

IV-933 - ALGORITMO PARA SELEÇÃO DE PROCESSOS DE TRATAMENTO PARA SISTEMAS DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO URBANO

Rodrigo Pinheiro Pacheco⁽¹⁾, Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia Ambiental, CPF 018.976339-63, rodrigopacheco@cobrape.com.br, brasileiro, (41) 98857-4745 - COBRAPE - Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos

Tarso José Tulio⁽¹⁾, Engenheiro Civil e Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela UFPR, CPF 033.703.249-11, tarsotulio@cobrape.com.br, (41) 988047507, COBRAPE - Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos

William Cantos Correa⁽¹⁾, Engenheiro Ambiental e Mestre em Engenharia Ambiental pela UFPR, CPF 029.26884904, williamcorrea@cobrape.com.br, (41) 99129-3699, COBRAPE - Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos

Daniel da Costa Santos, Engenheiro Civil, Filósofo, Mestre Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRG, doutor Construção Civil e Estruturação Urbana pela USP e pós-doutorado em Saneamento Ambiental no Institute for Water Education, UNESCO IHE, Holanda. Professor da Universidade Federal do Paraná, no Departamento de Hidráulica e Saneamento junto ao Programa de Pós-Graduação – PPGERHA.

Miguel Mansur Aisse, Engenheiro Civil, mestre Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento pela USP e doutor em Engenharia Civil - Engenharia Hidráulica pela USP. CPF 307.807.139-15, Professor da Universidade Federal do Paraná junto ao Programa de Pós-Graduação – PPGERHA.

Endereço⁽¹⁾: Avenida São Jose, 618 – Cristo Rei – Curitiba – Paraná – Brasil – CEP: 80.050-350 – fone: +55 (41) 3094-2424

RESUMO

Este estudo apresenta uma consolidação metodológica para a seleção de processos de tratamento de esgoto mais adequado, sob a ótica do cálculo da diluição, observando as concentrações limites da Resolução do CONAMA 357/2005 e verificando as $Q_{disponível}$ e $Q_{apropriada}$, através de equações conhecidas. Como resultado, são apresentados fluxogramas e resultados da aplicabilidade do algoritmo para uma situação hipotética; O estudo mostra um quadro com os principais processos e suas eficiências para a remoção das cargas orgânicas e nutrientes; Conclui-se que algoritmo apresentado é uma metodologia eficiente e ambientalmente adequada na escolha de um processo de tratamento com poucos parâmetros de entrada. E ressalta-se que, com pouca disponibilidade hídrica para a diluição, o reuso do efluente na agricultura e/ou indústria é a solução ambientalmente mais viável.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo; processos; diluição; tratamento de esgoto;

INTRODUÇÃO

Segundo o Atlas de Esgoto da ANA (2017), o Brasil conta com 2.768 Estações de Tratamento de esgotos – ETEs em operação, o que equivale ao tratamento de 43% dos municípios brasileiros, porém, mesmo quando existentes, muitas destas ETEs têm problemas operacionais e de projeto. (DANTAS, 2022).

Ademais, com o aumento gradativo das populações urbanas, aliado ao incremento de atendimento com rede coletoras e, consequente, maior produção de efluentes sanitários contribui para a degradação dos corpos hídricos locais, caso os esgotos domésticos não sejam tratados de forma adequada (CORREA, 2017).

As matrizes de tratamento a serem adotadas são definidas através da fixação de graus de tratamento ou eficiências de remoção de poluentes ou ainda em um tipo de processo específico, enquanto a qualidade do efluente pode se basear na fixação de valores máximos permissíveis de um dado poluente ou na própria qualidade de água que deva ser mantida no curso d'água em função de usos preponderantemente nele exercidos (VERÓL E VOLSCHAN, 2007).

Neste caso, o uso de modelos matemáticos de qualidade das águas consiste em uma eficiente ferramenta para análise do impacto do lançamento de efluentes nos rios, assim como no auxílio do estudo de intervenções (VON SPERLING, 2014).

Assim, quando vislumbrado a necessidade de implementações e adequações dos sistemas de esgotamento sanitário, é importante definirmos os corpos hídricos receptores com capacidade de receber o efluente tratado, de modo que o corpo de água receptor não sofra alterações nos parâmetros de qualidade fixados para a região afetada pelo lançamento. (JORDÃO, 2011).

Apesar de existirem diversas formas de se definir um processo de tratamento esgoto a ser utilizado em uma localidade específica, poucas vezes esta metodologia é documentada e descrita de forma detalhada.

Utilizando como ponto de partida a Política Nacional (Lei nº 9.433/1997), que prevê a diluição dos esgotos, tratados ou não, mediante outorga concedida pelo Poder Público, deve-se enfatizar que, embora os corpos d'água receptores tenham capacidade de autodepuração, não se deve utilizá-los como sistemas de tratamento. Isso resultaria na degradação do corpo receptor, comprometendo todos os organismos locais que dependem da qualidade das águas, além de tornar inviável os usos múltiplos das águas à jusante do ponto de lançamento (SOARES e SILVA, 2018).

OBJETIVO

O objetivo deste artigo é, utilizando técnicas simples e conceitos já estabelecidos, consolidar uma metodologia para seleção de tecnologias de tratamento de esgoto, visando auxiliar os profissionais de engenharia na tomada de decisão criteriosa. Neste sentido, está apresentado um algoritmo simplificado, que verifique um ou mais dos principais parâmetros de lançamento (DBO, N e P) necessários à tomada de decisão relativa à escolha de processos de tratamento a serem adotados.

METODOLOGIA

Como ponto de partida, é necessário se estabelecer possíveis locais de disposição final do efluente tratado, analisando a hidrografia da região do entorno da ocupação urbana a fim de determinar quais os locais de lançamento com maior capacidade de diluição e os pontos ao longo do corpo hídrico onde haja incrementos de vazões consideráveis.

A definição do corpo receptor do município é uma atividade importante no momento da avaliação da alternativa técnica, uma vez que a vazão disponível para diluição pode exigir um tratamento de maior, ou menor complexidade, conforme as limitações impostas pelas legislações federais, estaduais e municipais vigentes, como também os planos de bacia, caso existentes.

A vazão disponível no ponto específico do corpo hídrico superficial é estimada através da equação 01.

$$Q_{Disponivel} = C \times Q_{Referencia} - Q_{Indisponivel} \quad (01)$$

sendo:

- $Q_{Disponivel}$ – Vazão disponível para diluição do lançamento de esgoto sanitário;
- C – Coeficiente que limita percentualmente o uso da vazão de referência para diluição do lançamento de esgoto sanitário, conforme legislação de cada estado a ser aplicado;
- $Q_{Referencia}$ – Vazão de referência do ponto de lançamento de esgoto sanitário, calculada através da área de contribuição do ponto multiplicada pela vazão específica da área;
- $Q_{Indisponivel}$ – Vazão alocada para outros usuários que não poderá ser utilizada, representada pela somatória das vazões outorgadas a montante e jusante do ponto estudado;

Já a vazão necessária para diluir o efluente esgoto tratado pode ser estimado fazendo uso de conceitos simples como a conservação da massa. Neste caso, a vazão apropriada para diluição pode ser estimada através da equação 02.

$$Q_{Apropriada} = \frac{Q_{Efluente}(C_{Efluente} - C_{Limite})}{(C_{Limite} - C_{Receptor})} \quad (02)$$

sendo:

- $Q_{Apropriada}$ – Vazão apropriada para diluição do efluente;
- $Q_{Efluente}$ – Vazão do efluente lançado;
- $C_{Efluente}$ – Concentração do efluente lançado;

- C_{Limite} – Concentração limite do corpo receptor; e
- $C_{Receptor}$ – Concentração verificada no corpo receptor.

Atualmente os padrões de qualidade dos rios tem seus principais parâmetros definidos pela RESOLUÇÃO CONAMA 357 de 2005. Considera-se que o lançamento de um efluente não pode alterar as classes estabelecidas no momento da mistura. Portanto, pode-se assumir os seguintes limites de concentração no corpo receptor apresentados no quadro 1

Quadro 1 – Concentração limite para o cálculo de diluição (mg/L)

Classes	DBO	Nitrogênio Total (pH < 7,5)	Fósforo Total (ambiente lóxico)
1	3,0	3,7	0,10
2	5,0	3,7	0,10
3 e 4	10,0	13,3	0,15

Fonte: RESOLUÇÃO CONAMA 357/2005

Quando a capacidade de diluição do esgoto tratado em determinado corpo receptor é muito baixa, normalmente em municípios estabelecidos em cabeceiras de bacias, as condições para o lançamento tornam-se bastante restritivas. Neste caso, seria necessário avaliar a existência de outros corpos receptores próximos da sede urbana, mesmo que a solução exija a construção de um emissário.

Inexistindo pontos de lançamento com maior diluição que suporte processos de tratamento mais simplificados, irá ocorrer a demanda por processos biológicos mais eficientes e conseqüentemente mais complexos. Inclusive, podendo até exigir a filtração deste efluente, assistida quimicamente ou não, bem como em alguns casos mais restritivos, demandando processos similares as estações de tratamento de águas para abastecimento público, tornando esta situação ainda mais complexa.

Alternativamente, a ETE pode ser posicionada próximo a locais onde seja possível fazer uso sustentável de seus subprodutos. Como por exemplo, próxima as zonas de cultivo para fertirrigação, ou para o uso industrial. Sendo assim, reduzindo a vazão do efluente e conseqüentemente, uma menor vazão apropriada para diluição.

Como forma de se organizar esta metodologia de tomada de decisão, a Figura 1 resume o algoritmo, através do fluxograma para o estudo de diluição.

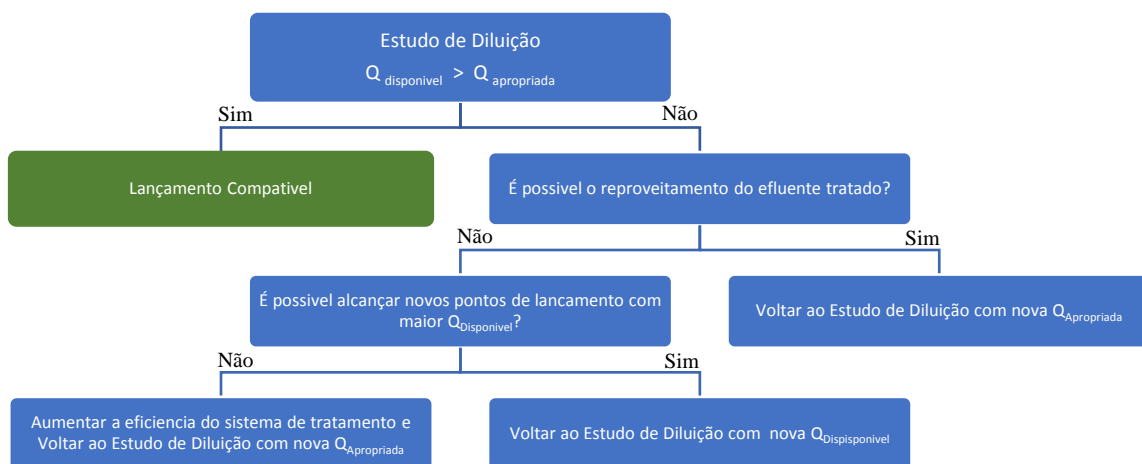


Figura 1 – Fluxograma para o estudo de diluição

Seguindo o fluxograma da figura 1, tem-se:

- ✓ Quando $Q_{Disponível}$ é maior que $Q_{Apropriada}$ o corpo receptor no local avaliado tem vazão de diluição compatível com a vazão de saída da ETE com o processo proposto;
- ✓ Quando $Q_{Disponível}$ é menor que $Q_{Apropriada}$ - o corpo receptor no local avaliado não tem vazão de diluição compatível com a vazão de saída da ETE com o processo proposto.

Restando assim as seguintes alternativas:

- ✓ Buscar o reuso do efluente para o seu aproveitamento reduzindo a vazão de lançamento e consequentemente a diluição no corpo hídrico;
- ✓ Buscar um novo local de lançamento com maior vazão disponível para a diluição ou encontrar um corpo receptor com concentração limite mais elevada; e
- ✓ Implantar unidades de tratamento complementares com objetivo de melhorar a eficiência de ETE ou a adoção de um novo processo de tratamento com maior eficiência.

No entanto, ressalta-se que nos casos de reservatório à jusante do lançamento dos efluentes domésticos, irá ocorrer a necessidade de remoção complementar de P e N (nitrificação do N). Portanto deverá observado que:

- ✓ Na remoção do P será demandado um tratamento físico-químico adicional ao biológico. O processo unitário mais comum a ser utilizado é coagulação seguida da floculação química, com posterior separação de sólidos em decantadores, flutuadores ou filtros;
- ✓ Na remoção do N, principalmente quanto ao NH_3 , será demandado um tratamento aeróbio mais robusto com maior idade de lodo, demanda de oxigênio e concentração de sólidos.

Existem algumas legislações estaduais vigentes que observam apenas a concentração de lançamento (DBO, N e P) como o parâmetro, ou seja, pelos limites das concentrações máximas destes, ao invés da capacidade de diluição do corpo receptor. Para estes casos específicos, o algoritmo a ser adotado passa a ser mais simplificado, conforme observado na figura 2:

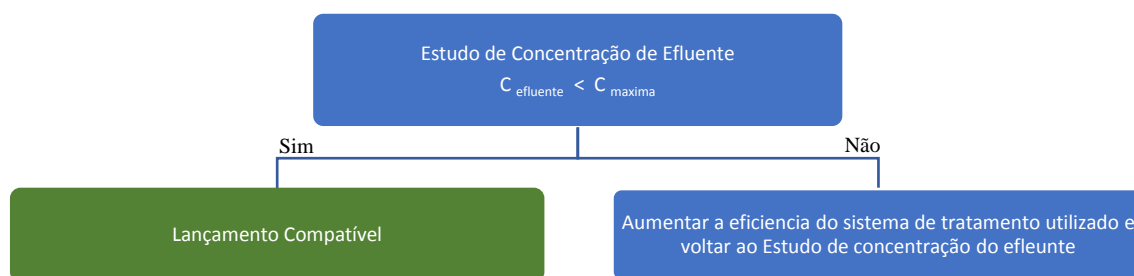


Figura 2 – Fluxograma para avaliação de concentração do efluente

Considerando as alternativas dos algoritmos que apontaram para o aumento do sistema de tratamento utilizado, o quadro 2 apresenta um resumo das eficiências encontradas na literatura para remoção de carga orgânica (DBO) e macro nutrientes (N e P), a ser utilizado como referência:

Quadro 2 – Eficiências para remoção de carga orgânica e macro nutrientes em processos de tratamento

Processo de Tratamento	DBO	Fósforo	Nitrogênio	*CET (mg/L)
Reator UASB	60%	30%	30%	120
Lagoa Anaeróbia	60%	30%	20%	120
Reator UASB + Filtro Biológico Percolador (sem Decantador)	80%	30%	30%	60
Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa	80%	30%	30%	60
Reator UASB + Filtro Biológico Percolador + Decantador	90%	30%	30%	30
Reator UASB + Lagoa de Polimento + Lagoa de Maturação	90%	35%	40%	30
Reator UASB + Lodo Ativado de Fluxo Contínuo	93%	35%	90%	20
Lodo Ativado em Bateladas + Hipoclorito de Sódio	93%	35%	90%	20
Reator UASB + Lodo Ativado de Fluxo Contínuo + Filtração	97%	35%	90%	10
Reator UASB + Lodo Ativado de Fluxo Contínuo + Filtração Final + Hipoclorito de Sódio	97%	35%	90%	10
Lodo Ativado de Fluxo Contínuo + Coagulação (Fe) + Floculação + Decantação Acelerada + Filtração	97%	50%	90%	10
Lodo Ativado de Fluxo Contínuo com Câmara de Pré-Desnitrificação + Filtração Terciária + Radiação Ultravioleta	97%	50%	90%	10
Reator UASB + Lodo Ativado de Fluxo Contínuo + Coagulação (Fe) + Floculação + Decantação Acelerada + Filtração	97%	50%	90%	10
Lodo Ativado com Desnitrificação + Filtração	97%	40%	90%	10

* CET – expectativas da concentração de DBO do efluente tratado, considerando o esgoto doméstico típico;

Fonte: Modificado de Von Sperling, 2014 e Atlas de Esgoto da ANA (2017);

É importante ressaltar que os valores das eficiências das ETEs, apresentados no Quadro 2, tratam-se de faixas observadas nas respectivas ETEs, conforme estão presentes nas literaturas. No entanto, há uma série de condições que podem refletir diretamente nestes números, tais como: cargas não típicas de contaminantes na entrada da ETE, má operação do sistema de tratamento, temperaturas e pressões atípicas, águas de chuvas entrando no sistema através de ligações de águas pluviais, etc.

RESULTADOS - APLICABILIDADE DO ALGORITMO

O quadro 3 apresenta os resultados dos cálculos de diluição para um corpo receptor hipotético, com valores de DBO/OD estabelecidos em função das classes mais usuais (2 e 3) da Resolução CONAMA 357 / 2005, a qual admite que a mistura completa do efluente tratado no corpo receptor (em pontos de lançamentos distintos), através das equações 01 e 02 apresentadas.

Quadro 3 – Estudo de Diluição da DBO para Três Pontos de Lançamento

Corpo receptor	Corpo receptor hipotético		
Ponto do lançamento	Ponto 01 – junto à ETE	Ponto 02 – 500 metros à jusante	Ponto 03 – 1.000 metros à jusante
$Q_{Referencia}$ (L/s)	50,0	100,0	200,0
$Q_{Indisponivel}$ (L/s)	5,0	10,0	10,0
$Q_{Disponivel}$ (L/s) ⁽¹⁾	35,0	70,0	150,0
Ano de referência	Início de Plano	1ª Etapa	Final de Plano
$Q_{Efluente}$ (L/s)	10	12	14
Máxima DBO de lançamento para enquadramento na Classe 2⁽²⁾			
	Início de Plano	1ª Etapa	Final de Plano
Ponto 01	15,5	13,8	12,5
Ponto 02	26,0	22,5	20,0
Ponto 03	50,0	42,5	37,1
Máxima DBO de lançamento para enquadramento na Classe 3⁽³⁾			
	Início de Plano	1ª Etapa	Final de Plano
Ponto 01	34,5	30,4	27,5
Ponto 02	59,0	50,8	45,0
Ponto 03	115,0	97,5	85,0
Máxima Concentração de N de lançamento para enquadramento na Classe 2⁽⁴⁾			
	Início de Plano	1ª Etapa	Final de Plano
Ponto 01	14,90	13,03	11,70
Ponto 02	26,10	22,37	19,70
Ponto 03	51,70	43,70	37,99
Máxima Concentração de N de lançamento para enquadramento na Classe 3⁽⁵⁾			
Ponto 01	54,60	47,72	42,80
Ponto 02	95,90	82,13	72,30
Ponto 03	190,30	160,80	139,73
Máxima Concentração de P de lançamento para enquadramento na Classe 2⁽⁶⁾			
Ponto 01	0,42	0,36	0,33
Ponto 02	0,73	0,63	0,55
Ponto 03	1,45	1,23	1,06
Máxima Concentração de P de lançamento para enquadramento na Classe 3⁽⁷⁾			
	Início de Plano	1ª Etapa	Final de Plano
Ponto 01	0,62	0,54	0,49
Ponto 02	1,10	0,94	0,83
Ponto 03	2,18	1,84	1,60

⁽¹⁾ Na rotina de cálculo considerou-se Coeficiente de uso $C = 0,8$

⁽²⁾ Na rotina de cálculo considerou-se DBO Limite = 5,0 mg/L e DBO corpo receptor = 2,0 mg/L

⁽³⁾ Na rotina de cálculo considerou-se DBO Limite = 10,0 mg/L e DBO corpo receptor = 3,0 mg/L

⁽⁴⁾ Na rotina de cálculo considerou-se Concentração Limite de NT= 3,7 mg/L e NT corpo receptor = 0,5 mg/L

⁽⁵⁾ Na rotina de cálculo considerou-se Concentração Limite de NT= 13,3 mg/L e NT corpo receptor = 1,5 mg/L

⁽⁶⁾ Na rotina de cálculo considerou-se Concentração Limite de PT = 0,10 mg/L e PT corpo receptor = 0,010 mg/L

⁽⁷⁾ Na rotina de cálculo considerou-se Concentração Limite de PT = 0,15 mg/L e PT corpo receptor = 0,015 mg/L

Fonte: desenvolvido pelos autores (2023)

A partir da aplicação do algoritmo de tomada de decisão, avaliando o nível de eficiência de cada sistema de tratamento na remoção de DBO, N e P é possível se estabelecer um conjunto de processos de tratamento com eficiência das e remoções apresentados no quadro 2.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

No Quadro 3 é possível observar que em lançamento de efluentes em pontos com disponibilidade hídrica restrita irão apresentar dificuldade no atendimento dos critérios de diluição.

No ponto 01, na condição do corpo hídrico enquadrado como Classe 2, verifica-se uma demanda por sistemas de tratamento com um altíssimo grau de eficiência, necessitando inclusive da utilização de processos físico-químico para a atingir a eficiência mínima esperada.

Outra alternativa para o ponto 01 e classe 2, seria a utilização do reuso, evitando assim parte do lançamento. Neste caso a estação de tratamento seria contemplada com unidades complementares que possibilitariam o uso sustentável do efluente. No caso da fertirrigação: seriam implantadas unidades de desinfecção e armazenamento de água de reuso; para o caso de uso industrial: as unidades complementares irão variar conforme as características necessárias da água de reuso, conforme preconizado no algoritmo.

Uma condição mais favorável para se realizar o lançamento de efluente tratado seria destiná-lo aos pontos 02 e 03, cujos sistemas de tratamento não demandaria etapas terciárias, apenas fazendo uso de soluções de digestão anaeróbia e aeróbia consorciada, conforme observado no Quadro 3. A restrição para estes processos de tratamento é quanto ao reuso, ou seja, o efluente deles é inadequado para a indústria.

Tanto no ponto 02 e classe 2, assim como no ponto 01 e classe 3, é necessário utilizar sistemas de tratamento com aeração forçada. Nos demais casos, cuja demanda por concentração de DBO no lançamento é menos restritiva, é possível a utilização de sistema sem a aeração forçada, ou seja, menor consumo energético.

Quando existe a necessidade de realizar a remoção de nutrientes, em especial o P principalmente para o caso de reservatórios com tomada de água para abastecimento, poderá ser observado uma maior demanda por vazões de diluição.

Mesmo nestes casos mais favoráveis, caso haja a necessidade da remoção de nutrientes (P e/ou N) para os sistemas propostos, devem passar por análises mais criteriosas. No caso de remoção de P, o sistema de tratamento proposto deverá ser contemplado com unidades adicionais dosagem de coagulantes no processo de tratamento. Para a remoção de N, o processo de tratamento deve contar necessariamente com sistemas aeróbios que permitam fase anóxica. Neste caso, recomenda-se que a ETE não faça o uso de reatores anaeróbios à montante do reator aeróbio.

CONCLUSÕES

O algoritmo apresentado revelou-se uma metodologia eficiente e ambientalmente adequada para auxiliar na escolha de um processo de tratamento de esgotos para uma localidade específica, fazendo uso de um conceito consolidado a partir de uma quantidade reduzida de parâmetros de entrada.

Os limites estabelecidos pela RESOLUÇÃO CONAMA 357 de 2005 podem se apresentar menos restritivos em certos estados e, portanto, se faz necessário consultar as leis locais para os cálculos de diluição.

A utilização de efluentes tratados para o reuso, seja no meio rural (fertirrigação) ou industrial, é a alternativa ambientalmente mais viável para a implantação da ETE, onde há corpos hídricos com baixa capacidade de diluição. Preconizando a qualidade do corpo receptor em detrimento de um lançamento de maior carga orgânica (e nutrientes) num ponto de maior diluição.

As tecnologias de tratamento de efluentes, já consolidadas na literatura clássica, são compatíveis ao atendimento das demandas de tratamento previstas no presente estudo. No entanto, as opções dos processos para a remoção de nutrientes (N e P) são mais limitadas e complexas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Agência Nacional de Águas (ANA). **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília, DF, 2017. 88p.

CORREA, W. C.; TULIO, T. J.; PACHECO, R. P.; SILVA, M. C. S. DA. Comparação Técnico-Econômica de Sistemas de Pós- Tratamento - Filtros Biológicos Percoladores com Mídia Plástica Versus Lodos Ativados. In: **Anais do 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. São Paulo, 2017.

COBRAPE - CIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS, **PDRH - Plano Diretor de Recursos Hídricos para a Região Norte do Estado do Paraná**. Curitiba: SANEPAR, USPE, 2017.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução no 357, 17 de março de 2005. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamentos de efluentes nos corpos receptores e dá outras providências.

DANTAS, M. S.; FREITAS, D. L.; et AL. **Avaliação de dados de monitoramento de estações de tratamento de esgotos domésticos operando com reatores UASB, localizados na bacia hidrográfica do Rio das Velhas (MG), Brasil**. Eng. Higienizar. Ambiente, 2022

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8o ed. Rio de Janeiro, 2011.

SOARES A. F. S.; SILVA. L. F. M.; Gestão da Qualidade das Águas: Considerações Técnicas Acerca dos Padrões de Lançamento de Esgoto em Minas Gerais. In: **Anais do IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. São Bernardo do Campo, 2018

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 4ª ed, 2014.

VEROL, A. P.; VOLSCHAN, I. Inventário e Análise de Padrões de Lançamento de Esgotos Sanitários Visão Nacional e Internacional. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo, 2007.