DIMENSIONAMENTO DE TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM BASE EM SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Serena Sühnel Lagreze[(1)]
Engenheira Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e mestranda do programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI) da UFPR.
Fernando Augusto Silveira Armani[(2)]
Engenheiro Ambiental, mestre e doutor pela UFPR. Professor de magistério superior da UFPR.

Endereço[(1)]**:** Rua Rio Grande do Norte, 168 - Mirassol - Pontal do Paraná - Paraná - CEP: 83.255-000 - Brasil - Tel: +55 (48) 92000-8195 - e-mail: serenalagreze@gmail.com.

RESUMO

A falta de tratamento de esgoto em comunidades isoladas do Complexo Estuarino de Paranaguá gera graves impactos socioambientais, exigindo soluções sustentáveis alinhadas ao ODS 6. O Tanque de Evapotranspiração (TEvap) surge como alternativa técnica, combinando tratamento de efluentes com produção agrícola. Foi calculada a evapotranspiração de referência (ETo) pelo método de Turc (1961) e o balanço hídrico para dimensionar TEvap adaptados às condições climáticas locais. Assumindo 100% de eficiência, obteve-se uma área de 138,3 m², que ultrapassa o limite normativo de 20 m² por tanque, tornando necessária a subdivisão do sistema em sete tanques. A área geralmente recomendada, de 2 m² por usuário, corresponde a uma eficiência de aproximadamente 24%. Os resultados, obtidos por modelagem simplificada, destacam a importância de análises complementares que incluem precipitação e diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração para um dimensionamento mais preciso do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Evapotranspiração, Saneamento, Esgoto.

INTRODUÇÃO

A falta de tratamento de esgoto sanitário representa um sério risco para a saúde pública, favorecendo a proliferação de enfermidades, a poluição de recursos hídricos e impactos ambientais, especialmente em comunidades insulares. Diante desse cenário, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), propõe como meta assegurar, até 2030, serviços de saneamento básico e higiene acessíveis a todos, com atenção especial à erradicação da defecação ao ar livre e às demandas de mulheres, crianças e grupos em situação de vulnerabilidade (PNUD, 2015).

Para alcançar essa meta, é essencial desenvolver projetos sustentáveis e adaptáveis às diferentes realidades locais. No contexto brasileiro, as políticas públicas de saneamento básico tradicionalmente concentraram investimentos e esforços nas grandes cidades, deixando em segundo plano as necessidades das comunidades rurais e dos pequenos municípios (Costa et al., 2021).

Estudos da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2018) destacam que o acesso ao saneamento básico é fundamental para prevenir doenças e promover qualidade de vida, garantindo dignidade às populações. No entanto, a realidade brasileira ainda apresenta grandes desafios: dados do Atlas Esgotos (2017) revelam que, em 2017, menos de um terço do esgoto gerado no país recebia tratamento adequado (31,87%), enquanto 41,14% sequer era coletado, permanecendo como fonte de contaminação ambiental e risco à saúde pública.

As comunidades situadas no complexo estuarino de Paranaguá são comunidades que não têm acesso ao esgotamento sanitário da rede pública nem a caminhões que esgotam o lodo das fossas sépticas. O esgoto não tratado gera riscos de contaminação do solo e do mar, causando impactos sociais, como o impacto na pesca, maricultura e turismo, e impactos ambientais como a contaminação e eutrofização dos ambientes. Comunidades que não têm acesso ao esgotamento sanitário da rede pública nem a caminhões.

A NBR 17.076 (ABNT, 2024) regulamenta os sistemas descentralizados de tratamento de esgoto como solução para áreas sem acesso às redes coletoras, incluindo comunidades isoladas e locais onde a interligação se mostra inviável técnica ou financeiramente.

Neste contexto, o Tanque de Evapotranspiração (TEvap) emerge como uma tecnologia apropriada, alinhando princípios ecológicos com necessidades sanitárias. Trata-se de uma solução baseada na natureza (SbN), um sistema descentralizado que utiliza processos naturais para o tratamento de efluentes provenientes de bacias sanitárias, baseando-se no processo da evapotranspiração.

A evapotranspiração é um dos processos que ocorrem no ciclo da água. Esta pode ser definida como a "soma da quantidade de água perdida por uma superfície coberta com vegetação, por meio da evaporação direta da superfície do solo e da água perdida pelas plantas por transpiração". (Coelho et al., 2011).

Reconhecido como tecnologia sustentável (Rezende, 2019) e incluído na NBR 17.076 (ABNT, 2024) para sistemas de pequeno porte, o TEvap é especialmente indicado para: Áreas rurais sem acesso a redes de esgoto, locais com disponibilidade de espaço e altas taxas de evapotranspiração, comunidades que buscam soluções de saneamento ecológicas e de baixo custo.

Além de tratar efluentes, o sistema promove a inclusão socioprodutiva (EMATER-DF, 2019) ao integrar agricultura e saneamento, demonstrando como soluções baseadas na natureza podem aliar proteção ambiental, segurança hídrica e desenvolvimento comunitário. Assim, o TEvap elimina contaminação do solo e lençóis freáticos , dispensa energia elétrica ou produtos químicos, pode ser integrado a cultivos úteis (ex.: bananeiras) e atende normas técnicas brasileiras de saneamento.

No entanto, segundo Vanhoni e Mendonça (2021), "o litoral do Paraná enquadra-se dentro do tipo climático CFa (Clima temperado chuvoso e moderadamente quente), úmido em todas as estações e com verão quente, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger". Assim, é de suma importância o dimensionamento do TEvap segundo o balanço hídrico do tanque e da análise da evapotranspiração de referência (ETo) baseado em dados meteorológicos regionais.

Segundo Allen et al. (1998), a evapotranspiração de referência é determinada exclusivamente por fatores climáticos, incluindo a temperatura atmosférica, a umidade do ar, a incidência de radiação solar, a intensidade dos ventos e a pressão barométrica.

Como os fatores climáticos variam muito de uma região para outra, existem vários métodos para estimar a evapotranspiração. Porém, a maioria só funciona bem em condições específicas, como certas faixas de temperatura, pressão e umidade, e não consegue se adaptar a diferentes tipos de clima (Armani; Freitas; Moreira, 2018). O Método de Turc (1961), pode ser utilizado e é recomendado para regiões costeiras e úmidas.

OBJETIVO(S)

Este trabalho tem como objetivo calcular o dimensionamento de Tanques de Evapotranspiração no litoral do Paraná, a partir do balanço hídrico e valores de evapotranspiração utilizando o Método Turc, a fim de propor sistemas de tratamento de esgoto adaptados ao clima da região do Complexo Estuarino de Paranaguá.

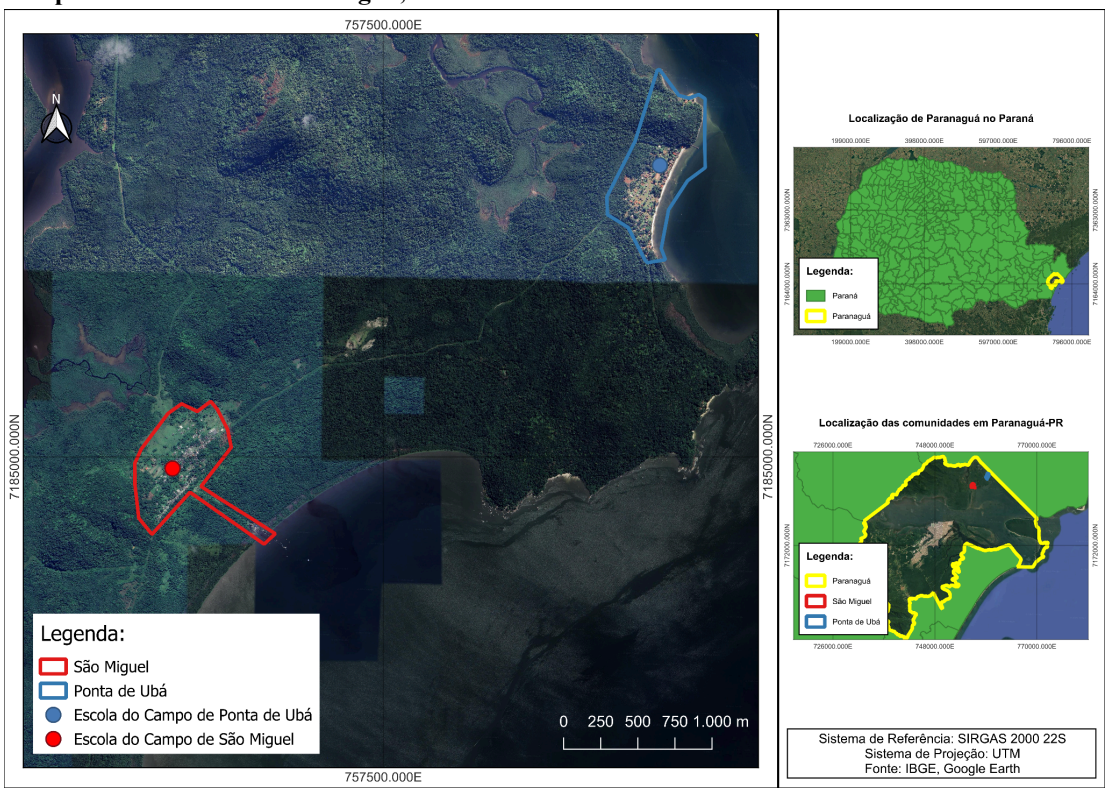
METODOLOGIA UTILIZADA

A NBR 17.076 (ABNT, 2024) dispõe as sugestões para o dimensionamento do TEvap: deve considerar a taxa de evapotranspiração da vegetação escolhida e os dados de pluviosidade do local. Sem estes dados, deve ser feito o dimensionamento segundo a quantidade de usuários e a contribuição da bacia sanitária.

O dimensionamento do TEvap foi realizado com base no balanço hídrico do sistema, e a evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada utilizando o Método de Turc. Como estudo de caso, foram selecionadas duas escolas rurais em comunidades vizinhas (ambas com 30 usuários), adotando-se uma vazão de 50 L/pessoa/dia. Assim, a contribuição total de esgoto em cada escola foi de 1,5 m^3/dia.

A Figura 1 exibe a localização das escolas em que os TEvap foram projetados neste trabalho, situadas nas comunidades de Ponta de Ubá e São Miguel, ambas do município de Paranaguá.

Figura 1 - Mapa de localização das escolas de campo das comunidades de Ponta do Ubá e São Miguel no Complexo Estuarino de Paranaguá, Paraná.



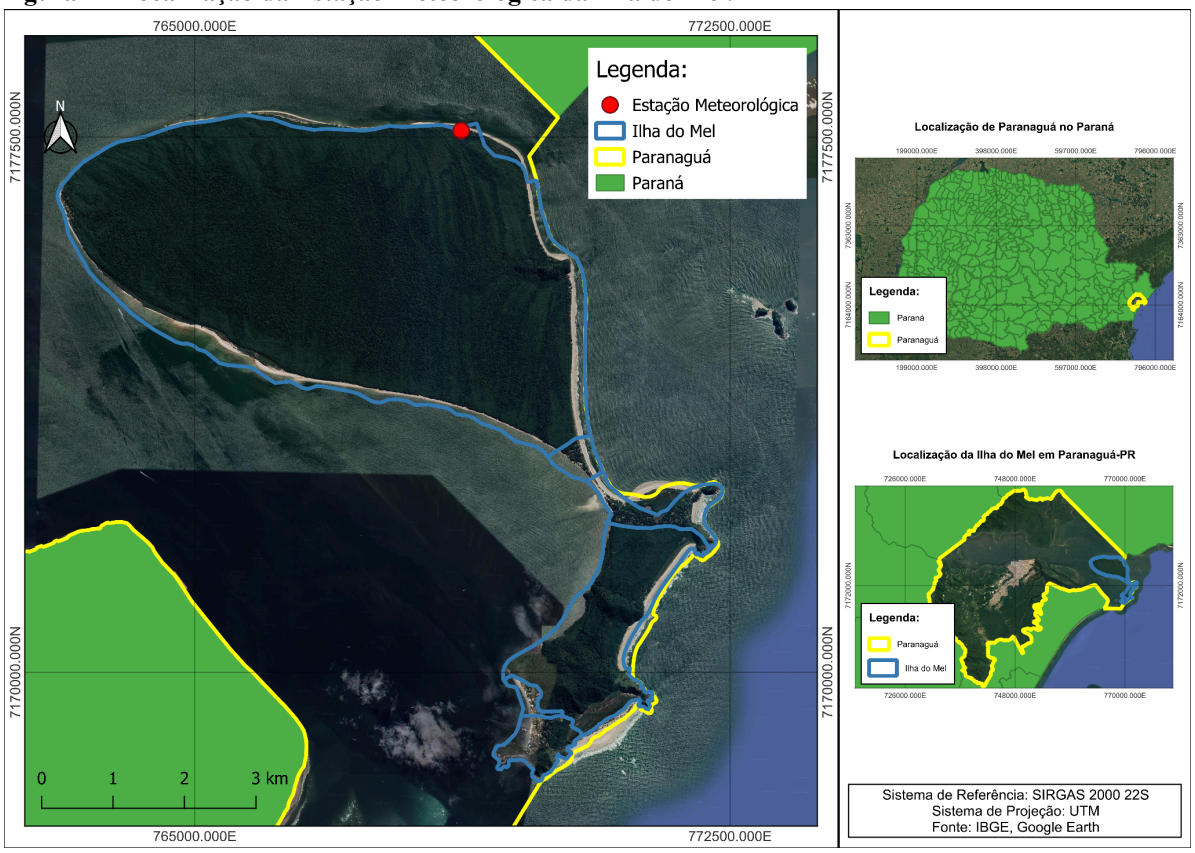
Fonte: Os Autores, 2025.

Os parâmetros climáticos necessários para a aplicação do Método de Turc neste estudo foram obtidos junto à estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalada na Ilha do Mel, Paraná. A série histórica utilizada para esta análise foi do período de 12 a 28 de setembro de 2017. A coleta de dados foi realizada uma vez por hora, durante 23 horas consecutivas, em cada um dos 17 dias, sem interrupções. Foram coletadas as variáveis essenciais para o cálculo da evapotranspiração de referência (ETo): temperatura do ar (°C), umidade relativa (%), radiação solar global (MJ/m²/dia) e precipitação (mm).

A estação do INMET na Ilha do Mel foi escolhida por reunir características ideais para o estudo: sua localização representa adequadamente as condições costeiras do litoral paranaense, com influência marinha e continental típicas da região. Além disso, embora apresente algumas lacunas pontuais, comuns em séries históricas de longo prazo, esta foi a estação que ofereceu a série temporal mais completa e confiável para a zona costeira do estado durante o período analisado.

A Ilha do Mel está localizada na entrada da Baía de Paranaguá, e a estação meteorológica localizada nas coordenadas geográficas aproximadas 25°49'S e 48°33'W. A Figura 2 mostra a localização da estação meteorológica da Ilha do Mel/PR.

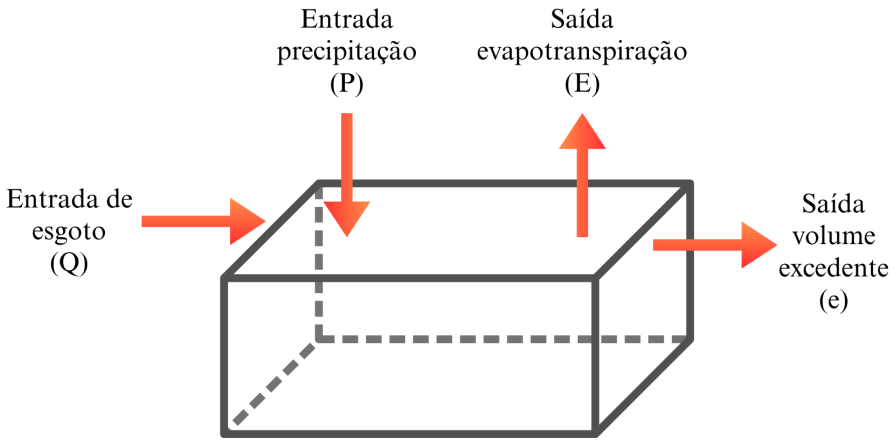
Figura 2 - Localização da Estação Meteorológica da Ilha do Mel.



Fonte: Os Autores, 2025.

O modelo do balanço hídrico do tanque de evapotranspiração foi elaborado considerando os fluxos de entrada e saída de água. As entradas correspondem ao esgoto doméstico (Q) e à contribuição pluviométrica (P), enquanto as saídas compreendem o volume evapotranspirado (E) e o eventual volume excedente (e) escoado pelo tubo extravasor. O esquema da Figura 3 demonstra o balanço hídrico no TEvap.

Figura 3 - Balanço hídrico no TEvap.



Fonte: Os Autores, 2025.

Com base no esquema acima, deduz-se que o balanço hídrico no TEvap tem a seguinte forma, como demonstra a equação 1:

$$Q + P = E - e \qquad \text{equação (1)}$$

Ao supor sucesso, ou seja, que o sistema estará funcionando perfeitamente, não ocorrerá eventual volume excedente (e), assim, "e" se iguala a zero e obtemos a equação 2:

Q + P = E equação (2)

Logo, para podermos obter a variação do volume útil do TEvap, obtemos a equação 3:

ΔV = Q + P - E equação (3)

Considerando que a variação do volume é a área pela variação do nível da água no tanque (ΔH), obtemos a equação 4, onde:

A = (Q + P - E)/ΔH equação (4)

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) foi utilizado o método de Turc (1961). Esta equação teve como base o leste europeu, onde a umidade relativa do ar é maior que 50%, onde pode ser aplicada para a região deste estudo, onde temos um clima temperado chuvoso e moderadamente quente. Assim, para calcular a evapotranspiração de referência, o método está descrito abaixo na equação 5.

$$ETo = a_t \times 0,0113 \times \left(\frac{T_{med}}{T_{med}+15}\right) \times \left(\frac{\frac{Rs}{0,0238846}+50}{\lambda}\right)$$ equação (5)

Onde temos que:
a_t = Fator de umidade relativa;
Rs = Radiação solar global (MJ/m²d);
λ = Calor latente de vaporização (MJ/mm);
T_{med} = Temperatura média diária do ar (°C).

Se a umidade relativa é maior ou igual a 50%, a_t = 1. Caso contrário, deve ser calculado da seguinte maneira:

$$a_t = 1 + \left(\frac{50-UR}{70}\right)$$ equação (6)

As dimensões do Tanque de Evapotranspiração (TEvap) devem atender às especificações estabelecidas pela NBR 17.076, que preconiza os seguintes parâmetros dimensionais (ABNT, 2024):

- Profundidade útil: entre 1,0 e 1,5 metros
- Largura: entre 1,0 e 2,0 metros
- Comprimento máximo: 10,0 metros

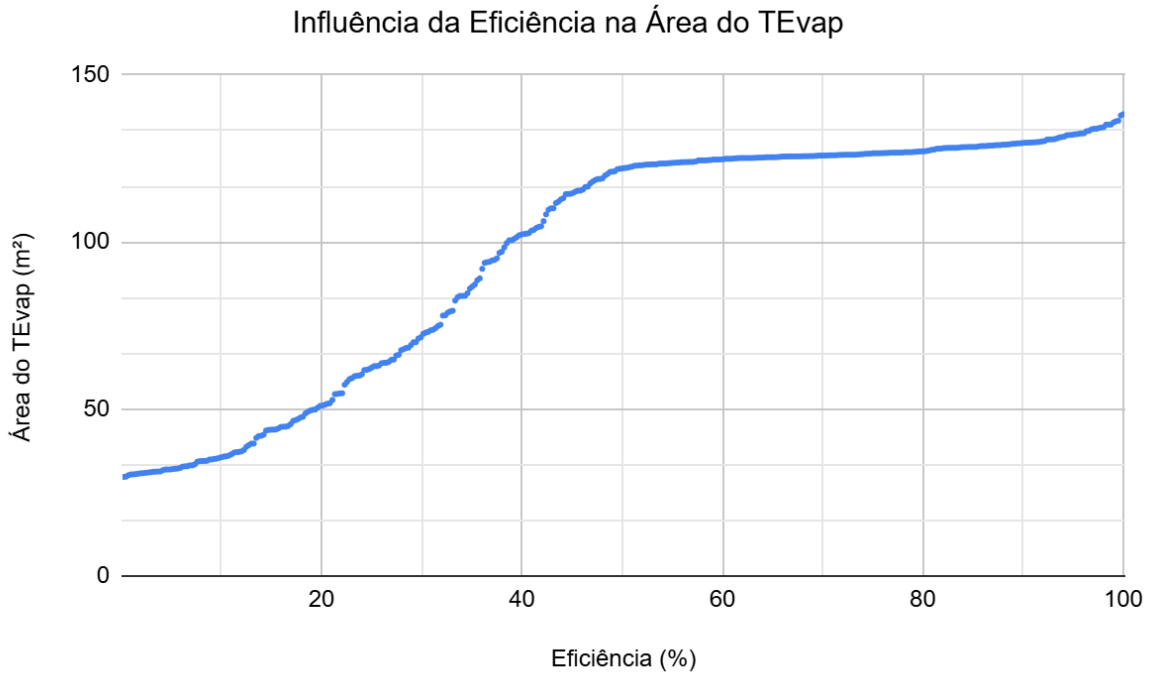
A norma recomenda que a área superficial mínima seja de 2,0 m² por usuário contribuinte, garantindo assim a eficiência do sistema de tratamento. Caso o tanque ultrapasse as dimensões máximas, podem ser dimensionados mais tanques para contemplar todos os usuários nas dimensões adequadas. Como a norma especifica as dimensões máximas (largura máxima de 2,0 m e comprimento máximo de 10,0 m), a área do tanque deve ser menor ou igual a 20 m².

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos por meio de planilhas de cálculo, nas quais os dados coletados foram inseridos e analisados com base nas equações apresentadas na metodologia. Os cálculos consideraram uma contribuição diária de 1,5 m³ de efluente e uma altura útil para o TEvap de 1,5 m. Durante o período analisado, não foram registradas precipitações, a umidade instantânea do ar variou entre 59% (mínima) e 97% (máxima), e a radiação solar global máxima foi de 3,532 MJ/m²d.

Com base na análise dos dados coletados no período de 12/09/2017 a 28/09/2017, foram obtidas as áreas em cada hora de coleta de dados da estação, onde foi determinada uma área de 138,3 m² para o tanque de evapotranspiração, assumindo-se 100% de eficiência do sistema. O resultado obtido foi ordenado conforme a área do TEvap (m²) e a eficiência (variando de 0 a 100%), como pode ser visto no gráfico da Figura 4.

Figura 4 - Gráfico de influência da eficiência na área do Tanque de Evapotranspiração.



Fonte: Os Autores, 2025.

Considerando um mínimo de 2 m² por usuário, o tanque de evapotranspiração (TEvap) deve possuir, no mínimo, uma área de 60 m². De acordo com os resultados obtidos, essa área corresponde a uma eficiência de aproximadamente 24% no funcionamento do sistema. Com base no método aplicado neste estudo, estima-se que, para alcançar uma eficiência de 100% no litoral do Paraná, a área mínima necessária seria de 4,6 m² por usuário.

Entretanto, essa área total para eficiência máxima ultrapassa o limite estabelecido pela norma vigente, que permite no máximo 20 m² por tanque. Dessa forma, torna-se necessário subdividir o sistema em múltiplas unidades.

Neste caso, para cada escola de campo, seriam recomendados 7 tanques, com aproximadamente 19,8 m² cada, para atender ao volume de efluente considerado e manter a eficiência desejada.

Os resultados apresentados foram obtidos a partir de uma modelagem simplificada. Assim, é fundamental realizar modelagens comparativas, aplicando outros métodos para o cálculo da evapotranspiração de referência e incluindo períodos com ocorrência de precipitação. Essas análises adicionais permitirão uma melhor compreensão do balanço hídrico do sistema sob diferentes condições climáticas.

Além disso, devem ser avaliadas estratégias para minimizar a percolação na superfície do TEvap, de modo a evitar a entrada excessiva de água no sistema. Isso contribuirá para a manutenção de altas eficiências operacionais. Por fim, é importante considerar que, dado o alto valor de área necessário para atingir 100% de eficiência, o TEvap deve incluir uma forma de disposição final segura, uma vez que esse nível de eficiência pode ser inviável em determinadas situações práticas.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Comunidades com acesso limitado (terrestre/marítimo) enfrentam graves deficiências em saneamento, comprometendo a saúde local. A combinação de tanque séptico com tanque de evapotranspiração (TEvap) resolve esta demanda, enquanto serve como recurso educativo (ensino de ciclos naturais e saneamento) e produtivo (cultivo de frutíferas), integrando soluções técnicas com desenvolvimento comunitário.

Os resultados obtidos demonstram que, mesmo sob condições climáticas favoráveis, sem ocorrência de chuvas, com umidade relativa do ar variando entre 59% e 97%, e radiação solar global significativa, a área necessária para o funcionamento eficiente do sistema de evapotranspiração (TEvap) pode ultrapassar os limites normativos, quando se considera uma eficiência de 100%. A área calculada de 138,3 m² evidencia a grande exigência de espaço físico para o tratamento adequado de 1,5 m³ de efluente por dia, o que reforça a necessidade de subdivisão do sistema em unidades menores para atender aos critérios legais.

Além disso, os dados indicam que, ao considerar a área mínima de 2 m² por usuário, obtém-se uma eficiência operacional limitada a cerca de 24%. Esse valor destaca a importância de se repensar os critérios de dimensionamento, especialmente em regiões como o litoral do Paraná, onde fatores ambientais podem favorecer a evapotranspiração, mas ainda assim não garantem a viabilidade física de tanques únicos dimensionados para máxima eficiência.

Diante disso, é imprescindível o desenvolvimento de modelagens complementares que considerem diferentes metodologias de cálculo da evapotranspiração de referência, bem como simulações com inclusão de períodos chuvosos, a fim de compreender melhor o comportamento hídrico do sistema ao longo do tempo. Também se torna fundamental avaliar alternativas construtivas e operacionais que visem reduzir a percolação e promover o controle da entrada de água, assegurando uma operação mais eficiente e sustentável do sistema.

Portanto, embora os resultados desta pesquisa ofereçam uma base sólida para o dimensionamento inicial do TEvap, eles também evidenciam a necessidade de abordagens mais integradas, que conciliem critérios técnicos, legais e ambientais para garantir a viabilidade e a eficiência do sistema em longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, v.56, cap.4, 1998.

2. ARMANI, F. A. S.; FREITAS, L. A.; MOREIRA, V. S. Avaliação do método de Turc para a estimativa da evapotranspiração de um ambiente litorâneo. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, Curitiba, ed. especial, p. 1-10, out. 2018. ISSN 2358-5420. Disponível em: https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/article/view/443. Acesso em: 01 de jun. 2025.

3. ATLAS ESGOTOS. Atlas Esgotos - Despoluição de Bacias Hidrográficas. 2009. Disponível em: https://www.ana.gov.br/atlasesgotos/. Acesso em: 02 de agosto de 2024.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17.076: Projeto de sistema de tratamento de esgoto de menor porte: Requisitos. Rio de Janeiro, p. 6, 11, 17. 2024.

5. COELHO FILHO, M. A. et al. O processo de evapotranspiração. In: SOUSA, V. F. de et al. (org.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. Cap. 2, p. 91–113. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/915609/o-processo-de-evapotranspiracao. Acesso em: 22 maio 2025.

6. COSTA, P. S. de A.; SILVA, B. A.; CARMO, D. de F.; SILVA, I. de F. da; TEIXEIRA, M. A.; MARQUES, D. C. Tanque de evapotranspiração para saneamento rural: estudo de caso no planejamento micro e macro. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v.14, Supl.2, p.2, 2010.

7. EMATER-DF. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal. 2019. Disponível em: http://biblioteca.emater.df.gov.br/jspui/handle/123456789/128. Acesso em: 02 de agosto de 2024.

8. FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; DA PAZ, R. L. et al. Evapotranspiração – Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos. Embrapa Arroz e Feijão, 2010.

9. OMS. Organização Mundial da Saúde. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789241514705. Acesso em: 02 de agosto de 2024.

10. PNUD. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Disponível em: https://www.undp.org/pt/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel. Acesso em: 02 de agosto de 2024.

11. REZENDE, D. C. V. Tanque de evapotranspiração no tratamento de esgoto sanitário em comunidades rurais. Urutaí: IF GOIANO, 2019. 37 f. Dissertação (Mestrado em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado).

12. VANHONI, F.; MENDONÇA, F. O Clima do Litoral do Estado do Paraná. Revista Brasileira de Climatologia, v. 3, 2008. DOI: 10.5380/abclima.v3i0.25423. Disponível em: https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25423. Acesso em: 01 de jun. de 2025.