21 a 22 agosto 2025
CAMPINAS
VALENCIA
19 a 20 junho 2025
XVII SIIU
Seminário Internacional de Investigação em Urbanismo
DOI: 10.5821/siiu.14060

FITORREMEDIAÇÃO DE ESGOTOS COMO SOLUÇÃO BASEADA NA NATUREZA

Proposta para cidades ribeirinhas amazônicas

HIRATUKA, Kai Haru Rosandisk [1]
SILVA, Juliana Chicone da [2]
GRIMALDI, Julia Coelho [3]
LUZ, Vera Santana [4]

Abstract
The article presents a proposal for the treatment of sewage in Amazonian riverside cities bordering the Rio Negro, using French System Wetlands, whose hypothesis is sanitation using alternative techniques to conventional engineering, in urbanized areas, located in biomes whose characteristics are strategic for the socio-environmental balance and safeguarding of indigenous populations present in these territories. The objective is to demonstrate the feasibility of these processes, which do not imply environmental impact, and can be implemented in a decentralized manner, with lower costs, compared to those required for conventional sanitation, as a functional landscaping, considering local flora species, using effective techniques, with possibilities for social and community participation. It is justified, taking into account the universality of provision required by the legal statute and not achieved in Brazil, especially in the North Region. The methodology consists of a socio-territorial diagnosis, using bibliographical, academic and documentary references from the cities elected – São Gabriel da Cachoeira, Barcelos and Novo Airão, in the state of Amazonas, as well as the research into the literature on predicated phytoremediation technology, sizing and implementation tests. The results indicate the feasibility of the systems in all case studies, which can inspire public policies and community actions, with benefits to human health and to the ecosystem.

Keywords: *socio-environmental balance, sewage phytoremediation, Amazon biome, universalization of sanitation.*

Resumo
Este artigo apresenta proposta para tratamento de esgotos, em cidades ribeirinhas amazônicas lindeiras ao Rio Negro, mediante Wetlands de Sistema Francês, cuja hipótese é o saneamento mediante técnicas alternativas às convencionais de engenharia, em tecidos urbanizados, localizados em bioma cujas caraterísticas são estratégicas para o equilíbrio socioambiental e salvaguarda de populações autóctones, presentes nestes territórios. O objetivo é demonstrar a possibilidade destes processos, que não implicam em impacto ambiental, podendo ser implantados de modo descentralizado, com custos inferiores, comparados aos predicados para o saneamento convencional, como um paisagismo funcional, considerando espécies da flora local, em técnicas eficazes, com

[1] *LADEUR – Laboratório de Desenho de Estratégias Urbano-Regionais, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, https://orcid.org/0009-0009-6115-0284, Brasil, helena_hiratuka@hotmail.com.*
[2] *LADEUR – Laboratório de Desenho de Estratégias Urbano-Regionais, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Brasil, julichicone@hotmail.com.*
[3] *LADEUR – Laboratório de Desenho de Estratégias Urbano-Regionais, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, https://orcid.org/0009-0009-8315-1931, Brasil, ju.grimaldi2002@gmail.com.*
[4] *LADEUR – Laboratório de Desenho de Estratégias Urbano-Regionais, Programa de Arquitetura e Urbanismo, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, https://orcid.org/0000-0001-6931-0574, Brasil, veraluz@puc-campinas.edu.br.*

possibilidades de participação social e comunitária. Justifica-se, tendo em consideração a universalidade de provimento predicada pelo estatuto legal e não alcançada no Brasil, especialmente na Região Norte. A metodologia se constitui por diagnóstico socioterritorial, mediante referências bibliográficas, acadêmicas e documentais das cidades elencadas – São Gabriel da Cachoeira, Barcelos e Novo Airão, no estado do Amazonas, bem como investigação da literatura sobre a tecnologia de fitorremediação predicada, dimensionamentos e ensaios de implantação. Os resultados apontam para a exequibilidade dos sistemas em todos os estudos de caso, passíveis de inspirar políticas públicas e ações comunitárias, com benefícios à saúde humana e ao ecossistema.

Palavras-chave: *equilíbrio socioambiental, fitorremediação de esgotos, bioma amazônico, universalização do saneamento.*

Área temática: *Estudos Urbanos e Problemas Contemporâneos.*

Subárea temática: *Saúde e território: urbanismo biofílico, soluções baseadas na natureza, bem-estar e cidade.*

1. Introdução



Fig. 1 *Localização de municípios ao longo do Rio Negro.* Fonte: Google Earth, adaptada

Apresentamos estudos de caso que buscam alterativas para a saneamento de esgotos em cidades da Região Norte. Os municípios definidos como estudos de caso se encontram na região amazônica, ao longo do Rio Negro (figura 1), a saber, São Gabriel da Cachoeira, Barcelos e Novo Airão. Estas cidades ribeirinhas compreendem populações que contam com expressiva quantidade de representantes de diversas etnias indígenas, configuram tecidos urbanos envoltos por importantes áreas de proteção ambiental, tais como Terras Indígenas e Unidades de Conservação, tendo, também, em comum ausência total expressiva carência de provimento público de sistemas de esgotamento sanitário.

2. Objetivos

Objetiva-se apresentar alternativas para o saneamento de esgotos em áreas ambientalmente sensíveis, em especial na região amazônica, a partir da possibilidade de implantação imediata de sistemas de fitorremediação, como técnicas englobadas nas Soluções baseadas na Natureza.

3. Desenvolvimento da pesquisa

3.1. Caracterização dos estudos de caso

Este artigo contempla uma série de pesquisas de maior amplitude, que realizam a leitura crítica territorial e socioambiental dos municípios estudos de caso, à luz da hipótese de conveniência da proposição de sistemas de saneamento de esgotos descentralizados e em bases que emulam processos naturais. Neste artigo, apresentamos uma síntese de alguns aspectos investigados. Todos os municípios estudos de caso contemplam áreas expressivas municipais e, em oposição, tecidos urbanizados com pequenas dimensões, proporcionalmente, uma vez que conformam um colar de cidades amazônicas, esparsas, envolvidas pela floresta, gênese a partir da qual reside a própria preocupação da investigação, dada a importância socioambiental destes territórios e a evidência da não universalização de saneamento de esgotos no Brasil, em especial, na região Norte. Em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) relativos ao censo de 2022, somente 46,4% de domicílios na região Norte contavam com esgotamento sanitário por rede coletora, pluvial ou fossa séptica (Ferreira, 2024), sendo que, no âmbito nacional, pessoas de cor ou raça preta, parda e indígena persistem com menores proporções de conexão. Quanto à geomorfologia, a topografia das áreas urbanizadas em tela se apresentam sem declividades acentuadas, de modo geral, cujas altitudes em relação ao nível do mar consistem, em termos aproximados, a: 1) São Gabriel da Cachoeira: entre 60 e 78 metros; cotas médias das áreas de instalação (conforme apresenta esta artigo, a seguir), em torno de 62, 64, 69, 73, 74 e 75 metros, a depender da localidade; 2) Barcelos: entre 25 e 32 metros; cota média da área de instalação, em torno de 30 metros; 3) Novo Airão: tecido urbanizado, entre 20 e 47 metros; cota média da área de instalação, em torno de 53 metros (CalcMaps, 2015). Os locais eleitos para a realização de ensaios de implantação, a partir do cálculo de áreas superficiais necessárias, se pautou pelos seguintes critérios: inexistência de vegetação arbórea ou arbustiva; proximidade ou insersão no tecido urbanizado e/ou em próxidade a eixos viários que indiquem eventuais processos futuros de expansão urbana e facilidade de acesso para controle e manutenção; se possível em proximidade a cursos d'água, uma vez que estes podem consistir em vertedouros das águas tratadas (Silva & Luz, 2023; Hiratuka & Luz, 2024; Grimaldi & Luz, 2024), cujo sistema contempla sua total adequação em termos de eliminação de patógenos e demais elementos nocivos à saúde humana e à biota (Sperling e Sezerino, 2018). Nesse sentido, observa-se que, para São Gabriel da Cachoeira, cuja estratégia previu ensaios de implantação de Wetlands Construídos de Sistema Francês de modo descentralizado, definiu-se 12 locais com tais possibilidades; em Barcelos, por sua vez, foi definido local próximo a uma estrada vicinal, em cota superior ao tecido urbano; Novo Airão teve, como eleição, um local em condições semelhantes ao caso de Barcelos e, entretanto, a pesquisa que origina este artigo se desdobra, atualmente, sobre a alternativa de pulverização do sistema no tecido urbano, em semelhança ao predicado para São Gabriel da Cachoeira – em que se considera sua proximidade a marcos referenciais, como escolas, postos de saúde, equipamentos institucionais, entre outros. Estudos posteriores podem tratar da necessidade de bombeamento dos efluentes até os Wetlands, porém, desde já, elegeu-se locais que não sejam submetidos a inundações ou alagamentos, tendo em vista a sazonalidade dos sistemas fluviais amazônicos.

Os Wetlands Construídos de Sistema Francês são realizados mediante leitos de tratamento totalmente isolados, para a adequada separação e estanqueidade, por meio de dispositivos de impermeabilização, evitando a contaminação do solo e do lençol freático. Mediante estudos em realização, temos especificado espécies nativas de macrófitas emergentes, adequadas à implantação na região amazônica, tais quais: oryza glumaepatula (arroz-de-pato); *echinochloa polystachya; heliconia spp.; montrichardia linifera (*aninga*); alocasia macrorrhiza; poaceae; cana-brava (Gynerium sagitatu); alternanthera spp. Cyperaceae* (Grimaldi, 2025). Após o tratamento, as águas excedentes, no caso de São Gabriel da Cachoeira, seriam conduzidas, a depender do local de implantação, diretamente no Rio Negro ou em igarapés próximos; no caso de Barcelos, seriam vertidas em igarapé próximo, a leste dos *wetlands* e, no caso de Novo Airão, seriam conduzidas ao Igarapé Tijuco – decisões que implicariam, para a aplicação real, em aprofundamento multidisciplinar, mediante cálculos hidrológicos mais

pormenorizados. A figura 2, a seguir, ilustra as circunstâncias descritas, relativas a cada estudo de caso.

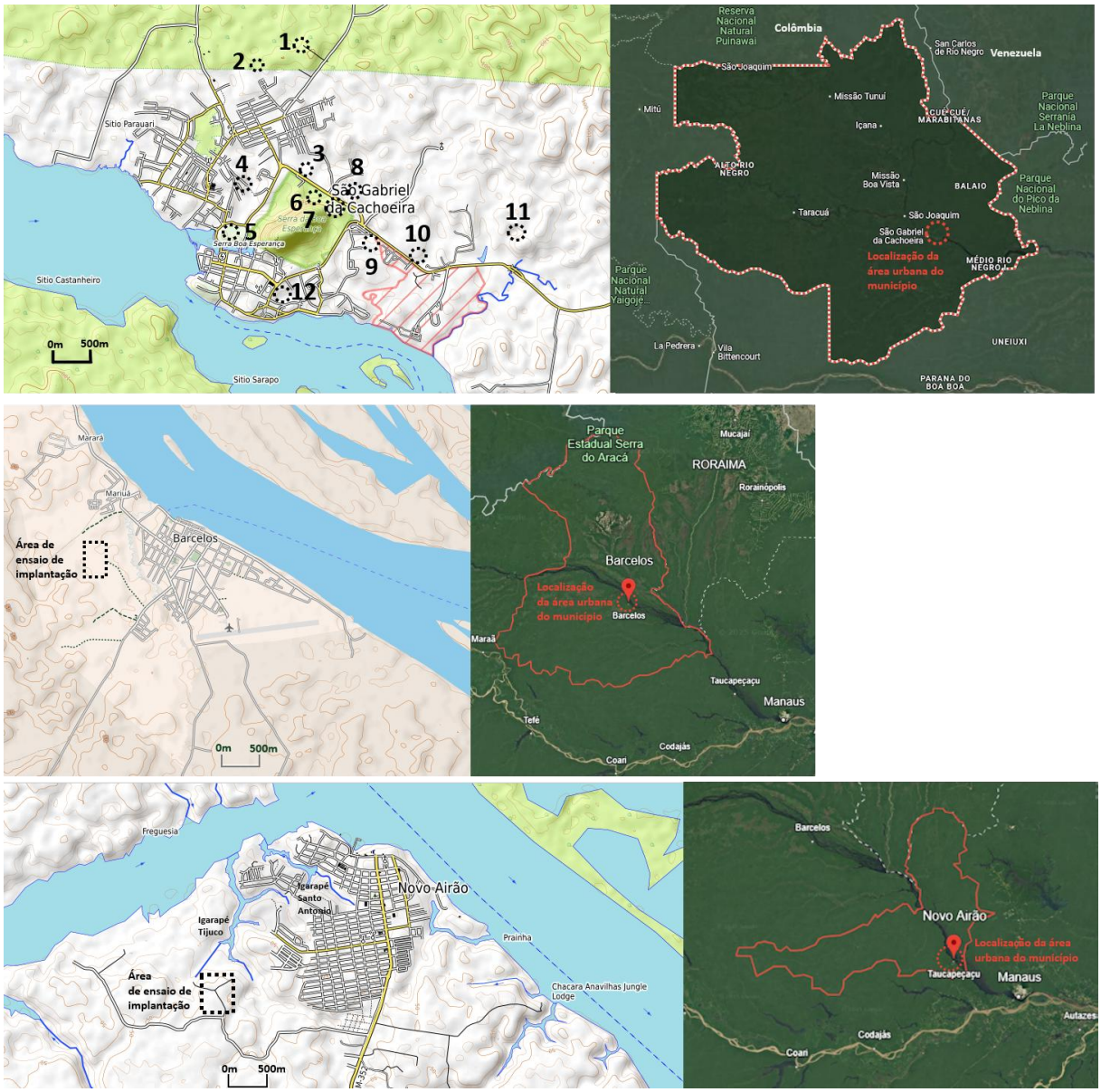


Fig. 2 *Municípios de São Gabriel da Cacheira, Barcelos e Novo Airão, Amazonas, ao longo do Rio Negro, estudos de caso. Esquerda: Áreas urbanizadas e suas envoltórias, apresentando curvas de nível, topografia e principais cursos hídricos. Direita: Imagens aéreas com a delimitação das áreas municipais e indicação das localizações das áreas urbanizadas.* Fonte: Esquerda: Topographic-map; Direita: Google Earth, adaptadas

Um aspecto considerado, uma vez que todos os municípios estudados se caracterizam como “municípios na floresta”, por assim dizer – em que a maior parte dos habitantes pertence a etnias indígenas –, é que os sistemas de fitorremediação predicados podem possibilitar processos de engajamento e participação popular, compreendendo atividades socioambientais que envolvam trocas de conhecimento, dada sua qualidade como elementos na paisagem. Com respeito a possíveis expansões do tecido urbanizado, teve-se em conta a presença do Rio Negro como importante articulador de transporte fluvial até a capital, Manaus, bem como a presença de estradas, em alguns casos, e mesmo aeroportos, o que poderiam ser eixos indutores de crescimento; observa-se que a população urbana de 2010 e de 2022, e a taxa de crescimento populacional, conforme dados dos dois censos do IBGE, correspondem aos seguintes números de habitantes, respectivamente: 1) São Gabriel da Cachoeira: 37.896 e 51.795 pessoas (36,68%); 2) Barcelos: 25.718 e 18.843 pessoas (-26,68%); e 3) Novo Airão: 14.723 e 15.761 pessoas (7,05%) (G1, 2023). Somente São Gabriel da Cachoeira

apresentou taxa de crescimento populacional relevante, sendo o caso de Barcelos justamente o oposto. O ensaio de implantação do sistema em São Gabriel da Cachoeira contempla, justamente a consideração dos possíveis eixos de expansão. No entanto, os dados acima apresentados se referem à população total dos municípios, em todos os casos, sendo que, em termos proporcionais, em dados relativos a 2010, a população urbana de cada município correspondia às porcentagens de: 1) São Gabriel da Cachoeira: 45,1%; 2) Barcelos: 41,8%; e 3) Novo Airão: 59,7% (Infosambas, s.d.) e, com respeito às áreas urbanizadas, os municípios perfaziam, em 2022, as porcentagens relativas aos totais das áreas municipais de: 1) São Gabriel da Cachoeira: 17,11%; 2) Barcelos: 4,98% e 3) Novo Airão: 3,77% (IBGE, 2023).

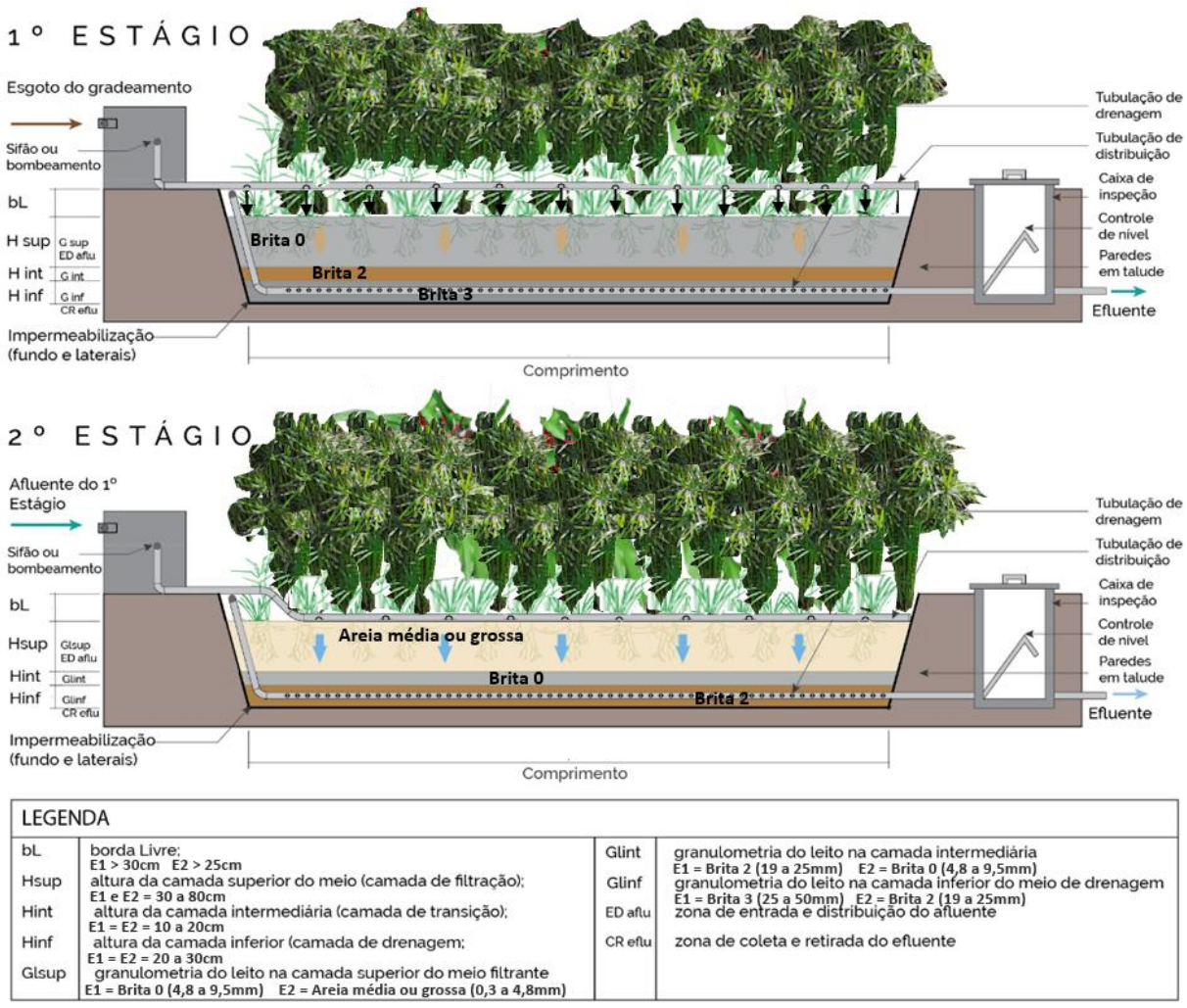
3.2. Fitorremediação de esgotos como Solução baseada na Natureza

As Soluções baseadas na Natureza (SbN) conformam ações que preconizam benefícios mútuos ao bem-estar humano e à biodiversidade (EC, s.d.; IUCN, 2016; UN, 2022). Nesse sentido, se dirigem a uma compreensão da vida no planeta sem caráter antropocêntrico (Marques, 2019; Lourenço, 2019), pautadas por evidências mensuráveis da promoção de equilíbrio ecossistêmico (IUCN, 2020). Abarcam uma série de processos como um conceito amplo, tais quais Infraestrutura Verde, Paisagismo Funcional, Engenharia Ecológica, Adaptação e Mitigação baseada em Ecossistemas. Entre os desafios sociais, encontram-se as mudanças climáticas, a segurança alimentar, a segurança hídrica, riscos de desastres, saúde humana e desenvolvimento econômico e social (Cohen-Shacham *et al*., 2016). Há diferentes definições propostas para as SbN, com algumas variações de perspectivas (Marques *et al*., 2021; Luciani & Luz, 2022). Em nosso entendimento e de acordo com seus princípios mais gerais, pressupõe-se que as SbN proponham objetivos claros, como suporte para componentes e valores culturais e sociais e que obedeçam a contextos específicos em tempo e espaço, perante as condições presentes, podendo ser consideradas multifuncionais e multiescalares, do nível local até o âmbito global (Luciani &Luz, 2022). De acordo com a International Union for Conservation of Nature (IUCN) (Cohen-Shacham *et al*., 2016, p. xii), as abordagens das SbN podem comportar restauração de ecossistemas; proteção de ecossistemas; gestão baseada em ecossistemas; cunhos específicos, como adaptação, mitigação e redução de riscos baseados em ecossistemas; infraestruturas.

Infraestruturas relativas a processos de fitorremediação de esgotos estão no campo da SbN (Murakava & Luz, 2022; Hiratuka & Luz, 2024; Silva, Luz, 2023; Grimaldi, Luz, 2024), se caracterizando por tratamentos em bases naturais, a partir de conhecimentos técnicos bastante consolidados, internacionalmente e no Brasil (Kadlec & Knight, 1996; Dotro *et al*., 2017; Von Sperling & Sezerino, 2018; Langergraber *et al*., 2019; Sezerino & Pelissari, 2021).

Entre as variações de técnicas de *Wetlands* Construídos – como, a exemplo, de escoamento horizontal superficial, de escoamento horizontal subsuperficial, de escoamento vertical –, encontram-se os *Wetlands* Construídos de Sistema Francês, que são *wetlands* de escoamento vertical, em dois estágios de tratamento, o primeiro com três leitos e o segundo com dois leitos, de funcionamento intercalado – eleitos como o sistema mais adequado para os estudos de caso. Em climas cálidos, como no Brasil, estuda-se a possibilidade de redução da quantidade destes leitos. Uma de suas vantagens é não necessitar de tratamentos prévios, podendo receber os esgotos em bruto, precedidos apenas por gradeamento simples. Também se desenvolve uma camada de lodo em estado mineralizado na superfície dos tanques, fundamental para seu funcionamento, que pode ser removida aproximadamente a cada 20 anos, podendo ser utilizada como fertilizante, sem necessitar de secagem posterior (Von Sperling & Sezerino, 2018).

Os processos bio-físico-químicos envolvidos ocorrem pela filtragem e, principalmente pela atividade dos microrganismos presentes na rizosfera das plantas macrófitas envolvidas que, no estudo em tela, supõem espécies nativas amazônica. As camadas dos tanques de tratamento envolvem: camada superior do meio suporte, principal, de filtração; camada intermediária, de transição; camada inferior, de drenagem – todas com substrato de granulometria adequada e alturas determinadas; bordas livres e impermeabilização do fundo e laterais. A figura 3, a seguir, apresenta esquemas em corte do sistema:



LEGENDA			
bL	borda Livre; E1 > 30cm E2 > 25cm	Glint	granulometria do leito na camada intermediária E1 = Brita 2 (19 a 25mm) E2 = Brita 0 (4,8 a 9,5mm)
Hsup	altura da camada superior do meio (camada de filtração); E1 e E2 = 30 a 80cm	Glinf	granulometria do leito na camada inferior do meio de drenagem E1 = Brita 3 (25 a 50mm) E2 = Brita 2 (19 a 25mm)
Hint	altura da camada intermediária (camada de transição); E1 = E2 = 10 a 20cm	ED aflu	zona de entrada e distribuição do afluente
Hinf	altura da camada inferior (camada de drenagem; E1 = E2 = 20 a 30cm	CR eflu	zona de coleta e retirada do efluente
Glsup	granulometria do leito na camada superior do meio filtrante E1 = Brita 0 (4,8 a 9,5mm) E2 = Areia média ou grossa (0,3 a 4,8mm)		

Fig. 3 *Cortes esquemáticos dos dois estágios de Wetlands de Sistema Francês.* Fonte: Adaptado de Von Sperling e Sezerino (2018, p. 38)

3.3. Dimensionamento: cálculo de áreas superficiais necessárias

Para o dimensionamento da área superficial dos *Wetlands* de Sistema Francês, seguimos o postulado por Von Sperling & Sezerino (2018), relativo a documento de consenso de pesquisadores e praticantes no Brasil, realizado a partir de diversas referências. Desse modo, os cálculos para área superficial necessária para cada estágio seguem dois critérios: a Taxa de Aplicação Hidráulica Superficial e a (em m^3/m^2.dia) e a Taxa de Aplicação Orgânica Superficial (em gDBO/m^2.dia), adotando-se o valor mais desfavorável, ou seja, o que requer maior área. Assim, temos as seguintes fórmulas a considerar:

Critério 1: Taxa de Aplicação Hidráulica Superficial:

Primeiramente, calcula-se a vazão média de esgotos afluente ao sistema, considerando:

Qm = vazão média de esgotos afluente ao *wetland* por dia (m^3/dia)

Qp = vazão de contribuição de esgotos per capita (m^3/pessoa.dia), considerou-se o valor de 0,131m^3/pessoa.dia (padrão médio) – adotado em Novo Airão e 0,101,m^3/pessoa.dia (padrão baixo) adotado em Barcelos, a partir da Norma Brasileira ABNT 7229 (ABNT, 1993, p. 4)

P = população total atendida ou equivalente populacional (número de habitantes)

$$Qm = Qp \times P \quad (1)$$

Calcula-se, a seguir, a área superficial requerida, considerando que a taxa de aplicação hidráulica é constante para os dois estágios:

A_{e1} = A_{e2} = área superficial requerida para cada leito dos 1º e 2º Estágio (m^2)

T_h = taxa de aplicação hidráulica (m^3/m^2.dia), correspondente a 0,40 m^3/m^2.dia (Von Sperling & Sezerino, 2018, p. 50)

$$Ae1 = Ae2 = Qm \div Th \quad (2)$$

Dado utilizarmos três leitos de tratamento, em atividade alternada, para o 1º Estágio e dois leitos para o 2º Estágio, multiplica-se a área superficial requerida obtida, pelo número de leitos para cada estágio, a saber:

AT_{e1} = área total dos leitos do 1º Estágio de tratamento (m^2)

AT_{e2} = área total dos leitos do 2º Estágio de tratamento (m^2)

$$ATe1 = A \times 3 \quad (3)$$

$$ATe2 = A \times 2 \quad (4)$$

Devido à necessidade de áreas sobressalentes para apoios técnicos e circulação, considera-se este valor como em torno de 40% da área total obtida para os leitos de tratamento. Desse modo, a área superficial requerida total para todo o sistema comporta a soma das áreas totais de cada estágio, a saber:

AT = área total do sistema (m^2)

$$AT = (Ae1 + Ae2) + [(Ae1 + Ae2) \times (0{,}4)] \quad (5)$$

Critério 2: Taxa de Aplicação Orgânica Superficial:

Primeiramente, calcula-se a carga média de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) bruto afluente ao sistema, considerando:

DBO_b = carga média de DBO bruto afluente ao *wetland* por dia (g/dia)

DBO_p = carga de DBO de contribuição per capita (g/pessoa.dia), adotando 60g/pessoa.dia, a partir de Silva (s.d., p. 6)

P = população total atendida ou equivalente populacional (número de habitantes)

$$DBOb = DBOp \times P \quad (6)$$

Calcula-se, a seguir, a carga de DBO afluente ao *wetland*, considerando, no 1º Estágio, a recepção dos esgotos em bruto e, no 2º Estágio, a eficiência de remoção do tratamento prévio, sendo:

DBO_{e1} = carga de DBO afluente ao *1º Estágio* (g/dia)

DBO_{e2} = carga de DBO afluente ao 2º Estágio (g/dia)

E_0 = eficiência de remoção do tratamento prévio (não existe para os esgotos brutos que entram no 1º Estágio), adotando o valor zero.

E_{e1} = eficiência de remoção do tratamento prévio (correspondente aos esgotos provenientes do 1º para o 2º Estágio), adotando o valor de 80% (Sperling & Sezerino, 2018, p. 51)

$$DBOe1 = DBOb \times \left[1 - \left(\frac{Eo}{100}\right)\right] \quad (7)$$

$$DBOe2 = DBOb \times \left[1 - \left(\frac{Ee1}{100}\right)\right] \quad (8)$$

Calcula-se, então, a área superficial requerida para cada estágio, considerando:

A'_{e1} = área superficial requerida para cada leito do 1º Estágio (m^2)

A'_{e2} = área superficial requerida para cada leito do 2º Estágio (m^2)

$TDBO_{e1}$ = taxa de aplicação orgânica superficial no 1º Estágio (gDBO/m^2.dia), equivalente a 150 gDBO/m^2.dia (Sperling & Sezerino, 2018, p. 49)

$TDBO_{e2}$ = taxa de aplicação orgânica superficial no 2º Estágio (gDBO/m^2.dia), equivalente a 20 gDBO/m^2.dia (Sperling & Sezerino, 2018, p. 49)

$$A'e1 = DBOe1 \div TDBOe1 \quad (9)$$

$$A'e2 = DBOe2 \div TDBOe2 \quad (10)$$

Da mesma forma que no Critério 1, dado utilizarmos três leitos de tratamento, em atividade alternada, para o 1º Estágio e dois leitos para o 2º Estágio, multiplica-se a área superficial requerida obtida, pelo número de leitos para cada estágio, a saber:

$A'T_{e1}$ = área total dos leitos do 1º Estágio de tratamento (m^2)

$A'T_{e2}$ = área total dos leitos do 2º Estágio de tratamento (m^2)

$$A'Te1 = A'e1 \times 3 \quad (11)$$

$$A'Te2 = A'e2 \times 2 \quad (12)$$

Da mesma forma que no Critério 1, devido à necessidade de áreas sobressalentes para apoios técnicos e circulação, considera-se este valor como em torno de 40% da área total obtida para os leitos de tratamento. Desse modo, a área superficial requerida total para todo o sistema comporta a soma das áreas totais de cada estágio, a saber:

A'T = área total do sistema (m^2)

$$A'T = (A'e1 + A'e2) + [(A'e1 + A'e2) \times (0{,}4)] \quad (13)$$

4. Resultados

Apresentamos, a seguir, os resultados de dimensionamento e ensaios de implantação para cada município estudo de caso.

4.1. São Gabriel da Cachoeira

O município de São Gabriel da Cachoeira é o único estudo de caso que conta com Plano de Saneamento Básico (PLANSAM, 2012), embora não implantado. Foram, portanto, utilizados os dados constantes neste documento. Para tanto, considerou-se para o valor de *P* = população total atendida ou equivalente populacional (número de habitantes), o cenário mais atual, tendo-se em conta a ocasião da pesquisa, correspondente ao ano de 2023 (27.342 habitantes), para implantação imediata do sistema, bem como o cenário mais desfavorável, relativo ao horizonte do ano de 2036 (35.708 habitantes). No referido documento são estabelecidos os seguintes valores:

Qm_{2023} = vazão média de esgotos afluente ao *wetland* por dia = 4.731,264 m^3/dia

Qm_{2036} = vazão média de esgotos afluente ao *wetland* por dia = 9.423,65 m^3/dia

DBO_{b2023} = carga média de DBO bruto afluente ao *wetland* por dia = 2.129.000,00 g/dia

DBO_{b2036} = carga média de DBO bruto afluente ao *wetland* por dia = 4.242.000,00 g/dia

Mediante os valores adotados os resultados obtidos para este estudo de caso corresponderam a:

Critério 1: Taxa de Aplicação Hidráulica Superficial (ano de 2023)

A_{e1} = A_{e2} = área superficial requerida para cada leito dos 1º e 2º Estágio = 11.828,16 m^2

AT_{e1} = área total dos leitos do 1º Estágio de tratamento = 35.484,48 m^2

AT_{e2} = área total dos leitos do 2º Estágio de tratamento = 23.656,32 m^2

AT_{2023} = área total do sistema = 82.797,12 m^2

Critério 2: Taxa de Aplicação Orgânica Superficial (ano de 2023):

DBO_{e1} = carga de DBO afluente ao 1º Estágio = 2.129.000,00 g/dia

DBO_{e2} = carga de DBO afluente ao 2º Estágio = g/dia

A'_{e1} = área superficial requerida para cada leito do 1º Estágio = 14.193,33 m^2

A'_{e2} = área superficial requerida para cada leito do 2º Estágio = 21.290,00 m^2

$A'T_{e1}$ = área total dos leitos do 1º Estágio de tratamento = 42.580,00 m^2

$A'T_{e2}$ = área total dos leitos do 2º Estágio de tratamento = 42.580,00 m^2

$A'T_{2023}$ = área total do sistema = 119.224,00 m²

No horizonte de 2036, as áreas totais corresponderam a:

Critério 1: Taxa de Aplicação Hidráulica Superficial (ano de 2036)

AT_{2036} = área total do sistema = 164.913,875 m²

Critério 2: Taxa de Aplicação Orgânica Superficial (ano de 2036):

$A'T_{2036}$ = área total do sistema = 237.552,00 m²

Os valores adotados para os ensaios de implantação corresponderam à necessidade de maiores áreas, sendo relativos ao Critério 2 da Taxa de Aplicação Orgânica Superficial, ou seja:

119,224,00 m3 (ano 2023) e 237.552,00 m² (ano 2036).

4.2. Barcelos

Para o estudo de caso de Barcelos, a definição de *P* = população total atendida ou equivalente populacional (número de habitantes), foi realizada pela informação disponível por ocasião da pesquisa, a saber, a projeção do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGEE, c2017) para 2021, que consistia em 27.772 habitantes. Ponderando a população referente ao censo de 2010, correspondente a 25.718 pessoas, aproximou-se o valor para o ano de 2024, mediante acréscimo de uma porcentagem, que resultou em 28.333 habitantes – número adotado (sendo que, posteriormente ao término da pesquisa o censo de 2022 apresentou o total de 18.831 habitantes).

Os resultados obtidos para este estudo de caso corresponderam a:

Critério 1: Taxa de Aplicação Hidráulica Superficial:

Qm = vazão média de esgotos afluente ao *wetland* por dia = 2.861,60 m³/dia

$A_{e1} = A_{e2}$ = área superficial requerida para cada leito dos 1º e 2º Estágio = 7.154,00 m²

AT_{e1} = área total dos leitos do 1º Estágio de tratamento = 21.462,00 m²

AT_{e2} = área total dos leitos do 2º Estágio de tratamento = 14.308,00 m²

AT = área total do sistema = 50.078,00 m²

Critério 2: Taxa de Aplicação Orgânica Superficial:

DBO_b = carga média de DBO bruto afluente ao *wetland* por dia = 1.699.980,00 g/dia

DBO_{e1} = carga de DBO afluente ao 1º Estágio = 1.699.980,00 g/dia

DBO_{e2} = carga de DBO afluente ao 2º Estágio = 339.996,00 g/dia

A'_{e1} = área superficial requerida para cada leito do 1º Estágio = 11.333,20 m²

A'_{e2} = área superficial requerida para cada leito do 2º Estágio = 16.999,80 m²

$A'T_{e1}$ = área total dos leitos do 1º Estágio de tratamento = 33.999,60 m²

$A'T_{e2}$ = área total dos leitos do 2º Estágio de tratamento = 33.999,60 m²

A'T = área total do sistema = 95.198,88 m²

Desse modo, conforme o resultado de maior área necessária, adotou-se o Critério 2: Taxa de Aplicação Orgânica Superficial, para a eleição do valor a ser definido para o sistema, correspondente a 95.198,88 m², aproximado para 95.200 m².

4.3. Novo Airão

Para o dimensionamento de Novo Airão, com respeito à variável correspondente a *P* = população total atendida ou equivalente populacional (número de habitantes), adotou-se o total de 15.761 habitantes, conforme o último censo demográfico (IBGE, 2022).

Desse modo, os resultados obtidos corresponderam a:

Critério 1: Taxa de Aplicação Hidráulica Superficial:

Qm = vazão média de esgotos afluente ao *wetland* por dia = 2.064,70 m^3/dia

A_{e1} = A_{e2} = área superficial requerida para cada leito dos 1º e 2º Estágio = 5.161,75 m^2

AT_{e1} = área total dos leitos do 1º Estágio de tratamento = 15.485,25 m^2

AT_{e2} = área total dos leitos do 2º Estágio de tratamento = 10.323,50 m^2

AT = área total do sistema = 36.132,25 m^2

Critério 2: Taxa de Aplicação Orgânica Superficial:

DBO_b = carga média de DBO bruto afluente ao *wetland* por dia = 945.660 g/dia

DBO_{e1} = carga de DBO afluente ao 1º Estágio = 945.660 g/dia

DBO_{e2} = carga de DBO afluente ao 2º Estágio = 189.132 g/dia

A'_{e1} = área superficial requerida para cada leito do 1º Estágio = 6.304,40 m^2

A'_{e2} = área superficial requerida para cada leito do 2º Estágio = 9.456,60m^2

$A'T_{e1}$ = área total dos leitos do 1º Estágio de tratamento = 18.913,20 m^2

$A'T_{e2}$ = área total dos leitos do 2º Estágio de tratamento = 18.913,20 m^2

A'T = área total do sistema = 52.956,96 m^2

Mediante os resultados dos dois critérios, adotou-se, portanto, a maior área, correspondente à Taxa de Aplicação Orgânica Superficial, ou seja, 52.956,96 m^2, arredondando-se o valor para 53.000,00 m^2.

4.4. Ensaios de implantação

A análise territorial do tecido urbano e das áreas envoltórias foi realizada a partir de imagens aéreas pela plataforma Google Earth, para investigação de sua organização e, pelo site Contour Map Creator, que disponibiliza curvas de nível, foi realizado o cotejamento de aspectos da topografia, como declividades favoráveis. Desse modo, para eleição de áreas apropriadas para a implantação do sistema, as premissas se referiram a áreas livres de edificações, sem presença de vegetação arbórea ou usos determinados, como praças, campos de futebol ou esportes, entre outros, bem como cotas favoráveis para evitar alagamentos ou inundações, porém relativamente próximas a cursos d'agua, aos quais destinar os efluentes devidamente tratados.

4.4.1. São Gabriel da Cachoeira

No caso de São Gabriel da Cachoeira, foram localizadas doze localidades favoráveis, cuja somatória de superfícies resultou em 500.000 m^2 – valor expressivamente superior às necessidades do horizonte temporal de 2036 (figura 4). Assim, foram elencadas as localidades numeradas como Área 4, Área 5, Área 12, para implantação imediata, por serem localidades contíguas ao tecido urbano existente e Área 2 e Área 11, suficientes para instalações referentes a 2036, as quais se localizam em setores de possíveis expansões urbanas, devido à presença de eixos rodoviários (figura 5).



Fig. 4 *Localidades adequadas para implantação de Wetlands de Sistema Francês em São Gabriel da Cachoeira.* Fonte: Google Earth, adaptada

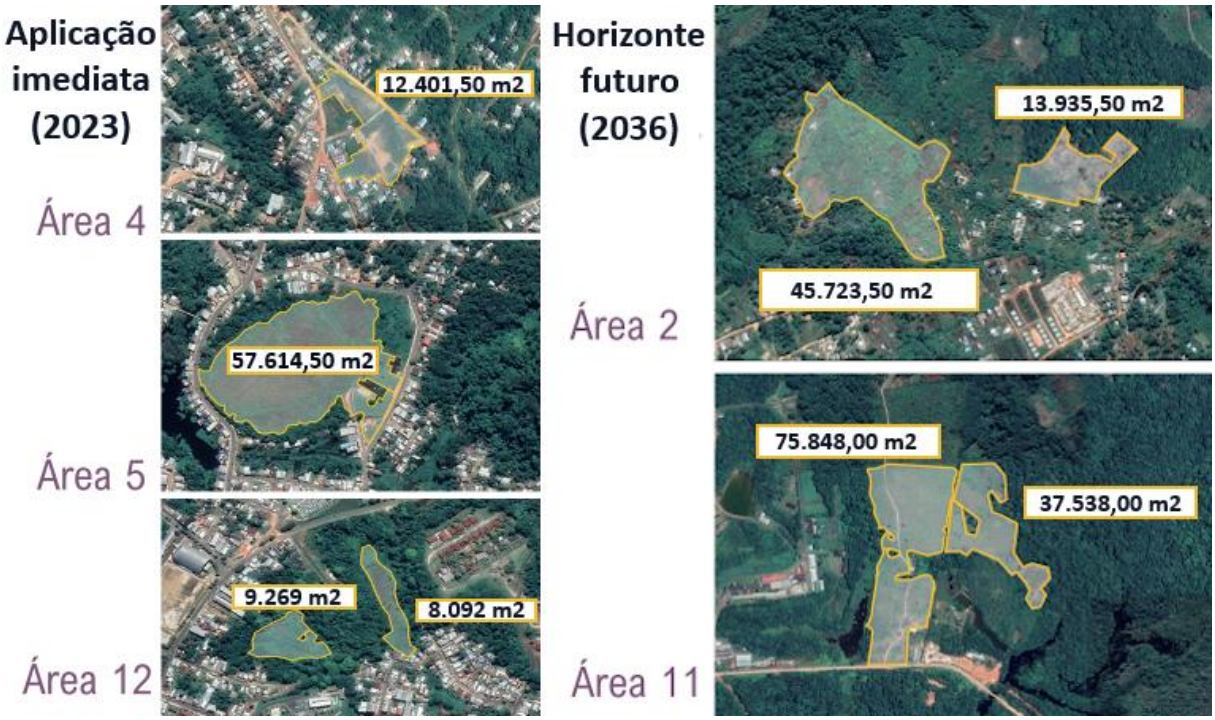


Fig. 5 *Localidades adequadas para implantação de Wetlands de Sistema Francês em São Gabriel da Cachoeira. Esquerda: Com previsão de aplicação imediata (ano 2023). Direita: Com previsão futura (ano 2036).* Fonte: Autoral, com base em Google Earth

4.4.2. Barcelos

A região mais favorável, para o caso de Barcelos, se revelou em terreno relativamente próximo à área urbanizada, a oeste, acessível por estrada existente, como mostra a figura 6, abaixo.



Fig. 6 *Esquerda: Área urbanizada de Barcelos e perímetro da área de implantação. Direita: Implantação preliminar de Wetlands de Sistema Francês.* Fonte: Esquerda: Google Earth, adaptada. Direita: Autoral, com base em Google Earth

4.4.3. Novo Airão

Foram consideradas, para o caso de Novo Airão, seis possibilidades de implantação, optando-se por região relativamente afastada de possíveis expansões urbanas, porém dotada de acesso por estrada existente. A figura 7 apresenta ensaio preliminar de implantação do sistema, para o caso de Novo Airão.

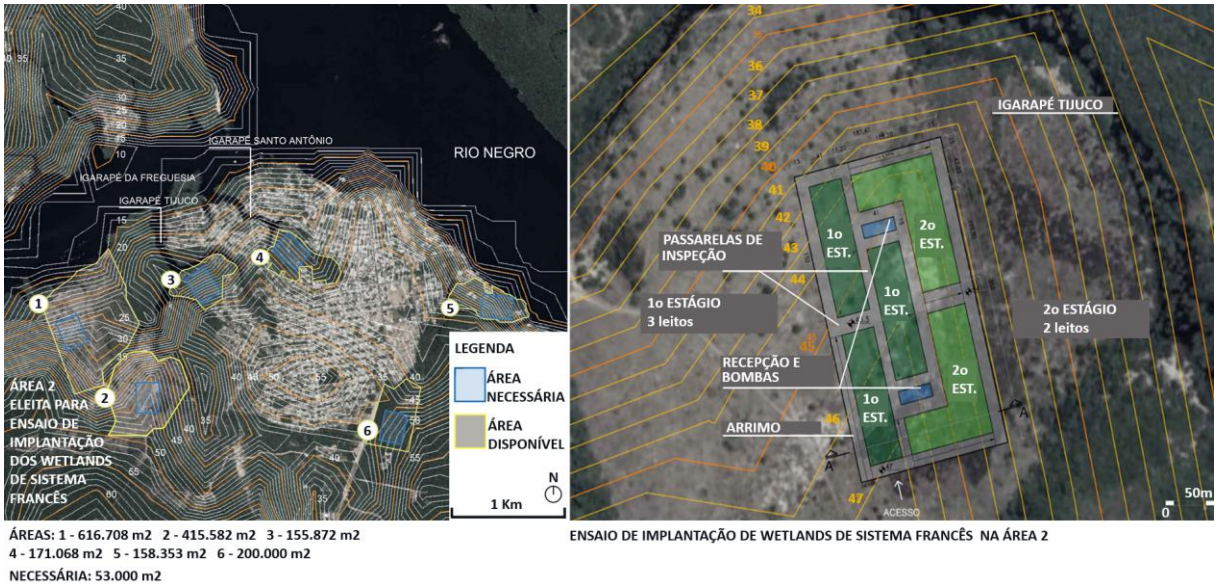


Fig. 7 *Esquerda: Área urbanizada de Novo Airão e perímetros de áreas adequadas para implantação. Direita: Implantação preliminar de Wetlands de Sistema Francês na Área 2.* Fonte: Esquerda: Google Earth, adaptada. Direita: Autoral, com base em Google Earth

5. Conclusões

Os resultados apresentados apontam para a perfeita exequibilidade de *Wetlands* de Sistema Francês nos municípios estudos de caso, demonstrando possibilidades de instalação em áreas adequadas ao

seu funcionamento, no sentido de garantia imediata de provimento de saneamento de esgotos, em bases tecnicamente consagradas, com benefícios aos biomas envolvidos, em especial ao sistema hídrico, ao bem-estar e saúde humana. Os desdobramentos podem abarcar processos de educação ambiental, fortalecimento de cidadania e salvaguarda de identidades étnicas, mediante promoção de políticas públicas participativas e responsáveis, para o enfrentamento da necessidade urgente de universalização do saneamento de esgotos no Brasil, e, em particular, na Região Norte.

6. Referências

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1993). *NBR 7229. Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos.* Rio de Janeiro: ABNT.

CALCMAPS. (2015). *Calcular elevação no mapa*. Disponível em: https://www.calcmaps.com/pt/. (Acesso: 28/04/2024).

CONTOUR MAP CREATOR. (s.d.). Disponível em: https://contourmapcreator.urgr8.ch/#VHT. (Acesso: 01/04/2024).

COHEN-SHACHAM, E; WALTERS, G.; JANZEN, C., e MAGGINIS, S. (Eds.). (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. Gland, Switzerland: IUCN. DOI: http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en.

DOTRO, G.; LANGERGRABER, G., MOLLE, P., NIVALE, J., PUIGAGUT, J., STEIN, O., & VON SPERLING, M. (2017). *Treatment Wetlands*. v. 7. Biological Wastewater Treatment Series. London, IWA.

EC – European Commission. European Research Executive Agency. (s.d.). *Nature-based Solutions*. Disponível em: https://rea.ec.europa.eu/funding-and-grants/horizon-europe-cluster-6-food-bioeconomy-natural-resources-agriculture-and-environment/nature-based-solutions_en. (Acesso: 31/03/2025).

GRIMALDI, J. C., & LUZ, V. S. (2024). Fitorremediação como alternativa sustentável para o tratamento de efluentes de esgotos: estudo de caso em Novo Airão, Amazonas. *Revista Latino-americana de Ambiente Construído & Sustentabilidade*, *5*(3), 287-303.

GRIMALDI, J. C. (2025). *Wetlands de Sistema Francês como alternativa sustentável de fitorremediação de esgotos em Novo Airão, Amazonas: agenciamento territorial, construtibilidade e vegetação para o estudo de caso*. Monografia (Iniciação Científica) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Pontifícia Universidade Católica de Campinas. [Mimeo]. Orientação Vera Santana Luz.

HIRATUKA, K. H. R., & LUZ, V. S. (2024). Fitorremediação como alternativa sustentável par tratamento de efluentes de esgoto: estudo de caso São Gabriel da Cachoeira, Amazonas. *Revista Iberoamericana de Economia Ecológica*, *37*(1), 51-73.

FERREIRA, I. (2024). Censo 2022: rede de esgoto alcança 62,5% da população, mas desigualdades regionais e por cor e raça persistem. *Agência IBGE Notícias*, 23 fev. 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39237-censo-2022-rede-de-esgoto-alcanca-62-5-da-populacao-mas-desigualdades-regionais-e-por-cor-e-raca-persistem. (Acesso: 28/05/2025).

G1. (2023). População de São Gabriel da Cachoeira (AM) é de 51.795 pessoas, aponta o Censo do IBGE. *G1, Amazonas, Amazônia*, 28 jun. 2023. Disponível em: https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2023/06/28/populacao-de-sao-gabriel-da-cachoeira-am-e-de-51-795-pessoas-aponta-o-censo-do-ibge.ghtml. (Acesso: 14/05/2025).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2023). *Brasil. Amazonas. Novo Airão*. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/novo-airao/panorama. (Acesso: 28/02/2023).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (s.d.). *Cidades e Estados do Brasil*. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. (Acesso: 12/04/2025).

INFOSANBAS. (s.d.). Disponível em: https://infosanbas.org.br/. (Acesso: 14/12/2024).

IUCN – International Union for Conservation of Nature. (2016). World Conservation Congress; *Resolution 069. Defining Nature-based Solutions*. Disponível em: https://portals.iucn.org/library/node/46486. (Acesso: 27/02/2022).

KADLEC, R. H., & KNIGHT, R. L. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Raton, Flórida: CRC Press.

LANGERGRABER, G., DOTRO, G., NIVALA, J., RIZZO, A., & STEIN, O. (Eds.). (2019). *Wetland technology. Practical information on the design and application of Treatment Wetlands*. London: IWA.

LOURENÇO, D. B. (2019). *Qual o valor da natureza? Uma introdução à ética ambiental*. São Paulo: Elefante.

LUCIANI, M., & LUZ, V. S. (2022). Soluções baseadas na Natureza. In: TRANI, E., & LUCIANI, M. (Orgs.) *Instrumentos de planejamento, licenciamento e gestão ambiental no Estado de São Paulo: caderno de apoio para profissionais* (199-216). São Paulo: CETESB.

MARQUES, L. (2019). *Capitalismo e colapso ambiental*. 3ª ed. Campinas: Unicamp.

MARQUES, T. H. N., RIZZI, D., FERRAZ, V., & HERZOG, C. P. (2021). Soluções baseadas na Natureza: aplicabilidade e complexidade no contexto latino-americano, casos do Brasil e do Peru. *Revista Labverde*, Dossiê Labverde #1, Soluções baseadas na Natureza para a Resiliência Urbana na América Latina, *11*(1), 12-49. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2179-2275.labverde.2021.189419.

MURAKAVA, K. & LUZ, V. S. (2022). Proposição de wetlands como Solução Baseada na Natureza para situações emergenciais: o caso da Vila Gênesis, Campinas. *Revista Labverde*, Dossier Labverde # 2, Soluções baseadas na Natureza para Resiliência Urbana na América Latina, *12*(1), 129-160.

PLANSAM – Programa de Apoio à Elaboração dos Planos Municipais de Saneamento e Gestão Integrada de Resíduos dos Municípios do Estado do Amazonas. (2012). *Plano Municipal de Saneamento Básico: São Gabriel da Cachoeira/AM*. Disponível em: https://www.aam.org.br/planos-municipais-de-saneamento-e-gestao-integrada-de-residuos-solidos-dosmunicipios-do-estado-do-amazonas. (Acesso: 09/01/2021).

SEZERINO, P. H., & PELISSARI, C. (Orgs.). (2021). *Wetlands construídos como ecotecnologia para o tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras*. Curitiba, Brazil Publishing.

SILVA, C. E. (s.d.). *Sistemas de tratamento de esgotos sanitários*. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Centro de Tecnologia (CT), Santa Maria, RGS. Disponível em: http://jararaca.ufsm.br/websites/ces/download/A1.pdf. (Acesso: 21/04/2024).

SILVA, J. C., & LUZ, V. S. (2023). Fitorremediação de esgotos como alternativa sustentável para Barcelos, Amazonas (111-121). *Anais do 6º Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos*, Universidade Feeavale, Novo Hamburgo. ISSN: 2446-631X.

UN – United Nations. UNEP – United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme. (2022). *Resolution adopted by the United Nations Environment Assembly on 2 March 2022. 5/5. Nature-based solutions for supporting sustainable development.* Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/39864/NATURE-BASED%20SOLUTIONS%20FOR%20SUPPORTING%20SUSTAINABLE%20DEVELOPMENT.%20English.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (Acesso: 31/03/2025).

VON SPERLING, M., & SEZERINO, P. H. (2018). Dimensionamento de Wetlands Construídos no Brasil. Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes. *Wetlands Brasil*, Boletim, Ed. especial.