

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA

ALLINE VITÓRIA SCHMIDT

**DETERMINAÇÃO DE CHUMBO EM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA VISANDO SUA POSSÍVEL UTILIZAÇÃO NA AGRICULTURA**

Porto Alegre

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA

ALLINE VITÓRIA SCHMIDT

**DETERMINAÇÃO DE CHUMBO EM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ÁGUA VISANDO SUA POSSÍVEL UTILIZAÇÃO NA AGRICULTURA**

Trabalho de conclusão apresentado junto à
atividade de ensino “Projeto Tecnológico” do
Curso de Química Industrial, como requisito
parcial para a obtenção do grau de Química
Industrial

Prof.^a Dr.^a Morgana Bazzan Dessuy
Orientadora

Dr. Álvaro Tavares Duarte
Coorientador

Porto Alegre
2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Roselaine Teresinha Schmidt e Dani Everson Schmidt por todo apoio, incentivo e suporte financeiro para que fosse possível a conclusão dessa importante etapa da minha vida.

Ao meu namorado, Elvis Vieira Soares, por todo suporte emocional e compreensão não só durante a elaboração deste trabalho como durante todo o período da minha graduação.

À minha orientadora Professora Dr^a. Morgana Bazzan Dessuy e ao meu coorientador Dr. Álvaro Duarte por toda ajuda, paciência e conhecimento dividido. Vocês tornaram este momento tenso de final de curso em algo mais leve.

A todos os colegas do Laboratório de Análise de Traços da UFGRS por me receberem de forma tão afetuosa e por se mostrarem sempre dispostos a dividir seu conhecimento e ceder seu tempo para me ajudar no desenvolvimento deste trabalho. Foi um prazer ter tido a oportunidade de conhecê-los.

Aos colegas das estações de tratamento de água da CORSAN de Guaíba e Gravataí pela ajuda com o fornecimento de amostras.

Aos meus colegas e amigos da estação de tratamento de água da CORSAN de Cachoeirinha por toda a ajuda e contribuição com este trabalho.

À CORSAN por permitir a coleta de amostras para que este trabalho fosse realizado.

Aos demais familiares e amigos por toda torcida e por compreender a minha ausência em tantos momentos.

RESUMO

Já é passada a hora de termos um olhar atento para o destino dos resíduos provenientes das Estações de Tratamento de Água (ETA) do Brasil. Atualmente, à nível mundial, a incineração, disposição em aterros e uso agrícola são processos que representam 90% da disposição final do lodo oriundo desse processo. O reaproveitamento agrícola tem se mostrado como a melhor opção de reutilização do lodo, visto que proporciona os melhores resultados econômicos, além de reduzir a exploração de recursos naturais para fabricação de fertilizantes. Porém, deve-se assegurar a qualidade do lodo utilizado na agricultura, a fim de promover melhorias ao solo, mas sem risco de contaminações, visto que no lodo podem estar presentes elementos potencialmente tóxicos, como o chumbo. No Brasil não há legislação específica para lodo de ETA, apenas legislação para o lodo das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE); a Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define parâmetros de contaminantes para utilização agrícola desse lodo (limite máximo de 300 mg kg^{-1} para chumbo). Neste trabalho foi realizada a determinação do chumbo, em amostras de lodo de ETA, pela técnica de espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e forno de grafite (HR-CS GF AAS) por análise direta de sólidos, visando avaliar a possibilidade de aplicação deste lodo no cultivo agrícola. Amostras de lodo das estações de tratamento de água de Cachoeirinha, Gravataí e Guaíba foram centrifugadas e foi realizada a determinação de chumbo nas frações sólida e líquida, bem como nas amostras sem passar por centrifugação. Os resultados obtidos para a fração sólida ficaram entre $7,94$ e $10,3 \text{ mg kg}^{-1}$ (base seca), e para as frações líquidas ficaram todos abaixo do limite de quantificação, de $0,68 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$. As amostras que não passaram por centrifugação apresentaram teores de chumbo muito similares às frações sólidas centrifugadas. Os teores de chumbo encontrados ficaram abaixo dos limites estabelecidos pelo CONAMA, tanto nas frações sólida como nas líquidas das amostras centrifugadas. Logo, segundo o único parâmetro analisado neste trabalho – teor de chumbo-, o lodo de ETA poderia ser aplicado no solo para fins agricultáveis.

Palavras-chave: lodo de ETA, chumbo, espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e forno de grafite, análise direta de amostras sólidas.

ABSTRACT

It is about time to look closely at the destination of waste coming from Water Treatment Plants (WTP) in Brazil. Nowadays, worldwide, incineration, landfill disposal and agricultural use are processes that represent 90% of sludge's final disposal. Agricultural reuse has been shown as the best option of sludge's recycle, which provides the best economic results, while reducing exploitation of natural resources to the production of fertilizers. However, you must ensure the quality of the sludge used in agriculture, in order to promote soil improvements, but without risk of contamination, as long as potentially toxic elements could be present in the sludge, including the lead (Pb). In Brazil there is no specific legislation for WTP sludge, only legislation for Sewage Treatment Plants (STP) sludge. The resolution 375/2006 from the National Council of the Environment (CONAMA) defines contaminant parameters for agricultural use of sludge from STP (limit of 300 mg kg⁻¹ for lead). In this work it was carried out the determination of lead in WTP sludge samples using the direct analysis of solid samples by high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry (HR-CS GF AAS) in order to check the possibility of application of this sludge in agricultural cultivation. Sludge samples from three local WTP were centrifuged and it was carried out the determination of lead in the liquid and in the solid part. The results obtained for the solid part were between 7.94 and 10.3 mg kg⁻¹ (dry base), and for the liquid samples all the results were below the limit of quantification (0.68 µg L⁻¹). Another aliquot of these samples was not submitted to centrifugation step and was just dried prior the analyses; Pb values found with this procedure were very similar to those obtained in the centrifuged solid samples. The lead levels found were below the limits established by CONAMA, in the solid part and in the liquid part of centrifuged samples. Therefore, according to the only parameter analyzed in this work – lead level -, the WTP sludge could be applied to soil for agricultural uses.

Keywords: WTP sludge, lead, high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry, direct analysis of solid samples.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas de tratamento e distribuição de água, (1) chegada da água, (2) coagulação, (3) floculação, (4) decantação, (5) filtração, (6) desinfecção, (7) e (8) reservação, (9) distribuição.	14
Figura 2 - Disposição final do lodo de ETAs dos Estados Unidos.....	19
Figura 3 - Disposição final do lodo de ETAs do Reino Unido.....	20
Figura 4 - Espectros de absorção atômica, resolvidos temporalmente, de Pb em 0,072 mg de amostra de lodo de ETA - a) sem correção de fundo pelo algoritmo dos mínimos quadrados e b) com correção de fundo pelo algoritmo dos mínimos quadrados para a molécula de SiO	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Destino do lodo de ETA no Brasil. Os dados, do ano de 2008, representam o número de municípios com geração de lodo no processo de tratamento de água	18
Tabela 2 - Programa de temperatura utilizado para determinação de Pb nas amostras de lodo por HR-CS SS-GF AAS.	28
Tabela 3 - Parâmetros obtidos para a determinação de chumbo em amostras de lodo de ETA. Os valores de LD e LQ foram calculados para massas de 0,03 mg e volumes de 30 µL, respectivamente para amostras sólidas e líquidas.....	30
Tabela 4 - Avaliação da exatidão do método através da análise do MRC de solo....	31
Tabela 5 - Quantificação de chumbo nas amostras de lodo de ETA sem centrifugação via HR-CS GFAAS.....	32
Tabela 6 - Quantificação de chumbo nas amostras sólidas centrifugadas de lodo de ETA via HR-CS GFAAS.	33
Tabela 7 - Quantificação de chumbo nas amostras líquidas de lodo de ETA via HR-CS GFAAS	33

LISTA DE SIGLAS

AFS	Espectrometria de fluorescência atômica (do inglês: <i>Atomic Fluorescence Spectrometry</i>)
A_{int}	Absorvância integrada
AWWA	American Water Works Association
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FAAS	Espectrometria de absorção atômica (do inglês: <i>atomic absorption spectrometry</i>)
GF AAS	Espectrometria de absorção atômica com forno de grafite (do inglês: <i>Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry</i>)
HR -CS AAS	Espectrometria de absorção atômica com fonte contínua de alta resolução (do inglês: <i>high-resolution continuum source atomic absorption spectrometry</i>)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP-AES	Espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (do inglês: <i>Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy</i>)
ICP-MS	Espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (do inglês: <i>Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i>)
LD	Limite de detecção
LQ	Limite de quantificação
LS AAS	Espectrometria de absorção atômica com fonte de linha (do inglês: <i>Line Source Atomic Absorption Spectrometry</i>)
MRC	Material de referência certificado
SST	Sólidos suspensos totais
DPR	Desvio padrão relativo
XRF	Fluorescência de raios X (do inglês: <i>X-Ray Fluorescence Spectroscopy</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 PROPOSTA TECNOLÓGICA.....	12
4 REFERENCIAL TEÓRICO	13
4.1 ÁGUA	13
4.1.1 Consumo.....	13
4.1.2 Processo de tratamento	13
4.2 CARACTERÍSTICAS DO LODO DE DECANTADOR.....	15
4.3 LEGISLAÇÕES PARA DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS	16
4.4 PANORAMA NACIONAL E INTERNACIONAL DE DESTINAÇÃO	17
4.4.1 Nacional	17
4.4.2 Internacional.....	18
4.5 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO GERADO EM ETAS 20	
4.5.1 Lançamento em cursos d'água	21
4.5.2 Incineração.....	22
4.5.3 Aterro Sanitário	22
4.5.4 Aplicação agrícola	22
4.6 DETERMINAÇÃO DE METAIS EM LODO	23
4.6.1 Espectrometria de absorção atômica	24
4.6.2 Toxicidade do chumbo	25
5 EXPERIMENTAL	26
5.1 MATERIAIS E REAGENTES.....	26
5.2 AMOSTRAS E PREPARO DA AMOSTRAS.....	26

5.3	PROCEDIMENTO ANALÍTICO.....	27
5.4	LINEARIDADE E FAIXA DE TRABALHO.....	28
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
6.1	ESCOLHA DA LINHA ANALÍTICA.....	29
6.2	CURVAS DE CALIBRAÇÃO.....	30
6.3	PRECISÃO E EXATIDÃO.....	31
6.4	ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE LODO DE ETA.....	32
6.4.1	Determinação de Pb.....	32
6.4.2	Concentrações encontradas e aplicabilidade de acordo com legislação.....	33
7	AVALIAÇÃO DE CUSTOS.....	35
8	IMPACTO AMBIENTAL.....	37
9	CONCLUSÃO.....	38
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
	ANEXO 1 – CONCENTRAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA DE SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS NO LODO DE ESGOTO DESTINADO À AGRICULTURA.....	42
	ANEXO 2 - PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES.....	43

1 INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de água apresentam muitas semelhanças com sistemas produtivos de qualquer indústria, visto que em ambos os casos a matéria-prima é trabalhada e transformada por meio de diversos processos, resultando em um produto final. Esses processos são divididos em etapas, que levam a geração de resíduos com características diversas, relacionadas à origem da água bruta, ao *layout* da estação, aos produtos químicos adicionados ao longo do processo, entre outros. No caso da estação de tratamento de água, este resíduo é o lodo.

No Brasil a destinação do lodo de estação de tratamento de água (ETA) é muito recente e ainda pouco discutida, visto que quando se busca por trabalhos na área a maioria dos resultados é a respeito do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE). Isto se reflete na legislação, uma vez que não existe recomendação específica para destinação ou reaproveitamento do lodo de ETA. Sabendo que a nossa população cada vez aumenta mais e que constantemente se busca por melhoria na qualidade de vida, a geração de resíduos urbanos, incluindo o lodo, é uma realidade que deve ser encarada com seriedade.

Os números mais recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mostram que a grande maioria dos municípios brasileiros despejam seu lodo diretamente em cursos d'água, o que é uma situação que precisa mudar de imediato, visto que o lodo representa um passivo ambiental da indústria do saneamento. Dentre os impactos negativos para o corpo hídrico que recebe este resíduo, estão o aumento da quantidade de sólidos, da cor e turbidez, diminuição da concentração de oxigênio dissolvido, assoreamento e aumento da concentração de metais na água, dentre eles o chumbo.

Existem diversas alternativas para o lodo de ETA, como aplicação agrícola, disposição em aterro sanitário, indústria cerâmica, porém deve-se primeiramente realizar a caracterização do resíduo para verificar qual disposição final será possível. Quando se tem interesse na aplicação agrícola, deve-se atentar aos diversos parâmetros estabelecidos na legislação 375/06 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), onde, entre eles, o teor máximo de chumbo é de 300 mg kg^{-1} (base seca).

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

O objetivo do trabalho foi revisar o estado da arte da destinação do lodo de Estação de Tratamento de Água no Brasil, bem como, quantificar Pb em amostras de lodo de ETA e avaliar a possibilidade de aplicação deste lodo no cultivo agrícola. Para a determinação de chumbo foi empregada a técnica de espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e forno de grafite (HR-CS GF AAS) por análise direta de sólidos

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte das opções para destino do lodo de estação de tratamento de água, demonstrando os aspectos a serem considerados em cada alternativa.

2- Determinar a concentração de chumbo na amostra de lodo por espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e forno de grafite (HR-CS GF AAS) por análise direta de sólidos.

3- Comparar os resultados obtidos para concentração de chumbo e limites de detecção e quantificação do método com os parâmetros para chumbo existentes na legislação (CONAMA 375/2006 e 430/2011).

4 - Avaliar a dimensão dos custos do emprego da destinação final apropriada para o lodo.

3 PROPOSTA TECNOLÓGICA

É sabido que o lodo de estação de tratamento de água tem sido despejado em cursos de água sem nenhum tipo de tratamento, porém cada vez mais isso tem sido questionado por órgãos ambientais, visto o risco que esta ação representa à saúde pública e à vida aquática. Porém, para que se possa avançar nessa questão, o primeiro passo é a realização de uma caracterização adequada do lodo, sendo que, para cada tipo de disposição final desejada, as legislações ambientais específicas devem ser atendidas.

Através dos dados levantados nesse trabalho, sobre as principais opções para destino do lodo de ETA, e com o monitoramento do teor de Pb nesse tipo de lodo, irá se verificar a viabilidade da aplicação do lodo na agricultura, bem como outras possíveis formas de disposição adequadas para este resíduo. Para o monitoramento do teor de Pb, será utilizada a técnica de espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e forno de grafite (HR-CS GF AAS) por análise direta de sólidos.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 ÁGUA

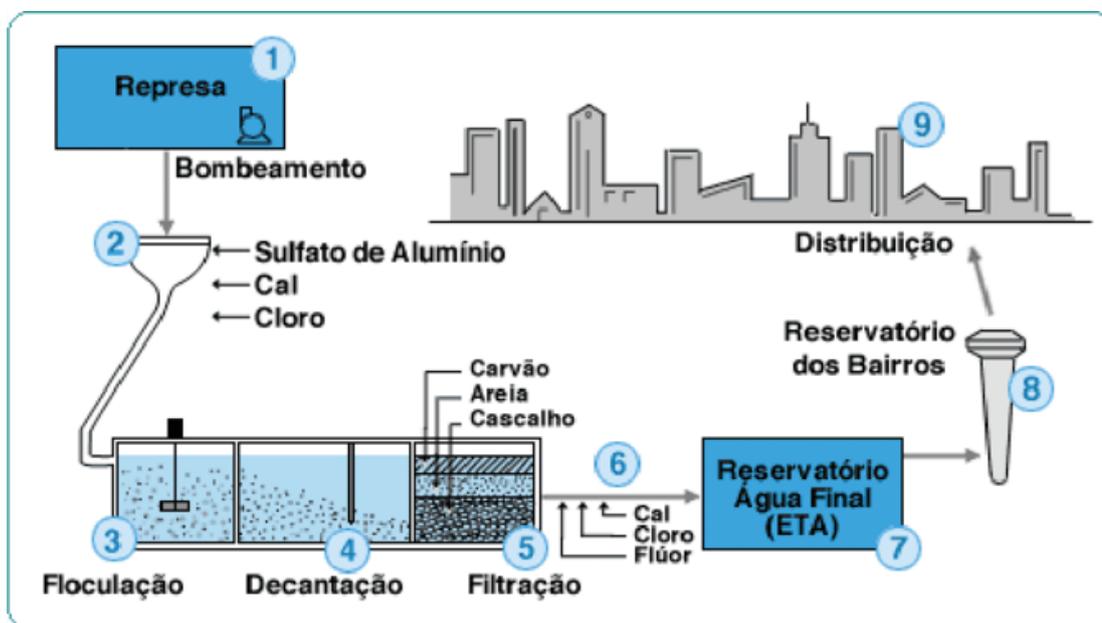
4.1.1 Consumo

A água está diretamente ligada ao desenvolvimento social, econômico e ambiental de todos os países. De acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos, divulgado em março de 2015, o consumo de água cresceu duas vezes mais que a população e espera-se que até 2050 a demanda aumente em 55%, além de prever que a população mundial chegará a 9,6 bilhões no mesmo ano. Ainda segundo o mesmo relatório, a crescente busca por água potável é confrontada pelo acréscimo de quantidade de resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água (ETAs). Sendo assim, é de suma importância o emprego de tecnologias que viabilizem a reciclagem e a exploração desses resíduos. (OLIVEIRA; RANDON, 2016).

4.1.2 Processo de tratamento

Buscando atender os parâmetros de qualidade exigidos para o abastecimento da população com água de boa qualidade, são realizadas diversas etapas durante o processo de tratamento a partir da captação da água bruta. O tratamento de água feito no Brasil utiliza o processo convencional de ciclo completo, composto pelas fases de captação, coagulação, floculação, decantação, filtração e cloração. Um esquema dessas etapas encontra-se na Figura 1 (BOTERO, 2008; OLIVEIRA, 2016).

Figura 1 - Fluxograma das etapas de tratamento e distribuição de água, (1) chegada da água, (2) coagulação, (3) floculação, (4) decantação, (5) filtração, (6) desinfecção, (7) e (8) reservação, (9) distribuição.



Fonte: Sabesp.

Conforme representado na Figura 1, o tratamento e a distribuição de água seguem basicamente nove etapas: Primeiramente, a água de rios ou represas é captada e bombeada para a estação de tratamento por meio de tubulações (1); em seguida a água recebe cal ou soda para que seu pH seja ajustado para uma faixa em que possa ocorrer a floculação; pode ser também necessário a chamada pré-cloração, para facilitar o processo de remoção de impurezas que virá a seguir e, então, é dosado o coagulante, por exemplo sulfato de alumínio, seguido de uma agitação vigorosa da água para proporcionar uma homogeneização do coagulante e provocar a desestabilização elétrica das partículas de sujeira, sendo essa etapa nomeada coagulação (2). Depois, a agitação se torna mais lenta para facilitar a agregação e formação de flocos, ocorrendo a chamada floculação (3). Visto que os flocos de sujeira possuem um peso maior do que a água, eles caem e se depositam no fundo dos tanques de decantação (4). Passada pelos decantadores, a água passa por filtros em que os flocos menores que não decantaram são retidos, na etapa conhecida como filtração (5). As etapas citadas (floculação, decantação e filtração) são conhecidas como sendo o processo clarificação. Nele, são retiradas todas as partículas de impurezas, fornecendo uma água límpida, porém para que a água seja considerada potável é necessário ainda haver a desinfecção (6). Usada

para destruir microrganismos que possam causar doenças, a desinfecção é comumente realizada aplicando-se cloro na água. Numa última etapa, buscando atender à legislação, também se adiciona flúor, que tem por finalidade colaborar para redução da incidência da cárie dentária na população. Uma vez completo o processo de tratamento, a água é armazenada nos reservatórios (7-8) e distribuída para as casas (9).

As estações de tratamento de água apresentam muitas semelhanças com sistemas produtivos de qualquer indústria, visto que em ambos os casos a matéria-prima é trabalhada e transformada por meio de diversos processos, resultando em um produto final. Esses processos levam a geração de resíduos com características diversas, relacionadas à origem da água bruta, ao *layout* da estação, aos produtos químicos adicionados ao longo do processo, entre outros. Os principais resíduos gerados são a água de lavagem dos filtros e o lodo, classificado como resíduo sólido que caracteriza-se por ser uma torta densa e viscosa, composto por argilas, siltes, areia fina, material húmico e microrganismos, além de produtos químicos oriundos do processo de coagulação, não podendo ser lançado em cursos d'água sem um tratamento prévio. Porém, existem cerca de 7.500 ETAs no país que atualmente utilizam o tratamento tradicional e lançam os resíduos do processo diretamente em cursos d'água. Uma vez que a geração de resíduo de ETA representa 5% da água tratada por dia, são fundamentais estudos sobre o aproveitamento do lodo. Além disso, a partir do ano de 1997, a indústria do saneamento passou a ter uma preocupação legal visto que se instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, que definiu o lançamento de efluente em corpos d'água como um instrumento de recurso hídrico sujeito a outorga (CORDEIRO, 1999; REALI, 1999; CORDEIRO, 2001; ABNT, 2004; MACHADO *et al.*, 2004).

4.2 CARACTERÍSTICAS DO LODO DE DECANTADOR

Para que adquira potabilidade, é necessário que se remova as impurezas coloidais e em suspensão da água coletada nos mananciais. A dosagem de sulfato de alumínio aliada a uma agitação vigorosa proporciona a dispersão do agente coagulante bem como a desestabilização das partículas coloidais e em suspensão. Os agregados e a formação dos flocos são proporcionados pela mistura lenta da água; depois, utilizando mecanismos de arraste e pelo aumento do tamanho e da densidade, os flocos formados sedimentam. A quantidade adicionada de sulfato de

alumínio varia com as características da água bruta, e ela irá influenciar o volume, as características e a composição do lodo gerado. Além disso, as variações no tratamento e operação da ETA (tipo de decantador, por exemplo), a adição de alcalinizantes e polieletrólitos têm influência direta nas características do lodo (BIDONE; SILVA; MARQUES, 2001).

De forma a evitar a sobrecarga nos filtros e sempre buscando uma melhor qualidade da água tratada, toda vez que se constata que os decantadores estão com uma quantidade excessiva de resíduos (lodo) no fundo, realiza-se a limpeza do mesmo. Nas estações de tratamento de água convencionais o lodo pode ser removido manualmente e com o auxílio de jatos de água, ou também podem ser removidos constantemente através de raspadores de fundo. É este lodo que é chamado de lodo de ETA (BOTERO, 2008).

O Brasil produz 4 milhões de toneladas de lodo de ETA por ano, os quais possuem teor de umidade geralmente superior a 95%, apresentando-se geralmente sob a forma fluida. Sendo assim, mostra-se necessário um prévio adensamento e desidratação para que se possa gerenciar melhor este resíduo (CORDEIRO, 1999; SILVA, 2011).

Através da determinação da composição química, da distribuição e tamanho das partículas, da filtrabilidade e da resistência específica do lodo, é possível verificar possíveis impactos ambientais, bem como formas de disposição finais adequadas para este resíduo. É preciso atentar especialmente para a presença de metais como cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, cromo, manganês e, principalmente, alumínio e ferro presentes no lodo, visto que estes possuem ações tóxicas, resultando em efeitos negativos na disposição final e reutilização destes resíduos (HOPPEN *et al.*, 2006).

4.3 LEGISLAÇÕES PARA DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a NBR 10004, que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos para que possam ser gerenciados de forma adequada, o lodo proveniente de estação de tratamento de água se enquadra como um resíduo sólido. O fato de se classificar um resíduo não deve impedir que se estude alternativas para a sua utilização. Porém, essa classificação é de suma importância para orientar os cuidados especiais no manejo do resíduo sólido, os quais podem impossibilitar a sua

utilização quando não houver garantias quanto à segurança do trabalhador, do meio ambiente, ou consumidor final (ABNT, 2004).

Infelizmente, atualmente, a maioria das ETAs do país não atende a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), a qual prioriza a redução, reuso e reciclagem. Visto que o lodo não é um rejeito e sim um resíduo, o mesmo deveria receber um tratamento ecologicamente adequado aplicando-se a redução, reuso e reciclagem (OLIVEIRA; RANDON, 2016).

Quando do lançamento do resíduo em corpos d'água, deve-se observar diversos aspectos químicos e biológicos em busca de não alterar negativamente a qualidade daquele manancial. A Resolução CONAMA nº 357 define os parâmetros de qualidade a serem mantidos em cada classe de água. Para isso, ela estabelece padrões de qualidade dos corpos receptores, atentando apenas ao corpo hídrico. Ainda, a Resolução CONAMA nº 430, que complementa a Resolução 357, dispõe sobre os critérios para o lançamento de efluentes nos corpos d'água, que no caso do Pb é de no máximo $0,5 \text{ mg L}^{-1}$, e estabelece uma análise do efluente e sua relação com o corpo receptor, com a finalidade de não modificar a qualidade daquela classe de água (BRASIL, 2005; BRASIL 2011).

Quando se tem interesse na disposição agrícola do lodo da estação de tratamento de água, deve-se atentar ao fato de que a legislação existente é para lodo de esgoto. Essa legislação, Resolução CONAMA nº 375 de 2006, define, entre outros parâmetros, a concentração máxima de 300 mg de chumbo por kg de base seca do lodo destinado à aplicação agrícola, visando assegurar um requisito mínimo de qualidade (BRASIL, 2006). Os parâmetros dessa legislação para os demais metais encontram-se no Anexo 1.

4.4 PANORAMA NACIONAL E INTERNACIONAL DE DESTINAÇÃO

4.4.1 Nacional

No Brasil, conforme pode-se observar pela Tabela 1, a maior parte das estações lançam seus resíduos diretamente em cursos d'água próximos, sem que nenhum tipo de tratamento seja realizado, resultando no assoreamento e deterioração da qualidade da água dos rios e lagos. Ainda a respeito da tabela, entende-se por reaproveitamento, por exemplo, a fabricação de tijolos, telhas e

gesso ou aplicação na agricultura, atuando como fertilizante e recompositor da camada superficial do solo (ANDRADE, 2014).

Tabela 1 - Destino do lodo de ETA no Brasil. Os dados, do ano de 2008, representam o número de municípios com geração de lodo no processo de tratamento de água.

Grande região	Destino do lodo gerado						
	Rio	Mar	Terreno Baldio	Aterro Sanitário	Incineração	Reaproveitamento	Outro
Norte	46	-	14	2	-	3	23
Nordeste	231	5	261	14	1	24	61
Sudeste	703	-	105	53	-	10	94
Sul	330	2	59	11	-	11	54
Centro-Oeste	105	-	24	3	-	2	15

Fonte: IBGE, 2010.

Estes números deixam claro que mais do que nunca se faz necessário a busca por novas tecnologias de tratamento do lodo e formas diferenciadas de disposição, buscando causar o menor impacto possível no meio ambiente e respeitando as legislações ambientais vigentes (ANDRADE, 2014).

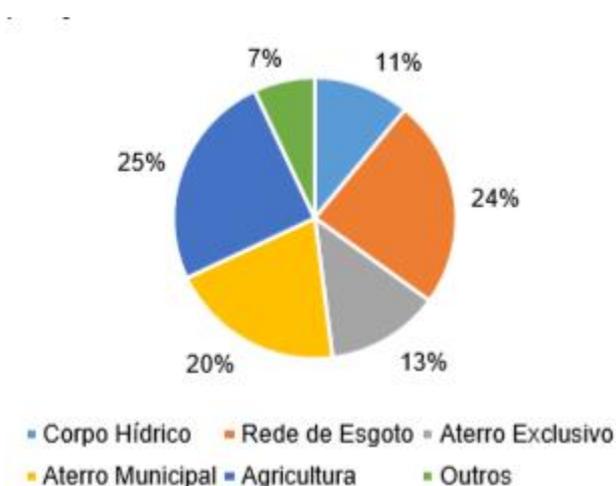
4.4.2 Internacional

Houve uma grande evolução a nível mundial da legislação responsável pela proteção ambiental e, como consequência disso, o desenvolvimento de métodos para reduzir o volume de lodo e tecnologias para recuperar o coagulante utilizado e técnicas alternativas de utilização do lodo. Esse avanço tecnológico, além de ser sustentável, é capaz de conferir valor agregado aos resíduos, seja pelo fato de diminuir custos ou pela oportunidade do crescimento de receitas. Nesse sentido, muitos estudos têm sido realizados na busca pelo seu aproveitamento (MACHADO *et al.*, 2004).

Existem muitas alternativas de disposição do resíduo das ETAs e, dentre todas, as que ocupam as primeiras posições nos países desenvolvidos são disposição em aterro sanitário, aplicação controlada no solo e reciclagem. Nas ETAs dos EUA, a forma mais comum de aproveitamento dos resíduos é a sua aplicação

na agricultura, representando 25% do total de lodo produzido, resultando em alguns benefícios como o ajuste de pH, aumento da capacidade de retenção de água, condições de aeração e melhoria da estrutura do solo. A Figura 2 apresenta os principais destinos dado ao lodo de ETAs nos Estados Unidos e o Figura 3 no Reino Unido (MACHADO *et al.*, 2004; SMIRDELE, 2016).

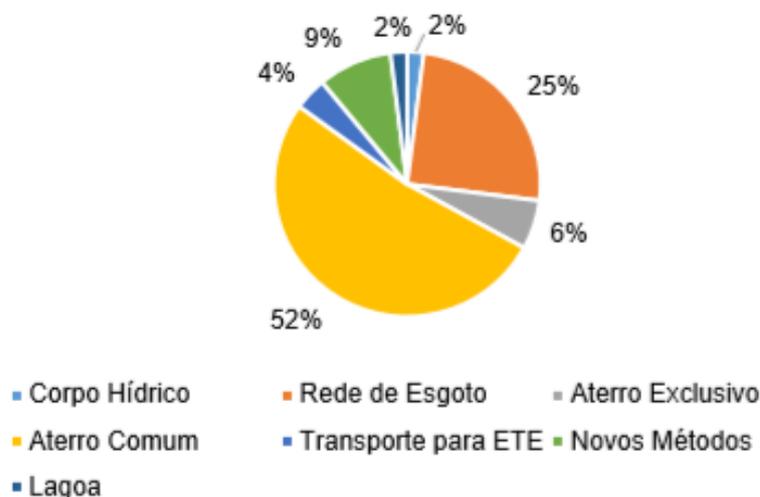
Figura 2 - Disposição final do lodo de ETAs dos Estados Unidos.



Fonte: SMIRDELE, 2016.

A aplicação do lodo desidratado de ETA em culturas agrícolas tem mostrado eficiência equivalente a outros produtos comerciais utilizados para fornecer ferro ao solo. Assim, a determinação da dosagem de aplicação deve ser realizada através de projeto piloto, evitando a contaminação do solo por metais pesados. Um exemplo do sucesso do emprego agrícola nos EUA é nos solos destinados ao cultivo de plantas cítricas, que normalmente possuem uma deficiência de ferro, porém, esse elemento é de suma importância para o crescimento dessas culturas e pode ser suprido pela aplicação do lodo de ETA no solo. Para isso, é necessário que a estação de tratamento utilize o sulfato férrico como coagulante e, buscando atender a essa condição, algumas estações de tratamento nos EUA substituíram o uso de sulfato de alumínio por sulfato férrico de alta pureza, aumentando significativamente o valor comercial do resíduo (TSUTIYA e HIRATA, 2001).

Figura 3 - Disposição final do lodo de ETAs do Reino Unido.



Fonte: SMIRDELE, 2016.

Outro exemplo para ilustrar a evolução mundial nessa questão é a companhia de saneamento responsável pela operação em Londres e no Vale do Tâmis, que gera 32.948 toneladas de lodo nas ETAs por ano e nada é enviado para aterro sanitário. O lodo é completamente reciclado, diretamente em terreno da própria ETA ou encaminhado para o uso na agricultura ou, ainda, destinado a uma ETE (SMIRDELE, 2016).

Na Itália, em virtude da legislação muito rígida e pouco clara que não encoraja as aplicações agrícolas, os lodos geralmente são depositados em aterros, com custos muito altos de transporte e disposição final, geralmente cerca de 70 euros/tonelada. Apenas em alguns casos eles são reutilizados nas indústrias de cimento. O mesmo acontece na Espanha, com uma grande parcela de seu lodo sendo destinado a lixões (VERLICCHI; MASOTTI, 2000; RODRÍGUEZ *et al.*, 2010).

4.5 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO GERADO EM ETAS

O Brasil produz 4 milhões de toneladas de lodo de ETA por ano e, para facilitar o manejo deste resíduo, é importante que após retirá-lo dos decantadores se realize um processo de adensamento, visto que ele possui água distribuída livremente nas partículas que precisam ser removidas para reduzir o volume da torta. O adensamento de lodos das ETAs pode ser efetuado por gravidade, flotação

com ar dissolvido ou adensadores mecânicos por tela, e consiste na produção de uma torta concentrada de sólidos, possuindo um teor de sólidos suspensos totais (SST) mínimo de 2% e dosagem de polímero de 2 a 5 mg g⁻¹ SST (SILVA, 2011; SILVA, 2015).

Uma vez adensado, o lodo precisa passar por um processo de desidratação, sendo a centrifugação uma alternativa viável para as ETAs. É uma operação capaz de separar fases através da ação do campo de forças centrífuga que surge ao rotacionar um tambor contendo as fases de interesse, utilizando para isso um equipamento chamado centrífuga. No caso do lodo de ETA, quando o tambor é submetido a grandes taxas de rotações, as partículas sólidas, que são mais densas, são rapidamente projetadas na direção da parede interna do tambor, onde se acumulam e, dessa forma, são separadas da fase líquida. A água clarificada removida pela centrífuga pode ser reaproveitada retornando ao sistema de tratamento de água (REALI; PATRIZZI; CORDEIRO, 1999; SILVA, 2015).

4.5.1 Lançamento em cursos d'água

A descarga oceânica do lodo gerado como resíduo do processo de tratamento de água já é uma prática muito ultrapassada, visto que cada vez mais busca-se maneiras de se preservar o meio ambiente e, nesse sentido, é inclusive proibida em países Europeus e nos Estados Unidos. Porém, existe a possibilidade deste resíduo ser lançado em cursos d'água, desde que este atenda certas condições e, ainda, sujeito à autorização das autoridades locais. Deve-se analisar o impacto na qualidade do corpo receptor em função do volume do resíduo e de suas características. Segundo a legislação brasileira, os efluentes só poderão ser lançados diretamente em cursos d'água caso estejam de acordo com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 430 (disponíveis no ANEXO 2), além disso, pode haver outras exigências por parte de órgãos locais (SILVA, 2011; SMIDERLE, 2016).

Entre as consequências negativas para o corpo d'água receptor do resíduo de ETA estão o aumento da cor e da turbidez, aumento da quantidade de sólidos, perda da atividade fotossintética e diminuição da concentração de oxigênio dissolvido devido à redução de penetração da luz, assoreamento e aumento da concentração de alumínio e ferro, oriundos do coagulante utilizado no processo de tratamento (SMIRDELE, 2016).

4.5.2 Incineração

Quanto a incineração como disposição final, avalia-se que os custos referentes a esta alternativa são consideravelmente elevados, além do fato de gerar cinzas que também vão necessitar de uma disposição adequada, ou seja, estaria apenas transferindo-se o problema. Ademais, o lodo proveniente do tratamento de água não se apresenta como um bom candidato à incineração devido ao seu baixo conteúdo orgânico e valor calorífero, que é cerca de 1164 kJ kg^{-1} , enquanto o do lodo proveniente de esgoto é de 23260 kJ kg^{-1} (HOPPEN *et al.*, 2006; WANG *et al.*, 1992).

4.5.3 Aterro Sanitário

A destinação final do lodo da estação de tratamento para aterro sanitário consiste na aplicação deste resíduo no solo, utilizando para isso técnicas de engenharia que permitam a máxima redução do volume de resíduo e a ocupação da menor área possível, minimizando os impactos ambientais e sem causar danos à saúde pública e à sua segurança ambiental (ABNT, 1992).

O tratamento do resíduo se faz necessário para, além de minimizar os custos com transporte e a disposição final, alcançar o teor de sólidos solicitado pelo aterro sanitário, que normalmente é de 20 a 25%. Apesar de incluir altos custos de manutenção, perda de energia que poderia ser empregada adequadamente de outras formas, e do risco de contaminação de solos e lençóis freáticos, essa alternativa de disposição final ainda se mostra viável, porém, a técnica vai de encontro aos princípios de minimização, reuso, reaproveitamento e reciclagem de resíduos, que conduzem o gerenciamento de resíduos sólidos moderno (SILVA, 2015; HENDGES *et al.*, 2017; QUINTANA; DO CARMO; DE MELO, 2011).

4.5.4 Aplicação agrícola

A prática de aplicação de lodo no solo, que consiste em esparramar o mesmo em terreno natural ou em solos agricultáveis, vem sendo pautada como uma opção de disposição viável nos casos em que sua aplicação não resulte em impactos negativos no solo receptor. Segundo a *American Water Works Association* (AWWA), o lodo de ETA possui características mais similares aos solos do que o de esgoto. Em geral, o carbono orgânico do lodo de ETA e o nitrogênio são mais estáveis,

menos reativos e se encontram em menores concentrações (HOPPEN *et al.*, 2005; SILVA, 2011).

Ao substituir os fertilizantes industriais por biofertilizantes, tem-se economia tanto financeira como energética. Dentre os benefícios, pode-se citar o aumento da aeração e da capacidade de retenção de líquido na aplicação do lodo no solo na fase de preparação e/ou crescimento da grama comercial. Porém, devem ser realizados estudos para determinar a dosagem ideal do lodo para que se evite o acúmulo de metais no solo, excesso de umidade ou até mesmo prejuízo na fotossíntese devido a presença de sólidos. Ainda, a utilização de lodo no solo colabora com uma melhoria estrutural do solo, ajustando o pH, a umidade e fornecendo minerais (QUINTANA; DO CARMO; DE MELO, 2011; SMIRDELE, 2016).

No entanto, as reduzidas concentrações de matéria orgânica e nutrientes e as altas concentrações de metais pesados podem restringir a sua aplicação no solo, devido à possibilidade de contaminação do solo e do lençol freático. Ainda, salienta-se a existência dos gastos com a logística do resíduo e com a realização do constante monitoramento do local no qual o lodo foi aplicado, para verificar a disponibilidade de nutrientes e metais pesados no solo (TSUTIYA e HIRATA, 2001; SMIRDELE, 2016).

4.6 DETERMINAÇÃO DE METAIS EM LODO

Existe uma quantidade considerável de técnicas disponíveis para determinar metais em lodo. Dentre elas pode-se citar a voltametria, espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES), espectrometria de fluorescência atômica (AFS), fluorescência de raios X (XRF), polarografia, entre outras. A espectrometria de absorção atômica, seja em chama (FAAS) ou em forno de grafite (GF AAS), possui grande aplicação nas análises de rotina dos laboratórios visto suas vantagens frente às demais, como robustez, sensibilidade, baixos limites de detecção para muitos elementos em diferentes tipos de amostras e baixo custo relativo (FRESCHI *et al.*, 2000).

4.6.1 Espectrometria de absorção atômica

A técnica consiste no princípio de que átomos livres, no estado gasoso, gerados em um atomizador absorvem radiação de frequência específica que é emitida por uma fonte espectral; sendo assim, a quantificação obedece aos princípios da lei de Beer. Pode-se utilizar uma fonte de radiação específica para cada elemento (fonte de linha) ou fonte contínua (BORGES, 2005).

Na espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua (HR-CS AAS) uma lâmpada de arco de xenônio, que emite radiação de alta intensidade nas regiões ultravioleta e visível (190-900 nm), é usada como fonte de radiação, permitindo a determinação dos diversos elementos, com uma mesma lâmpada (FRESCHI *et al.*, 2000; WELZ, 2014).

Uma das vantagens da HR-CS AAS é o fato de possuir um maior potencial para correção de fundo, pois ela permite o monitoramento simultâneo da linha analítica e da vizinhança espectral, com isso, é possível corrigir mudanças rápidas na absorção de fundo contínuo. Além disso, o *software* possibilita uma correção matemática, por meio do emprego de algoritmo de mínimos quadrados (LSBC) para quando a amostra apresenta fundo estruturado. Neste caso, gera-se um espectro de referência da espécie responsável pelo fundo estruturado subtrai-se do espectro da amostra (DUARTE, 2014).

Uma técnica que se apresenta como uma boa opção para a determinação de chumbo em lodo de ETA é a espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e forno de grafite (HR-CS GF AAS) por análise direta de sólidos. Uma vez colocada a amostra no forno, é necessário que seja realizada uma etapa de secagem, para eliminação de umidade ou solvente, em uma temperatura baixa o suficiente para evitar que amostra respingue, o que causaria uma diminuição na precisão; posteriormente, ocorre a etapa de pirólise, na qual se empregam temperaturas mais altas visando a eliminação da matriz da amostra, sem que ocorra a volatilização do analito; finalmente, ocorre a etapa de atomização, na qual é produzido um vapor atômico do analito, permitindo a medida da absorção atômica. Importante salientar que pode ser necessária a utilização de modificadores químicos para conversão dos concomitantes numa forma mais volátil, ou do analito em uma forma menos volátil, contribuindo assim para uma eliminação mais efetiva da matriz na etapa de pirólise (NAMOURA, 2008; BEATTY, 1993).

A técnica possui características que permitem uma prática incorporação da análise na rotina de uma empresa, apresentando como vantagens: (i) boa seletividade e sensibilidade para a análise, (ii) possibilidade de análise direta da amostra, reduzindo assim o seu preparo a etapas de secagem e moagem, e (iii) necessita de quantidades pequenas de amostra. Ademais, pelo programa de aquecimento permitir o pré-tratamento térmico da amostra, especialmente durante a etapa de pirólise, o que assegura a eliminação de parte dos concomitantes da amostra, geralmente é possível realizar a calibração do equipamento com soluções padrão aquosas. Isto é possível mesmo quando se trabalha com a análise direta de amostras sólidas (NOMURA, 2008).

4.6.2 Toxicidade do chumbo

O chumbo pode ser liberado no ambiente através de processos naturais, mas a ação antropogênica é a maior responsável pela sua liberação, sendo as mais comuns as atividades de mineração, indústrias metalúrgicas, adubos na agricultura e queima de combustíveis fósseis. Além de ser um elemento desnecessário aos organismos, é considerado altamente tóxico, pois todos seus efeitos conhecidos em sistemas biológicos são nocivos. Uma água que venha a ser contaminada por este metal pode prejudicar ecossistemas aquáticos, sendo capaz de contaminar diretamente organismos que nela vivem e indiretamente o homem, se ele se alimentar destes organismos e de plantas que foram irrigadas por águas contaminadas por chumbo (DE CAPITANI; PAOLIELLO; ALMEIDA, 2009; SOARES, 2002).

O chumbo pode ser encontrado em águas superficiais na forma de complexos com ácidos húmicos ou compostos orgânicos antropogênicos. Diferentes fatores são capazes de influenciar o seu deslocamento e disponibilidade, como por exemplo concentração do elemento, pH, matéria orgânica, composição mineralógica, substâncias coloidais e oxi-hidróxidos (EVANGELISTA; SILVA, 2013).

Apesar de não levar diretamente a morte, a intoxicação crônica por chumbo é capaz de provocar déficits cognitivos irreversíveis, principalmente em crianças, cujo sistema nervoso ainda está em desenvolvimento, sendo essa uma importante fonte de enfermidade resultante de exposições ambientais (SOARES, 2002).

5 EXPERIMENTAL

5.1 MATERIAIS E REAGENTES

A água utilizada no preparo das soluções foi purificada por um sistema Milli-Q (Milipore, Bedford, MA, EUA), com resistividade de 18,2 MΩ.cm, a 25 °C. Todos os reagentes utilizados foram de grau analítico. O ácido nítrico utilizado foi bidestilado em destilador de quartzo (Kurner Analysetechnik, Alemanha).

Foram preparadas soluções padrão aquosas para a curva de calibração a partir de uma solução padrão estoque de Pb 1000 mg L⁻¹ (SpecSol, São Paulo, Brasil), com diluições adequadas em ácido nítrico 0,014 mol L⁻¹ (Anidrol, São Paulo, Brasil). As mesmas foram armazenadas em frascos de polipropileno, sob refrigeração.

Como modificador químico, foi utilizado uma solução de 0,05 % (m/v) Pd, 0,03 % (m/v) Mg e 0,05 % (v/v) Triton X-100, preparada a partir de diluições adequadas de soluções concentradas de 10 g L⁻¹ Pd(NO₃)₂ (Sigma Aldrich, San Luis, EUA) e de 10 g L⁻¹ Mg(NO₃)₂ (Fluka Analytical, Loughborough, Inglaterra). O material de referência certificado (MRC) empregado para avaliar a exatidão do método foi o *Sandy Soil A* (High-Purity Standards, Charleston, USA), o qual representa uma matriz de solo arenoso.

5.2 AMOSTRAS E PREPARO DA AMOSTRAS

As amostras analisadas neste trabalho foram coletadas na ocasião de lavagem de decantador das estações de tratamento de água da CORSAN, entre os meses de maio e setembro de 2019, em três municípios da região metropolitana de Porto Alegre: Cachoeirinha, Gravataí e Guaíba.

Todas as amostras foram centrifugadas em uma centrífuga (Daiki, modelo L-450,) durante 5 minutos, numa velocidade de 4000 rotações por minuto (rpm). O sobrenadante foi então separado, sendo essa fração denominada “amostra líquida”. A parte sólida foi, ainda, seca em estufa (De Leo, modelo A2SE), durante 5 horas, a 100 °C, originando a “amostra seca centrifugada”. Para efeito de comparação, secou-se também em estufa, nas mesmas condições, uma amostra de lodo que não passou pela etapa de centrifugação, denominada “amostra seca sem centrifugação”. Depois de secas, as amostras foram maceradas em almofariz de ágata.

5.3 PROCEDIMENTO ANALÍTICO

Para realizar as medidas de absorvância foi utilizado um espectrômetro de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua, modelo contrAA 700 (Analytik Jena, Jena, Alemanha), que possui dois tipos de atomizadores, chama e forno de grafite com aquecimento transversal, sendo que neste trabalho utilizou-se o forno de grafite. Este equipamento possui uma lâmpada de arco curto de xenônio de alta intensidade operando em modo *hot-spot* como fonte de radiação, um monocromador duplo de alta resolução (prisma e rede *echelle*) e detector constituído por um dispositivo de carga acoplada, que possui 588 *pixels*. A linha analítica do chumbo de 283,306 nm foi usada para a medida da absorvância integrada (A_{in}). Para as amostras líquidas o *pixel* central e os dois adjacentes à linha analítica ($CP \pm 1$) foram avaliados, já para as amostras sólidas monitorou-se apenas o *pixel* central (CP).

A análise das amostras líquidas foi realizada em triplicata, adicionando-se manualmente sobre a plataforma, com auxílio de micropipetas (BRAND, modelo Transferppete S), 10 μL da solução de modificador químico e 30 μL da amostra. No caso das amostras sólidas, a plataforma foi colocada sobre uma balança micro analítica M2P (Sartorius, Gottingen, Alemanha) e 0,03 a 0,29 mg de amostra foram pesados diretamente na plataforma, com o auxílio de uma espátula. Em seguida, foi adicionado 10 μL da solução de modificador químico (0,05 % (m/v) Pd, 0,03 % (m/v) Mg e 0,05 % (v/v) Triton X-100) e a plataforma foi introduzida no forno de grafite com o auxílio de uma pinça.

Cada amostra sólida foi pesada e analisada em quintuplicata e, uma vez que as massas de amostra foram diferentes para cada replicata, para efeito de comparação dos resultados, as A_{int} obtidas foram normalizadas para uma mesma massa de amostra, 0,03 mg. Então, o conjunto foi submetido ao programa de temperatura desenvolvido e otimizado por FICK *et al.*, conforme Tabela 2 (FICK *et al.*, 2018).

Tabela 2 - Programa de temperatura utilizado para determinação de Pb nas amostras de lodo por HR-CS SS-GF AAS.

Etapa	Temperatura (°C)	Rampa de aquecimento (°C s ⁻¹)	Tempo (s)	Fluxo de gás Ar (L min ⁻¹)
Secagem	90	10	20	2
Secagem	130	10	40	2
Pirólise	900	300	30	2
Atomização	2300	3000	5	0
Limpeza	2450	500	5	2

Fonte: Adaptado de FICK *et al.*, 2018.

5.4 LINEARIDADE E FAIXA DE TRABALHO

Para a determinação de chumbo nas amostras de lodo de estação de tratamento de água e no MRC, foram construídas curvas de calibração utilizando um branco e soluções padrão aquosas com concentrações de 7 µg L⁻¹ a 60 µg L⁻¹. A escolha da concentração dos padrões foi feita de acordo com a quantidade de analito presente na amostra. Foi inserida uma alíquota de 10 µL de solução no forno, juntamente com 10 µL de modificador e a mistura foi submetida ao mesmo programa de temperatura das amostras (Tabela 2).

Para os cálculos dos limites de detecção (LD) e quantificação (LQ) foram realizadas 10 medidas do branco e, então, os limites foram calculados conforme equações 1 e 2:

$$LD = \frac{3\sigma}{S} \quad \text{Equação 1}$$

$$LQ = \frac{10\sigma}{S} \quad \text{Equação 2}$$

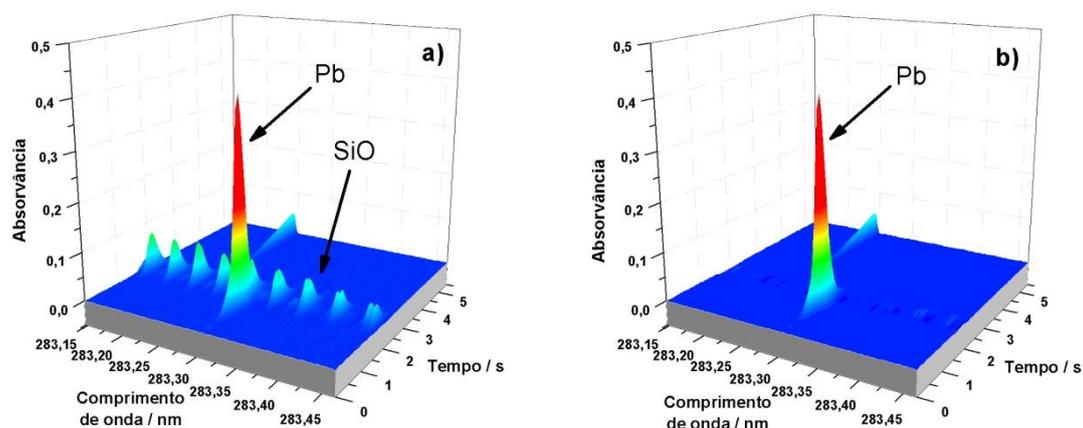
Onde σ é o desvio padrão das 10 medidas do branco e S é o coeficiente angular da curva de calibração.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ESCOLHA DA LINHA ANALÍTICA

Primeiramente foram realizadas medidas na linha analítica principal para Pb, em 217,001 nm (100% de sensibilidade relativa), porém as amostras sólidas continham alto teor do analito, apresentando elevados valores de absorvância integrada (A_{int}). Dessa forma, se decidiu utilizar a linha analítica secundária em 283,306 nm (48% de sensibilidade relativa), na qual as amostras apresentaram valores de A_{int} adequados. Porém, na região espectral em torno dessa linha analítica há a presença de um fundo estruturado gerado pela molécula de SiO, o que poderia afetar a medida do sinal analítico de Pb. Para contornar esse problema de absorção de fundo, foi gerado um espectro de referência da molécula de SiO, nas mesmas condições em que a amostra é medida, e este foi subtraído do espectro da amostra (Figura 4a) usando o algoritmo dos mínimos quadrados. A Figura 4b apresenta o espectro da amostra, resolvido temporalmente, após a realização da correção de fundo. Pode-se observar que a correção de fundo foi eficiente pois o fundo estruturado foi completamente removido.

Figura 4 - Espectros de absorção atômica, resolvidos temporalmente, de Pb em 0,072 mg de amostra de lodo de ETA - a) sem correção de fundo pelo algoritmo dos mínimos quadrados e b) com correção de fundo pelo algoritmo dos mínimos quadrados para a molécula de SiO



Fonte: O autor.

6.2 CURVAS DE CALIBRAÇÃO

Foram estabelecidos os parâmetros de desempenho do método utilizado neste trabalho que, como mencionado anteriormente, utilizou as condições experimentais desenvolvidas e otimizadas por FICK e colaboradores (FICK *et al.*, 2018). Para isso, foram construídas as curvas de calibração empregando-se 10 μL de cada uma das soluções padrão descritas no item 5.4, que resultaram nas massas de 0,07 a 0,6 ng de chumbo, dentro do forno.

Os valores obtidos para os parâmetros LD e LQ, bem como as equações da reta obtidas para as curvas de calibração são apresentados na Tabela 3. Os valores de LD e LQ são apresentados em concentração, isto é, eles foram calculados para uma massa normalizada de amostra de 0,03 mg (no caso das amostras sólidas) e para um volume de 30 μL (no caso das líquidas).

Tabela 3 - Parâmetros de mérito para a determinação de chumbo em amostras de lodo de ETA. Os valores de LD e LQ foram calculados para massas de 0,03 mg e volumes de 30 μL , respectivamente para amostras sólidas e líquidas.

Parâmetro	Amostras sólidas	Amostras líquidas
Equação da reta	$A = 0,00431 + 0,401 m \text{ (ng)}$	$A = 0,0102 + 1,04 m \text{ (ng)}$
R	0,994	0,991
LD	0,11 ng mg ⁻¹	0,68 $\mu\text{g L}^{-1}$
LQ	0,37 ng mg ⁻¹	2,26 $\mu\text{g L}^{-1}$

Fonte: O autor.

Em ambas as curvas se estudou o mesmo intervalo de massa (0,07 a 0,6 ng), variando-se apenas a quantidade de *pixels* para avaliação do sinal. A curva de calibração do chumbo para as amostras sólidas, em que foi utilizado apenas o *pixel* central (CP), se mostrou linear para toda a faixa de massa estudada, com A_{int} entre 0,0 e 0,25 s, aproximadamente. Já a curva de calibração do chumbo para as amostras líquidas, em que se utilizou um *pixel* central e dois adjacentes ($\text{CP} \pm 1$), se mostrou linear no intervalo de absorvâncias entre 0,0 e 0,6 s, aproximadamente, sendo também linear na faixa de 0,07 a 0,6 ng. A utilização apenas do *pixel* central para avaliar as amostras sólidas justifica-se por estas possuírem uma maior quantidade de analito, sendo necessário trabalhar-se com uma sensibilidade menor, o que pode ser comprovado pela menor inclinação da curva (0,401 s ng⁻¹). Por outro lado, para as amostras com pouco analito (líquidas), utilizou-se 3 *pixels*, pois assim

tem-se um somatório da absorvância, que resulta em uma elevada sensibilidade, também atestada pela maior inclinação ($1,04 \text{ s ng}^{-1}$) da curva nessas condições.

Visto que o menor parâmetro para chumbo que se tem nas legislações destinadas ao manejo deste resíduo é de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ (CONAMA 430/2011), considera-se que os valores de LD e LQ são satisfatórios em relação às legislações de interesse.

6.3 PRECISÃO E EXATIDÃO

Em todas as medidas realizadas dos padrões, amostras e MRC, foi calculado o desvio padrão relativo (DPR) entre as replicatas. Para as amostras sólidas e MRC os valores de DPR estiveram sempre abaixo de 15% (exceto para a amostra coletada em maio no município de Cachoeirinha, que apresentou 16%). Para as soluções padrão o DPR esteve abaixo de 5%, já as amostras líquidas apresentaram valores entre 5 e 15%, porém, como será mostrado posteriormente, todas elas ficaram abaixo do LQ. Esses valores são satisfatórios considerando-se a análise de traços, visto que são todos abaixo de 20% e de que se trata de amostras complexas (HUBER, 1998).

Para avaliar a exatidão do método proposto foi realizada a análise do MRC *Sandy Soil A*, de solo arenoso, utilizando soluções padrão aquosas para a calibração. Foram realizadas cinco medidas e, então, a concentração média de chumbo no material foi calculada. Os valores resultantes são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Avaliação da exatidão do método através da análise do MRC de solo.

MRC Sandy-A	
Valor certificado (mg kg^{-1})	15,2
Valor encontrado ($\text{mg kg}^{-1} \pm \text{s}$)	$15,7 \pm 0,9$
$t_{\text{calculado}}$	1,24

Fonte: O autor.

Utilizando-se o teste t de *Student*, com um nível de confiança de 95% e 5 medidas, o t tabelado corresponde a 2,78. Sendo o t tabelado maior que o t

calculado, os valores encontrados de chumbo no material de referência foram estatisticamente iguais aos valores certificados. Portanto, pode-se afirmar que o método empregado é exato e pode ser aplicado para as determinações de chumbo em lodo de ETA.

6.4 ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE LODO DE ETA

6.4.1 Determinação de Pb

Após determinados os parâmetros de desempenho do método, foram realizadas as análises das amostras. Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos para a quantificação de chumbo no lodo que não passou pela etapa de centrifugação antes da secagem, por HR-CS GF AAS, empregando-se a análise direta das amostras sólidas.

Tabela 5 - Quantificação de chumbo nas amostras de lodo de ETA sem centrifugação via HR-CS GFAAS. Valores para base seca.

Amostra (município)	Mês de coleta	Concentração de Pb (mg kg ⁻¹ ± s)	RSD (%)
Cachoeirinha	Maio	7,94 ± 1,23	16
Cachoeirinha	Agosto	10,3 ± 1,5	15
Gravataí	Agosto	8,22 ± 0,72	9
Guaíba	Setembro	9,03 ± 0,88	10

Fonte: O autor.

Observa-se que os valores de chumbo ficaram na faixa de concentração de 7,9 a 10,3 mg kg⁻¹ (base seca), todos acima do LQ. Interessante ressaltar que os extremos dos intervalos de concentração encontrados foram justamente nas amostras do mesmo município, o que pode ser explicado por fatores externos que alteram as características água bruta, por exemplo alterações climáticas que possam causar um aumento abrupto de partículas sedimentares devido à forte correnteza causada pelas chuvas, ou até mesmo em função de descarte incorreto de resíduos industriais ou agrícolas.

A Tabela 6 apresenta os valores encontrados para as amostras sólidas que passaram pela etapa de centrifugação e a fração sólida foi então seca.

Tabela 6 - Quantificação de chumbo nas amostras sólidas centrifugadas de lodo de ETA via HR-CS GFAAS. Valores para base seca.

Amostra (município)	Mês de coleta	Concentração de Pb (mg kg ⁻¹ ± s)	RSD (%)
Cachoeirinha	Maio	7,55 ± 0,54	7
Cachoeirinha	Agosto	10,5 ± 0,7	7
Gravataí	Agosto	8,21 ± 0,97	12
Guaíba	Setembro	10,8 ± 0,5	5

Fonte: O autor.

Os resultados observados se mostram muito similares aos encontrados na Tabela 5, onde a amostra foi seca integralmente, o que sugere que, quando da centrifugação, o chumbo concentra-se na parte sólida da amostra e não no sobrenadante.

Na Tabela 7 são mostrados os resultados da quantificação de chumbo nas amostras líquidas. Estes resultados vão ao encontro da observação anteriormente mencionada, pois mostra que todas as concentrações para a fração líquida da centrifugação estiveram abaixo do LQ (2,26 µg L⁻¹), sendo metade delas até mesmo abaixo do LD (0,68 µg L⁻¹).

Tabela 7 - Quantificação de chumbo nas amostras líquidas de lodo de ETA via HR-CS GFAAS.

Amostra (município)	Mês de coleta	Concentração de Pb (µg L ⁻¹ ± s)	RSD (%)
Cachoeirinha	Maio	< LQ	5
Cachoeirinha	Agosto	< LQ	11
Gravataí	Agosto	< LD	12
Guaíba	Setembro	< LD	15

Fonte: O autor.

6.4.2 Concentrações encontradas e aplicabilidade de acordo com legislação

Conforme mostrado na seção 6.4.1, os resultados das concentrações de chumbo ficaram entre 7,55 e 10,8 mg kg⁻¹ (base seca) para as amostras sólidas e abaixo do LQ para as amostras líquidas. Isso reforça a ideia trabalhada na revisão bibliográfica de que, na própria ETA, o lodo poderia ser centrifugado e a parte líquida

retornada para o início do tratamento, com o objetivo de reduzir consideravelmente o volume deste resíduo para, assim, facilitar seu manejo.

A legislação CONAMA nº 430, que dispõe sobre os parâmetros de lançamento de efluente para manter a qualidade de determinado corpo d'água, traz que a concentração máxima de chumbo permitida no efluente é de $0,5 \text{ mg L}^{-1}$. No caso do lançamento do lodo via expurgo no momento da lavagem de decantadores, como ocorre na maioria das ETAs do país, é complicado mensurar se a concentração deste elemento se enquadra ou não na legislação, visto que o volume do lodo sofre grande oscilação (ocasionada pela variação no volume de água usado para a lavagem do decantador) e não pode ser determinado com precisão.

Não há uma legislação específica para a aplicação agrícola do lodo de ETA, objeto de interesse de estudo deste trabalho, porém há legislação semelhante para o lodo de ETE. Essa legislação, CONAMA nº 375 de 2006, entre outros parâmetros, define que o limite máximo da concentração de chumbo para o lodo destinado à aplicação agrícola é de 300 mg kg^{-1} (base seca). Os resultados encontrados para as amostras sólidas estão muito abaixo desse parâmetro, contudo deve-se atentar para, ao incorporar o lodo de ETA no lodo de ETE, não exceder os parâmetros estabelecidos pela legislação para chumbo em lodo de ETE. Importante ressaltar que não somente o teor de chumbo como diversos outros critérios devem ser atendidos para que o lodo possa ser aplicado na agricultura, além de variados estudos a respeito do solo em que o mesmo será aplicado bem como o constante monitoramento de suas consequências para este solo, uma vez aplicado.

Para destinação em aterro sanitário não há parâmetros para o teor de chumbo no resíduo, não sendo objeto de avaliação nessa seção.

7 AVALIAÇÃO DE CUSTOS

Como apresentado na revisão bibliográfica, a maioria das estações de tratamento de água do país destinam seu lodo diretamente em corpos d'água, sem nenhum tipo de tratamento prévio, tendo atualmente um custo zero com o manejo de seus resíduos. Portanto, quaisquer que forem as sugestões de disposição final apresentadas neste trabalho, elas irão onerar as empresas que prestam este serviço quando comparadas ao que se pratica atualmente.

Conforme também trabalhado na seção 4.5, para que se facilite o manejo deste resíduo o primeiro passo é a desidratação do mesmo e, posteriormente, para que se possa avaliar o destino adequado, é necessário que se realize a caracterização do lodo. Ao fazer uma avaliação qualitativa dos custos que iriam implicar a implementação dessas etapas, deve-se levar em conta a aquisição de uma centrífuga para que possa ocorrer a separação das fases líquida e sólida; os gastos com a elaboração de um sistema capaz de encaminhar o lodo do fundo do decantador para a centrífuga, bem como de um sistema que conduza a fase líquida separada para o início do tratamento da estação.

Além disso, precisa ser considerado os custos com a terceirização das análises necessárias para caracterização do lodo. Por exemplo, a análise de uma amostra de lodo para avaliação da quantidade dos metais que constam na Resolução CONAMA 375/2006, tem o valor de aproximadamente R\$ 1100,00. Importante ressaltar que existem outros parâmetros, além dos teores de metais, nessa resolução que também necessitariam ser atestados por análises. Deve-se levar em consideração ainda, que a composição do lodo pode variar ao longo do tempo e, portanto, deve-se estabelecer, empiricamente, uma frequência de análise.

Uma vez caracterizado, apresenta-se duas alternativas para a destinação final do lodo: agrícola e aterro sanitário. Quando se tem interesse no envio para aterro sanitário, deve-se levar em conta o custo do transporte do lodo até o aterro e o custo da manutenção deste resíduo no aterro. Já para destinar o lodo para uso agrícola, devem ser considerados os custos com o transporte deste resíduo até o solo de interesse, com a caracterização deste solo e com o monitoramento do solo após aplicado o lodo.

Claramente a disposição final para uso agrícola causará o maior impacto financeiro para a estação, por outro lado é a única alternativa em que existe a

possibilidade de um retorno financeiro para a empresa dada a atividade fertilizante do lodo para o solo em questão.

8 IMPACTO AMBIENTAL

Mais de 9 anos já se passaram desde a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos que, dentre outras diretrizes, proíbe completamente o lançamento dos resíduos sólidos em corpos hídricos. Além disso, estabelece a seguinte ordem de prioridade para a gestão de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Embora o manejo correto do resíduo implique em um grande custo para as empresas fornecedoras de água, e a isso, provavelmente, se deva o atraso nacional nessa questão, já não se pode mais ignorar os impactos negativos que está se deixando para as gerações futuras. A partir do momento em que se realiza a caracterização do lodo pode-se abrir um leque de possibilidades para sua destinação de forma ambientalmente apropriada, impactando positivamente o meio ambiente e a sociedade, corroborando com a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

9 CONCLUSÃO

Como apresentado neste trabalho, outros países já vêm há alguns anos tendo outra postura em relação à disposição final adequada do lodo de ETA, investindo em pesquisas na área e, conseqüentemente, estão bem mais avançados do que o Brasil nessa questão.

O emprego da técnica de HR-CS GF AAS e análise direta de sólidos para a determinação de Pb em lodo de ETA, visto que apresentou resultados exatos e precisos, além de obter limites de detecção e quantificação abaixo dos parâmetros existentes nas legislações de interesse. Portanto, essa técnica se mostrou bastante promissora para ser incorporada na rotina do laboratório da ETA para determinação de chumbo e , futuramente, outros metais.

Neste trabalho obteve-se concentrações de Pb dentro do limite permitido pela legislação tanto nas frações sólida como nas líquidas das amostras centrifugadas. Logo, segundo o único parâmetro analisado neste trabalho – teor de chumbo-, o lodo de ETA poderia ser aplicado no solo para fins agricultáveis. Porém, ressalta-se que ainda há uma série de outros parâmetros que devem ser atendidos para que este lodo possa de fato ser aplicado na agricultura.

Os resultados mostrados neste trabalho podem ser considerados satisfatórios, mostrando um panorama geral e sendo apenas o princípio de um trabalho maior visando a viabilidade da utilização do lodo proveniente das estações de tratamento de água na agricultura. Dado que cada estação possui um manancial com características específicas, o lodo de cada uma delas terá suas próprias particularidades. Sendo assim, é importante a aplicação de métodos de análise simples, utilizando equipamentos e materiais de baixo custo e versatilidade, para que seja agilizado o processo de análise deste lodo.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Cynthia Franco; SILVA, Cristina Mendes; OLIVEIRA, F. C. Gestão ambiental em saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de eta e seus impactos na qualidade das águas. In: **V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Belo Horizonte/MG–2014**. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro. 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos- Classificação. 2 eds. Rio de Janeiro: 2004. 71 p.

BEATTY, Richard; KERBER, Jack. Concepts, Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry. The Perkin-Elmer Corporation, 1993.

BIDONE F.; SILVA A. P.; MARQUES, D. D. M. Lodos Produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETAs): Desidratação em Leitões de Secagem e Co-disposição em Aterros Sanitários. In: COSTA, A. F. S. D.; HAANDEL, A. C. V.; SALES, A.; SILVA, A. P.; FERREIRA, A. C.; COSTA, A. N. D.; CARNEIRO, C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V.; CHERUBINI, C.; RAMALDES, D. L. C.; MARQUES, D. D. M.; ERBA, D. A.; FERNANDES, F.; BIDONE, F.; CORDEIRO, J. S.; GOMES, L. P.; PINTO, M. A. T.; LIMA, M. R. P.; MARQUES, M. O.; VERONEZ, M.; COELHO, O. W.; CAVALCANTI, P. F. F.; SANTANA, R. C.; GONÇALVES, R. F.; SOUZA, S. G. D.. **Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos**. 1ª Edição. Rio de Janeiro. Ed ABES, 2001. Cap. 9, p 215-240.

BORGES, D. L. G.; CURTIUS, A. J.; WELZ, B.; HEITMANN, U. Fundamentos da espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua. **Revista Analytica**, v. 1, p. 58-67, 2005.

BOTERO, W. G. **Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola**. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, 2008.

BRASIL. (2006) **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília: DF.

BRASIL. (2005) **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília: DF.

BRASIL. (2010) Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Planalto, Casa Civil, DOU 3 ago. 2010a

BRASIL. (2011) **CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA)**. Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília: DF.

CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: SOUZA, A. G. D.; BARRETO, E.; CARVALHO, E. H. D.; BRANDÃO, J.; CORDEIRO, J. S.; PATRIZZI, L. J.; BERNARDO, L. D.; REALI, M. A. P.; SCALIZE, P. S.; GONÇALVES, R. F.; PIOTTO, Z. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água**. 1ª Edição. Rio de Janeiro. Ed ABES, 1999. Cap. 1, p 1-18.

CORDEIRO, J. S. Processamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: COSTA, A. F. S. D.; HAANDEL, A. C. V.; SALES, A.; SILVA, A. P.; FERREIRA, A. C.; COSTA, A. N. D.; CARNEIRO, C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V.; CHERUBINI, C.; RAMALDES, D. L. C.; MARQUES, D. D. M.; ERBA, D. A.; FERNANDES, F.; BIDONE, F.; CORDEIRO, J. S.; GOMES, L. P.; PINTO, M. A. T.; LIMA, M. R. P.; MARQUES, M. O.; VERONEZ, M.; COELHO, O. W.; CAVALCANTI, P. F. F.; SANTANA, R. C.; GONÇALVES, R. F.; SOUZA, S. G. D.. **Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos**. 1ª Edição. Rio de Janeiro. Ed ABES, 2001. Cap. 5, p 121-141.

DE CAPITANI, E. M.; PAOLIELLO, M. M. B.; ALMEIDA, G. R. C. Fontes de exposição humana ao chumbo no Brasil. **Revista Medicina**, Ribeirão Preto, V. 42 (3), p. 311-318, 2009.

DUARTE, A. T. **Estratégias de análise direta de amostras para determinação de elementos traço em biomassa e seus produtos de pirólise por espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e forno de grafite**. 2014. 97 f. Dissertação (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

EVANGELISTA, F. S. D. B.; SILVA, I. C. R. D. Fontes de Contaminação pelo Chumbo. **8ª Mostra De Produção Científica Da Pós-Graduação Lato Sensu Da Puc Goiás**. p. 28, 2013. Disponível em: <[http://www.cpgls.pucgoias.edu.br/8mostra/Artigos/SAUDE_BIOLÓGICAS/FONTES_DE_CONTAMINAÇÃO_PEL_O_CHUMBO_\(Pb\).pdf](http://www.cpgls.pucgoias.edu.br/8mostra/Artigos/SAUDE_BIOLÓGICAS/FONTES_DE_CONTAMINAÇÃO_PEL_O_CHUMBO_(Pb).pdf)>

FICK, S. S.; NAKADI, F. V.; FUJIWARA, F.; SMICHOWSKI, P.; VALE, M. G. R., WELZ, B.; ANDRADE, J. B. Investigation of spectral interference in the determination of Pb in road dust using high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry and direct solid sample analysis. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 33, n. 4, p. 593-602, 2018.

FRESCHI, G. P. G.; SINABUCRO, C. D.; NETO, J. A. G.; MORAES, M. Espectrometria de absorção atômica multielementar simultânea com atomização eletrotérmica em forno de grafite uma revisão da técnica e aplicações. **Eclética Química**, v. 25, n. 1, p. 0, 2000.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.; SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, Curitiba, v. 51, n. 318, p. 85-95, 2005.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; TRINDADE, E. M.; ANDREOLI, C. V. Uso de lodo de estação de tratamento de água centrifugado em matriz de concreto de cimento Portland para reduzir o impacto ambiental. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-84, 2006.

HUBER, L. Validation of Analytical Methods: Review and Strategy. **LC GC Europe**, v. 11, n. 2, p. 96-105, 1998.

HENDGES, L. T.; TONES, A. R. M.; REINHER, R. C. R.; LEICHTWEIS, J., FERNANDES, É. J. Disposição final de lodo de estação de tratamento de água e de esgoto: Uma revisão. In: ANAIS DO SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, n. 9, 2017, Santana do Livramento, **Anais...**, Santana do Livramento, 2017.

QUINTANA, N. R. G.; DO CARMO, M. S.; DE MELO, W. J. Lodo de esgoto como fertilizante: Produtividade agrícola e rentabilidade econômica. **Nucleus**, v. 8, n. 1, 2011.

MACHADO, L. C. G. T.; PEREIRA, J. A. R.; PONTE, M. X.; LOPES, L. N. A. Avaliação do aproveitamento agrícola do lodo produzido na ETA Bolonha-RMB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2004, p 916-926.

NOMURA, C. S.; DA SILVA, C. S.; OLIVEIRA, P. V. Análise direta de sólidos por espectrometria de absorção atômica com atomização em forno de grafite: uma revisão. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 104, 2008.

OLIVEIRA, I. Y. Q. D.; RONDON, O. C. Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. **Interações**. Campo Grande. V. 17. n. 4, p. 687-698, 2016.

REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETAs. In: SOUZA, A. G. D.; BARRETO, E.; CARVALHO, E. H. D.; BRANDÃO, J.; CORDEIRO, J. S.; PATRIZZI, L. J.; BERNARDO, L. D.; REALI, M. A. P.; SCALIZE, P. S.; GONÇALVES, R. F.; PIOTTO, Z. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água**. 1ª Edição. Rio de Janeiro. Ed ABES, 1999. Cap. 2, p 21-39.

REALI, M. A. P.; PATRIZZI, L. J.; CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: SOUZA, A. G. D.; BARRETO, E.; CARVALHO, E. H. D.; BRANDÃO, J.; CORDEIRO, J. S.; PATRIZZI, L. J.;

BERNARDO, L. D.; REALI, M. A. P.; SCALIZE, P. S.; GONÇALVES, R. F.; PIOTTO, Z. **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água**. 1ª Edição. Rio de Janeiro. Ed ABES, 1999. Cap. 4, p 85-105.

RODRÍGUEZ, N. Husillos et al. Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 5, p. 778-786, 2010.

SILVA, E. R. A. D. **Avaliação estratégica para a recuperação das águas residuais da ETA Laranjal/RJ**. 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, M. V. D. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SMIDERLE, J. J. **Estudo de viabilidade para destinação final do lodo da ETA Laranjal/RJ**. 2016. 99 f. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SOARES, E. **Adequação Jurídica de Resultados e Termos Científicos Provenientes de Estudos na Área de Toxicologia Ambiental: Estudo de Caso da Contaminação por Chumbo no Vale do Ribeira SP/PR**. 2002.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo, 2001. Trabalho Técnico apresentado no 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

VERLICCHI, P.; MASOTTI, L. Reuse of drinking water treatment plants sludges in agriculture: problems, perspectives and limitations. In: **Technology transfer. Proceedings of the 9th International Conference on the FAO ESCORENA Network on recycling of agricultural, municipal and industrial residues in agriculture**. 2000. p. 67-73.

WANG, M. C.; HULL, J. Q.; JAO, M.; DEMPSEY, B. A.; CORNWELL, D. A. Engineering behavior of water treatment sludge. **Journal of Environmental Engineering**, v. 118, n. 6, p. 848-864, 1992.

WELZ, B.; VALE, M. G. R.; PEREIRA, E. R.; CASTILHO, I. N. B.; DESSUY, M. B. Continuum Source Atomic Absorption Spectrometry: Past, Present and Future Aspects - A Critical Review. *Journal of The Brazilian Chemical Society*, v. 25, p. 799-821, 2014.

**ANEXO 1 – CONCENTRAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA DE SUBSTÂNCIAS
INORGÂNICAS NO LODO DE ESGOTO DESTINADO À AGRICULTURA**

Substâncias Inorgânicas	Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: CONAMA 375/06.

ANEXO 2 - PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES

Parâmetros inorgânicos	Valores máximos
Arsênio total	0,5 mg L ⁻¹ As
Bário Total	5,0 mg L ⁻¹ Ba
Boro total (Não se aplica para o lançamento em águas salinas)	5,0 mg L ⁻¹ B
Cádmio total	0,2 mg L ⁻¹ Cd
Chumbo total	0,5 mg L ⁻¹ Pb
Cianeto total	1,0 mg L ⁻¹ CN
Cianeto livre (destilável por ácidos fracos)	0,2 mg L ⁻¹ CN
Cobre dissolvido	1,0 mg L ⁻¹ Cu
Cromo hexavalente	0,1 mg L ⁻¹ Cr ⁺⁶
Cromo trivalente	1,0 mg L ⁻¹ Cr ⁺³
Estanho total	4,0 mg L ⁻¹ Sn
Ferro dissolvido	15,0 mg L ⁻¹ Fe
Fluoreto total	10 mg L ⁻¹ F
Manganês dissolvido	1,0 mg L ⁻¹ Mn
Mercúrio total	0,01 mg L ⁻¹ Hg
Níquel total	2,0 mg L ⁻¹ Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg L ⁻¹ N
Prata total	0,1 mg L ⁻¹ Ag
Selênio total	0,30 mg L ⁻¹ Se
Sulfeto	1,0 mg L ⁻¹ S
Zinco total	5,0 mg L ⁻¹ Zn
Parâmetros Orgânicos	Valores máximos
Benzeno	1,2 mg L ⁻¹
Clorofórmio	1,0 mg L ⁻¹
Dicloroeteno (somatório de 1,1 + 1,2cis + 1,2 trans)	1,0 mg L ⁻¹
Estireno	0,07 mg L ⁻¹
Etilbenzeno	0,84 mg L ⁻¹
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,5 mg L ⁻¹ C ₆ H ₅ OH
Tetracloroeto de carbono	1,0 mg L ⁻¹
Tricloroeteno	1,0 mg L ⁻¹
Tolueno	1,2 mg L ⁻¹
Xileno	1,6 mg L ⁻¹

Fonte: CONAMA 430/2011.