nzihou A. Integrating alum sludge with waste-activated sludge in co-conditioning and dewatering: a case study of a city in south France. *Env Sci Pollut Res.* 2020 May;1;27(13):14863-71. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126010
14. Bittencourt S, Serrat BM, Aisse MM, Marin LMKS, Simão CC. Aplicação de lodos de estação de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. *Rev Eng Sanit Amb.* 2012 Jul;17(13):315-24.

15. Botero G, dos Santos A, Oliveira LC, Rocha JC. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. *Quim Nova*. 2009 Ago;32(8):2018-22. doi: 10.1590/s0100-40422009000800007
16. Haynes RJ, Zhou YF. Use of alum water treatment sludge to stabilize C and immobilize P and metals in composts. *Envir Sci Pollut Res*. 2015 Sep;22(18):13903-14. doi: 10.1007/s11356-015-4517-4
17. Souza TMM, Almeida Filho A. Caracterização físico-química do resíduo (lodo) de ETA, no período de seca, em Várzea Grande - MT. *E&S Eng Sci*. 2017 Jan;6(1):74-85. doi: 10.18607/ES20176072
18. Hua T, Haynes RJ, Zhou YF. Competitive adsorption and desorption of arsenate, vanadate, and molybdate onto the low-cost adsorbent materials alum water treatment sludge and bauxite. *Env Sci Pollut Res*. 2018 Dec;25(34):34053-62. doi: 10.1007/s11356-015-4517-4
19. Tony MA. Zeolite-based adsorbent from alum sludge residue for textile wastewater treatment. *Int J Env Sci Technol*. 2020 May;17(5):2485-98. doi: 10.1007/s13762-020-02646-8
20. Yang Y, Wang J, Zhao Y, Tang C, Liu R, Shen C. Can phosphorus adsorption clog an alum sludge-based biofiltration system? Evidence and insight. *J Chem Technol Biotechnol*. 2021 Jan;96(1):180-7. doi: 10.1002/jctb.6525
21. Shah SAR, Mahmood Z, Nisar A, Aamir M, Farid A, Waseem M. Compaction performance analysis of alum sludge waste modified soil. *Const Build Mater*. 2020 Jan;230:116953. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116953
22. Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. 21 ago 2020;161(Seção 1):265-69. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>
23. Ferreira ACDS, Silva JBG, Pereira RDO, Oliveira APS. Avaliação do desenvolvimento do capim Tifton cultivado em latossolo adubado com lodo de ETA. *Rev Int Ciências*. 2017 Jul;7(1):64-83.
24. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro (RJ):ABNT; 2004.
25. American Public Health Association (APHA). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington (US): APHA; 2012.
26. Bouyoucos GJ. The hydrometer as a new and rapid method for determining the colloidal content of soils. *Soil Science*. 1927 Apr;23(4):319-31.
27. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 14545: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2000.
28. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro (RJ): EMBRAPA; 1979.
29. Tedesco MJ, Gianelli C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2. ed. Porto Alegre (RS): Departamento de Solos (UFRGS); 1995. (Boletim Técnico, n. 5)
30. Mattos MRU, Girard L. Caracterização físico-química e ensaios de adensamento em coluna do lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Água de grande porte. *Rev Bras Ciênc Amb*. 2013 Set;28:34-43.
31. Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP) [Internet]. Barragem Santa Bárbara comemora 50 anos de história. Pelotas (RS): SANEP [Internet]; 21 out 2018 [citado em 15 jan 2022]. Disponível em: <http://www.pelotas.com.br/noticia/barragem-santa-barbara-comemora-50-anos-de-historia>
32. Marguti AL, Ferreira Filho SS, Piveli RP. Full-scale effects of addition of sludge from water treatment stations into processes of sewage treatment by conventional activated sludge. *J Env Manag*. 2018 Jun;215:283-93. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.03.072
33. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Diretoria de Pesquisas. Coordenação de população e indicadores sociais, estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2019. Cidades e Estados, Pelotas [Internet]; [citado em 22 jan 2022]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/pelotas.html>
34. Serviço Autônomo de Saneamento de Pelotas (SANEP). Tratamento da água. Pelotas (RS): SANEP [Internet]; c2022 [citado em 22 jan 2022]. Disponível em: <https://portal.sanep.com.br/agua/tratamento-agua>.
35. Castilhos Júnior A, Prim E, Pimentel F. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. *Est Tecnol Eng*. 2011 Jul;7(2):86-97. doi: 10.4013/ete.2011.72.02
36. Barakwan RA, Trihadiningrum Y, Bagastyo AY. Characterization of alum sludge from Surabaya Water Treatment Plant, Indonesia. *J Ecol Eng*. 2019 Jun;20(5):7-13. doi: 10.12911/22998993/104619
37. Kluczka J, Zołotajkin M, Ciba J, Staroń M. Assessment of aluminum bioavailability in alum sludge for agricultural utilization. *Env Monitor Assess*. 2017 Aug;189:422. doi: 10.1007/s10661-017-6133-x

38. Rumky J, Visigalli S, Turolla A, Gelmi E, Necibi C, Gronchi P, et al. Electro-dewatering treatment of sludge: Assessment of the influence on relevant indicators for disposal in agriculture. *J Environ Manag.* 2020 Aug;268:110689. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110689
39. Anjum SA, Ashraf U, Khan I, Tanveer M, Ali M, Hussain I, et al. Chromium and aluminum phytotoxicity in maize: Morpho-physiological responses and metal uptake. *CLEAN - Soil Air Water.* 2016 Aug;44(8):1075-84. doi: 10.1002/clen.201500532
40. Tavares RG, da Motta MA, Pereira LJR, Córrea MM, de Arruda VCM, de Melo RRC. Avaliação da toxicidade do lodo de estação de tratamento de água e esgoto, antes e após vermicompostagem, usando teste de germinação com semente de alface (*Lactuca sativa*). *Rev DAE.* 2019 Out;67(218):156-67. doi: 10.4322/dae.2019.040
41. Oliveira APS, Silva JBG, Pereira RDO, Santos ASP. Avaliação dos atributos de um latossolo adubado com lodo de estação de tratamento de água. *Rev Inter Ciênc.* 2015 Mai;5(2):29-47. doi: 10.12957/ric.2015.19441
42. Teixeira ST, Melo WJ, Silva ET. Plant nutrients in a degraded soil treated with water treatment sludge and cultivated with grasses and leguminous plants. *Soil Bio Bioch.* 2007 Jun;39(6):1348-54. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.12.011
43. Malavolta E; Vitti GC, Oliveira SA. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba (SP): POTAFOS; 1997.
44. Belmeskine H, Ouameur WA, Dilmi N, Aouabed A. The vermicomposting for agricultural valorization of sludge from Algerian wastewater treatment plant: impact on growth of snap bean *Phaseolus vulgaris* L. *Heliyon.* 2020 Aug;6(8):e04679. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04679
45. Malavolta E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Editora Agronômica CERES; 1980.
46. Gonçalves F, de Souza CHU, Tahira FS, Fernandes F, Teixeira RS. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Rev DAE.* 2016;65(205):5-14. doi: 10.4322/dae.2016.018
47. Teixeira ST, de Melo WJ, Silva ET. Plant nutrients in a degraded soil treated with water treatment sludge and cultivated with grasses and leguminous plants. *Soil Biol Biochem.* 2007 Jun;39(6):1348-54. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.12.011
48. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 1997.
49. Bashar MNA, Syarhida Isa NH, Sofiyah Rahman NR, Alias S, Chay TC, Abdul Aziz NH, et al. Feasibility study on the application of alum sludge (AS) as alternative landfill liner material in sustainable landfill infrastructure model: XRD and SEM analysis. *J Phys: Conf Ser.* 2019;1349:012041. doi: 10.1088/1742-6596/1349/1/012041