

PROPOSTA DE SISTEMA DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO PARA O TRATAMENTO DO ESGOTO SANITÁRIO GERADO EM UMA CIDADE DE PEQUENO PORTE DO NOROESTE PARANAENSE

PROPOSAL FOR A STABILIZATION POND SYSTEM FOR THE TREATMENT OF SANITARY SEWAGE GENERATED IN A SMALL TOWN LOCATED IN THE NORTHWEST OF THE STATE OF PARANÁ

WELITON MICHEL GERVASONI AUGUSTO¹, OTAVIO HENRIQUE DA SILVA^{2*}

1. Bacharel em Engenharia Civil pela Faculdade UMFG, Cianorte, PR; 2. Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

* Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, Brasil. CEP: 70910-900. otavio.silva@unb.br

Recebido em 08/05/2024. Aceito para publicação em 16/05/2024

RESUMO

Muitas cidades brasileiras são desprovidas de sistemas de tratamento de esgotos, o que pode trazer problemas de ordem sanitária às populações. Considerando que diferentes tecnologias de tratamento podem ser implementadas, este estudo objetivou propor um sistema de tratamento, composto por lagoas de estabilização, para a cidade de Indianópolis, Paraná. Para isso, foi concebido um sistema australiano, composto por lagoas anaeróbia e facultativa, seguido de uma série de três lagoas de maturação. Considerando o horizonte de projeto de 2044, foi conduzido dimensionamento das lagoas, o que permitiu determinar, em especial, a eficiência do sistema quanto à remoção de DBO e de coliformes. A partir da vazão de projeto de 12,08 l/s, foi dimensionado um sistema de tratamento com área requerida total de, aproximadamente, 25.200,0 m². A remoção prevista de DBO atendeu ao padrão legal exigido, sendo estimada uma eficiência de 86,8%. Já a eliminação de coliformes apresentou eficiência de 99,85%. Por fim, foram indicadas áreas potenciais próximas à cidade analisada para a instalação do sistema e definidos critérios de operação gerais. Acredita-se que sistemas de lagoas de estabilização possuem muitas potencialidades. Cabe aos profissionais da área propor novos projetos e avaliar os existentes visando disseminar a tecnologia, especialmente no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Lagoa anaeróbia; Lagoa facultativa; Lagoa de maturação; Tratamento de esgoto.

ABSTRACT

Many Brazilian cities lack sewage treatment systems, which can bring sanitary problems to the populations. Considering that different treatment technologies can be implemented, this study aimed to propose a treatment system composed of stabilization ponds, for the town of Indianópolis, Paraná, Brazil. For this, an Australian system was designed, consisting of anaerobic and facultative ponds, followed by a series of three maturation ponds. Considering the project horizon of 2044, the dimensioning of the ponds was carried out, which made it possible to determine, in particular, the efficiency of the system regarding the removal of BOD and

coliforms. Based on the design flow of 12.08 l/s, a treatment system was designed with a total required area of approximately 25,200.0 m². The planned BOD removal met the required legal standard, with an estimated efficiency of 86.8%. The elimination of coliforms showed an efficiency of 99.85%. Finally, potential areas close to the analyzed town were indicated for the installation of the system, and general operating criteria were defined. Stabilization pond systems are believed to have many potentials. It is up to professionals in the area to propose new projects and evaluate existing ones to disseminate the technology, especially in Brazil.

KEYWORDS: Anaerobic pond; Facultative Pond; Maturation Pond; Sewage treatment.

1. INTRODUÇÃO

Os efluentes sanitários, se gerenciados de forma inadequada, podem gerar uma série de problemas, tanto para a saúde da população, como para a adequada conservação dos recursos naturais^{1,2}. Isso demonstra a importância de tecnologias adequadas de tratamento serem adotadas para o controle de danos ambientais.

Sistemas de tratamento de esgotos são compostos por diferentes etapas, entre elas o tratamento secundário ou biológico. Essa etapa é fundamental para a remoção da matéria orgânica e, conseqüentemente, para a adequação técnica do efluente aos padrões de lançamento, no Brasil, definidos pela Resolução CONAMA 430/2011³. No país, as lagoas de estabilização compreendem a tecnologia mais utilizada para a condução desse estágio de tratamento⁴.

Lagoas de estabilização compreendem um sistema de tratamento potencialmente adequado a países em desenvolvimento localizados em regiões tropicais e subtropicais, devido a aspectos relacionados à economia, à operação facilitada e à elevada eficiência na remoção de DBO e de coliformes. Dentre as desvantagens deste sistema, citam-se a maior demora do processo de tratamento, a exigência de temperatura amena, além da dependência de grandes áreas para sua

implantação⁵.

Do total de esgoto gerado no Brasil, considerando dados de 2022, apenas 52,28% são tratados⁶. Nesse contexto, a implantação de sistemas de tratamento compostos por lagoas, observando parâmetros de projeto adequados, pode oferecer solução às demandas da população de cidades desassistidas por tratamento do esgoto gerado. Segundo IBGE (2024)⁷, esse é o caso da cidade de Indianópolis, Paraná, onde, em muitos casos, é possível identificar a presença de fossas negras, um sistema inadequado ao tratamento e disposição de efluentes.

Sendo assim, entende-se que estudos relativos a lagoas de estabilização podem contribuir para a disseminação da tecnologia em questão. Isso vai ao encontro da Política Federal de Saneamento Básico, Lei 11.445/2007⁸, a qual determina que os usuários de serviços de saneamento devem ter acesso a adequado sistema de tratamento. Dessa maneira, este estudo objetivou propor um sistema de tratamento de esgoto sanitário, composto por lagoas de estabilização, para a cidade de Indianópolis, Paraná.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Concepção geral do sistema de tratamento

O município de Indianópolis, localizado no Noroeste Paranaense, possui população de 4.448 habitantes e área territorial de aproximadamente 120 mil km². Atualmente, não há sistema de tratamento para o esgoto sanitário gerado na cidade, sendo comum o uso de fossas negras nos imóveis⁷.

A cidade de Indianópolis, situada a 466 metros de altitude, possui clima predominantemente subtropical, com temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C. Os verões são quentes, as geadas são pouco frequentes e há a tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida⁹.

O sistema de tratamento dimensionado compreende uma lagoa anaeróbia seguida de outra facultativa. Este arranjo é conhecido como sistema australiano. Considerando a realidade climática local, acredita-se que este sistema é adequado à cidade de Indianópolis, conforme Von Sperling, (2007)⁵. Ademais, tecnicamente, o sistema é adequado devido à baixa vazão de esgotos esperada localmente.

Em lagoas anaeróbias, bactérias metanogênicas são responsáveis pela degradação da matéria. Devido a isso, possuem profundidade elevada, o que é necessário à redução da penetração do oxigênio produzido na superfície. Já nas lagoas facultativas, o tratamento do esgoto ocorre a partir de processos anaeróbios, que ocorrem no fundo das lagoas, possibilitando a degradação da matéria orgânica suspensa (DBO particulada), e de processos aeróbios, que acontecem na superfície dessas lagoas a partir da oxidação da matéria dissolvida (DBO solúvel). Pontua-se que lagoas anaeróbias e facultativas não demandam consumo de energia elétrica¹⁰.

Além do sistema australiano, previu-se a incorporação de uma série de três lagoas de maturação ao fim do tratamento, as quais objetivam remover organismos patogênicos, particularmente, coliformes termotolerantes¹¹. Essa opção garante um processo de desinfecção menos oneroso em relação às alternativas usualmente empregadas, como cloração e ozonização⁵. A Figura 1 mostra a concepção geral do arranjo de lagoas proposto.

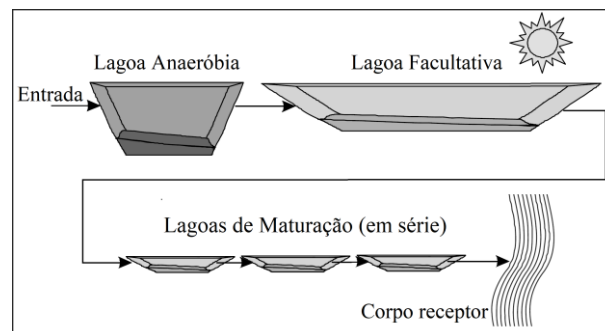


Figura 1. Arranjo de lagoas proposto para a cidade de Indianópolis, Paraná. **Fonte:** Adaptado de Von Sperling (2007)⁵

Procedimentos para o dimensionamento do sistema de tratamento

A seguir, são indicados os procedimentos definidos para o dimensionamento do sistema, desde o cálculo da vazão de projeto, até a definição das dimensões das lagoas e de tópicos relativos à eficiência e à operação do sistema de tratamento. Os procedimentos em questão estão alinhados ao que determina a ABNT NBR 9648:1986¹².

Vazão de projeto

A vazão de projeto foi calculada considerando um horizonte de projeto de 20 anos, a partir de 2024, finalizando em 2044. A população para o ano-horizonte foi calculada com base nos últimos dados populacionais censitários disponibilizados pelo IBGE (2024)⁷, referentes a 2010 e 2022. Logo, foi utilizado um alcance populacional de 22 anos. Foram realizadas projeções aritmética e geométrica da população para a definição da população de projeto.

Também, foram levantados, junto ao SNIS (2023)⁶, dados relativos ao consumo de água diário médio efetivo por habitante (Q_e) e às perdas de rede local. Os cálculos da vazão per capita local e da vazão de demanda para fim de projeto foram realizados a partir das Equações (1) e (2).

$$qm = \frac{Q_e}{1 - Ir} \quad (1)$$

Em que:

qm = Consumo per capita total (l/hab.dia);

Q_e = Consumo per capita efetivo (l/hab.dia);

Ir = Índice de perdas da rede.

$$Q = \frac{K1 \times K2 \times C \times Pf \times qm}{86400} \quad (2)$$

Em que:

Q = Vazão de demanda para fim do projeto (l/s);

$K1$ e $K2$ = Coeficientes de dia e hora de maior consumo;
 C = Coeficiente de retorno;
 Pf = População para fim do Projeto (hab).

Etapas de dimensionamento das lagoas de estabilização

O dimensionamento das lagoas foi realizado seguindo os procedimentos de cálculo definidos por Von Sperling (2007)⁵, com base nos parâmetros de projeto e de eficiência mostrados na Tabela 1. Foram dimensionadas as unidades relativas às etapas anaeróbia, facultativa e de maturação, nessa ordem. Os cálculos foram executados com auxílio do *software* Microsoft Excel 2019. Após determinadas as dimensões das lagoas de tratamento, foi elaborado um *layout* do sistema simplificado, usando o *software* AutoCAD 2021.

Tabela 1. Principais parâmetros de projeto e de eficiência de tratamento em diferentes tipos de lagoa de estabilização

Tipo de lagoa	TDH (dias)	Ls (KgDBO/m ³ .dia)	Lv (KgDBO/m ³ .dia)	H (m)	L/B	E (%)
Anaeróbia	3 - 6	-	0,1 - 0,35	3,5 - 5	1 - 3	50 - 70
Facultativa	15 - 45	100 - 350	-	1,5 - 2	2 - 4	75 - 85
Aerada	5 - 12	-	-	2,5 - 5	-	70 - 90
Maturação	2 - 4	-	-	0,8 - 1	1 - 10	90 - 99

Em que: TDH = Tempo de detenção hidráulico; Ls = Taxa orgânica de aplicação do projeto; Lv = Taxa de aplicação volumétrica; H = Profundidade; L/B = Relação comprimento e largura; E = Eficiência do tratamento.

Fonte: Von Sperling (2007)⁵

Inicialmente, conhecida a vazão de entrada do sistema (Q), foi calculado o volume requerido pela lagoa anaeróbia, com base na Equação (3).

$$V = \frac{Lc}{Lv} \tag{3}$$

Em que:

V = Volume requerido (m³);

Lc = Carga de DBO total afluente (kgDBO₅/dia);

Lv = Taxa de aplicação volumétrica (kgDBO/m³.dia).

O valor de Lv foi determinado com base na temperatura média do ar do mês mais frio para o local, conforme relações indicadas na Tabela 2.

Tabela 2. Relação de Lv com a temperatura média do ar do mês mais frio local (Tar)

Temperatura média do ar do mês mais frio - Tar (°C)	Taxa de aplicação volumétrica - Lv (KgDBO/m ³ .d)
10 a 20	0,02T - 0,10
20 a 25	0,01T + 0,10
> 25	0,35

Fonte: Von Sperling (2007)⁵

Então, foi calculado o tempo de detenção da lagoa (T) e determinada a área requerida (A), conforme Equações (4) e (5).

$$T = \frac{V}{Q} \tag{4}$$

Em que:

T = Tempo de detenção (d).

$$A = \frac{V}{H} \tag{5}$$

Em que:

A = Área requerida pela lagoa (m²);

H = Profundidade da lagoa (m).

Definida a área, foi possível determinar possíveis dimensões de comprimento (L) e largura (B) da lagoa, baseando-se na faixa de valores apresenta na Tabela 1 para a relação L/B de lagoas anaeróbias.

A eficiência de remoção do DBO esperada foi calculada com base nas indicações da Tabela 3 em função da temperatura média do mês mais frio local.

Tabela 3. Eficiência da lagoa anaeróbia (E_A) com relação à temperatura média do mês mais frio local (Tar)

Temperatura média do ar do mês mais frio - Tar (°C)	Eficiência de remoção de DBO na lagoa anaeróbia - E_A (%)
10 a 20	0,02T - 0,10
10 a 25	2T + 20
> 25	70

Fonte: Von Sperling (2007)⁵

Após fixar uma concentração de DBO afluente na lagoa anaeróbia (S_0), foi calculada a concentração de DBO efluente, a partir da Equação (6).

$$DBO_{eflA} = \frac{(1 - E_A)}{100} S_0 \tag{6}$$

Em que:

DBO_{eflA} = Concentração de DBO efluente na lagoa anaeróbia (mg/l);

E_A = Eficiência da lagoa anaeróbia (%);

S_0 = Concentração de DBO afluente na lagoa (mg/l).

Depois, utilizando a Equação (7), foi possível calcular a espessura esperada da camada de lodo gerada no período de um ano.

$$Es = \frac{(Ac - 1)}{A} \tag{7}$$

Em que:

Es = Espessura da camada de lodo (m/ano);

Ac = Acumulação anual de lodo (m³/ano).

Finalmente, a partir da Equação (8), foi calculado o tempo máximo para a limpeza da lagoa, considerando a relação de 1/3 da altura útil.

$$t = \frac{(H/3)}{Es} \tag{8}$$

Em que:

t = Tempo de limpeza (ano).

Conhecida a eficiência de remoção de matéria orgânica da lagoa anaeróbia, foi determinada a carga afluente da lagoa facultativa, conforme Equação (9).

$$Ld = \frac{(100 - E_A)Lc}{100} \tag{9}$$

Em que:

Ld = Carga afluente (kgDBO/d).

Após adotar uma taxa de aplicação superficial (Ls) para o projeto, foram calculados a área requerida da

lagoa facultativa (A), por meio da Equação (10), e o volume da lagoa, a partir da Equação (11). Nesse momento, foi possível definir o comprimento (L) e a largura (B) da lagoa, conforme relação L/B indicada na Tabela 1. Depois, utilizando a Equação (4), foi calculado o tempo de detenção da lagoa.

$$A = \frac{Ld}{Ls} \quad (10)$$

Em que:

Ls = Taxa de aplicação superficial (kgDBO/d).

$$V = A \times H \quad (11)$$

Von Sperling (2007)⁵ entende como adequado o valor de $0,27 \text{ d}^{-1}$ para o coeficiente de remoção de DBO à temperatura de 20°C (K_{20}). Para determinar o coeficiente de remoção relativo à temperatura local (K_T), inicialmente foi determinada a temperatura do líquido (Tes) com base na temperatura média do ar do mês mais frio local (Tar), segundo Equação (12). Com isso, foi possível calcular o coeficiente corrigido (K_T), utilizando a Equação (13).

$$Tes = (0,54 \times Tar) + 12,7 \quad (12)$$

Em que:

Tes = Temperatura do líquido (esgoto) ($^\circ\text{C}$);

Tar = Temperatura do ar ($^\circ\text{C}$).

$$K_T = K_{20} \times 1,05^{(Tes-20)} \quad (13)$$

Em que:

K_T = Coeficiente de remoção de DBO para a temperatura local (d^{-1});

K_{20} = Coeficiente de remoção de DBO a 20°C (d^{-1}).

Conhecido o valor de K_T , foi determinado o valor da DBO solúvel efluente (S_{SOL}) com base no método de mistura completa (lagoa não predominantemente longitudinal), representado pela Equação (14). Então, após estimar a DBO particulada efluente (S_{PART}), foi calculada a DBO total efluente na lagoa facultativa (DBO_{eflF}), por meio da Equação (15).

$$S_{SOL} = \frac{So}{(1 + K_T \times T)} \quad (14)$$

Em que:

S_{SOL} = Concentração de DBO solúvel efluente na lagoa facultativa (mg/l);

So = Concentração de DBO afluente na lagoa (mg/l).

$$DBO_{eflF} = S_{SOL} + S_{PART} \quad (15)$$

Em que:

DBO_{eflF} = Concentração de DBO total efluente na lagoa facultativa (mg/l);

S_{PART} = Concentração de DBO particulada efluente na lagoa facultativa (mg/l).

Conhecida a DBO total efluente na lagoa facultativa (DBO_{eflF}), foi possível verificar se o sistema dimensionado atende ao padrão de lançamento exigido pela Resolução CONAMA 430/2011³, a qual fixa para DBO o limite 120 mg/l (ou remoção mínima de 60%). Depois, a partir dos dados já obtidos, foi

possível calcular a eficiência total teórica do tratamento desempenhado pelas lagoas anaeróbia e facultativa (E), a partir da Equação (16).

$$E = \frac{(So - DBO_{eflF})}{So} \times 100 \quad (16)$$

Em que:

E = Eficiência de remoção de DBO do sistema (%).

Para calcular a área útil total, a área requerida total (valor 25% superior à Au , por considerar o espaço ocupado por estruturas auxiliares, como, por exemplo, taludes, vias de acesso etc.) e a área per capita, relativas ao sistema, foram utilizadas as Equações (17), (18) e (19).

$$Au = Aa + Af \quad (17)$$

Em que:

Au = Área útil total (m^2);

Aa = Área da lagoa anaeróbia (m^2);

Af = Área da lagoa facultativa (m^2).

$$Ar = 1,25 \times Au \quad (18)$$

Em que:

Ar = Área requerida total pelo sistema (m^2).

$$Ap = \frac{Ar}{Pf} \quad (19)$$

Em que:

Ap = Área per capita.

Antes de dimensionar as lagoas de maturação, foi necessário conhecer a eficiência na remoção de coliformes esperada na lagoa facultativa. Para isso, foi calculado o número de dispersão (d), com base na Equação (20), e o coeficiente de decaimento bacteriano, utilizando a Equação (21).

$$d = \frac{1}{(L/B)} \quad (20)$$

Em que:

d = Número de dispersão;

(L/B) = Relação comprimento / largura.

$$Kb = 0,542 \times H^{-1,259} \quad (21)$$

Em que:

Kb = Coeficiente de remoção de coliformes (d^{-1}).

Sabendo que a Equação (21) define o valor de Kb para a temperatura de 20°C , foi realizada correção do coeficiente para a temperatura do esgoto no local, a partir da Equação (22)

$$Kb_T = Kb_{20} \times 1,07^{(Tes-20)} \quad (22)$$

Em que:

Kb_T = Coeficiente de remoção de coliformes para a temperatura local (d^{-1}).

Após adotar valor referente à concentração afluente de coliformes (No), considerando fluxo disperso, foi calculada a concentração efluente de coliformes (N) por meio das Equações (23) e (24). Então, foi calculada

a eficiência da remoção de coliformes na etapa facultativa, utilizando a Equação (25).

$$a = \sqrt{1 + 4 \times Kb_T \times T \times d} \quad (23)$$

Em que:

a = parâmetro de cálculo da equação.

$$N = N_o \times \frac{4 \times a \times e^{\left(\frac{1}{2a}\right)}}{(1 + a)^2 \times e^{\left(\frac{a}{2d}\right)} - (1 - a)^2 \times e^{-\left(\frac{a}{2d}\right)}} \quad (24)$$

Em que:

N = Concentração efluente de coliformes (CF/100ml);

N_o = Concentração afluente de coliformes (CF/100ml).

$$E_c = \frac{(N_o - N)}{N_o} \times 100 \quad (25)$$

Em que:

E_c = Eficiência de remoção de coliformes (%).

Já entrando na fase de dimensionamento da etapa final do sistema, após adotar tempo de detenção adequado, foi calculado o volume das lagoas de maturação a partir da Equação (26).

$$V = T \times Q \quad (26)$$

Conhecido o volume e adotada a dimensão para a profundidade, foi possível calcular a área das lagoas de maturação, por meio da Equação (5), e, então, definir possíveis dimensões das unidades em série. Também, sabendo que área total requerida pelas lagoas é em torno de 25% superior a área líquida determinada, foi aplicada a Equação (18) para contabilizar esse acréscimo e estimar a área requerida total do sistema de maturação. Depois, usando a Equação (19) foi definida a área per capita de maturação. Com os dados dimensionais de todas as unidades do sistema, incluindo as lagoas anaeróbia e facultativas dimensionadas, foram determinadas as áreas requeridas e per capita da ETE.

Depois, após conduzir os procedimentos de cálculo indicados pelas Equações (20) a (25), foi possível determinar a eficiência de remoção de coliformes na primeira lagoa da série (E_c). Considerando as três lagoas, foi calculada a eficiência total de remoção do sistema, $E_c(total)$, e a concentração total de coliformes no efluente final, $N(total)$, utilizando as Equações (27) e (28), respectivamente.

$$E_c(total) = 1 - (1 - E)^3 \times 100 \quad (27)$$

Em que:

$E_c(total)$ = Eficiência total (%).

$$N(total) = N (1 - E(total)) \quad (28)$$

Em que:

$N(total)$ = concentração de coliformes no efluente final (CF/100 mL).

Procedimentos para a definição de critérios para a instalação e operação do sistema

Considerando a cidade objeto de estudo, Indianópolis, foram identificadas possíveis áreas para a

implantação do sistema de tratamento de esgoto. Para tanto, levou-se em consideração três critérios técnicos principais: (1) direção predominante do vento local; (2) proximidade com mananciais para o lançamento do efluente final; e (3) necessidade de desapropriações. Depois, foram elaboradas sugestões gerais de cunho técnico, quanto à operação do sistema de lagoas de estabilização dimensionado neste estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dimensionamento do sistema

Nesta etapa, foi realizado o cálculo da vazão de projeto e conduzido o processo de dimensionamento das lagoas.

Determinação da vazão de projeto

Inicialmente, foram levantadas as populações de 4.299 e 4.448 habitantes, para os anos de 2010 e 2022, em Indianópolis, segundo dados do IBGE (2024)⁴. Considerando o ano de projeto de 2044, a partir de progressão aritmética e geométrica, foram estimadas populações, para o ano-horizonte em questão, de 4.722 e 4.735 habitantes, respectivamente. Visando garantir maior segurança ao dimensionamento, foi adotada a maior população estimada (pelo método geométrico), de 4.735 habitantes, como parâmetro de projeto.

A partir do Índice de perdas da rede de 13,8% (I_r) e do Consumo per capita efetivo de 132,0 l/hab.dia (Q_e), levantados junto ao SNIS (2023)⁶, foi calculada a vazão per capita local (q_m), utilizando a Equação (1), que resultou em 153,13 l/hab.dia.

Finalmente, foi calculada a vazão de demanda para fim do projeto (Q). Adotando os coeficientes K_1 igual a 1,2, K_2 igual a 1,5, e de retorno igual a 0,8, conforme recomendação da ABNT NBR 9649:1986¹³, foi obtido o valor de Q igual a 12,08 l/s, o que equivale a 1.044,1 m³/d.

A vazão calculada para o horizonte de projeto em questão garante a adequabilidade do sistema durante as próximas duas décadas. Contudo, caso haja incremento populacional acentuado, é fundamental conduzir análise da demanda do sistema de modo a averiguar a necessidade de intervenções.

Dimensionamento das lagoas

Para fins de projeto, por conveniência, foram utilizados dados climatológicos de Maringá, Paraná, para os cálculos, devido à disponibilidade de informações. Maringá localiza-se há aproximadamente 100 km de Indianópolis e apresenta, também, o clima Cfa⁹. A cidade possui temperatura média no mês mais frio, julho, igual a 18,6°C¹⁴. A partir desse valor e da relação adequada expressa na Tabela 2, foi possível calcular a Taxa de aplicação volumétrica (L_v), que resultou em 0,272 KgDBO/m³.d.

Segundo Von Sperling (2005)¹⁵, a concentração de DBO em efluentes sanitários varia de 250 a 400 mg/l. Pela ausência de dados locais, e visando proporcionar segurança ao dimensionamento sistema, adotou-se o teto da faixa para fins de dimensionamento. Com isso,

considerando vazão de 1.044,1 m³/d e assumindo concentração igual a 400 mgDBO/l no esgoto bruto, o efluente de entrada da lagoa anaeróbia possui carga total afluente (L_c) de 417,6 kgDBO₅/dia.

Então, com base dos valores de L_v e L_c , a partir da Equação (3), foi determinado um volume requerido (V) de 1.535,4 m³ para a lagoa anaeróbia (única). Então, conhecida a vazão de entrada (Q), foi possível determinar o tempo de detenção do efluente na lagoa anaeróbia (T), utilizando a Equação (4), que resultou em 1,47 dia. Esse valor encontra-se abaixo da faixa indicada na Tabela 1, contudo, ainda é entendido como adequado. Segundo Von Sperling (2007)⁵, lagoas anaeróbias tradicionais que apresentem baixo tempo de detenção, como é o caso deste estudo, devem ter a entrada do efluente pelo fundo, em contato com o lodo sedimentado, para que tenha melhorias no desempenho e redução de geração de maus odores.

Visando definir a área requerida pela lagoa anaeróbia (A), foi adotada profundidade de 5,0 m, dimensão máxima indicada na Tabela 1. Essa decisão foi tomada visando reduzir a superfície ocupada pelo sistema, além de auxiliar o processo de digestão das bactérias metanogênicas (evitando o funcionamento facultativo), considerando a menor penetração solar na massa líquida e a consequente redução na eventual produção de oxigênio na superfície da lagoa.

Após aplicar a Equação (5), a área requerida da lagoa resultou em 307,1 m². Tal valor permite definir a geometria da lagoa. Foi adotada relação L/B (comprimento/largura) igual a 2,0, que corresponde ao valor intermediário da faixa mostrada na Tabela 1. Com isso, considerando uma geometria retangular, foram dimensionados comprimento (L) e largura (B) de 26,0 m e 13,0 m, respectivamente, o que equivale a uma área (A) aproximada de 338,0 m², valor pouco superior ao calculado.

A partir do valor adotado como temperatura média do ar do mês mais frio (18,6°C), utilizando as informações da Tabela 3, foi estimada a eficiência da lagoa anaeróbia (E_A) de 57,2%. Com base nesse dado e na concentração de DBO de entrada de 400 mg/l, já adotada, foi definida, a partir da Equação (6), a concentração de DBO total efluente de 171,2 mg/l.

Entrando nos cálculos relativos aos parâmetros de limpeza da lagoa, fez-se necessário prever, inicialmente, a acumulação anual de lodo (Ac). O valor de Ac equivale ao produto entre a taxa de acúmulo de lodo e da população de projeto. Von Sperling (2007)⁵ sugere uma taxa de 0,04 m³lodo/hab.ano, aqui adotada. Após multiplicar esse valor pela população de 4.735 habitantes, obteve-se uma acumulação de lodo (Ac) de 189,39 m³/ano.

Então, por meio da Equação (7), utilizando os valores de Ac de 189,39 m³/ano e da área da lagoa (A) de 338,0 m², foi possível calcular a espessura da camada de lodo gerada a partir de um ano, correspondendo a 56,0 cm/ano. De acordo com Von Sperling (2007)⁵, essa taxa de acúmulo anual, relativamente elevada, pode ser explicada devido ao

fato de a lagoa dimensionada ser profunda e possuir baixo tempo de detenção (menor área superficial para espalhamento do lodo).

Desse modo, levando em conta que a espessura da camada de lodo não deve ultrapassar 1/3 da altura útil da lagoa anaeróbia, pela Equação (8), prevê-se a necessidade de realizar limpeza a cada 3 anos, visando o adequado funcionamento do sistema.

Ressalta-se que, caso a remoção não seja realizada por esvaziamento e secagem na lagoa, não se deve remover todo o lodo. Isso porque, dessa forma, haveria perda de biomassa, o que demandaria que a lagoa anaeróbia iniciasse a partida novamente⁵.

Finalizado o dimensionamento da lagoa anaeróbia, é possível determinar a concentração de DBO recebida pela lagoa facultativa, considerando que o efluente da primeira lagoa é o afluente da segunda. Após aplicar a Equação (9), utilizando os valores de L_c de 417,6 kgDBO₅/dia e de E_A de 57,2%, foi obtido a carga afluente da lagoa facultativa (L_d) de 178,7 kgDBO/d.

Para o local de estudo, que possui inverno e insolação moderada, Von Sperling (2007)⁵ indica que taxa de aplicação superficial (L_s) varia entre 120 e 240 KgDBO/hab.d. Esse parâmetro influencia na área necessária para a lagoa segundo a incidência de luz solar no local, de modo que o processo de fotossíntese ocorra corretamente, suprimindo a demanda das algas para a produção de oxigênio, posteriormente utilizado para ação das bactérias aeróbias. Neste estudo, optou-se por utilizar o valor médio da faixa indicada, ou seja, L_d igual a 180 kgDBO/hab.d.

Então, utilizando a Equação (10), foi calculada a área requerida pela lagoa facultativa (A) de 9.930,1 m². Considerando que a área é relativamente elevada, a critério do dimensionador, optou-se por dimensionar duas lagoas facultativas, com as dimensões iguais, em paralelo. Essa decisão permite facilitar a operação do sistema caso seja necessário o esvaziamento de uma dessas lagoas, de modo que o sistema permaneça em funcionamento.

Em relação à geometria das lagoas facultativas, foi adotada relação L/B igual a 2,0, valor dentro da faixa exposta na Tabela 1. Com isso, dimensionou-se, para cada lagoa, comprimento (L) de 100 m e largura (B) de 50 m. Isso resulta numa área de 5.000,0 m² para cada unidade e, consequentemente, 10.000,0 m² no total, valor pouco superior ao calculado inicialmente.

Ainda tratando sobre as dimensões das lagoas facultativas, optou-se por adotar 2,0 m para a profundidade, a critério do dimensionador, conforme intervalo indicado na Tabela 1. Essa dimensão não pode ser muito elevada, sob risco de excesso de atividade anaeróbia na lagoa.

Definidas a área total e a profundidade das lagoas, usando a Equação (11), obteve-se um volume total do sistema facultativo igual a 20.000,0 m³. Assim, individualmente, cada lagoa teria o volume de 10.000 m³.

Então, foi realizada verificação do tempo de detenção (T) do efluente nas lagoas facultativas.

Utilizando a Equação (4), foi obtido tempo de detenção de 19,2 dias. Segundo a Tabela 1, o valor encontrado está dentro da faixa usual, que varia de 15 a 45 dias.

Na sequência, visando o posterior cálculo da eficiência do sistema facultativo (E), fez-se necessário determinar o valor do coeficiente de remoção de DBO. Von Sperling (2001)¹⁶, após analisar 10 lagoas de estabilização no sudeste brasileiro, considerando o regime de mistura completa a 20°C, encontrou o valor de 0,27 para o coeficiente (K_{20}). Contudo, é necessário converter o coeficiente em função da temperatura do líquido no local de estudo (K_T).

Desse modo, inicialmente, aplicando a Equação (12), em função da temperatura média do ar do mês mais frio local, 18,6°C (Tar), foi estimada a temperatura do líquido igual a 22,74°C (Tes). Então, por meio da Equação (13), foi corrigido o valor do coeficiente K_{20} , que resultou em 0,31 (K_T).

A partir da Equação (14), sendo conhecida a concentração de DBO afluente na lagoa facultativa (S_0) de 171,2 mg/l, foi possível calcular a estimativa de DBO solúvel efluente (S_{SOL}) igual a 24,76 mgDBO/l. Admitindo uma concentração de sólidos suspensos (SS) no efluente igual a 80 mg/l, conforme sugere Von Sperling (2007)⁵, e considerando que cada 1 mgSS/l implica numa DBO em torno de 0,35mg/l, é possível, estimar a concentração de DBO particulada efluente (S_{PART}) em 28,0 mgDBO/l.

Então, somando as concentrações solúvel e particulada de DBO, conforme Equação (15), foi obtida a concentração de DBO total do efluente das lagoas facultativas igual a 52,8 mg/l. Observa-se, portanto, que o sistema dimensionado atende ao padrão estabelecido para remoção de DBO pela Resolução CONAMA 430/2011³, visto que a concentração final estimada é inferior ao limite de 120 mg/l.

Finalmente, foi possível determinar a eficiência das lagoas de estabilização. Com base na Equação (16), utilizando os valores de concentração de DBO de entrada da lagoa anaeróbia de 400,0 mg/l (S_0) e de DBO de saída das lagoas facultativas de 52,8 mg/l (DBO_{eff}), foi indicada eficiência de 86,8%. Já no caso do sistema facultativo, individualmente, que recebe a contração de DBO de 171,2 mg/l, a eficiência é de 69,2%.

Ainda, empregando as Equações (17), (18) e (19), foi possível calcular a área útil total do sistema de lagoas anaeróbia e facultativa (Au) de 10.338,0 m², a área total requerida (Ar) pelo sistema de 13.439,40 m² e a área per capita (Ap), que equivale a 2,84 m²/hab.

De modo a permitir o dimensionamento das unidades de maturação, primeiramente, foram conduzidos procedimentos de cálculo para determinar a eficiência na remoção de coliformes no sistema facultativo. Aplicando a Equação (20), a partir da relação L/B igual a 2,0, foi obtido número de dispersão (d) igual a 0,5. Já utilizando a Equação (21) em função da profundidade das lagoas (H) de 2,0 m, foi calculado o coeficiente de remoção de coliformes (Kb), que resultou em 0,23 d⁻¹. Como o valor de Kb foi calculado

considerando 20°C, foi realizada uma correção desse valor, por meio da Equação (22), com base na temperatura 22,74°C, a qual retornou valor de Kb_T igual a 0,27 d⁻¹.

Depois, empregando a Equação (23), para fluxo disperso, foi calculado o valor de a igual a 3,37. E, pela Equação (24), adotando o valor da concentração afluente de coliformes de 5×10^7 CF/100 ml (N_0), conforme sugere Von Sperling (2007)⁵, foi obtida a concentração efluente de coliformes igual a $3,3 \times 10^6$ CF/100 ml (N).

Com base nos valores de N_0 e N , utilizando a Equação (25) foi obtida eficiência (E_c) na remoção de coliformes de 93,4%, na etapa facultativa. Visando maximizar essa eficiência, foi conduzido o dimensionamento de três unidades de lagoas de maturação em série.

O tempo de detenção adotado para cada lagoa de maturação foi de 3 dias, valor médio do intervalo apresentado na Tabela 1. Então, conhecida a vazão do sistema de 1.044,1 m³/d, utilizou-se a Equação (26) para definição do volume de cada lagoa, que resultou em 3.132,16 m³. Para permitir o cálculo da área, foi adotada profundidade de 1,0 m, respeitando a indicação expostas na Tabela 1. Então, a partir da Equação (5), foi obtida a área requerida por cada lagoa de 3.132,16 m².

Para a definição das dimensões de cada lagoa, foi adotada geometria superficial quadrada, ou seja, relação L/B igual a 1,0. Para atender à área requerida, definiu-se, para cada lagoa, as dimensões L e B iguais a 56,0 m, o que equivale a uma área final pouco superior à calculada (3.136,0 m²). Como são três lagoas em série, a área total do sistema de maturação equivale a 9.408,0 m². Considerando um acréscimo de 25% nesse valor, conforme Equação (18), estima-se que a área total requerida pelas lagoas de maturação seja de 11.760,0 m², o que equivale a 2,48 m²/hab, segundo a Equação (19).

No total, o sistema completo de tratamento possui área requerida estimada em aproximadamente 25.199,4 m², o que representa 5,32 m²/hab.

Para permitir análise sobre a eficiência do sistema de maturação para a remoção de coliformes, foram conduzidos os mesmos procedimentos de cálculo fixados pelas Equações (20) a (25), já executado para o sistema facultativo. Assim, foram obtidos valores de 1,0 para d , 0,54 d⁻¹ para Kb , 0,65 d⁻¹ para Kb_T , 2,97 para a , $9,39 \times 10^5$ CF/100 ml para N (utilizando o valor $3,3 \times 10^6$ CF/100 ml para N_0), e, finalmente, a eficiência da primeira lagoa da série, que foi de 71,52%. Considerando a série de três lagoas, por meio da Equação (27), tem-se uma eficiência total de remoção de coliformes, $E_c(total)$, de 97,7%. Já a Equação (28) indicou uma concentração de coliformes no efluente final, $N(total)$, de $2,17 \times 10^4$ CF/100ml. Contabilizando a remoção de coliformes realizada na etapa facultativa, o sistema apresenta eficiência total de 99,85%.

Concluído o processo de dimensionamento, foi elaborado um *layout* simplificado do sistema de lagoas

(Figura 2). Salienta-se que, a depender das dimensões do terreno para a implantação do sistema, podem ser necessárias alterações na geometria das lagoas.

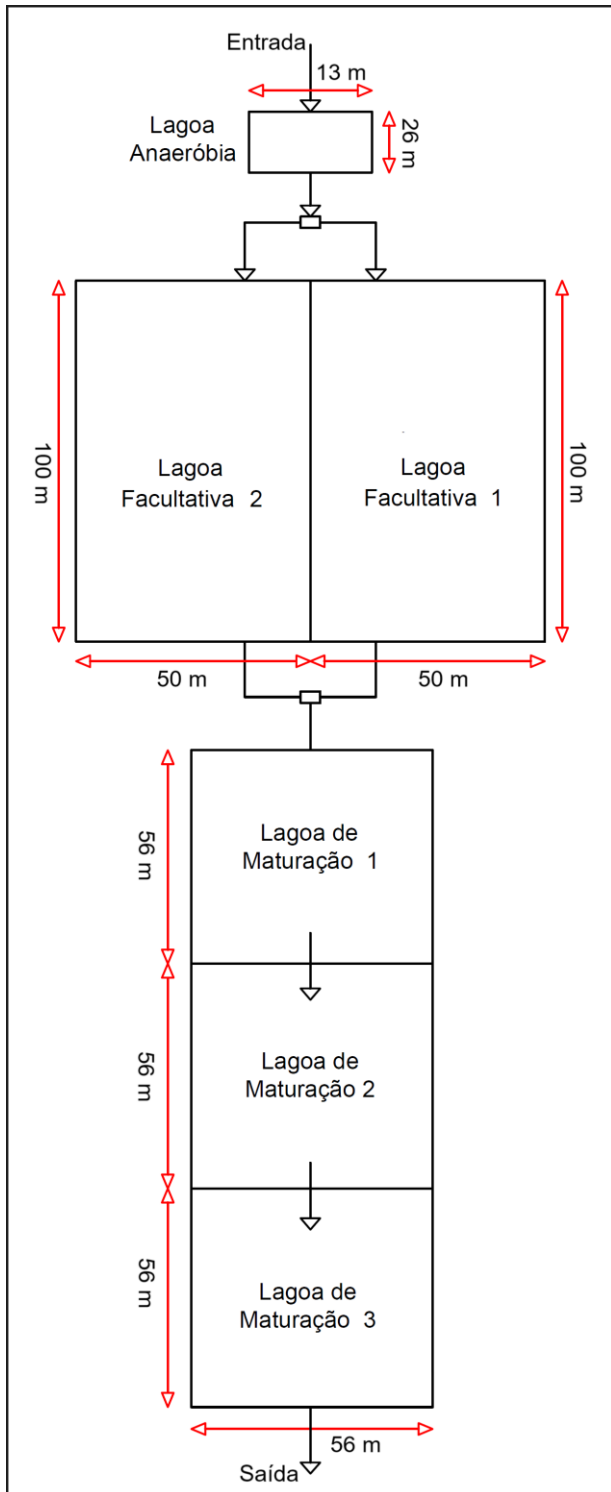


Figura 2. Layout simplificado do sistema de lagoas de estabilização dimensionado para a cidade de Indianópolis, Paraná
Fonte: Elaborado pelos autores

Definição de critérios para a instalação e operação do sistema

Após análise espacial da cidade de Indianópolis e da área rural em seu entorno, foi possível identificar, preliminarmente, algumas áreas para a possível

instalação do sistema de tratamento já dimensionado.

Considerando que a direção predominante dos ventos na região é a leste¹⁷, é importante que a área para instalação da Estação não esteja a oeste da área urbanizada. Isso porque a eventual emissão de gás sulfídrico pela lagoa anaeróbia, devido ao seu odor desagradável, poderia trazer desconforto aos munícipes, caso fosse deslocado pelos ventos até a cidade.

Ainda, foram identificados alguns mananciais próximos à área urbana, sendo importante que o sistema seja instalado próximo a algum deles visando facilitar o lançamento do fluente a ser tratado. Também, foram priorizadas áreas sem construções, o que poderia facilitar um eventual processo de desapropriação.

Observa-se que outros aspectos mais pontuais devem ser levados em conta, como o desenho da futura rede de coleta de efluentes e a disponibilidade de infraestrutura no local para atender as necessidades da ETE. Ao todo, foram selecionadas quatro áreas, distribuídas nas regiões ao norte, ao sul e a sudeste da cidade, como mostra Figura 3.

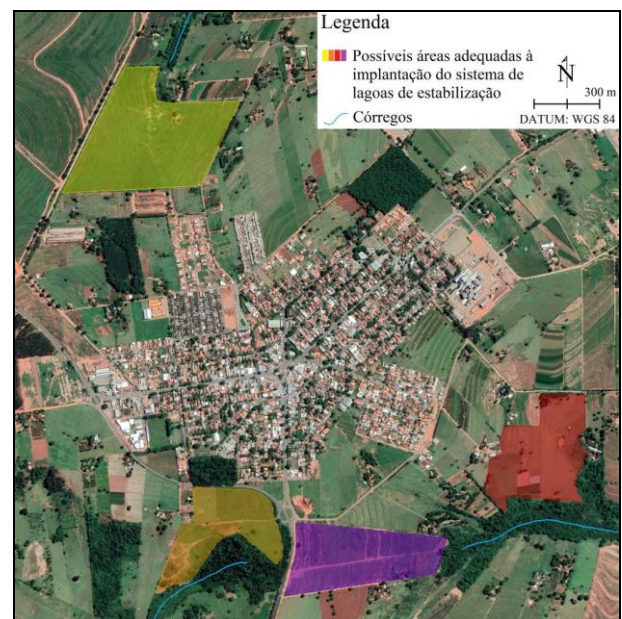


Figura 3. Possíveis áreas selecionadas para a instalação do sistema dimensionado para a cidade de Indianópolis, Paraná. **Fonte:** Adaptado de Google (2024)¹⁸

Aqui, é importante realizar alguns apontamentos. É essencial que seja realizado estudo da dinâmica dos ventos específica no local, de modo a confirmar as informações expostas. Quanto ao lançamento do efluente tratado, é necessário realizar estudos hidrológicos para atestar a adequação do corpo receptor escolhido para essa finalidade, conforme aprovação da autoridade ambiental. Finalmente, no que diz respeito à seleção do terreno, além de considerar a necessidade de eventuais ampliações do sistema, é importante avaliar a viabilidade econômica de possíveis desapropriações (nesse caso, a utilização de áreas públicas, caso disponíveis para a instalação da ETE, pode influenciar na decisão).

A respeito da operação do sistema, é importante prever sistema de tratamento preliminar, de modo a retirar material grosseiro que possa ser coletado pela rede e encaminhado às lagoas. Grades e desarenadores são opções usualmente empregadas. Ainda, é importante instalar um dispositivo para medição da vazão afluente, o que permite melhor controlar o tratamento. Entende-se que calhas Parshall são uma opção adequada, visto que não demandam uso de energia elétrica e oferecem adequada precisão para a medição da vazão. De todo modo, cabe ao projetista definir as melhores tecnologias para serem incorporadas na ETE.

Tratando de lagoas de estabilização, é fundamental que sejam realizadas limpezas periódicas de modo a não prejudicar o tratamento. No caso da lagoa anaeróbia, por exemplo, o dimensionamento estimou a necessidade de limpeza a cada 3 anos. De todo modo, é relevante que seja realizado monitoramento batimétrico, o qual permite identificar a necessidade de limpezas das lagoas.

Ainda, cita-se que é essencial monitorar continuamente a qualidade do efluente ao longo de todas as etapas da ETE. Com isso, pode-se atestar o bom funcionamento do sistema, bem como identificar a necessidade de intervenções. Caso haja aumento da vazão e a etapa facultativa apresente tempo de detenção inferior ao demandado, por exemplo, pode-se prever sistema de aeração mecanizado para otimizar o processo de tratamento.

4. CONCLUSÃO

Por meio desta pesquisa, foi possível propor um sistema de tratamento de esgoto para cidade de Indianópolis, Paraná. Para isso, foi concebido um sistema australiano, composto por lagoa anaeróbia e duas lagoas facultativas em paralelo, seguido de uma série de três lagoas de maturação.

As lagoas apresentaram eficiência estimada na remoção de DBO de 86,8%, em conformidade, portanto, com o que determina o padrão legal no Brasil. Já a eliminação de coliformes apresentou eficiência esperada de 99,85%. Além disso, este estudo abordou tópicos relativos à localização e a operação do sistema proposto.

É relevante que trabalhos futuros conduzam procedimentos de dimensionamento de novos sistemas de tratamento de efluentes e de avaliação de sistemas existentes, em especial, relacionados às lagoas de estabilização. Com isso, espera-se demonstrar as potencialidades dessa tecnologia e disseminá-la no Brasil, contribuindo para a melhoria do saneamento, sobretudo no caso de cidades que não possuem, ainda, formas adequadas de tratamento do esgoto urbano.

5. REFERÊNCIAS

[1] Jassal S, Warmoota R, Goyal D, Mittal I, Sharma A, Gupta N Sustainable wastewater treatment: opportunities and challenges. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2023; 66: 1-15.

- [2] Santos FFS, Daltro Filho J, Machado CT, Vasconcelos JF, Feitosa FRS. O desenvolvimento do saneamento básico no Brasil e as consequências para a saúde pública. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*. 2018; 4(1): 241-251.
- [3] Conselho Nacional Do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União, Brasília*, 2011.
- [4] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: 2017 - abastecimento de água e esgotamento sanitário. Rio de Janeiro, 2020.
- [5] Von Sperling M. *Waste stabilisation ponds*. Londres: IWA Publishing, 2007.
- [6] Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento - SNIS. Diagnóstico temático: serviços de água e esgoto. 2023. [acesso 30 abr. 2024]. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>
- [7] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. IBGE Cidades - Indianópolis - PR. 2024. [acesso 30 abr. 2024]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/indianopolis/panorama>
- [8] Brasil. Lei n 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. *Diário Oficial da União*. Brasília, 2007.
- [9] Nitsche PR, Caramori PH, Ricce WS, Pinto LFD. Atlas climático do estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2019.
- [10] Kayombo S, Mbwette TS, Mayo A, Katima JHY, Jørgensen SE. *Waste stabilisation ponds and constructed wetlands: design manual*. United Nations Environment Programme, 2005.
- [11] Jordão EP, Pessôa CA. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 8ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.
- [14] Instituto Nacional De Meteorologia - INMET. Normais Climatológicas do Brasil. Brasília: INMET, 2022.
- [15] Von Sperling M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.
- [16] Von Sperling M. Remoção de DBO em 12 lagoas de estabilização primárias e secundárias no Sudeste do Brasil. In: IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SILUBESA, 2001.
- [17] Caviglione JH, Kiihl LRB, Caramori PH, Oliveira D. *Cartas climáticas do Paraná*. Londrina: Iapar, 2000.
- [18] Google Earth Pro. Version 7.3: Google Inc, 2024.