



# GERENCIAMENTO DO LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO MUNICÍPIO DE SALTO-SP: LOGÍSTICA E TRANSPORTES

**Palavras-Chave:** LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA, USO BENÉFICO, GERENCIAMENTO, SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA.

**Autores(as):**

LUIZ HENRIQUE FREITAS DA SILVA, FECFAU – UNICAMP  
Prof.<sup>(a)</sup>. Dr.<sup>(a)</sup>. RICARDO DE LIMA ISAAC (orientador(a)), FECFAU - UNICAMP  
CAMILA GOMES MARCHESINI FONSECA (coorientador(a)), FECFAU - UNICAMP

## INTRODUÇÃO:

A potabilização da água em estações de tratamento de água (ETA) convencionais tem como impacto negativo a geração de resíduos sólidos, com destaque para o lodo dos decantadores e filtros, que necessitam de tratamento e destinação final adequados do ponto de vista técnico, econômico e ambiental (RIBEIRO, 2008). As ETA transformam a água bruta, captada normalmente em mananciais superficiais - onde geralmente não se apresentam com qualidade adequada - em água potável para o consumo humano. Dentre as tecnologias que podem ser empregadas para esse fim, destaca-se a denominada convencional ou de ciclo completo, que compreende as etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, havendo a aplicação de insumos, notadamente, coagulante a base de alumínio ou ferro (RICHTER, 2009).

Diversos fatores interferem nas características qualitativas e quantitativas dos lodos gerados em uma ETA, com destaque para a qualidade da água captada, os insumos utilizados para o tratamento, do modo de limpeza dos decantadores e filtros, além da forma de tratamento do lodo. O conhecimento dessas características dos lodos é essencial quando se visa o adequado gerenciamento dos mesmos. Dada a elevada produção de lodo nas ETA, esse resíduo precisa receber uma destinação final ambientalmente adequada, evitando-se impactos ambientais, com possíveis reflexos sobre a saúde humana (ANDRADE; SILVA; OLIVEIRA, 2014). A disposição final dos lodos gerados nas ETA brasileiras de forma ambientalmente adequada e economicamente viável ainda constitui uma questão chave para o setor do saneamento. Esses resíduos comumente são dispostos nos cursos d'água mais próximos à ETA. Tal situação é agravada pela tendência de acréscimo na geração e piora da qualidade desses resíduos impulsionados tanto pelo aumento da demanda por água potável, dado o cenário de crescimento populacional e maior acesso ao saneamento, como pela deterioração da qualidade dos cursos d'água que requerem diferentes técnicas para o seu tratamento (URBAN et al., 2019).

O emprego de lodo de ETA como substituto da argila no setor ceramista tem sido amplamente estudado, sendo uma alternativa promissora para o uso benéfico desse resíduo, com trabalhos técnicos comprovando sua viabilidade (SILVA e FUNGARO, 2011; TARTARI et al., 2011; SILVA et al., 2015). Dentre os aspectos que impactam os custos da destinação do lodo, destacam-se aqueles relacionados à logística de transporte.

Deste modo, com o auxílio de ferramenta de análise espacial, Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a presente pesquisa visa identificar e analisar os aspectos logísticos relacionados ao transporte do lodo gerado nas ETA de Salto para seu uso benéfico em indústrias cerâmicas da região, contribuindo para a elaboração do panorama logístico da destinação final.

## METODOLOGIA:

Para a construção do Sistemas de Informação Geográficas (SIG), foram levantados dados sobre as ETA de Salto e os possíveis receptores do lodo (indústrias ceramistas e aterros sanitários) considerando um raio de influência de 10 km, baseado em URBAN (2016). Dados sobre a rede viária que interliga a posição geográfica das ETA aos seus receptores também foram levantados. De posse desses dados, foi elaborado com o auxílio do *software* QGIS, um mapa com a plotagem das localizações geográficas de cada ETA, aterro sanitário e indústria cerâmica dentro da área de influência adotada, sendo também plotados dados sobre o sistema de transporte, considerando a área de estudo. Assim, foi inserida a camada de transporte viário e rodoviário em operação, além de restrições impostas pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER), quais sejam, comprimentos e peso por eixo para caminhões de cargas.

Baseado em método empírico, a produção de lodo nas duas ETA de Salto (Bela Vista e João Jabour) foi estimada, a fim de realizar uma análise quantitativa do número de caminhões necessários para o transporte do lodo, bem como de quais indústrias teriam a capacidade de receber, total ou parcialmente, o resíduo para ser usado como substituto de parte da matéria-prima. A estimativa da produção de lodo foi realizada considerando a equação proposta por Richter (2001) (equação 1).

$$S = (0,2C + k_1T + k_2D) \cdot 10^{-3} \quad \text{(equação 1)}$$

Em que: S é a produção de sólidos (kg de matéria seca / m<sup>3</sup> de água bruta tratada); C é a cor da água bruta (uC); T é a turbidez da água bruta (UNT); D é a dosagem de coagulante (mg/L); k<sub>1</sub> é o coeficiente de relação entre sólidos suspensos totais e turbidez, que varia entre 0,5 e 2,0; k<sub>2</sub> é o coeficiente de relação estequiométrica na formação do precipitado de hidróxido, sendo dependente do tipo de coagulante.

Após o cálculo da quantidade de lodo produzido nas ETA estudadas, estimou-se a capacidade de recepção do lodo de cada indústria cerâmica. Com base nos resultados apresentados por URBAN (2016), a quantidade média de argila processada mensalmente pelas indústrias cerâmicas no Estado de São Paulo é de 2.223 ton/mês. Considerou-se 10% de incorporação do lodo em substituição à argila usada como matéria prima, valor que se encontra dentro da faixa de relação mássica lodo/argila descrita na literatura (entre 5% e 12,5%), para que não ocorram alterações significativas nas propriedades mecânicas das peças cerâmicas produzidas (URBAN, 2016). Além disso, neste trabalho, foi considerado que todas as cerâmicas presentes na área de estudo estão dispostas a receber o lodo como parte de substituição de sua matéria-prima e que elas possuem a mesma capacidade de recepção do lodo. Assume-se também que o lodo gerado nas ETA será igualmente distribuído entre os ceramistas.

Partindo da estimativa da geração de lodo, realizou-se uma análise logística para auxiliar no gerenciamento desse material de forma econômica, segura e sustentável. Inicialmente, utilizou-se o SIG desenvolvido para roteirizar as opções de percursos entre as ETA e as indústrias cerâmicas selecionadas na base de dados. Isso permitiu desenvolver rotas mais eficientes para o destino do lodo, calculando as distâncias entre as ETA e os potenciais receptores. Desse modo, foram identificados 12 percursos no total, com 6 rotas possíveis para cada uma das ETA, cobrindo todo o trajeto entre a estação de tratamento e as 6 cerâmicas consideradas neste estudo.

O custo do transporte em caminhão tipo com capacidade de 14 toneladas foi admitido como sendo de R\$ 12,42, valor atualizado pelo Índice Geral de Preços de Mercado (IGP-M) a partir do utilizado por Ribeiro (2008) referente ao custo de transporte de lodo na região das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Bacia PCJ).

Considerando esses pontos, foram propostos dois cenários distintos para estimar o custo logístico de gerenciamento do resíduo. No primeiro cenário, seria contratado um caminhão diariamente para transportar o lodo das duas ETA até as cerâmicas estudadas. Já no segundo cenário, o gerenciamento da destinação do lodo seria realizado mensalmente, considerando uma infraestrutura de tratamento e armazenamento por parte das ETA.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Na figura 1, que contém o mapa com as informações sobre as localizações geográficas das ETA estudadas, além dos possíveis receptores do lodo, considerando a área de influência com raio de 10 km, foram plotados tanto os dados das vias intermunicipais - disponíveis no site do IBGE - dos municípios limítrofes à Salto, parcialmente inseridos na área de influência adotada, como as localizações de pontes de acesso à cidade, avaliando-se a permissão para circulação de caminhões nas mesmas.

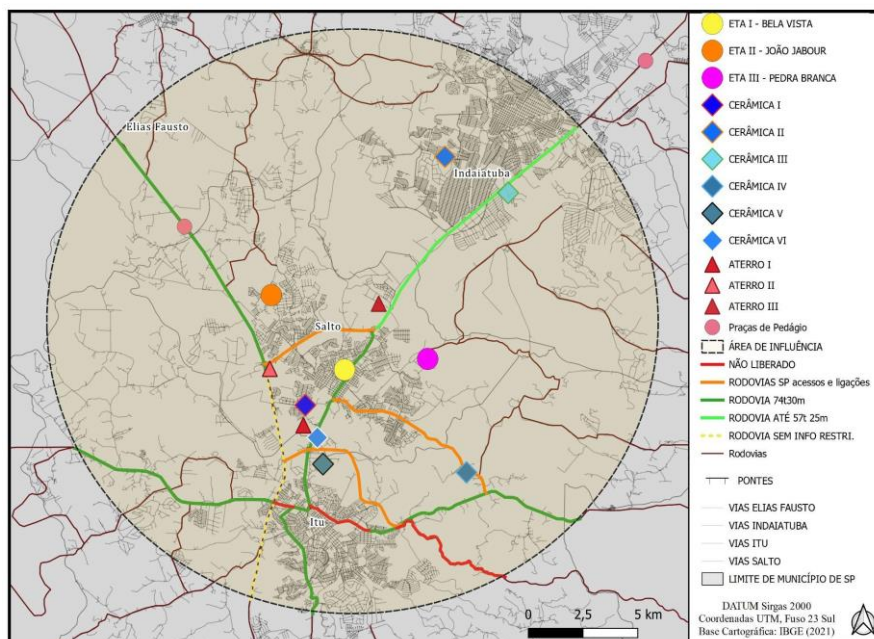


Figura 1: Mapa de localização das ETA, Cerâmicas e Aspectos viários na área delimitada.

Na abordagem logística, foram criados mapas de roteirização do lodo para a ETA Bela Vista (Figura 2) e para a ETA João Jabour (Figura 3), levando em consideração a distância, o tempo e as restrições de vias, a fim de analisar a solução mais eficiente com base no custo/distância e avaliar o uso das rotas em situações reais de transporte do lodo. Ressalta-se que nas referidas figuras constam os trajetos entre as ETA e as cerâmicas, considerando as rotas selecionadas.



Figura 2: Mapa de roteirização ETA Bela Vista.

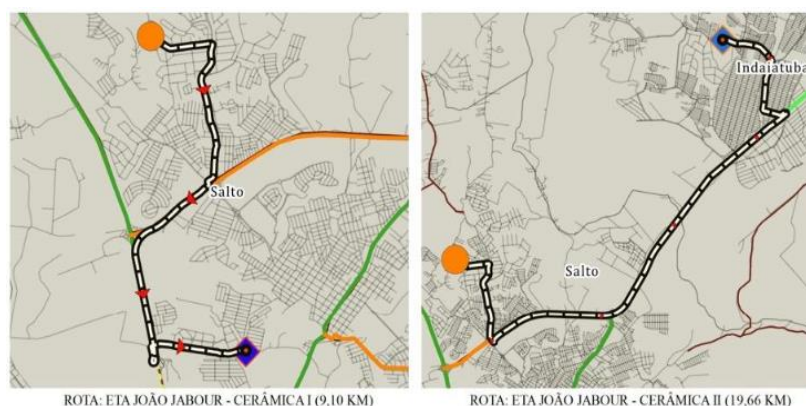


Figura 3: Mapa de roteirização ETA João Jabour.

Na tabela 1 é apresentada uma estimativa do custo com o transporte do lodo, considerando que a destinação ocorra de forma separada para cada ETA, caso proposto para o primeiro cenário. Como a máxima produção de lodo excede a capacidade de recepção de cada indústria cerâmica (7,29 ton/dia cerâmica), para estimar os custos com o transporte nessa situação, considerou-se que serão enviadas 7 ton/dia para cada cerâmica, quantidade de lodo próxima à capacidade de recepção de cada uma, sendo que o excedente deverá, conforme já comentado, receber outra forma de uso benéfico ou ser encaminhado para aterro sanitário. Dado que a capacidade do caminhão para o transporte do lodo é de 14 toneladas, será necessário apenas a contratação de 1 caminhão de carga para levar o lodo até as cerâmicas diariamente.

Tabela 1: Estimativa de custo de transporte do lodo das ETA até as cerâmicas, para as gerações mínimas, médias e máximas diárias de lodo (ton/dia).

	ETA Bela Vista		ETA João Jabour	
Quantidade de lodo a ser destinado para cada indústria cerâmica (ton/dia)	mínima: 0,20 média: 0,72 máxima: 7,00 (excedente: 6,73)		mínima: 0,032 média: 0,50 máxima: 7,00 (excedente: 11,74)	
<b>Cerâmicas</b>	<b>Distâncias ETA/Cerâmica (km)</b>	<b>Custo transporte (R\$)</b>	<b>Distâncias ETA/Cerâmica (km)</b>	<b>Custo transporte (R\$)</b>

Cerâmica I	3,50	43,47	9,08	112,77
Cerâmica II	15,52	192,76	19,66	244,18
Cerâmica III	14,46	179,59	18,61	231,14
Cerâmica IV	8,52	105,82	14,37	178,48
Cerâmica V	7,00	86,94	13,17	163,57
Cerâmica VI	3,87	48,07	12,37	153,64

Da tabela 1, observa-se que a quantidade de lodo transportada não aproveita toda a capacidade do caminhão. Assim, caso seja adotada a destinação diária de lodo das ETA até as cerâmicas, pode-se optar por contratar apenas um caminhão para realizar o transporte dos lodos das duas ETA para uma mesma cerâmica, no qual será feito o recolhimento do lodo das ETA e o transporte para a indústria cerâmica, tendo neste caso, o acréscimo do custo referente ao transporte de uma ETA para outra, mas, em compensação, gerando a economia com os custos associados a contratação de um veículo.

Para o segundo cenário, destaca-se que, considerar valores mínimos e máximos de turbidez e cor registrados no período analisado (de abril de 2022 a março de 2023, para a ETA Bela Vista, e de junho de 2022 a março de 2023, para a ETA João Jabour) pode sub ou superestimar a geração mensal de lodo, uma vez que é pouco provável que as águas brutas naturais registrem valores tão baixos ou tão elevados de cor e turbidez, sistematicamente, durante todo o mês, mesmo em períodos secos ou chuvosos. Por essa razão, para esse cenário de destinação mensal do lodo às cerâmicas, adotou-se apenas a quantidade média de lodo gerada (massa da torta de lodo desaguado), sendo esta igual a 132,37 ton/mês para a ETA Bela Vista e 91,20 ton/mês, para a ETA João Jabour. Dito isto, considerando que esse lodo será igualmente distribuído entre as 6 ceramistas escolhidas, a quantidade de lodo a ser destinada para cada uma delas é de 37,26 toneladas por mês. Para a quantidade de lodo a ser destinada para cada indústria cerâmica considerando a geração média mensal de lodo, serão necessários 2 caminhões para o transporte do lodo e os custos são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Estimativa de custo de transporte do lodo das ETA até as cerâmicas, para a geração média de lodo em ton/mês.

	ETA Bela Vista		ETA João Jabour	
Quantidade de lodo a ser destinado para cada indústria cerâmica (ton/mês)	média: 22,06		média: 15,20	
Cerâmicas	Distâncias ETA/Cerâmica (km)	Custo transporte (R\$)	Distâncias ETA/Cerâmica (km)	Custo transporte (R\$)
Cerâmica I	3,50	86,94	9,08	225,55
Cerâmica II	15,52	385,52	19,66	488,35
Cerâmica III	14,46	359,19	18,61	462,27
Cerâmica IV	8,52	211,64	14,37	356,95
Cerâmica V	7,00	173,88	13,17	327,14
Cerâmica VI	3,87	96,13	12,37	307,27

Pelos dados apresentados, nota-se que poderia ser adotada a mesma solução prevista anteriormente para a destinação diária do lodo, porém neste caso de destinação mensal haveria um melhor aproveitamento da capacidade dos caminhões, com redução de custos com transporte. Para destinar o lodo de forma mensal, é necessário considerar não apenas os custos com o transporte, mas também os de armazenamento do resíduo, além de fatores relacionados ao controle das qualidades mínimas exigidas pelas cerâmicas para o lodo. Esses itens devem ser somados ao cálculo do custo da logística de transporte do lodo para compor o custo total de sua destinação final.

Como as características da água bruta são variáveis ao longo do tempo, a quantidade e qualidade do lodo também o são. Essa variabilidade pode representar desafios para a logística e transporte deste resíduo, sendo esta uma etapa importante do processo de gerenciamento do lodo de ETA, por impactar diretamente os custos de transporte e destinação do lodo. Uma forma de minimizar os efeitos da variabilidade quantitativa da geração do lodo nas ETA seria a implantação de unidades de gerenciamento de lodo (UGL), também denominadas centrais de lodo, como as propostas por URBAN (2019), que objetivam o gerenciamento conjunto de lodo de várias ETA, recebendo e armazenando esse resíduo por um período até que o mesmo seja encaminhado para seu uso benéfico. Entretanto, essa alternativa pode impactar nos custos de destinação final já que, conforme apontado pelo referido autor, o custo de armazenamento é dependente do tempo de espera necessário para envio do material para o destino final, sendo que quanto maior for a necessidade de espera, maior será a área requerida, podendo influenciar no custo com aluguel, se for o caso, no custo de manutenção e no custo com a estrutura de armazenamento necessária.

## CONCLUSÕES:

Realizou-se para as duas ETA uma análise buscando verificar quais cerâmicas teriam capacidade de receber, em parte, o lodo produzido para a incorporação na fabricação dos materiais cerâmicos, com auxílio das equações empíricas para a estimativa da produção de lodo e dos mapas de localizações e restrições já mencionadas. Foi elaborada uma análise logística com todos os possíveis destinos do lodo de cada estação de tratamento, num raio de 10 km, inserindo-se: quantos caminhões serão necessários para o transporte dos resíduos, quais rotas poderão ser utilizadas e por fim, o custo diário e mensal de transporte por peso e distância para os destinos selecionados.

## BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, C.F.; SILVA, C.M.; 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, 5, 2014, Belo Horizonte: Ibeas, 2014. v. 1, p. 1-11.

RIBEIRO, C. F. **Uso de sistemas de informações geográficas na gestão do lodo das estações de tratamento de água de uma bacia hidrográfica**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Campinas, SP, Brasil.

RICHTER, C. A. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. 1. ed. São Paulo: **Blucher**, 2001. p. 102. ISBN 978-85-212-0289-9.

SILVA, M.V.; FUNGARO, D.A. Caracterização de lodo de estação de tratamento de água e cinzas de carvão visando sua utilização na manufatura de tijolo. In: **International workshop advances in cleaner production**, 3. São Paulo, 2011. São Paulo: Unip, p. 1-10, 2011.

TARTARI, R.; DIAZ-MORA, N.; MÓDENES, A.N.; PIANARO, S.A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica**, v. 57, p. 288-293, 2011.

URBAN, R. C. ISAAC, R. d. L.; MORITA, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE**, v. 67, n. 219, p. 128–158, 2019.

URBAN, R. C. Metodologias para gerenciamento de lodo de ETA e ETE. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Campinas, SP, Brasil.