Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

37ETC-07351

Remoção de *Klebsiella pneumonie*, *Escherichia coli* e Coliformes totais por HRAPS no pós-tratamento de esgoto doméstico em sistema contínuo de operação

Dra. Caroline Moço Erba Pompei
Pedro Leocádio, Ana Teresa Lombardi, Gustavo H. R. da Silva
UFSCar, UNESP/FEB.

Introdução

Nos últimos anos, tem-se observado um crescente esforço para desenvolver **alternativas ambientalmente sustentáveis** para as tecnologias de tratamento de efluentes.

O DESAFIO

O tratamento convencional de esgoto ainda enfrenta grandes desafios.



- Alta demanda de energia
- CO_2 Emissões de gases de efeito estufa
- Recuperação de recursos limitada
- Persistência de patógenos

SOLUÇÕES EMERGENTES

Soluções baseadas em recursos naturais estão ganhando atenção como alternativas sustentáveis.



SISTEMAS BASEADOS EM MICROALGAS

Microalgas oferecem múltiplos benefícios para o tratamento de esgoto.



Fotobiorreator fechado (FP-PBR)

Lagoa de alta taxa de algas (HRAP)

- Remoção de nutrientes
- Remoção de matéria orgânica
- Melhor separação sólido-líquido
- Produção de biomassa e recuperação de recursos

Sistemas baseados em consórcios microalgas-bactérias no tratamento de esgoto sanitário são uma alternativa oportuna e acessível para atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 6 — Água potável e saneamento para todos.



Introdução

SISTEMA BASEADO EM MICROALGAS



Consórcio inovador de microalgas e bactérias formando fotogranulos densos.

- Maior retenção de biomassa
- Alto desempenho no tratamento
- Excelentes propriedades de sedimentação
- Estabilidade operacional

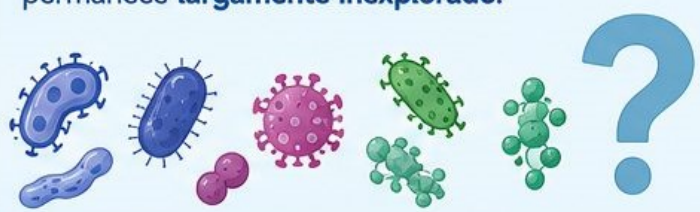


Fotobiorreator fechado (FP-PBR)

Lagoa de alta taxa de algas (HRAP)

A LACUNA DO CONHECIMENTO

Apesar do promissor desempenho desses sistemas para a remoção de poluentes, o potencial de **remoção de patógenos** permanece **largamente inexplorado.**



EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE PATÓGENOS

Embora não seja sua função principal, os sistemas com microalgas são eficientes na remoção de patógenos, por meio de:

- aumento do pH e do oxigênio dissolvido (fotossintese)
- estresse oxidativo e foto-oxidação
- ambiente inóspito para os microrganismos

PATÓGENOS REMOVIDOS
(estudos anteriores)

- ✓ *Escherichia coli*
- ✓ Coliformes totais
- ✓ *Enterococcus spp.*
- ✓ *Staphylococcus spp.*
- ✓ *Pseudomonas aeruginosa*
- ✓ Clostridium perfringens

(POMPEI et al., 2023, 2024, 2025; RUAS et al., 2022, 2023)

Rumo a um saneamento mais seguro e sustentável

- Saúde pública
- Proteção ambiental
- Aproveitamento de recursos
- Desenvolvimento sustentável

Objetivos

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

Este estudo investiga a **remoção de patógenos** em um **sistema baseado em microalgas**, avaliando seu potencial como uma solução sustentável para o tratamento de esgoto sanitário.

Apesar dos avanços em estudos de sistemas baseado em microalgas, a maioria foi avaliado indoor, ou em sistemas operados em bateladas, ou semi-contínuo, e muitos usaram esgoto sintético. Ademais, ainda há uma lacuna na remoção de espécies de importância clinica.

Este estudo investiga, **de forma inédita, a remoção de *Klebsiella pneumonie***, uma bactéria associada a infecções graves e resistência a antibióticos, ainda não explorada no contexto de tratamento de esgoto por **microalgas-bactérias**.

Klebsiella pneumonie



Materiais e métodos

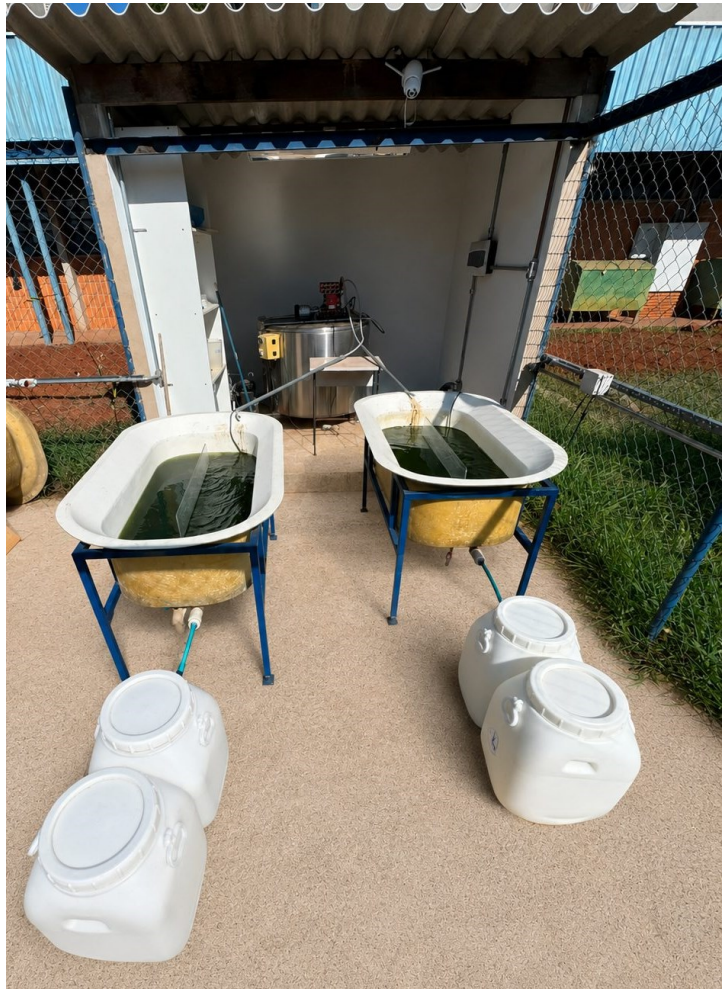


Figura 1: Local de instalação das HRAPs.

- Volume total de operação (165 Litros cada HRAP)
- Sob condições ambientais naturais (Figura 1).
- Operou de forma contínua de alimentação (50 dias),
- **Vazão** de 20,5 ml min^{-1} cada HRAP, controlada por meio de bombas dosadoras peristálticas (ProMinent ConceptPlus).
- **TDH:** 5 dias
- **Esgoto:** coletado semanalmente em uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) de autarquia municipal, de uma cidade do interior do estado de São Paulo (22°16'00.7"S 49°05'12.5"W), após o tratamento por **reator UASB.**
- **HRAPs:** construídas em fibra de vidro, com área de superfície iluminada de ≈ 0,72 m² (1,25 m de comprimento × 0,60 m de largura), e uma profundidade de cultura de 0,20 m.
- **Bomba submersa:** recirculação e aeração.

Luminosidade média (µmol fótons m^{-2} s^{-1}) - 896,7±40,4

Materiais e métodos



- Coleta de amostras (microbiologia)
- Medição de parâmetros físico-químicos diariamente - sonda multiparâmetros;



- Coleta de amostras (PT, PO_4, TKN, NO_2, NO_3, NT, SST, SSV, SSF, alcalinidade, AOV, DQO, amônia, clorofila-a, b, carotenoides, contagem de células);



Materiais e métodos

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

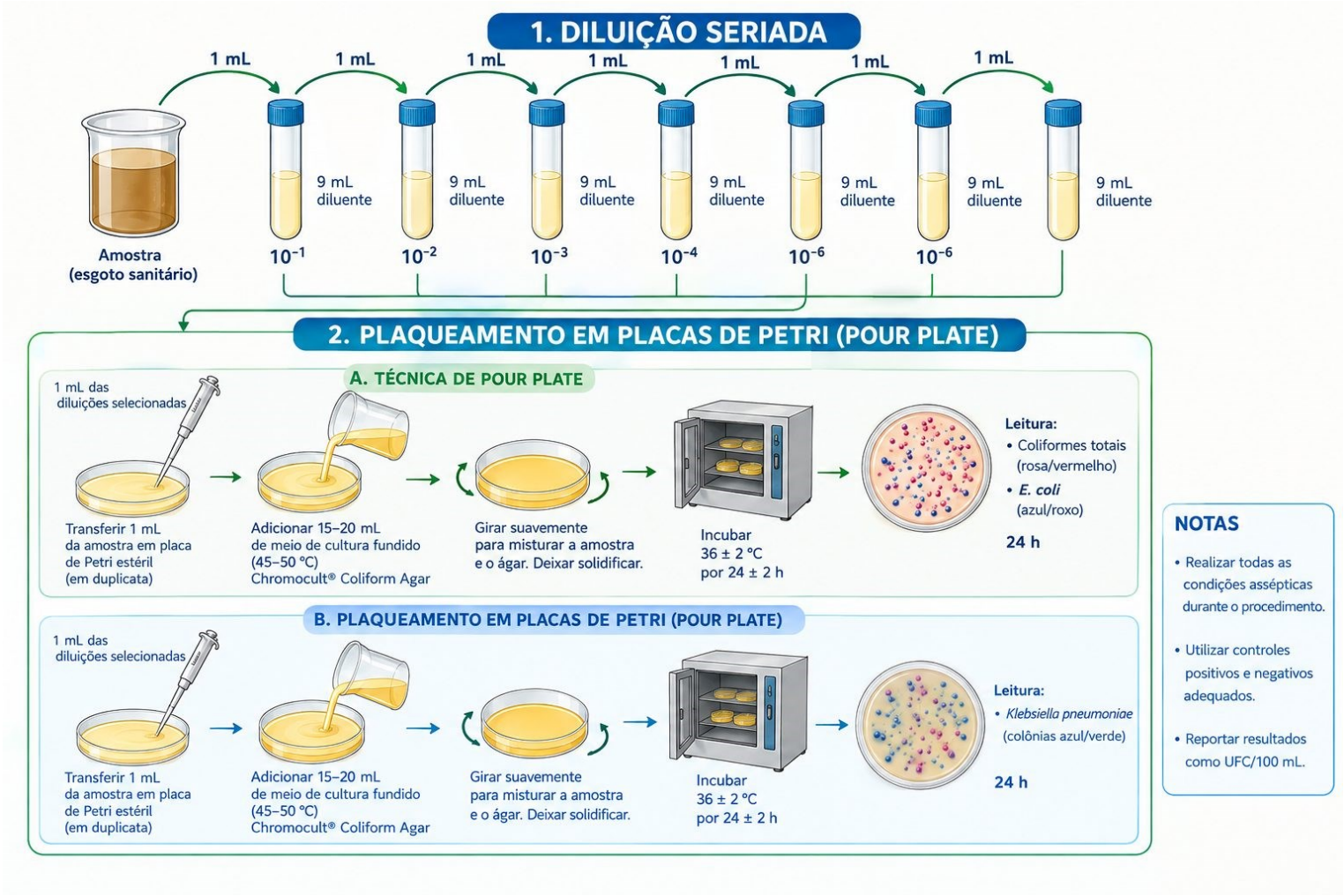
Meios de cultivo seletivo

***E. Coli* e coliformes totais:** HiCrome® Chromogenic Coliform agar (M1991I, Himedia)

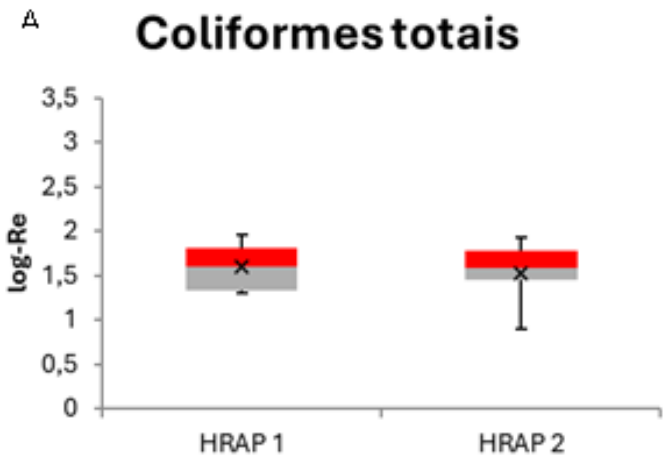
Klebsiella pneumonie: HiCrome® Klebsiella Selective Agar Base - M1573







Resultados e discussões



Coliformes totais

- **HRAP 1:** **97%** de remoção e **1,60 log**
- **HRAP 2:** **95%** de remoção e **1,53 log**

Coliformes totais

1,11x10⁷ CFU por 100 mL

HRAP 1

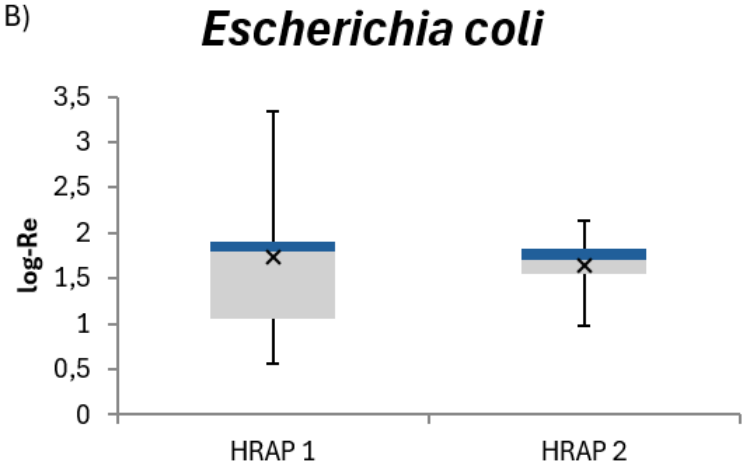


3,11x10⁵ CFU por 100 mL

HRAP 2



4,61x10⁵ CFU por 100 mL



E. coli

- **HRAP 1:** **92%** de remoção e **1,73 log**
- **HRAP 2:** **96%** de remoção e **1,64 log**

E. coli

2,43x10⁶ CFU por 100 mL

HRAP 1



1,38x10⁵ CFU por 100 mL

HRAP 2

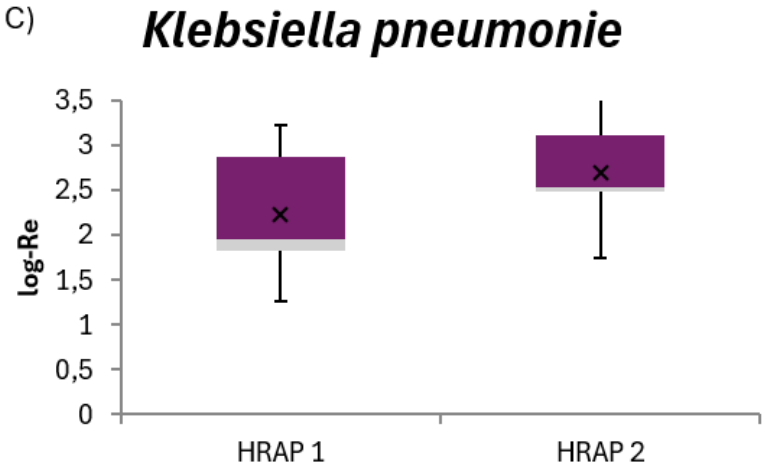


7,59x10⁴ CFU por 100 mL

Corroboram com Pompei et al., (2023) os quais obtiveram remoção média de 1 a 1,2 log em HRAP, porém operada sob regime de batelada. Outros trabalhos que corroboram os achados deste, são Chambonniere et al. (2020) com 1,77 log de remoção de *E. coli*, Espinosa et al., (2021) com >1,7 log.

Resultados e discussões

C)



Klebsiella pneumoniae

- **HRAP 1:** **92%** de remoção e **1,73 log**
- **HRAP 2:** **96%** de remoção e **1,64 log**



Resultados e discussões



Os valores dos parâmetros são **semelhantes entre as lagoas** e refletem um comportamento similar na remoção de patógenos, **sem diferença estatisticamente significativa** entre elas. Entretanto, a remoção resulta da **combinação de diversos fatores**, incluindo as espécies envolvidas.

Tabela 1. Valores médios dos parâmetros monitorados e desvio padrão (±), no esgoto pós-UASB e saída das HRAPs durante o período de estudo.

c	Esgoto pós-UASB	HRAP 1	HRAP 2
pH	6,9±0,3	8,6±0,7	7,8±0,6
Oxigênio dissolvido (mg L^{-1})	1,3±1,5	10,9±2,6	11,2±2,6
Temperatura do líquido (°C)	14,9±10,6	19,9±2,5	19,0±2,5
Temperatura ar (°C)	-	22,4±0,4	19,0±2,5
Luminosidade média (µmol fótons m^{-2} s^{-1})	-	896,7±40,4	896,7±40,4
Turbidez (NTU)	49,59±2,67	20,12±3,89	13,01±1,48
Clorofila a (mg L^{-1})	-	3,30±0,35	2,18±0,34
Clorofila b (mg L^{-1})	-	2,07±0,21	1,66±0,62
Carotenoides (mg L^{-1})	-	0,76±0,10	0,42±0,18
Contagem de células (cel mL^{-1})	-	$5,26\times10^{6}$	$3,32\times10^{6}$
DQO (mg L^{-1})	60,66±19,83	58,63±17,21	62,23±18,33
Fósforo total (mg L^{-1})	3,26±0,74	1,99±0,20	2,12±0,36
Ortofosfato (mg L^{-1})	10,15±0,63	7,90±0,91	7,87±1,03
TKN (mg L^{-1})	75,53±5,96	45,17±3,94	46,32±2,61
Nitrito (mg L^{-1})	0,01±0,01	2,65±0,11	2,64±0,25
Nitrato (mg L^{-1})	3,58±1,35	8,06±2,18	8,06±1,42
Amônia (mg L^{-1})	61,47±0,72	29,55±1,80	31,08±1,53
Nitrogênio total (mg L^{-1})	76,88±5,76	48,95±6,04	49,52±3,84
AOV (mg L^{-1})	45,3±7,0	36,5±9,4	36,0±10,6
Alcalinidade (mg L^{-1})	294,2±4,7	50,8±10,6	45,7±19,8
Coliformes totais (CFU 100 mL^{-1})	$1,11\times10^{7}$	$3,11\times10^{5}$	$4,61\times10^{5}$
Escherichia coli (CFU 100 mL^{-1})	$2,43\times10^{6}$	$1,38\times10^{5}$	$7,59\times10^{4}$
Klebsiella pneumoniae (CFU 100 mL^{-1})	$1,79\times10^{6}$	$3,63\times10^{4}$	$4,79\times10^{4}$

Fonte: Os autores.

Conclusões

- ✓ HRAPs - Solução Baseada na Natureza (SBN) tecnicamente viável e eficiente para o pós-tratamento de efluentes domésticos pré-tratados em reatores UASB. A remoção de coliformes totais e *Escherichia coli* pelas HRAPs esteve condizente com demais trabalhos reportados na literatura.

- ✓ De forma inédita, a pesquisa revelou uma expressiva redução de 2,5 log para a bactéria de importância clínica *Klebsiella pneumoniae*, preenchendo uma lacuna crítica na literatura e consolidando o potencial dessa tecnologia na mitigação de patógenos resistentes no saneamento.

- ✓ Remoção de nutrientes (N e P) moderada (~34% - 38%) - desempenho foi condicionado pela alta amplitude térmica sazonal, que afetou a estabilidade da biota cultivada.

Obrigada!

Encontro Técnico AESABESP
37º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

Dra. Caroline M. Erba Pompei

E-mail: caroline.erba-pompei@unesp.br
Whatsapp: 16-982015124

FAPESP

Coautores

Pedro Leocádio
pedro.leocadio@unesp.br

Profa. Dra. Ana Teresa Lombardi
lombardi@ufscar.br

Prof. Dr. Gustavo H. Ribeiro da Silva
gustavo.ribeiro@unesp.br

unesp

ufscar

PPG - Engenharia Civil
Unesp Bauru

