



**EDUARDO HENRIQUE FERREIRA SANTOS**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ADOÇÃO DE ALTERNATIVAS  
NÃO CONVENCIONAIS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO  
EM COMUNIDADES RURAIS**

**LAVRAS - MG  
2022**

**EDUARDO HENRIQUE FERREIRA SANTOS**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ADOÇÃO DE ALTERNATIVAS NÃO  
CONVENCIONAIS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO EM COMUNIDADES  
RURAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Mateus Pimentel de Matos  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2022**

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, à minha mãe, Jalmira, que em nenhum momento mediu esforços para que os meus objetivos fossem alcançados, sem ela isso não seria possível. Muito obrigado por ser esse ser humano maravilhoso, que sempre me apoiou, incentivou e me fez acreditar na minha capacidade.

Agradeço ao meu pai, Jadir, que é um exemplo de honestidade e consegue demonstrar, da sua maneira, o sentido de perseverança e amor.

Agradeço à Maria, que sempre vibrou e comemorou cada passo da minha caminhada.

À minha Vó Geralda por me encorajar a buscar e realizar os meus sonhos. Agradeço também meus avôs Rui, Cláudio e Natalina, que, mesmo de longe, estão torcendo por mim.

Aos meus irmãos, Nathalie, Nathane e Guilherme, que, mesmo distante, me apoiaram, incentivaram e nunca deixaram eu desistir, amo vocês. Aos meus sobrinhos, Luiza, Arthur e Buddy, por me fazerem sentir, mesmo sem saberem, especial.

À minha família, principalmente aos meus tios Jalmiza, Jalmice e Jalmir, por me ajudarem nessa graduação, o apoio de vocês foi essencial para essa conquista.

Aos meus amigos, de Aricanduva, Belo Horizonte e Lavras, que sempre estiveram comigo. Vocês foram e serão meu porto seguro. Obrigado por cada conselho e crítica, o meu crescimento só foi possível por ter vocês em minha vida.

Ao Engenheiros Sem Fronteiras, à Preserva Jr., ao NEMASA, ao NEGEO, à Máfia X e à ABB Eletrificação, por complementarem os meus ensinamentos, me fazendo ter uma nova visão e perspectiva da área Ambiental e Sanitária.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à professora Camila Franco, por terem me dado a oportunidade de realizar uma iniciação científica, muito obrigado por confiarem no meu potencial.

Aos meus parceiros de laboratório e estágio por toda a paciência e ensinamentos, vocês são incríveis.

Ao professor Mateus Matos, por toda dedicação, paciência e explicações durante esse projeto. Obrigado por apoiar o meu tema e por sempre tentar extrair o meu máximo. Você é uma das minhas inspirações profissionais.

E, por fim, quero agradecer a Deus pela minha vida, saúde e por todas as pessoas que foram colocadas nessa trajetória.

Muito obrigado.

## RESUMO

Diante do cenário de baixo índice de atendimento da população rural com serviços de esgotamento sanitário e da baixa disponibilidade de recursos por parte dos municípios, torna-se inevitável o desenvolvimento e a adoção de tecnologias alternativas, de baixos custos, alta eficiência e de simples construção e operação para o tratamento das águas residuárias. Dessa forma, com a realização do presente trabalho, objetivou-se realizar uma análise comparativa de emprego de alternativas não convencionais para o tratamento de esgotos de comunidades rurais, com base em critérios técnicos e econômicos, a partir de estudos já realizados. As unidades discutidas foram os Sistemas Alagados Construídos (SACs), Círculo de Bananeira (CBA), Fossa Séptica Biodigestora (FSB) e Tanque de Evapotranspiração (TEvap). Com base na análise de vantagens, desvantagens, área demandada, custos e tipo de água residuária, observou-se que quaisquer das unidades seriam passíveis de emprego para tratamento unifamiliar. A escolha de uma alternativa ou de outra depende de vários fatores como disponibilidade de área, tipo de água residuária tratada, custos, clima, dentre outros. Os SACs podem ser mais eficientes e podem ser alimentados com águas cinza e provenientes de sanitários, porém podem requerer maiores áreas. Enquanto as FSB são mais compactas, geram biofertilizantes, porém de operação mais complexa, menor potencial de depuração e tratam somente águas de vasos sanitários. Os CBA e os TEvap têm as vantagens de não gerar efluente para disposição final, porém tratariam apenas um dos dois tipos de águas residuárias geradas em residências rurais. Ademais, em virtude da escassez de publicações científicas, torna-se necessária a realização de estudos para aprofundamento do tema e consolidação dos parâmetros de dimensionamento acerca dos objetos de estudo.

**Palavras chaves:** Círculo de Bananeira; Fossa Séptica Biodigestora; Tanque de Evapotranspiração; Tratamentos não Convencionais de esgoto; Sistemas Alagados Construídos;

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>5</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>6</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>7</b>
3.1. Fossa Séptica Biodigestora (FSB)	7
Concepção	7
Vantagens e Desvantagens	8
Critérios de Projeto e Condições de Operação	9
3.2. Círculo de Bananeira (CBA)	13
Concepção	13
Vantagens e Desvantagens	14
Critérios de Projeto e Condições de Operação	15
3.3. Sistemas Alagados Construídos	18
Concepção	18
Vantagens e desvantagens	20
Critérios de Projeto e Condições de Operação	21
3.4. Tanque de Evapotranspiração	25
Concepção	25
Vantagens e Desvantagens	27
Critérios de Projeto e Condições de Operação	27
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>33</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo dados apresentados, em 2015, pela Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), somente 65,3% do esgoto total gerado é tratado no país (IBGE,2016), cenário que resulta em impactos ambientais, econômicos e sociais. E essa situação é ainda mais crítica nas zonas rurais, em razão da distância dos centros urbanos, da menor disponibilidade de recursos para investimento e fiscalização. Estudos apontam que 75% das residências rurais não possuem sistemas de tratamento ou de destinação adequada de esgoto (IBGE, 2008). Em geral, o efluente gerado nessas localidades é disposto em fossas rudimentares, em valas ou diretamente no solo ou em córregos, rios e lagoas (SENAR, 2019), causando a contaminação do meio físico.

A coleta e o tratamento adequado de esgoto possuem inúmeros benefícios e não podem ser encarados como gastos e sim como investimentos para melhoria da qualidade de vida da população. A presença de serviços de esgotamento sanitário representa promoção de saúde pública e preservação de recursos naturais, que influenciam no bem estar social. A remoção ineficiente de contaminantes do esgoto sanitário antes da sua disposição no meio ambiente pode, por exemplo, implicar em depleção dos níveis de oxigênio dissolvido (OD), na eutrofização de corpos d'água, no aumento da toxicidade do meio, na liberação de gases fétidos e poluidores, no encarecimento do tratamento de água, na salinização do solo, na redução da capacidade de infiltração de água no solo, além da proliferação de vetores de doenças, entre outros (MATOS, 2010; VON SPERLING, 2014).

Segundo o Instituto Trata Brasil (2012), dentre as enfermidades que podem ser transmitidas por águas poluídas, pode-se citar a cólera, febre tifóide, leptospirose, giardíase, amebíase, hepatite infecciosa, escabiose, pediculose, conjuntivite bacteriana aguda, ascaridíase,entre outros). Por essa razão, a implementação de serviços de saneamento permite reduzir os custos com saúde pública, de acordo com o Ministro da Saúde, a cada R\$1,00 gasto em saneamento, até R\$9,00 são economizados em remediação de doenças, visto que a incidência de doenças prejudica o desenvolvimento econômico (FUNASA, 2017).

Diante desse cenário de baixo índice de atendimento da população rural com serviços de esgotamento sanitário e baixa disponibilidade de recursos por parte dos municípios, torna-se indispensável o desenvolvimento e a adoção de tecnologias alternativas, que apresentem baixos custos (relativamente), alta eficiência e de simplicidade construtiva e de

operação para o tratamento das águas residuárias (LEMOS et al. 2008; BRIX, 1994). Em média, os custos de construção, operação e manutenção dessas alternativas são, respectivamente, 30% a 60 % e 20% a 35% menores comparativamente à adoção de reatores convencionais (MAIA, 2018). Ademais, dada a possível distância dos centros urbanos, há redução dos gastos com tubulações de interceptores condutores do efluente até às estações de tratamento de esgotos (ETEs) centrais. De acordo com von Sperling e Salazar (2013), os custos para a adução do esgoto podem representar até 60% dos valores totais do tratamento de esgoto.

Além das tradicionais fossa-séptica, filtro anaeróbio e sumidouros, outros sistemas individuais têm sido avaliadas visando ter aumento de eficiência e redução dos impactos ambientais, além de agregar conceitos de recuperação e aproveitamento de recursos, como produção de biomassa vegetal. Dentre os exemplos, cita-se a fossa séptica biodigestora, modificação da concepção original; o círculo de bananeiras; os sistemas alagados construídos e os tanques de evapotranspiração (TONETTI et al., 2018).

Dado o recente advento dessas alternativas, em comparação com os sistemas previamente consolidados, cujos parâmetros de projeto são bem definidos e normatizados, é de grande importância a realização de estudos com avaliação dos aspectos dessas opções, com intuito de verificar a viabilidade de adoção em comunidades rurais, observando variáveis como custos, qualidade do tratamento, simplicidade operacional e de manutenção e área demandada. Assim objetivou-se realizar uma análise comparativa do emprego de tecnologias alternativas não convencionais para o tratamento de esgotos de comunidades rurais, com base em critérios técnicos e econômicos, tendo como referência estudos publicados empregando essas unidades.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a realização do trabalho, foram utilizados dados secundários presentes na literatura relativos às unidades de tratamento de interesse, os Sistemas Alagados Construídos (SACs), as fossas sépticas biodigestoras (FSB), os tanques de evapotranspiração (TEvap) e os círculos de bananeiras (CBA). A pesquisa foi limitada entre os anos de 1994 à 2022, para que fosse possível observar toda a evolução dessas alternativas, além de haver poucas publicações acerca do tema em anos anteriores. As bases consultadas foram o Periódicos CAPES, o Web of Science, o Scopus e o Google Scholar, permitindo ter acesso a uma grande gama de artigos e informações. Posteriormente, de posse dos artigos, boletins técnicos, livros e outras

referências, foi feito um compilado com as principais características das unidades de tratamento, principais constituintes, dos custos de construção, de operação e de manutenção, das eficiências, das potencialidades e as desvantagens de sua utilização, além de outras informações pertinentes que possam embasar a escolha da população da zona rural.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Fossa Séptica Biodigestora (FSB)**

##### **a) Concepção**

O FSB foi desenvolvido, em 2001, pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), com interesse em substituir o sistema de fossas negras, que contaminam o solo e o lençol freático, e possibilitar aumento de desempenho em relação aos tanques sépticos convencionais (PAIVA et al., 2018; SILVA et al., 2014; TORRES, 2019). Com inspiração nos biodigestores asiáticos (FBB, 2010), a FSB foi idealizada para receber e depurar águas residuárias de vasos sanitários (fezes e urina) de uma residência rural com até cinco pessoas (NOVAES et al., 2002; Galindo et al., 2010). Segundo Sarges et al. (2016), essa unidade de tratamento pode ser definida como um reator no qual ocorre degradação anaeróbia dos sólidos orgânicos por bactérias e arqueas, resultando na produção de biogás e efluente com menor potencial de contaminação. Os dois primeiros compartimentos da FSB podem ser considerados como caixas de fermentação, sendo responsáveis pela digestão anaeróbia do esgoto, enquanto o terceiro tem a função de armazenamento do efluente antes da sua disposição final (NOVAES et al., 2002; GALINDO et al., 2010). Ao passar pelo FSB, ocorre a redução da concentração de sólidos, da contagem de organismos patogênicos, além da estabilização de substâncias orgânicas presentes no esgoto (NOVAES et al., 2002; GALINDO et al., 2010).

Como diferenças do FSB para as unidades tradicionais de decanto-digestão, cita-se a maior presença de compartimentos, o que visa melhorar as eficiências do tratamento e permitir gerar um efluente final passível de aproveitamento no solo como biofertilizante ou para aplicação em leiras de compostagem (controle de umidade e adição de nutrientes), isso a menores custos de construção e operação (NOVAES et al., 2002; GALINDO et al., 2010; SILVA, 2014).

Outro diferencial do FSB em relação às fossas sépticas, é que o primeiro acumula baixa quantidade de lodo, não sendo necessária a limpeza periódica (somente com um ou dois

anos) demandada pela fossa séptica tradicional. A manutenção exigida se resume a adição mensal de uma mistura de água e esterco bovino, com o objetivo de aumentar a atividade microbiana e, conseqüentemente, a eficiência da biodigestão, bem como prevenir a geração de odores desagradáveis (NOVAES et al., 2002; GALINDO et al., 2010).

Importante ressaltar que a FSB foi idealizada apenas para recebimento de esgoto proveniente de aparelhos sanitários, antigamente denominadas águas de vasos sanitários. Segundo Galindo et al., (2019), a presença de produtos nocivos aos microrganismos (sabões e detergentes) e a baixa concentração de matéria orgânica nas águas cinzas (efluentes de pias, chuveiros, tanques, etc.) podem reduzir a atividade metabólica microbiana, prejudicando o desempenho do tratamento.

#### b) Vantagens e Desvantagens

Os benefícios promovidos pela instalação da fossa séptica biodigestora se enquadram em sociais, como redução dos índices de mortalidade e enfermidades causadas por doenças de veiculação hídrica; ambientais, tendo diminuição do volume de esgoto e da carga de poluentes despejados em mananciais superficiais e subterrâneos; e econômicos, com economia nos gastos com de implantação do FSB em relação a outras alternativas, além da redução de perdas econômicas decorrentes dos impactos sociais (ABRANCHES et al., 2018).

Além disso, segundo Oliveira et al., (2017), algumas outras vantagens da adoção do FSB são o baixo tempo de detenção hidráulica (TDH), 25 dias (NOVAES et al., 2002; GALINDO et al., 2010), em relação a alguns tipos de alternativas, como o Tanque de Evapotranspiração que pode superar 50 dias (BERNARDES, 2014); baixa produção de lodo comparativamente com outras alternativas, razão pela qual não é preciso realizar a remoção do material acumulado; robustez, podendo trabalhar tanto com altos quanto baixos carregamentos orgânicos; gera efluente passível de ser utilizado para fertirrigação; e, a possibilidade de aproveitamento do gás metano gerado. Ressalta-se também a simplicidade de operação e manutenção, não demandando pessoal treinado para sua operação e não exigindo o esgotamento periódico por caminhões limpa-fossa (EMBRAPA, 2017).

Em termos de custos, o FSB apresenta valores acessíveis e comparativos à adoção da fossa séptica tradicional ou fossa mais filtro anaeróbio (FS + TA). Segundo Perminio (2013), o valor médio da construção de uma fossa biodigestora é de aproximadamente R\$1.600,00, para um equivalente populacional de 5 pessoas, equivalente a R\$ 320,00 por habitante, valor próximo à faixa da concepção tanque séptico + filtro anaeróbio, que equivale, segundo von

Sperling (2017) é de R\$300,00 por habitante (observando somente o custo de construção). Além disso, o FSB apresenta um ganho de desempenho em relação ao sistema FS-TA e não possui custos para remoção e transporte de lodo, que pode representar cerca de R\$20,00 por habitante (VON SPERLING, 2017).

Por fim, segundo Tonetti et al. (2018), um sistema dimensionado para atendimento de uma família de até 5 pessoas, a área necessária para até 5 pessoas é de 10 a 12 m<sup>2</sup>, tendo demanda de 2,0-2,4 m<sup>2</sup> hab<sup>-1</sup> (VON SPERLING, 2017), economizando em área em relação a adoção de outros reatores descentralizados. Segundo Tonetti et al. (2018), por exemplo, há requerimento de 7-10, 5 e 25-100 m<sup>2</sup> para solução unifamiliar (família de 5 pessoas), respectivamente, na implementação de Fossa Verde; Biodigestor; e Biosistema Integrado.

Como desvantagens da instalação do FSB em comunidades rurais, pode-se citar a produção de efluente de baixa qualidade visual; ainda com grande concentração de sólidos, possibilidade de exalação de odores (quando mal operado) e não passível de lançamento no curso d'água (OLIVEIRA et al., 2017). Dessa forma, o esgoto tratado deve ser aplicado no solo, de preferência como adubo líquido, devendo observar as recomendações de aplicação de fertilizante orgânico (EMBRAPA, 2010). Outro fator é a partida lenta do sistema, ainda que a introdução de esterco bovino proporcione ganho em relação à partida de outras unidades com metabolismo anaeróbico, como o caso da fossa séptica tradicional (NOVAES et al., 2002).

### c) Critérios de Projeto e Condições de Operação

As Fossas Sépticas Biodigestoras são um sistema inovador de esgotamento sanitário composto por três caixas coletoras com 1.000 litros cada uma, para atendimento de equivalente a 5 pessoas, totalizando volume de 3 m<sup>3</sup>, e de 10-12 m<sup>2</sup> de área demandada. Ficam enterradas no solo, funcionam conectadas exclusivamente ao vaso sanitário e são interligadas entre si por tubos e conexões de PVC de 100 mm (EMBRAPA, 2010).

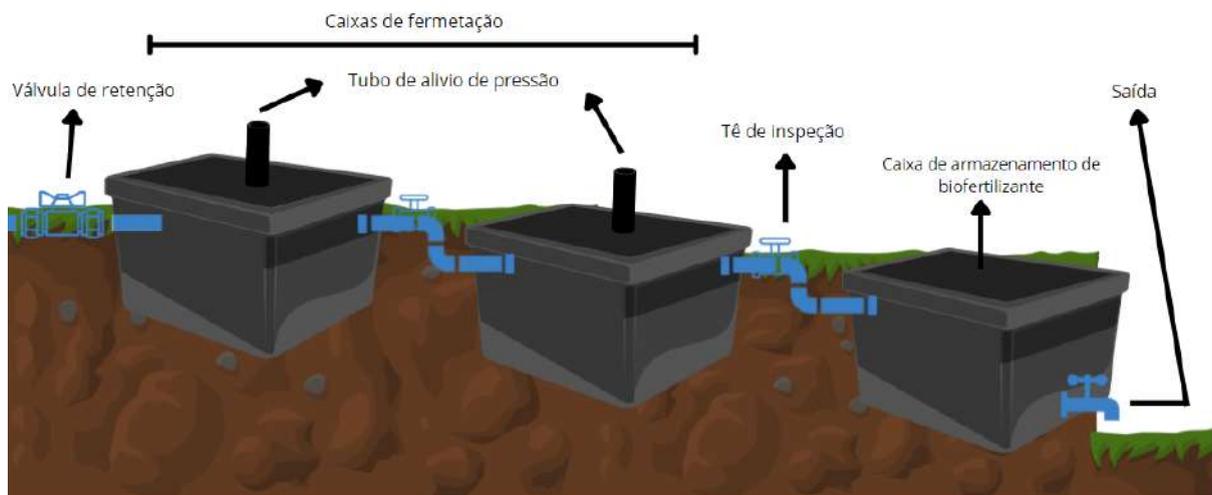
Para servir de inóculo, e acelerar o processo de start do reator, favorecendo a biodegradação dos sólidos acumulados, mensalmente é feita a aplicação de esterco bovino fresco, resultando em fornecimento ao produtor rural de um biofertilizante de boa qualidade para a adubação do solo de diversas culturas agrícolas (NOVAES et al., 2002).

É disponibilizado uma cartilha, confeccionada pela Embrapa e Fundação Banco do Brasil (2010), denominada “ Tecnologia Social - Fossa Séptica Biodigestora” e que contém referências do passo a passo e as seguintes informações pertinentes para estudo:

- No início do processo, como pode ser observado na Figura 1, existe uma válvula de retenção que nela deve ser despejada, uma vez por mês, a mistura, na proporção 1:1 de água e de esterco fresco de bovino ou de outro animal ruminante, a exemplo de cabras e ovelhas. Pela válvula de retenção, a mistura irá seguir para a primeira caixa, na qual ocorre a fermentação e redução da contagem de microrganismos patogênicos (cerca de 70%, o restante da remoção ocorre na segunda caixa), após isso o efluente é encaminhado para segunda caixa, na qual é concluída a etapa de biodigestão. Em ambas as caixas, que são vedadas, é necessário adicionar válvulas de escapes, conhecido também como suspiros, para evitar a explosão do gás metano acumulado no interior das mesmas;
- Na terceira caixa é obtido o biofertilizante que não oferece risco de contaminação ao solo, desde que aplicado de maneira adequada no solo. Esse biofertilizante, que é uma poderosa fonte de nutrientes para a agricultura, pode ser coletado por meio de baldes, bombas ou gravidade;
- O solo deve ser inserido e compactado ao redor da beirada das caixas de forma a impedir o acúmulo de água da chuva, porque isso pode refrescar o interior das caixas e prejudicar o processo de biodigestão dos dejetos humanos;
- As tampas das caixas devem ficar expostas ao Sol para facilitar o processo de biodigestão;
- Pintar de preto as caixas.

Outras recomendações construtivas e de projeto podem ser encontradas na Tabela 1.

**Figura 1:** Esquema da Fossa Séptica Biodigestora.



Fonte: do Autor. Dados: TONETTI et al., 2018

As eficiências de remoção do FSB estão na faixa de 50-80% e de 40-70%, respectivamente, de DBO e DQO, valores que dependem das características do efluente, do projeto e da manutenção do sistema de tratamento (ANDREOLI et al., 2009). No entanto, são frequentemente superiores às fossas sépticas tradicionais, que é de 30% – 40% de DBO, e no mesmo patamar de sistemas FS-TA, que da ordem de 40 – 75% de DBO. (FORTLEV, 2013).

**Tabela 1:** Especificações da Fossa Séptica Biodigestora

<b>Tratamento</b>	<b>Critérios</b>	<b>Recomendações</b>	<b>Resumo</b>
Fossa Séptica Biodigestora	Qualidade da água	A presença de produtos nocivos aos microrganismos e a baixa concentração de matéria orgânica, podem reduzir a atividade metabólica microbiana, prejudicando o desempenho do tratamento.	A Fossa Séptica Biodigestora (FSB) é uma tecnologia criada para o tratamento da água de vaso sanitário. É composta por três caixas d'água conectadas onde ocorrem a degradação da matéria orgânica do esgoto e a transformação deste em um biofertilizante que pode ser aplicado em algumas culturas.
	Distância do lençol Freático	Devido o uso de esterco é necessário ter no mínimo 1 metro de distância de lençol freático, para prevenir o risco de contaminação.	
	Fatores Climáticos	Temperaturas mais altas favorece a degradação da matéria orgânica	

Fonte: TONETTI et al., 2018; PINTO et al., 2015.

### **3.2. Círculo de Bananeira (CBA)**

#### **a) Concepção**

Segundo Oliveira e Leal (2017), o círculo de bananeira (Figura 2) é uma alternativa muito prática, fácil de ser implementada e de baixos custos para o tratamento das águas cinzas (provenientes das pias, chuveiros, tanques, etc.). Dessa forma, há impedimento de lançamento dessas águas diretamente no solo ou nos cursos d'água, com prejuízos ao meio ambiente.

Como o próprio nome diz, o círculo de bananeiras é formado por uma escavação no terreno, no formato circular, com impermeabilização do solo, sendo preenchido com troncos de madeira pequenos, galhos médios e palhas, de maneira que se forme um pequeno monte acima da vala. Ao redor da vala, plantam-se mudas de bananeiras ou outras espécies que evaporam grandes quantidades de água e que se adaptam bem a solos úmidos e ricos em matéria orgânica (EMATER, 2017). Também podem ser cultivados lírios e mamoeiros, além de ter o crescimento de outras culturas em locais sombreados na parte interna do círculo, espécies secas do lado de fora, bem como vinhas trepadeiras “escalando” as bananeiras ou uma treliça eventualmente colocada ao centro (MARTINETTI et al., 2009). Ainda de acordo com os autores, a utilização das bananeiras se justifica pelo fato dessa espécie evapotranspirar um grande volume de água, que varia de acordo com a estação do ano, variedade, clima local, etc, em valores que frequentemente esgotam o líquido inserido no reator (MARTINETTI et al., 2009). Dessa forma, não há geração de efluente passível de disposição no solo ou no curso d'água, o destino final dele é no próprio círculo de bananeiras. Além disso, a bananeira é uma cultura que ao receber efluente rico em nutrientes, produz frutos saudáveis e sem contaminação por organismos patogênicos conforme será discutido a seguir.

O princípio de funcionamento do círculo de bananeiras é a absorção de parte da água cinza e de seus nutrientes pelos vegetais e da infiltração/percolação de sua outra parte no solo, processos nos quais proporcionam depuração do efluente e permitindo a recarga do lençol freático (TONETTI et al., 2018), além da intensa evapotranspiração. A eficiência do sistema é condicionada à não utilização de produtos químicos na lavagem de roupas e louças e nos banhos, que podem prejudicar o desempenho da bananeira e o metabolismo microbiano (MARTINETTI et al., 2009; ARAÚJO; JESUS, 2016).

Se por um lado, as FSBs tratam apenas as águas provenientes de sanitários, unidades de círculo de bananeiras podem receber águas cinzas e tratar essas águas residuárias adequadamente. Assim sendo, essas podem ser utilizadas como unidades complementares de

recebimento e tratamento das águas residuárias geradas em residências unifamiliares. Segundo Perjessy (2017), os nutrientes provenientes dos produtos de limpeza, e presentes nas águas cinzas, são aproveitados pelas plantas cultivadas (bananeiras), enquanto os organismos patogênicos encontram condições inóspitas para sobrevivência e não contaminam os frutos, já que não há contato direto. Segundo Benjamin (2013), não foi detectada a presença de presença de coliformes totais, termotolerantes e de *Salmonella spp.* nas folhas e nos frutos da bananeira cultivada na unidade de tratamento, reforçando a segurança sanitária da técnica.

Comumente, as unidades de CBA são as únicas etapas de tratamento de esgotos unifamiliares (TONETTI et al., 2018), porém, essas também podem ser utilizadas como pós-tratamento de outros reatores. Silveira et al. (2002), por exemplo, sugerem a utilização do círculo de bananeiras após passagem pela fossa séptica, o que permitiria reduzir o aporte de sólidos suspensos orgânicos, reduzindo o tempo necessário para depuração da água residuária.

#### b) Vantagens e Desvantagens

Segundo Oliveira et al., (2017), dentre as principais vantagens dessa alternativa, cita-se a simplicidade de construção e manutenção. Basicamente, deve-se fazer o controle do crescimento das bananeiras ou das outras espécies vegetais, e impedir o desenvolvimento de invasoras (PERJESSY, 2017). Além disso, pela ausência de impermeabilização do fundo, essa técnica promove o tratamento e a destinação final da água residuária (recarrega o lençol freático) em uma unidade de processos construtivos simplificados, e tendo a utilização do solo e das culturas ao redor como meios de depuração, reduzindo o risco de contaminação da zona saturada. Por fim, ainda há recuperação/aproveitamento de recursos (nutrientes) e a produção de alimentos, sem a geração e a liberação de odores (OLIVEIRA et al., 2017). Como demonstrado por Benjamin (2013), as partes vegetais e frutíferas removidas podem ser aproveitadas por estarem livres de coliformes e, portanto, pode-se realizar a compostagem e produzir um composto passível de utilização como condicionador de solos, enquanto os frutos podem ser utilizados para alimentação.

Em relação aos custos, como se trata de uma alternativa que tem utilização de muitos materiais naturais e que podem ser obtidos na própria localidade, o preço de construção apresenta grande variação. Segundo Tonetti et al., (2018), o custo é em torno de R\$500,00 (para uma família de 5 pessoas), sendo um valor de R\$ 100,00 por habitante. Já quanto à demanda de área, de acordo com Tonetti et al., (2018) há uma redução do requisito de espaço

físico em comparação à fossa biodigestora, pois 3 a 5 m<sup>2</sup> atenderiam a mesma família de até 5 pessoas.

Como pontos negativos dessa alternativa, pode-se citar a eficiência condicionada à quantidade de detergente ou de demais produtos químicos presentes na água cinza; e, por ser uma técnica ainda muito incipiente no meio científico, há pouco conhecimento a respeito dos parâmetros de projeto e eficiências. A não recuperação do efluente, por exemplo, dificulta a avaliação da efetividade da técnica, devendo-se monitorar o lençol freático, sobretudo se esse estiver próximo à superfície (OLIVEIRA et al., 2017).

### c) Critérios de Projeto e Condições de Operação

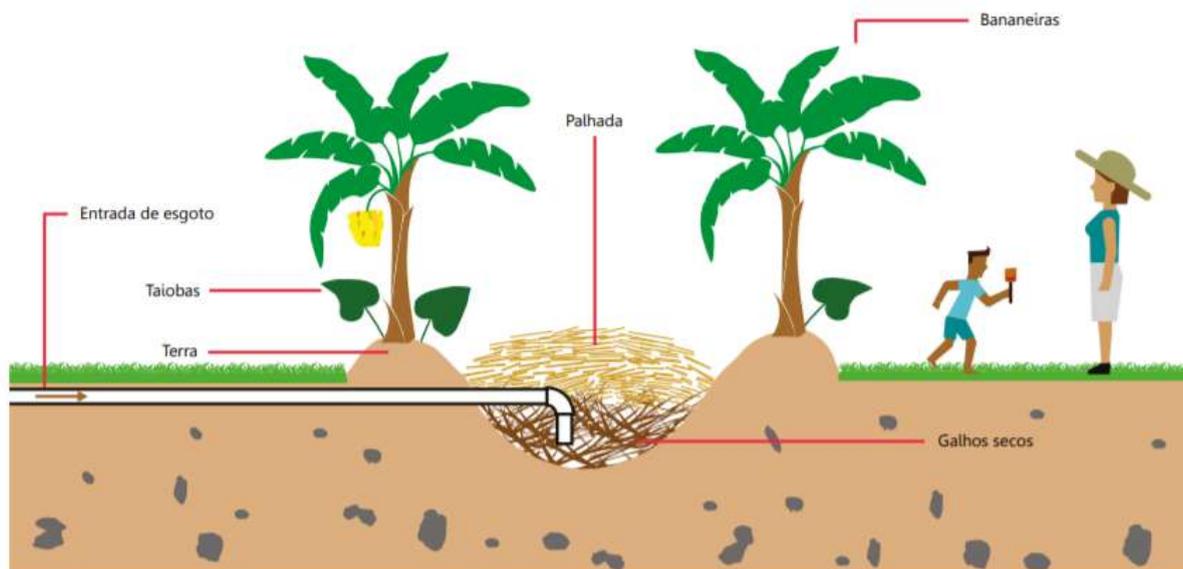
Segundo Figueiredo et al.,(2018), os critérios de dimensionamento do CBA podem ser encontrados na cartilha denominada “Tratamento de esgoto na Zona Rural: Fossa Verde e Círculo de Bananeiras”. No documento, constam também informações sobre os procedimentos para construção. Inicialmente, é feita a escavação de um talude no solo, com cerca de 2,0 m de diâmetro e 0,80 m de profundidade. Todo o solo removido é colocado na sua borda, criando um camalhão, que visa servir de barreira para redução do escoamento superficial e a entrada de água pluvial no leito.

Se o terreno for inclinado, ao invés de um círculo, deve-se escavar o solo em formato de “meia lua”, condição que irá impedir a erosão do solo, dando maior estabilidade à construção realizada. Por outro lado, caso o solo seja muito arenoso, deve-se adicionar uma camada de argila no fundo do buraco para “segurar” a água no solo. O espaço aberto no solo deve ser preenchido com pequenos galhos no fundo e com palhada na parte de cima (capim seco, folhas de bananeira, poda de árvores) para criar um ambiente arejado e espaçoso para receber o esgoto que precisa ser tratado. O esgoto deve ser conduzido por um cano e desaguar em um Joelho que deve ficar escondido no monte de palha seca, evitando assim que a água cinza fique em contato com a superfície. No monte do entorno do local escavado devem ser plantadas bananeiras, mamoeiro, taioba e outras plantas que se adaptam bem a ambientes úmidos. Uma casa com 4-5 pessoas deve ter entre um e três círculos de bananeiras para tratar todas as águas cinzas produzidas (FIGUEIREDO et al., 2018).

Em relação à manutenção citada de controle vegetativo e retirada dos frutos gerados, segundo Araújo e Jesus (2016), após realizar a colheita do cacho de bananas, deve-se cortar a bananeira bem na base e em pedaços de 1 m, dividir ao meio (longitudinal) e colocar no centro do círculo. A cada 3 anos (ou mais) todo o material depositado no leito pode ser

retirado (quando os troncos se dissolverem) e usado como adubo orgânico em hortas. Posteriormente, deverá ser reposto um novo material como no início da implantação do círculo. Mais recomendações a respeito da construção dos CBs podem ser encontradas na Tabela 2.

**Figura 2:** Esquema do Círculo de Bananeira.



Fonte: TONETTI et al., 2018

**Tabela 2:** Especificações do Círculo de Bananeiras

<b>Tratamento</b>	<b>Critérios</b>	<b>Recomendações</b>	<b>Resumo</b>
Círculo de Bananeiras	Qualidade do efluente	Quantidade de detergentes e/ou produtos químicos presentes no efluente que pode comprometer a eficiência do tratamento.	Unidade de tratamento para águas cinzas ou tratamento complementar de esgoto doméstico ou águas de vaso sanitário. Consiste em uma vala circular preenchida com galhos e palhadas, onde desemboca a tubulação. Ao redor são plantadas bananeiras e/ou outras plantas que apreciem o solo úmido e rico em nutrientes
	Vegetação local	Observar qual planta, citada anteriormente, irá se adaptar melhor ao local de instalação do tratamento.	
	Fatores Climáticos	Necessário clima favorável para desenvolvimento das plantas que irão utilizar no tratamento, observando a incidência solar e períodos chuvosos que podem prejudicar a eficiência do tratamento.	

Fonte: BARBOSA et al., 2017; TONETTI et al., 2018; PINTO et al., 2015

### 3.3. Sistemas Alagados Construídos

#### a) Concepção

Sistemas alagados construídos são unidades de tratamento caracterizadas por apresentarem moderado custo de capital, baixos consumo de energia e demanda de manutenção, proporcionarem estética paisagística e aumento do habitat para a vida selvagem (MICHAEL JR., 2003 e IWA, 2000; APUD LIN et al, 2005). Com advento após observação da capacidade de depuração de áreas alagadas naturais, os SACs têm recebido grande atenção da comunidade científica, o que é refletido nos muitos trabalhos publicados nos últimos anos. Assim, ao contrário das demais alternativas, os SACs possuem um vasto material publicado, apesar de ainda não existirem normas brasileiras para o seu dimensionamento. Na tentativa de padronizar os projetos de SACs no Brasil, von Sperling e Sezerino (2018) lançaram um documento com diretrizes para dimensionamento de SACs. Parâmetros adotados para construção de SACs nas condições brasileiras também podem ser encontrados em Matos e Matos (2017) e/ou em Sezerino e Pelissari (2021).

Segundo Prata et al., (2013), os SACs são reservatórios preenchidos com materiais porosos, de alta condutividade hidráulica, geralmente constituídos por brita, que serve de suporte para o cultivo de macrófitas. No meio suporte, desenvolve-se um biofilme entremeado pelas raízes das plantas, que favorece a degradação de parte da matéria orgânica em solução, remoção por meio de processos físicos dos sólidos sedimentáveis e sólidos suspensos, ocorrendo a depuração das águas residuárias (PRATA et al., 2013). A vegetação implantada nesses leitos de cultivo atua como extratora de macro e micronutrientes necessários ao seu crescimento, além de poder transferir oxigênio para o substrato, permitindo a formação de microzonas aeróbias em torno de rizomas e raízes. Essas plantas também favorecem o desenvolvimento dos filmes biologicamente ativos que propiciam a degradação dos compostos orgânicos, depurando o meio (TANNER, 2001; KADLEC; WALLACE, 2008).

Em relação às configurações, os SACs podem se diferenciar quanto à direção de escoamento e o nível de líquido em relação ao substrato filtrante(Figura 3). Segundo Rosendo (2021), os SACs de escoamento superficial (SAC-ES) apresentam lâmina d'água visível, apresentando menos camadas de material suporte ou ausência dos mesmos, assemelhando a uma lagoa plantada. Em razão da ausência de substrato filtrante, pode apresentar menores

custos de implantação e manutenção (substituição do material utilizado), porém com menores eficiências na remoção de alguns poluentes (sólidos e fósforo, principalmente). Os SACs de escoamento subsuperficial (Figura 3), por sua vez, se dividem em unidades de escoamento vertical (SAC-EV) e de escoamento horizontal (SACs-EHSS). (ROSENDO, 2021)

No SAC-EV, o líquido a ser tratado é disposto uniformemente sobre toda a área superficial do módulo de tratamento, de forma intermitente, percolando em trajetória descendente por entre o sistema radicular das macrófitas e dos poros do material filtrante, o qual é usualmente composto por areia, até ser coletado no fundo por um sistema de drenagem (VON SPERLING et al., 2018). O meio permanece não saturado, isto é, os espaços vazios entre os grãos do meio suporte não estão preenchidos com líquido, mas com ar, o que permite a predominância de condições aeróbias no leito filtrante (VON SPERLING et al., 2018).

Já no SAC-EHSS, o líquido a ser tratado é disposto na porção inicial do leito, denominada “zona de entrada” (geralmente composta por brita de maior granulometria ou material similar), atingindo a zona principal do leito, por onde irá escoar lentamente pelos vazios do material filtrante (também denominado meio suporte ou substrato; geralmente brita ou cascalho), até atingir a porção final, na extremidade oposta (também composta por brita de maior porte), denominada de “zona de saída”. O escoamento predominante do líquido ocorre de forma horizontal, ao longo da seção longitudinal, e o nível do líquido fica abaixo do nível superior do material filtrante. O escoamento ocorre, portanto, em condições anaeróbias e anóxicas (essa última favorecendo a desnitrificação), em que os espaços vazios entre os grãos de meio suporte estão preenchidos pelo líquido em tratamento (VON SPERLING et al., 2018).

Os SACs-EHSS vem sendo bastante estudado devido ao seu elevado potencial de tratamento de diferentes águas residuárias, tendo distintos resultados de eficiência apresentados na literatura (ZHANG et al., 2014). Esse fato decorre em razão da complexa combinação de processos físicos, químicos e biológicos na remoção dos contaminantes, que depende de muitas variáveis, incluindo taxa de aplicação hidráulica; tipo de água residuária; taxa de aplicação orgânica; tempo de detenção hidráulica (TDH); modo operacional (intermitente ou contínuo); variação nas condições ambientais como a temperatura; presença e tipos de vegetações, substrato; formação de biofilme, características da água residuária, entre outras (BRIX, 1997; MATOS et al., 2008; KADLEC; WALLACE, 2009; ÁVILA et al., 2013).

Entretanto, como todo reator, a adoção dos SACs-EHSS também apresentam desvantagens e que da mesma forma têm sido muito investigadas, como descrito em Matos, von Sperling e Matos (2018). Como limitações do emprego da técnica, cita-se o entupimento do meio poroso (fenômeno da colmatação), que inclui vários processos relacionados com o acúmulo de diferentes tipos de sólidos, o que leva a uma redução na capacidade de escoamento no leito (CASELLES-OSORIO et al., 2007; HUA et al., 2014; KNOWLES et al., 2010; MATOS; MATOS, 2017). A colmatação pode proporcionar diminuição na condutividade hidráulica no meio poroso, o que pode levar ao escoamento superficial das águas residuárias em SACs-EHSS e no aparecimento de zonas mortas e curtos-circuitos (PEDESCOLL et al., 2009), resultando em diminuição do tempo de detenção hidráulica (TDH) no sistema (USEPA, 2000), podendo conduzir à obtenção de menor eficiência no tratamento.

Esse fenômeno também pode reduzir o tempo de vida útil das unidades, aparecendo os primeiros relatos de evidências da obstrução dos vazios do leito após dois (PAOLI & VON SPERLING, 2013) ou quatro anos (CASELLES-OSORIO et al., 2007). Dentre as várias variáveis que influenciam na colmatação precoce ou mais tardia, elenca-se as taxas de carregamento orgânico (TCO), TDH e carga aplicada por área transversal (TUNÇSIPER et al., 2004; GHOSH; GOPAL, 2010), conseqüentemente é de grande importância a adoção de parâmetros adequados de operação.

Dada às potencialidades das unidades verticais, tem-se utilizado também os sistemas híbridos que consistem em uma combinação de SACs-EV e SACs-EHSS, permitindo grande remoção de sólidos e nitrificação, com posterior desnitrificação e remoção de outros nutrientes (FAISSAL, 2016). Nos últimos anos, outras variantes ainda foram desenvolvidas como os SACs do tipo biorack, com aeração, de fundo saturado, drenagem livre, sistema francês, entre outros. (BASSANI; DECEZARO, 2018; SOARES, 2021), configurações novas que não serão detalhadas no presente trabalho, pois ainda carecem de mais estudos antes do emprego nas regiões carentes.

#### b) Vantagens e desvantagens

Segundo Rezende et.al (2021), os benefícios do emprego dessas unidades são a utilização de materiais de baixo custo como areia, brita e resíduos sólidos como meio filtrante; a simplicidade de construção, operação e manutenção, dispensando mão de obra especializada; o baixo requerimento energético; a possibilidade de geração de recursos

financeiros com a comercialização da biomassa cortada do leito; as elevadas eficiências e a flexibilidade operacional. Pesquisas também têm indicado a efetividade dos SACs na remoção de diferentes poluentes em distintas águas residuárias, indicando que poderiam ser empregados na comunidade rural tanto para depurar esgotos domésticos quanto as águas residuária geradas na criação de animais (SOUZA, 2019; FIA et al., 2017).

Já os pontos contrários à adoção da tecnologia se baseiam na grande demanda de área, no custo do tratamento prévio do esgoto (para os SACs-EHSS); nos gastos necessários na aquisição do substrato filtrante (menor nos SACs-ES); nos custos de manutenção (entupimentos e corte da parte aérea da planta); na eminente o aparecimento de colmatação (precoce ou tardia - fenômeno anteriormente descrito); além do risco de exalação de odores e proliferação de mosquitos nos sistemas superficiais, caso mal operados (REZENDE et al., 2021). Além disso, a tecnologia é passível de interferências climáticas (chuvas e variação de temperatura), bem como sujeita a variação de eficiência em função da adaptação das condições fitossanitárias das espécies cultivadas. (NUAMAH, et al. (2020)

#### c) Critérios de Projeto e Condições de Operação

Os SACs são escavações taludadas e preenchidas com materiais porosos, de alta condutividade hidráulica que servem de suporte para o cultivo de plantas com bom desenvolvimento em ambiente alagado e rico em nutrientes, e o desenvolvimento de microrganismos (PRATA et al., 2013). Os substratos mais comumente utilizados para preenchimento de SACs-EHSS são o cascalho, a brita, a areia e o solo, entretanto, em razão do possível elevado custo de aquisição e transporte, além do risco de colmatação precoce, alternativas a esses materiais têm sido avaliadas. Pode-se citar, por exemplo, o uso de resíduos sólidos descartados de outras atividades, notadamente aqueles que estão menos sujeitos ao desgaste (inertes) decorrente do ataque de gases e ácidos orgânicos formados nesses sistemas de tratamento (YIN; YAN; GU, 2017), proporcionando, assim, maior tempo de vida útil dos leitos (retardo da colmatação). Como exemplos, cita-se as garrafas PET, outros materiais plásticos e lascas de pneu, disponíveis em grandes quantidades em áreas urbanas e que podem apresentar baixos custos de transporte (SARAIVA et al., 2018; MIRANDA et al., 2019)

Na escolha do meio suporte, deve-se levar em conta aspectos relacionados à participação na remoção de nutrientes/ poluentes (área superficial, granulometria e reatividade) e interferentes no tempo de vida útil do leito (porosidade, resistência e

coeficiente de uniformidade) (KADLEC; WALLACE, 2009; MATOS; VON SPERLING; MATOS, 2018). Wu et al., (2015) citaram ainda outros vários tipos de meio suporte alternativos, como conchas, pellets de argilominerais, lodo de estação de tratamento de água, carvão ativado, argila expandida, dentre outros, que são mais reativos e podem proporcionar maior capacidade de remoção de determinados poluentes (fósforo, por exemplo). Por outro lado, são mais propensos ao desgaste e à obstrução dos espaços porosos (MATOS et al., 2017).

Em relação às espécies vegetais, as mais utilizadas em SACs-EHSS estão o junco (*Juncus sp.*), a taboa (*Typha sp.*), a navalha de mico (*Scirpus sp.*), o carex (diversas espécies), o caniço (*Phragmites sp.*), o capim-mandante (*Echinochloa polytachya*), a cebolinha d'água (*Eleocharis sp.*) e a alternanthera (*Alternanthera philoxeroides*), plantas encontradas naturalmente em áreas alagadas. No entanto, após a constatação de que outras culturas podem se adaptar a esse ambiente, pelo desenvolvimento de aerênquimas e bombeamento de oxigênio na zona radicular, houve incentivo a busca por outras espécies (MATOS; MATOS, 2021). Atualmente, plantas florísticas comerciais (estrelícia, antúrio, agapanto e lírio amarelo), algumas forrageiras (capim-elefante, capim-tifton 85, azevém, aveia, milho, etc.) e algumas espécies para alimentação humana (arroz, milho, sorgo, girassol, cevada, colza, trigo, etc.) têm sido cultivadas, especificamente, em SACs-EHSS.

De acordo com Matos e Matos (2017), a possibilidade da utilização de SACs-EHSS como áreas de cultivo de produtos alimentícios ou outros produtos de interesse comercial é uma realidade e deve ser incentivada. Por outro lado, os autores ressaltam que a busca deve ser por espécies que proporcionem ganho na capacidade de depuração de águas residuárias. Sendo a zona radicular, a região mais ativa dos SACs-EHSS, onde ocorrem diferentes mecanismos de remoção (STOTTMEISTER et al., 2003), uma planta que apresenta sistema radicular bem desenvolvido e longo, por exemplo, tende a aumentar a capacidade desses sistemas na remoção de nutrientes/poluentes. Por essa razão, muitas pesquisas recentes têm sido feitas utilizando o capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) que tem raízes que podem alcançar até 5,0 m de comprimento (MICKOVSKI et al., 2005).

Em SACs-EHSS, têm sido cultivadas espécies de sistema radicular rizomatoso, axial ou fasciculado, sem, no entanto, atentar para possíveis benefícios de um ou outro para maior eficiência do sistema de tratamento, sendo que a espécie vegetal possui papel de grande relevância no desempenho da unidade de tratamento (MATOS; MATOS, 2021), havendo ainda um grande campo para pesquisas e desenvolvimento dos SACs. Além da escolha mais

propícia para uso em SACs, deve-se atentar também a outros aspectos como a densidade vegetal utilizada e a frequência do corte da parte aérea (PANRARE et al., 2016), além das cargas aplicadas, já que as plantas têm capacidade limite de absorção (MATOS; MATOS, 2021).

Os SACs-ES e SACs-EHSS são comumente construídos com formatos retangulares, ainda que novos estudos tenham indicado que elevadas relações L/B (comprimento/largura) podem não ser interessantes para a concepção de escoamento subsuperficial. Segundo Costa et al.,(2019), escoamento em SACs-EHSS ocorre em um ambiente poroso, condição que faz com que não se aproxime tanto do fluxo pistonado quanto em meios não preenchidos com meio suporte. Além disso, em grandes relação L/B, há menores seções transversais de recebimento da água residuária, implicando em mais precoce colmatação do leito. Assim, passa-se a ter maior liberdade na definição da razão L/B para projeto desses sistemas de tratamento de águas residuárias, podendo-se destinar maior seção transversal para o recebimento das águas residuárias.

Como outros detalhes construtivos, elenca-se que as paredes do talude dos SACs-EHSS são impermeabilizadas, com argila compactada, alvenaria ou geomembrana. A profundidade útil (nível d'água) das unidades varia de 0,3 a 0,6 m, havendo preenchimento com substrato filtrante nos SACs-EHSS em alturas superiores, de forma a apresentar escoamento subsuperficial. Ainda há uma folga entre nível de meio filtrante e a superfície do talude. O esgoto é distribuído por tubos de PVC perfurados posicionados na superfície de entrada do leito.

Esse primeiro trecho pode ser preenchido com brita nº 3 ou 4 ou, ainda, pedrão de mão (materiais de maior granulometria) para evitar rápido entupimento, já que é a região que recebe maior carga de sólidos. O trecho a seguir pode ser preenchido com brita nº 1 ou 2, areia (menos comum para SACs-EHSS) ou materiais alternativos. Por fim, o líquido tratado é coletado na extremidade horizontalmente oposta à entrada de esgoto. Para isso, recomenda-se a utilização de tubos de PVC perfurados localizados no fundo da vala do SAC. Esse trecho, denominado de zona de saída, pode ser preenchido com brita nº 3 ou 4 (TONETTI et al., 2018). A concepção dos SACs de escoamento superficial (SAC-ES) é bastante semelhante a das unidades de escoamento subsuperficial, com a diferença da ausência de meio suporte.

Os SACs-EV normalmente se apresentam em formato quadrado com camadas de material mais fino na superfície (brita de menor granulometria) e mais grosseiro abaixo, permitindo boa filtração na superfície e melhor capacidade de drenagem no fundo. A

profundidade útil varia entre 0,6 e 1,0 m, com a presença de tubos que distribuem o esgoto sobre a superfície do leito (área superficial) (TONETTI et al., 2018). A alimentação é intermitente, com ciclos de 3,5 dias de aplicação e 7 dias de repouso (TREIN et al., 2021). No sistema francês, são utilizadas três unidades, sendo duas com recebimento alternado de esgoto e a terceira para polimento do efluente dos outros SACs (TREIN et al., 2021). Porém, dadas as condições climáticas, no Brasil é possível o uso de apenas dois SACs-EV, como foi demonstrado no trabalho de Trein et al., (2021), justificando que em regiões tropicais geram: i) altas taxas de crescimento biológico durante o período de alimentação; ii) aceleração da mineralização da matéria orgânica retida nos poros do filtro (PLATZER; MAUCH, 1997); e iii) elevação das taxas de desidratação da camada de depósito superficial.

Em relação às demandas por área, requer-se para o tratamento de esgoto, áreas de 2,0, 0,6 e 1,0-5,0 m<sup>2</sup> por pessoa, respectivamente, para SACs-ES, EV e EHSS (RODRIGUES & VAN KAICK, 2021; ZUMALACARREGUI; VON SPERLING; 2018;), maiores do que reportados para outros reatores convencionais, porém menores do que em alguns sistemas descentralizados como o caso do Biosistema Integrado, que varia entre 5 a 20 m<sup>2</sup> por pessoa (TONETTI, et al., 2018; VON SPERLING, 2018). A faixa de valores, sobretudo para os SACs-EHSS, é bastante variável em razão de fatores climáticos, características da água residuária e tipo de espécie vegetal utilizada. Critérios de dimensionamento e outras recomendações estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Especificações e recomendações construtivas do projeto de Sistema Alagado Construído

Tratamento	Critério	Recomendações	Resumo das diferenças entre os SACs
SAC - EHSS	Taxa de aplicação superficial	$L_s = 70$ a $133 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Literatura internacional); $L_s = 400$ a $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ condições tropicais.	Aplicação contínua. Tipicamente preenchido com brita ou areia, sendo plantada com vegetação típica de áreas alagadas ou de interesse comercial. A água residuária, que é mantida abaixo da superfície do leito, esco horizontalmente da entrada para a saída. Geralmente são projetados para tratar o efluente do tratamento primário ou secundário antes da disposição do solo ou a descarga em cursos d'água. O elevado tempo de contato do líquido com plantas, meio filtrante e microrganismos permite elevadas eficiências de remoção de diversos contaminantes. Predominam condições anaeróbias e anóxicas, tendo microzonas aeróbias próximo às raízes e maior potencial redox na superfície e na saída, tendo maior potencial de desnitrificação.
	Carga Orgânica Transversal	$244$ a $488 \text{ g DBO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ $250 \text{ g DBO m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para $D_{10} < 4,0 \text{ mm}$	
	Tempo de Detenção Hidráulica	Ordem de dias. Recomendação de pelo menos de $2,0 \text{ d}$	
	Velocidade Horizontal	$< 8,6 \text{ m d}^{-1}$	
	Cinética de decaimento de Primeira Ordem	$C=C_0.e^{-k_1.t}$ Variável*	
SAC- EV	Taxa de Aplicação Hidráulica	$< 0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (uso de areia com meio suporte) $0,85 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (sem sobrecarga)	Aplicação intermitente. O líquido é distribuído na superfície do meio, preenchido com areia e brita, infiltrando e percolando pelo leito, passando pelo meio suporte e zona de raízes. Utiliza-se material de menor granulometria nas primeiras camadas de leito filtrante e material mais grosseiro na parte inferior, favorecendo filtração na superfície e boa distribuição do líquido na saída. Recebe esgoto diretamente do tratamento preliminar. Há predominância de condições aeróbias, permitindo ter elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica e maiores taxas de nitrificação.
	Equivalente Populacional	$A_s = m \times EP_b$ Variável**	
	Taxa de Fornecimento de Oxigênio	$\leq 30 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de $O_2$ .	
SAC - ES	Nível da água	$0,1$ a $0,6 \text{ m}$	Possui escoamento superficial, apresenta lâmina d'água livre e é semelhante aos alagados naturais, sendo também denominados lagoas plantadas. Quando o efluente atravessa a zona úmida, ele é tratado pelos processos de sedimentação, filtração (na zona de raízes), oxidação, redução, adsorção e precipitação. Tem menor potencial de filtração e desnitrificação, porém pode apresentar menores custos de construção (gastos com meio suporte) e maior potencial redox.
	Tempo de Detenção Hidráulica	$> 2,0 \text{ d}^{***}$	

Em que,  $k_1$  é o coeficiente de decaimento de primeira ordem, sendo que  $k_{120}$  é o referente na temperatura de 20 °C;  $C_0$  = concentração inicial ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $C$  = concentração final ( $\text{mg L}^{-1}$ );  $t$  = tempo (d);  $A_s$  = área superficial ( $\text{m}^2$ );  $m$  e  $b$  são coeficientes;  $EP$  = equivalente populacional (hab).

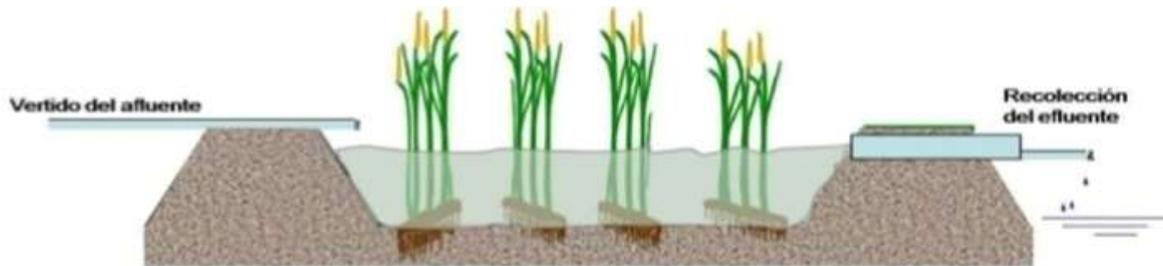
\* O modelo clássico da cinética de primeira ordem de fluxo em pistão pode não reproduzir adequadamente o decaimento, razão pela qual pesquisas têm sido sugerido o uso de outros modelos como modelo de fluxo disperso (com residual) e cinética de primeira ordem modificada (VON SPERLING; PAOLI, 2013; MATOS et al., 2019). O  $k_{120}$  frequentemente é superior a  $0,3 \text{ d}^{-1}$ .

\*\*  $m$  de 1,0 à 5,4;  $b > 0,5$ .

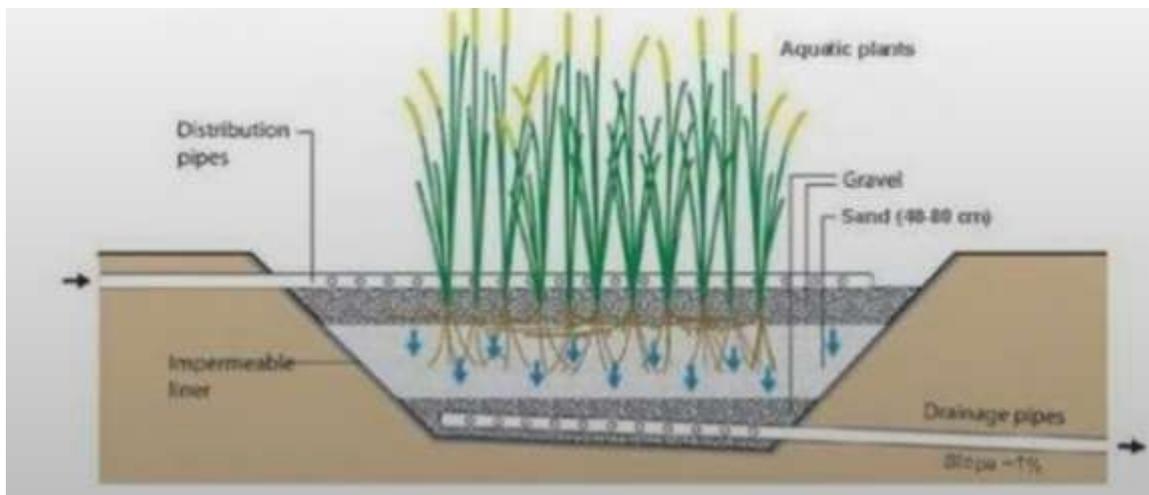
\*\*\* Não são encontradas muitas informações sobre recomendações na literatura pelo fato de que nem todos os pesquisadores consideram essas unidades com SACs e sim como lagoas plantadas.

Fonte: MATOS;MATOS,2017; VON SPERLING; SEZERINO, ANO ; KADLEC & WALLACE,2009; SEZERINO et al., 2015

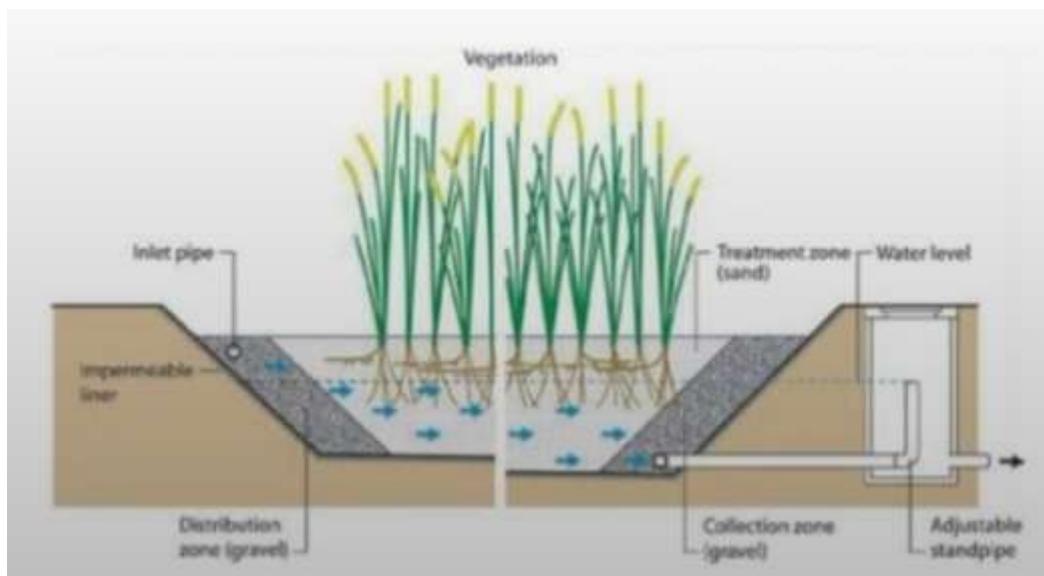
**Figura 3:** Esquema de Sistema Alagado Construído Escoamento Superficial; Sistema Alagado Construído de Escoamento Horizontal; Sistema Alagado Construído Vertical; Escoamento Superficial



Escoamento Vertical



Escoamento Horizontal Subsuperficial



Fonte: Águas e Efluentes (2021)

### 3.4. Tanque de Evapotranspiração

#### a) Concepção

O tanque de evapotranspiração (TEvap) (Figura 4) é uma técnica desenvolvida e difundida por permacultores de diversas nacionalidades, e que apresenta potencial para aplicação no tratamento domiciliar de águas de vasos sanitários em zonas urbanas e periurbanas (PAMPLONA; VENTURI, 2004). Na literatura, é possível encontrar a tecnologia semelhantes com os nomes de “*willow bed*”, o sistema de salgueiro, “*willow evapotranspiration system*”, “*evapotranspirative willow*”, “*willow wetland*”, bacia de evapotranspiração, fossa biosep, fossa verde, canteiro bioséptico e fossa agroecológica (REIS, 2022; CAMPOS et al., 2020). Consiste em um tanque impermeabilizado, preenchido com diferentes camadas de substrato e plantado com espécies vegetais de crescimento rápido e alta demanda por água. O sistema recebe o esgoto dos vasos sanitários, sendo que o mesmo passa por processos naturais de degradação microbiana da matéria orgânica, mineralização de nutrientes, absorção e evapotranspiração pelas plantas. Cada módulo é dimensionado para uma unidade familiar, composta por 5 pessoas (VENTURI, 2004). Assim, diferencia-se do círculo de bananeiras pelo fato de que as culturas se desenvolvem dentro do leito escavado e não nas margens do tanque, haver impermeabilização do fundo e pela água residuária tratada.

O sistema foi originalmente proposto por Tom Watson, denominado de Watson Wick, e consistia em uma trincheira escavada no solo, com largura e comprimento variáveis e, aproximadamente, 60 cm de profundidade, no qual era construído para receber tanto o esgoto de aparelhos sanitários quanto as águas cinzas (PAMPLONA; VENTURI (2004). Atualmente, no entanto, é frequentemente utilizado somente para recebimento, tratamento e disposição final do primeiro tipo de efluente (proveniente de sanitários). A alimentação das unidades ocorre por meio de um tubo, esse posicionado dentro de um câmara anaeróbia (feito com um tambor cortado longitudinalmente). Já na porção oposta à entrada do esgoto, próximo à superfície do solo, é colocado um tubo para drenagem do excesso de água (EMATER, 2016), em períodos de chuvas intensas ou quando ocorre uma produção atípica de esgoto nos sanitários.

A abertura feita no solo recebe material pedregulhoso, tendo camada de 45 cm de entulhos (tijolos, telhas, etc), após outra camada de 10 cm de brita. O restante do volume do tanque é preenchido com uma camada de 10 cm de espessura de areia e após adicionada uma camada de 35 cm de solo, onde são colocadas as plantas (EMATER,2014). As paredes e o fundo do tanque são impermeabilizados preenchidos com camadas de diferentes materiais,

citados anteriormente, sob as quais são colocadas plantas de crescimento rápido e alta demanda por água (PAULO et al., 2019). Para melhorar a filtração do efluente, conforme relatado por Pamplona e Venturi (2004), é recomendado o recobrimento das paredes e do fundo com uma mistura de esterco, argila e palha, permitindo o desenvolvimento de um biofilme composto por bactérias anaeróbias, que funciona como filtro.

Acima da trincheira aberta e preenchida com pedras, é colocada uma manta geotêxtil, uma camada de solo argiloso e uma camada de solo areno-argiloso, plantado com grama (GALBIATI, 2009). Uma faixa de solo argiloso se estende até o fundo do leito e é colocada, com objetivo de promover a ascensão capilar do efluente até a superfície, onde ocorre a evapotranspiração ao meio e colocado com a concavidade voltada para baixo, no fundo do tanque (GALBIATI, 2019). No entanto, essa faixa de solo pode não ter efeitos práticos em quaisquer configurações e condições climáticas, não ocasionando aumento das perdas hídricas conforme mostrado por Reis (2022), que recomenda testes voltados para plantas com raízes mais superficiais e aumentando-se a área superficial da faixa vertical do solo.

#### b) Vantagens e Desvantagens

Como alternativa em potencial para implantação de sistemas descentralizados de tratamento de efluentes, zonas úmidas ou zonas de raízes são utilizadas em áreas rurais nos países em desenvolvimento. Comparado aos sistemas convencionais, possuem vantagens como o baixo custo de implantação e operação, a facilidade operacional, o baixo ou nenhum requisito energético, harmonia paisagística, satisfatória eficiência na remoção de matéria orgânica, sólidos e nutrientes (EMATER, 2014; PINTO et al., 2015). Também há geração de biomassa vegetal, além de não produzir efluente para disposição final e não resultar em produção de lodo para descarte (REZENDE et al., 2021).

Por outro lado, como toda unidade de tratamento, as bacias TEvap também apresentam desvantagens como a grande dependência de fatores ambientais; o reduzido número de publicações a respeito da tecnologia, e, conseqüentemente, de critérios regulamentados de dimensionamento; o pequeno número de informações a respeito das eficiências, além de estarem suscetíveis a colmatação (GALBIATI, 2009; PAMPLONA; VENTURI, 2004). Em razão da necessidade de maior desenvolvimento dessa técnica, Reis (2022) realizou um compilado de informações existentes no Brasil e no mundo a respeito dos leitos de evapotranspiração, tendo destaque para as produções da autora Paula Paulo, pesquisadora da UFMS.

### c) Critérios de Projeto e Condições de Operação

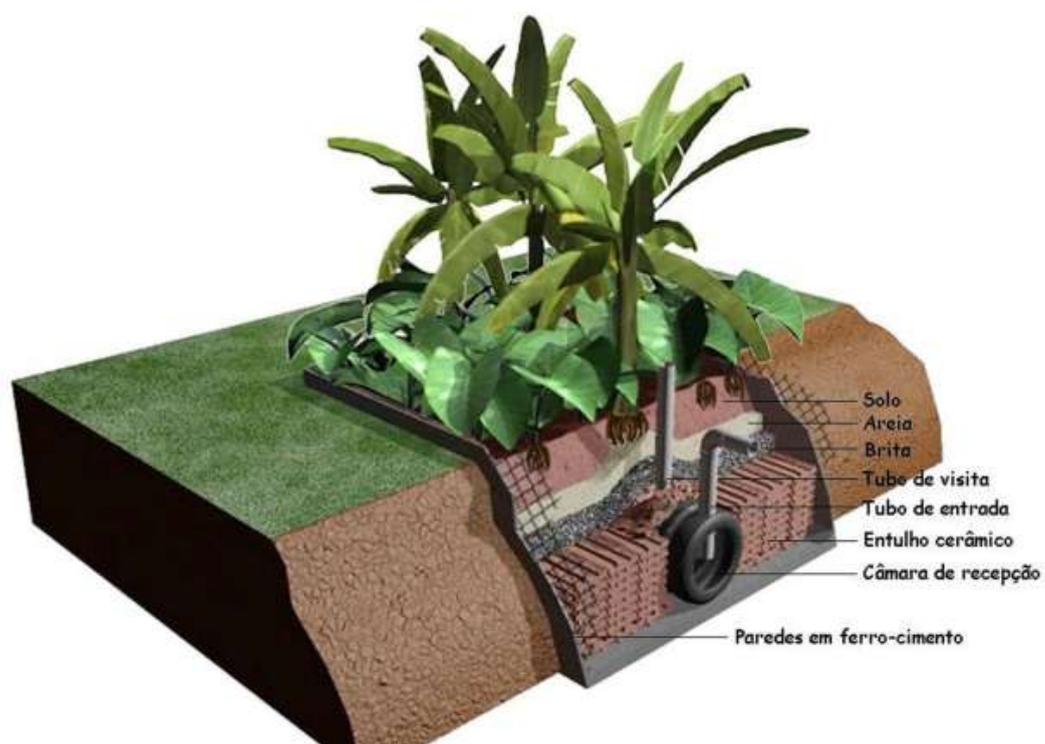
É atribuída a Tom Watson as recomendações de dimensionamento para o sistema de 2 m<sup>2</sup> de área por pessoa (PAMPLONA; VENTURI, 2004), inferior a de muitas unidades de tratamento descentralizado. Esse foi o critério adotado pelo permacultor estadunidense Scott Pittman, citado por Pamplona e Venturi (2004), com construção em ambiente do tipo jardim de inverno ou casa de vegetação, evitando a entrada de chuvas. Além da recomendação de área superficial, entusiastas da tecnologia também sugerem a adoção de 1,0 m de profundidade, além de considerar 1,0 m linear no comprimento por usuário (COSTA, 2014). Dessa forma, para uma família de 5 integrantes, haveria demanda de 10,0 m<sup>2</sup> de área superficial, sendo 5,0 m de comprimento e 2,0 m de largura, tendo 1,0 m de profundidade (45cm de entulho (tijolo, telha, etc), 10 cm de camada de brita, 10 cm de areia, 35 cm de solo (EMATER,2014)). Pesquisas mais recentes, no entanto, indicam que seria necessário, ao menos, 3,2 m<sup>2</sup> hab<sup>-1</sup> para alcançar a condição de descarga zero (não haver produção de efluente), isso em condições climáticas do Mato Grosso do Sul (PAULO et al., 2019).

Parte de grande relevância no funcionamento de TEvap, a escolha do tipo das espécies vegetais é parte chave no bom desempenho da tecnologia. Algumas espécies recomendadas para introdução no TEvap são: bananas (*Musa sp.*); inhames e taiobas (*Colacasia sp.*); mamoeiro (*Carica papaya*), ornamentais como copo-de-leite (*Zantedeschia aethiopica*); mariasem-vergonha (*Impatiens walleriana*); lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*); caeté banana (*Heliconia spp.*) e junco (*Zizanopsis bonariensis*) (VENTURI, 2004; MANDAI, 2006). Segundo observações de diversos usuários, esses sistemas raramente extravasam, mesmo em épocas de chuvas e alta umidade relativa do ar (GALBIATI, 2009).

Até em função da dependência das perdas hídricas no interior do TEvap, outra possibilidade da área demandada é o cálculo em função da estimativa de produção de esgoto e a capacidade de evapotranspiração da espécie vegetal escolhida, além de precipitação e infiltração de água pluvial no leito. Para cálculo das perdas hídricas, utiliza-se a evapotranspiração de referência da localidade (depende das condições locais) e o coeficiente do tanque TEvap (depende da cultura) (GALBIATTI, 2009). Na literatura, é recomendada a consideração que a evapotranspiração nas bacias TEvap é de 2,71 vezes superior à evapotranspiração local (GALBIATTI, 2009; PAULO et al., 2019), no entanto, os valores podem ser ainda superiores. Magalhães et al., (2018), por exemplo, encontraram valores entre 2,5 e 7,7 vezes maiores em Campo Grande-MS; Curneen e Gill (2014) entre 2,09 e 4,82 na

Irlanda; Frédette et al., (2019) entre 6,40 e 4,10 vezes maiores que a evapotranspiração referência no Canadá. Outras informações sobre os TEvap e a discussão de fatores de influência na evapotranspiração são encontradas na Tabela 4.

**Figura 4:** Esquema de Tanque de Evapotranspiração



Fonte: GALBIATI (2009)

**Tabela 4:** Especificações do Tanque de Evapotranspiração

<b>Tratamento</b>	<b>Critérios</b>	<b>Recomendações</b>	<b>Resumo</b>
Tanque de Evapotranspiração	Sentido leste-oeste	A evapotranspiração é potencializada pela incidência solar e em local sem sombra e ventilado. Por isso a o sentido em que o TEvap é construído irá influenciar na eficácia do processo	O TEvap é um sistema de tratamento e reaproveitamento dos nutrientes do efluente proveniente do vaso sanitário, criado e amplamente utilizado por permacultores. Trata-se de uma solução funcionalmente simples, pois não se faz uso de processos mecanizados, e as estruturas são de fácil construção e manutenção, além de apresentarem baixos custos de implantação.
	Fatores Climáticos	Temperaturas mais altas favorecem o processo de evapotranspiração.	
	Oasis	Escolher locais que não tenham outras plantas ao redor e que não façam sombra no sistema, visto que a eficiência está ligada a evapotranspiração.	
	Qualidade da água	Quanto maior a salinidade, tende a ter menor evapotranspiração, causando assim o efeito osmótico.	

Fonte: EMATER,2014; TONETTI et al., 2018; PINTO et al.,2015

### 3.5. Comparação entre as unidades descentralizadas de tratamento

Na Tabela 5, está apresentado um resumo das características das unidades discutidas e a comparação entre as mesmas.

**Tabela 5 :** Estudo comparativo entre alternativas de sistemas individuais de tratamento de esgoto

Critério	Sistema			
	CBA	FSB	TEvap	SAC
<b>Demanda de área (aspecto qualitativo)</b>	Baixa	Média	Média	Alta
<b>Demanda de área (quantitativo) (m<sup>2</sup> hab<sup>-1</sup>)</b>	0,6 a 1	2 a 2,4	1,4 a 3,2	0,6 a 5
<b>Custo de implantação (R\$ hab<sup>-1</sup>)</b>	100,00	320,00	400,00	500,00
<b>Regulamentação normativa</b>	Não	Não	Não	Não
<b>Consumo de energia elétrica</b>	Não	Não	Não	Não
<b>Complexidade Construtiva</b>	Baixa	Média	Baixa	Média
<b>Complexidade de operação</b>	Baixa	Alta	Baixa	Média
<b>Complexidade de manutenção</b>	Média	Baixa	Baixa	Média
<b>Custo de operação e manutenção (R\$hab<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>)</b>	NA	NA	NA	5-10
<b>Geração de odores</b>	Média	Média	Baixa	Baixa
<b>Proliferação de insetos e vetores</b>	Média	Baixa	Baixa	Baixa
<b>Aspecto do efluente</b>	NA	Regular	NA	NA
<b>Remoção de DBO (%)</b>	60-70	85-95	80-90	80-90
<b>Remoção de DQO (%)</b>	50-60	45-55	65-75	75-85
<b>Remoção de ST(%)</b>	NA	38,9	NA	NA

Critério	Sistema				
	CBA	FSB	TEvap	SAC	
Remoção de NT(%)	50	NA	NA	<60	
Remoção de NTK (%)	ND	19,1	32	ND	
Remoção de PT (%)	50	NA	NA	<35	
Remoção de CT(%)	99	98,1	NA	3-4 (LOG)	
Remoção de CF(%)	ND	97,3	NA	3-4 (LOG)	
Distância mínima do lençol freático (m)	ND	1	NA	NA	
Dependência de fatores climáticos	Alta	Média	Alta	Média	
Declividade da característica do solo	Baixa	NA	NA	NA	
Reúso da água /uso do efluente na produção de alimentos	Sim	Sim	Sim	Sim	
Indicação para residências de uso intermitente	Não	Não	Não	Não*	

Fonte: Dados obtidos von Sperling (2017) e Pinto et al., (2015). DB0 - Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO - Demanda Química de Oxigênio; ST - Sólidos Totais; SST - Sólidos Suspensos Totais; NT - Nitrogênio Total; NTK - Nitrogênio Total Kjeldah; PT - Fósforo Total; CT - Coliformes Totais; CF - Coliformes Termotolerantes; ND - Não Disponível; NA - Não Aplicável.

\* Dependendo das condições, os SACs-EV podem ser úteis para essa finalidade.

Com base no apresentado da Tabela 5, observa-se que são unidades que apresentam boas remoções de matéria orgânica, sendo que as FSB têm menores valores, em função das condições estritamente anaeróbias; enquanto que há maiores eficiências de remoção de nutrientes nas unidades plantadas e com presença de meio suporte (SAC, TEvap e CB). Se por um lado, o FSB seja compacto em relação à maioria dos reatores, essa unidade tem maiores custos e complexidade de operação, requerendo, por exemplo, a adição de esterco bovino.

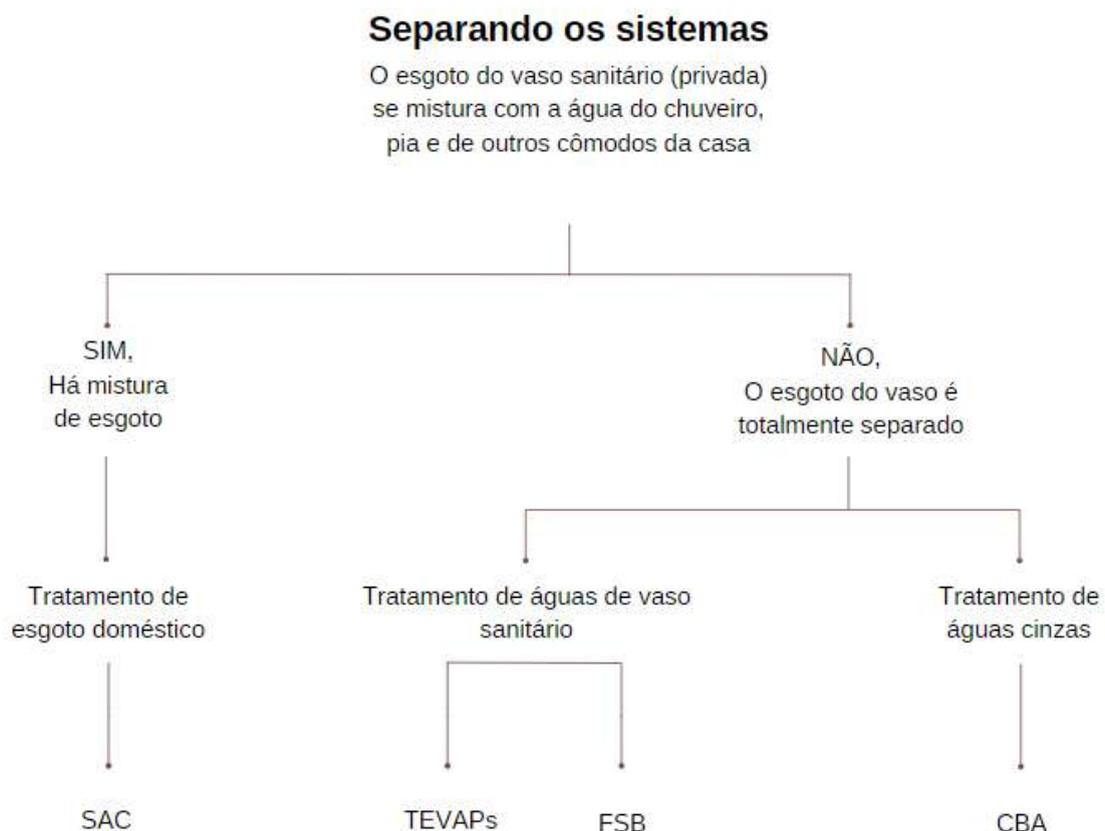
Outra análise que pode ser feita é em relação ao destino final da água residuária. Se a ideia for o lançamento no curso d'água, o FSB não alcança eficiência suficiente, sendo possível o emprego dos SACs. No TEvap e CBA, por outro lado, não há geração de efluente.

Por outro lado, se o interesse for a fertirrigação das culturas, qualquer uma dos reatores propiciaria o reúso de água, devendo somente observar o risco sanitário. Conforme apresentado na tabela, os SACs têm maior potencial de remoção de organismos patogênicos e, dessa forma, poderia ter menor potencial de contaminação de culturas consumidas cruas e que tenham contato direto da parte comestível com o esgoto tratado.

Em relação ao tipo de água residuária que poderia ser tratado em cada unidade, está apresentado um resumo na Figura 5. Os SACs, conforme discutido anteriormente, podem tratar uma grande infinidade de águas residuárias, dessa forma, poderiam receber tanto águas cinzas quanto provenientes de sanitários. Os TEvap e as FSBs podem tratar apenas águas resultantes de banheiros e os CBAs de águas cinzas.

Dessa forma, a escolha depende das condições do local, com disponibilidade de recursos, de área disponível, nível de tratamento exigido e o tipo de água residuária a ser tratada.

**Figura 5:** Resumo para seleção do tratamento



Fonte: Adaptado TONETTI et al., 2018

#### **4. CONCLUSÕES**

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que cada tipo de tratamento irá depender de vários fatores, como: área, tipo de água tratada, clima, custo, entre outros. Além disso, é possível observar que o custo benefício de utilização desses tratamento para ambientes com até 5 pessoas pode suprir a falta de uma Estação de Tratamento de Esgoto Convencional, obtendo um tratamento não convencional relativamente eficaz e econômico. Como outro ponto, um tratamento pode complementar o outro, como a junção de FSB + CBA ou TEvap + CBA, cada uma tratando um tipo de água residuária doméstica (cinza ou proveniente de sanitários), ou fazer a mistura entre esses efluentes e utilizar apenas dos SACs para tratar ambas águas residuárias. As últimas unidades podem ser mais eficientes, porém podem requerer maiores áreas. Enquanto os FSB são mais compactos, geram biofertilizantes, porém de operação mais complexa, menor potencial de depuração e tratam somente águas de vasos sanitários. Os CBA e os TEvap têm como vantagens a não geração de efluente para disposição final, porém somente tratam um tipo de efluente gerado de comunidades rurais. Ademais, é necessário ter mais estudos para aprofundamento do tema, visto que ainda não têm tantas publicações e uma consolidação dos parâmetros de dimensionamento acerca dos objetos de estudo.

## REFERÊNCIAS

ÁGUAS E EFLUENTES, **Curso Básico de Tratamento de Esgoto Sanitário**. 2021

ANDREOLI, C. V.; et al., **Lodo de Fossa Séptica: Caracterização, Tecnologias de Tratamento, Gerenciamento e Destino Final**. 1 ed. Rio de Janeiro; ABES, 2009. Disponível em: [http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab\\_5\\_tema\\_6.pdf](http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab_5_tema_6.pdf). Acesso em : 10 de fev. de 2022

ARAUJO, B.; JESUS, I.. **Análise e Desenvolvimento de Técnicas da Permacultura no Instituto Federal de São Paulo - Campus São Roque**. São Roque, 2016, Disponível em: <http://pergamum.ifsp.edu.br/pergamumweb/vinculos/000060/00006099.pdf>. Acesso em: 20 de mar. de 2022.

BASSANI, L.; DECEZARO, S.T.. **Hidrodinâmica e Mecanismos de Transferência e Consumo de Oxigênio em wetlands construídos verticais**. Wetlands Construídos como Ecotecnologia para o tratamento de águas Residuárias: Experiências Brasileira. cap.3, 1. ed. Editora: Brazil Publishing. Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/files/2021/02/E-book-WETLANDS-BRASIL-Experi%C3%AAs-Brasileiras-1.pdf>. Acesso em: 20 de mar. de 2022

BENJAMIN, A.M., **Bacia de evapotranspiração: Tratamento de efluentes domésticos e de produção de alimentos**. 2013. 50f. Dissertação -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013

BERNARDES, F. S. Avaliação do tratamento domiciliar de águas negras por um tanque de evapotranspiração (TEvap). **Especialize**, Campo Grande, v. 1, n. 7, jul., 2014. Disponível em : <https://www.ipog.edu.br/download-arquivo-site.sp?arquivo=avaliacao-do-tratamentodomiciliar-de-aguas-negras-por-um-tanque-de-evapotranspiracao-tevap-114161310.pdf>. Acesso em: 11 de mar. de 2022

BRASIL, M.S., MATOS, A.T. SOARES, A.A.. **Plantio e desempenho Fenológico da Taboa (Thypha SP.) Utilizada no tratamento de esgoto doméstico em Sistema Alagado Construído**. Eng. sanit. ambient. vol.12, n.3, jul-set,2007, p. 266-272. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/WGgpkQqKhgsTspNxqmcN4kF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 de mar. de 2022.

BRIX, H. **Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands**. Water Sci Technol,1994; 29 : 71–78.

BRIX, H. **Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?** Water Science Technology, v.35, n.5, pp.11-17, 1997.

CASELLES-OSORIO, A.; PUIGAGUT, J.; SEGÚ, E.; VAELO, N.; GRANÉS, F.; GARCÍA, D.; GARCÍA, J. **Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands**. v. 41. i. 6, p. 1388-1398, 2007.

CURNEEN, S. J.; GILL, L. W.. A comparison of the suitability of different willow varieties to treat on-site wastewater effluent in an Irish climate. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 153–161, 2014.

EMATER. **Tanque de Evapotranspiração**. . Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <http://cides.com.br/wp-content/uploads/2018/08/encontro/CARTILHA%20TANQUE%20DE%20EVAPOTRANSPIRA%C3%87%C3%83O.pdf>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.

EMBRAPA, **Memorial descritivo: Montagem e operação da fossa séptica biodigestora**. São Carlos, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1081476/memorial-descritivo-montagem-e-operacao-da-fossa-septica-biodigestora>. Acesso em: 15 de fev. de 2022.

FAISSAL, A. A. **Sistema Construtivo Alternativo para Wetland de fluxo horizontal empregado no tratamento de esgoto de Restaurante Universitário**. Londrina, 2016. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12031/4/LD\\_COEAM\\_2016\\_1\\_02.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12031/4/LD_COEAM_2016_1_02.pdf). Acesso em: 15 de mar. de 2022.

FIA, F.R.L.; MATOS, A.T.; FIA, R.; BORGES, A.C.; CECON, P.R. **Efeito da vegetação em Sistemas Alagados Construídos para tratar águas residuárias da suinocultura**. Eng Sanit Ambient., v.22 n.2, mar/abr 2017, p. 303-311. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/c4HGL8QHSP6z5DxSMf6bRvb/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 de mar. de 2022.

FIGUEIREDO, I.C.S.; SANTOS, B.S.C.; TONETTI, A.L.. **Tratamento de Esgoto na zona rural: Fossa Verde e Círculo de Bananeiras**. 1. ed. Biblioteca Unicamp. Campinas, 2018. Disponível em: <https://www.fecfau.unicamp.br/~saneamentorural/wp-content/uploads/2017/11/Fossa-Verde-e-C%C3%ADrculo-de-Bananeiras-UNICAMP.pdf>. Acesso em 08 de mar. de 2022.

FRÉDETTE, C.; GREBENSHCHYKOVA, Z.; COMEAU, Y.; BRISSON, J. **Evapotranspiration of a willow cultivar (*Salix miyabeana* SX67) grown in a full-scale treatment wetland**. **Ecological Engineering**, v. 127, p. 254–262, 2019.

FUNASA. **Cada real gasto em saneamento economiza novem em saúde**. Ministério da Saúde, 2017. Disponível em: [http://www.funasa.gov.br/todas-as-noticias/-/asset\\_publisher/lpnzx3bJYv7G/content/-cada-real-gasto-em-saneamento-economiza-nove-em-saude-disse-ministro-da-saude?inher](http://www.funasa.gov.br/todas-as-noticias/-/asset_publisher/lpnzx3bJYv7G/content/-cada-real-gasto-em-saneamento-economiza-nove-em-saude-disse-ministro-da-saude?inher). Acesso em: 07 de abril de 2022.

GALBIATI, A.F.. **Tratamento Domiciliar de Águas Negras através de Tanque de Evapotranspiração**. Campo Grande, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/jspui/bitstream/123456789/1163/1/Adriana%20Farina%20Galbiati.pdf>. Acesso em: 20 de jan. de 2022.

GALINDO, N.; SILVA, W. T. L. da; NOVAES, A. P. de; GODOY, L. A. de; SOARES, M. T. S.; GALVANI, F. **Perguntas e Respostas: Fossa Séptica Biodigestora** Edição revisada e ampliada. Documento 70, EMBRAPA, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/209338/1/Fossa-biodigestora-perguntas-e-respostas-...-doc-70.pdf>. Acesso em: 20 de mar. de 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2008**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=downloads>. Acesso em: 20 de mar. de 2022.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Manual do Saneamento Básico: Entendendo o saneamento básico ambiental no Brasil e sua importância sócioeconômica**. 2012. Disponível em: <https://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/estudos/pesquisa16/manual-imprensa.pdf>. Acesso em: 08 de mar. de 2022.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. **Treatment wetlands**. 2nd ed. Florida: CRC press, 2008. 1016 p.

LEMES, J.L.V.B; SCHIRMER, W.N.; CALDEIRA, M.V.W.; KAICK, T.V.; ABEL,O.; BÁRBARA, R.R. **Tratamento de Esgoto por Meio de Zona de Raízes em Comunidade Rural**. Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient., Curitiba, v. 6, n. 2, p. 169-179, abr./jun. 2008. Disponível em: <https://periodicos.pucpr.br/cienciaanimal/article/view/10460/9857>. Acesso em: 10 de fev de 2022.

LOPEZ, R.D.R.B., **Pré-projeto de um Wetland Construído de Escoamento Superficial como estrutura de drenagem urbana sustentável**. Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/195616/TCC%20Rafaela%20Lopez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 de dez. de 2021.

MAIA, F.M. **Análise técnico-financeira de tecnologias convencionais e alternativas para o tratamento de esgoto sanitário em cidades de pequeno a grande porte**. Lavras, 2018

MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; ALVES SOBRINHO, T.; STEFFEN, J. L.; ARIAS, C. A.; PAULO, P.L. Hydraulic and hydrological aspects of an evapotranspiration-constructed wetland combined system for household greywater treatment. **Journal of Environmental Science and Health, Part A . Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, v. 53, p. 493–500, 2018.

MARTINETTI, T. H.; SHIMBO, I.; TEIXEIRA, B.A .N. **Pesquisa-ação participativa para escolha de sistema de tratamento de efluentes sanitários**, residenciais mais sustentáveis. caso: assentamento rural sepé-tiaraju, serra azul, sp. **Ambiente Construído**, V.9, n. p 43-55 **2009**.

MARMO, C.R.; SILVA, W.T.L. da; **Fossa Septica Biodigestora: Experiência de Tecnologia na Amazônia Legal**. São Carlos, 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1006044/1/727siagro2014print01.pdf> Acesso em: 15 de jan. de 2022.

MATOS, M.P. de; VON SPERLING, M.; MATOS, A.T. de; DIAS, D.F.C.; SANTOS, C.R.S.; **Colmatação e Desempenho de Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Horizontal Subsuperficial ao longo de oito anos de operação.** Belo Horizonte, Eng Sanit Ambient., v.23,n.6,nov/dez 2018; Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/bZM4rThxN9W9wWp3kdQWmhN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 18 de dez. de 2021.

MATOS, A. T. de et al., **Capacidade extratora de plantas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias de laticínios.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1311-1317, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/wQ6S9kc7zRJLQsDk9dD8Qgf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 de jan. de 2022.

MICHAEL JR, J.H. **Nutrients in salmon hatchery wastewater and its removal through the use of a wetland constructed to treat off-line settling pond effluent.** Aquaculture, v.226, pp. 213-225, 2003.

MIRANDA, S. T. et al., **Influence of the substrate type and position of plant species on clogging and the hydrodynamics of constructed wetland systems.** Journal of Water Process Engineering, [s. l.], v. 31, p. 100871, 2019.

NOVAES, A. P. de et al., **Utilização de uma Fossa Séptica Biodigestora para Melhoria do Saneamento Rural e Desenvolvimento da Agricultura Orgânica.**São Carlos: Embrapa, 2002. Disponível em: [https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPDIA/8905/1/CT46\\_2002.pdf](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPDIA/8905/1/CT46_2002.pdf). Acesso em: 18 de dez. de 2021

OLIVEIRA, T.J.J; FERNANDES, K.N.; SANTIAGO, A.F.. **Conceitos e Tecnologias para o manejo de Efluentes Domésticos em pequenas Comunidades Rurais.** Congresso ABES, FENASAN. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2018/11/II-439.pdf>. Acesso em: 16 de jan. de 2022.

OLIVEIRA,G.M.; LEAL, J.T.C.P.. **Soluções Sustentáveis para residências rurais:: Fossa de Evapotranspiração e Círculos de Bananeiras. Tópicos em Sustentabilidade & Conservação,** 1. ed., cap.5. p. 70-76. Juiz de Fora, 2017. Disponível em: [https://fazendatriqueda.com.br/wp-content/uploads/2018/08/BARBOSA-et-al-2017\\_T%C3%B3picos-em-Sustentabilidade-Conserva%C3%A7%C3%A3o\\_Book.pdf#page=70](https://fazendatriqueda.com.br/wp-content/uploads/2018/08/BARBOSA-et-al-2017_T%C3%B3picos-em-Sustentabilidade-Conserva%C3%A7%C3%A3o_Book.pdf#page=70). Acesso em: 16 de jan. de 2022.

PAIVA, R.F.P.S.P.; SOUZA, M.F.P.. **Associação entre condições socioeconômicas, sanitárias e de atenção básica e morbidade hospitalar por doenças de veiculação hídrica no Brasil.** Cadernos de Saúde Pública, Volta Redonda 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csp/a/c3DgtD4MPBmxLdpmW8NxBhk/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 07 de abril de 2022.

PAMPLONA S & VENTURI M. (2004) **Esgoto à flor da terra. Permacultura Brasil. Soluções ecológicas.** V16. 41. PAOLI, A.C. A

PANRARE, A.; TONDEE, T.; SOHSALAM, P. “**Effect of plant density in constructed wetland on domestic wastewater treating efficiency**” International Journal of Applied and Physical Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 7-12, 2016.

PAOLI, A.C.D.; VON SPERLING, M. (2013) **Avaliação das condições hidrodinâmicas de wetlands de escoamento horizontal subsuperficial (unidades plantada e não plantada)**. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, v. 1, n. 2, p. 213-222.

PAULO, P.L., GALBIATI, A.F., MAGALHÃES FILHO, F.J.C., BERNARDES, F.S., 7 CARVALHO, G.A., BONCZ, M.A. **Evapotranspiration tank for the treatment, disposal and resource recovery of blackwater**. Resources, Conservation & Recycling, v. 147, 9 p. 61–66, 2019.

PERJESSY, J.R.. **Modelos Sustentáveis para o tratamento de Efluentes sob Abordagem da Gestão Ambiental**. Sorocaba, 2017. Disponível em: <https://www.ppgsga.ufscar.br/alunos/banco-de-dissertacoes/JaquelinePerjessy.pdf>. Acesso em: 16 de jan. de 2022.

PERMINIO,G.B.. **Viabilidade do uso de Biodigestor como Tratamento de Efluentes Domésticos descentralizados**. Lavras, 2013. Disponível em:<http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/4546/1/Guilherme%20Perminio.pdf>. Acesso em: 16 de jan. de 2022.

PLATZER, C.; MAUCH, K. Soil Clogging in Vertical-flow Reed Beds - Mechanisms, Parameters, Consequences and ... Solutions? **Water Science and Technology**, London, v. 35, n. 5, p. 175- 181, 1997

IBGE. **Pesquisa Nacional por amostra de Domicílios: Síntese de Indicadores 2015**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.abes-dn.org.br/pdf/Situacao.pdf>. Acesso em: 30 de abr. de 2022

PRATA, R.C.C.; MATOS, A.T. de; CECON, P.R.; LO MONACO, P.A.V.; PIMENTA, L.A.. **Tratamento de Esgoto Sanitário em Sistemas Alagados Construídos cultivados com Lírio-Amarelo**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.33, n.6, nov./dez. 2013,p.1144-1155. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/KrvrYyy7589kmdP9f8hg7QF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 07 de abril de 2022.

PINTO, A.G.; PAIVA, S.M.B.; REZENDE, A.A.P.; PAIVA, F.R.; MATA, R.A.. **II-371 -Saneamento Rural: Análise de Sistemas Individuais de Tratamento de Esgoto Sanitário como ferramenta de auxílio para tomada de decisão do Plano de Saneamento Municipal**. In: 28. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento29/TrabalhosCompleto PDF/II-371.pdf>. Acesso em: 16 de jan. de 2022.

REIS, M.C.G. **Tanques de Evapotranspiração para destinação de esgoto doméstico: Avaliação da perda de água e do balanço de poluentes.** Viçosa, 2022

REZENDE, D.C.V.; SILVA, E.L.; PINTO, A.F.J.; REZENDE, S.D.C.; BARROS, M.M.; XIMENES, S.L.S.A.; OLIVEIRA, T.G., BOSCATI, L., COSTA, R.R.. **Vantagens e desvantagens dos métodos Wetland e tanque de evapotranspiração:** Revisão não sistemática. Curitiba: Brazilian Journal of Development, v.7, n.6, p. 57248-57265 jun. 2021. Disponível em: <https://saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2021/07/31125-79598-1-PB.pdf>. Acesso em: 02 de abril de 2022.

ROCHA, A. **Água: as responsabilidades do estado com o diamante azul do Século XXI.** SynThesis Revista Digital FAPAM, Pará de Minas, v.5, n.5, 1-10, abr. 2014. Disponível em: <https://periodicos.fapam.edu.br/index.php/synthesis/article/view/77/72>. Acesso em: 15 de fev. de 2022

ROSENDO, T.F.; **Avaliação do Sistema Alagado Construído (SAC) no tratamento de efluentes oriundos de Agroindústrias de Laticínios.** Pombal, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/21699/1/THADEU%20FORMIGA%20ROSENDO%20-%20TCC%20-%20BACHARELADO%20EM%20ENGENHARIA%20AMBIENTAL%202021.pdf>. Acesso em: 15 de fev. 2022.

SARAIVA, C. B. et al., **Influence of substrate and species arrangement of cultivated grasses on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 38, n. 3, p. 417-425, 2018.

SARGES, R. C.; OLIVEIRA, B. R. de; COSTA, J. B. P.; LIRA-GUEDES, A. C.; GUEDES, M. C.. **Fossa Séptica biodigestora como alternativa para tratamento de esgoto em área de várzea.** EMBRAPA, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/153214/1/CPAF-AP-2016-Fossa-septica-biodigestora.pdf>. Acesso em : 15 de fev. de 2022

SENAR. **Saúde: Saneamento Rural.** Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/informe-ao-cacaucultor/manejo/cartilha-s-senar/226-saude-saneamento-rural.pdf>. Acesso em: 02 de mar. de 2022

SERINO, P.H.; BENTO, A.P.; DECEZARO, S.T.; MAGRI, M.E.; PHILIPPI, L.S.. **Experiências brasileiras com Wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias:** parâmetros de projeto para sistemas horizontais. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/8zwy5WwwLZVxRk5btDHDmK/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 de fev. de 2022.

SEZERINO, P.H.; PELISSARI, C. **Wetlands Construídos como ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias:** Experiências Brasileiras. 1.ed, Editora: Brazil Publishing, 2021. Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/files/2021/02/E-book-WETLANDS-BRASIL-Experi%C3%Aancias-Brasileiras-1.pdf>. Acesso em: 20 de mar. de 2022.

SILVA, D.D.; MIGLIORINI, R.B.; CASTRO E SILVA, E.; LIMA, Z.M. MOURA, I.B.. **Falta de saneamento e as águas subterrâneas em aquífero freático**: região do bairro Pedra Noventa, Cuiabá (MT). Eng Sanit Ambient, v.19, n.1, p.43-52, jan/mar 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/b5t5hKm7Qt5sXbnkVKrmvGw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 02 de abril de 2022.

SILVA, B.A.. **Determinação de condicionantes para uso do Tanque de Evapotranspiração como elemento de saneamento rural em Minas Gerais**. Niterói, 2016. Disponível em: [https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/4444/11143007\\_SILVA-BAda\\_TCC\\_29-08-2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/4444/11143007_SILVA-BAda_TCC_29-08-2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 20 de mar. de 2022.

SILVEIRA, A.L.R.C.; LIMA, F.K.G.M.; PEREIRA, K.V.V. **A sustentabilidade ambiental aplica em ecovilas no município de Teresina**. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo (NUTAU), Universidade Estadual de São Paulo (USP) 2002.

SNIS. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto**. Brasília, 2021. Disponível em: [http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_VIS\\_AO\\_GERAL\\_AE\\_SNIS\\_2021.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VIS_AO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf). Acesso em: 02 de mar. de 2022.

SOUZA, A.R., **Avaliação da Remoção de Nitrogênio e da Comunidade Microbiana em Sistemas Biológicos para o Pós-Tratamento de efluente de Canil**. Lavras, 2019. Disponível em: [http://177.105.2.222/bitstream/1/37336/1/TESE\\_Avalia%C3%A7%C3%A3o%20da%20remo%C3%A7%C3%A3o%20de%20nitrog%C3%AAnio%20e%20da%20comunidade%20microbiana%20em%20sistemas%20biol%C3%B3gicos%20para%20o%20p%C3%B3s-tratamento%20de%20efluente.pdf](http://177.105.2.222/bitstream/1/37336/1/TESE_Avalia%C3%A7%C3%A3o%20da%20remo%C3%A7%C3%A3o%20de%20nitrog%C3%AAnio%20e%20da%20comunidade%20microbiana%20em%20sistemas%20biol%C3%B3gicos%20para%20o%20p%C3%B3s-tratamento%20de%20efluente.pdf). Acesso em: 08 de mar. de 2022.

STOTTMEISTER, U. et al., Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 22, p. 93-117, 2003.

TANNER, C.C. **Plants as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands**. Water Science Technology, v.44, n.11-12, pp.9-17, 2001

TECNOLOGIA SOCIAL . **Fossa Ecológica - TEVAP**. Tecnologia Social, 2019. Disponível em: <https://www.fbb.org.br/images/Editais/COPASA/2019/Fossa%20S%C3%A9ptica%20TEVAP.pdf>. Acesso em: 20 de mar. de 2022.

TONETTI, A.L.; BRASIL, A.L. MADRID, F.J.P.L.; FIGUEIREDO, I.C.S.; SCHNEIDER, J.; CRUZ, L.M. de .O.; DUARTE, N.C.; FERNANDES, P.M.; COASACA, R.L.; GARCIA, R.S.; MAGALHÃES, T.M. **Tratamento de Esgoto Domésticos em Comunidades Isoladas**: Referencial para a escolha de soluções. 1. ed., Campinas: Biblioteca UNICAMP, 2018.

TORRES, V.S.. **Utilização de uma fossa séptica biodigestora para melhoria do saneamento rural**. EXTÓPEC, Campus Macau, 2019. Disponível em: [http://astecmpa.com.br/wp-content/uploads/2019/10/Fossa-S%C3%A9ptica\\_arq.pdf](http://astecmpa.com.br/wp-content/uploads/2019/10/Fossa-S%C3%A9ptica_arq.pdf). Acesso em: 02 de abril de 2022.

TUNÇSIPER, B.; AYAZ, S.Ç.; AKÇA, L. **Performances analysis and modeling of an experimental constructed wetlands**. **Proceedings**: 6th INTERNATIONAL CONFERENCE

ON WASTE STABILISATION PONDS and 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON WETLAND SYSTEMS FOR WATER POLLUTION CONTROL. Avignon, France, IWA/Astee, OC-40, CD-ROM. 26th of Sept. - 1st of October 2004.

VON SPERLING, M. **Avaliação e análise comparativa de três diferentes sistemas de “Wetlands”-Fluxo Superficial, Vertical e Subsuperficial-utilizados para o tratamento de curso d’água poluído por fontes difusas e pontuais, para o tratamento de esgotos brutos e para o pós-tratamento de efluentes de reatores.** UASB. In: BRASIL - Fundação Nacional da Saúde. 7º Caderno de pesquisa em engenharia de saúde pública. 1.ed. Brasília: Funasa. 2013.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed., Editora UFMG. 2014..

VON SPERLING, M. **Lagoa de Estabilização.** Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 3.ed. Editora: UFMG. 2017.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P.H.. **Dimensionamento de Wetlands Construídos no Brasil.** Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes. Wetlands Brasil. Ed. Especial. 2018. Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/files/2018/12/Boletim-Wetlands-Brasil-Edi%C3%A7%C3%A3o-Especial-Dimensionamento-de-Wetlands-Constru%C3%ADdos-no-Brasil-von-Sperling-Sezerino-2018-2.pdf>. Acesso em: 25 de mar. de 2022

WAGNER, A.G.; BELLOTTO, V.R.. **Incorporação da coleta, tratamento e disposição do esgoto sanitário na agenda de prioridades dos municípios brasileiros.** Brasília, 2000

WU, H. et al., A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 175, p. 594-601, 2015.

YIN, H.; YAN, X.; GU, X. **Evaluation of thermally-modified calcium-rich attapulgite as a low-cost substrate for rapid phosphorus removal in constructed wetlands.** Water Research, [s. l.], v. 115, p. 329-338, 2017.

ZUMALACARREGUI, J. **Influência das condições hidrodinâmicas nos processos de conversão aeróbia em wetlands construídos de escoamento vertical no tratamento de esgoto doméstico bruto.** 2018. Tese (Doutorado Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018