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

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

37ETC-07388

TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO COM REMOÇÃO SIMULTÂNEA DE CARBONO, NITROGÊNIO E FÓSFORO EM UM ÚNICO REATOR DE LEITO ESTRUTURADO E AERAÇÃO INTERMITENTE (SBRIA)

Dr. Rafael Brito de Moura
Ana Paula Felix, Alessandra Giordani, Duanny Thais Rodrigues Caproni
Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG

Introdução

1 Problemática da questão sanitária de países em desenvolvimento

- Crescimento populacional e urbanização desordenada
- Baixa cobertura de saneamento
- Contaminação de corpos d'água
- Riscos à saúde pública e ao meio ambiente



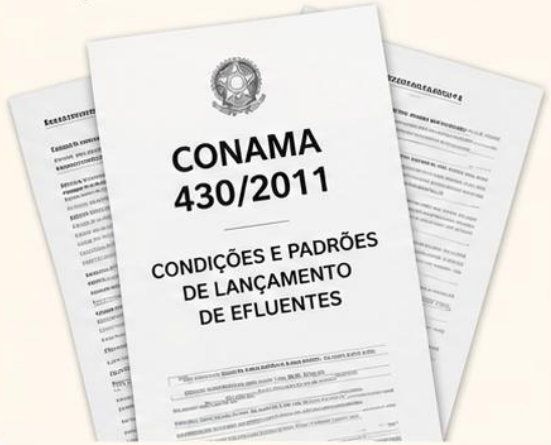
2 Sistemas convencionais – Projetados para remover DBO

- Foco principal na remoção de matéria orgânica (DBO)
- Tecnologias consolidadas e amplamente utilizadas
- Remoção limitada de nutrientes (ex.: nitrogênio e fósforo)



3 Aumento das restrições de lançamento – Aumento de custos para o tratamento

- Legislação mais restritiva (ex.: CONAMA 430/2011 e revisões)
- Exigência de remoção de nutrientes (N e P) e outros poluentes
- Necessidade de adequação de ETEs existentes e novos projetos
- Maior investimento e custos operacionais



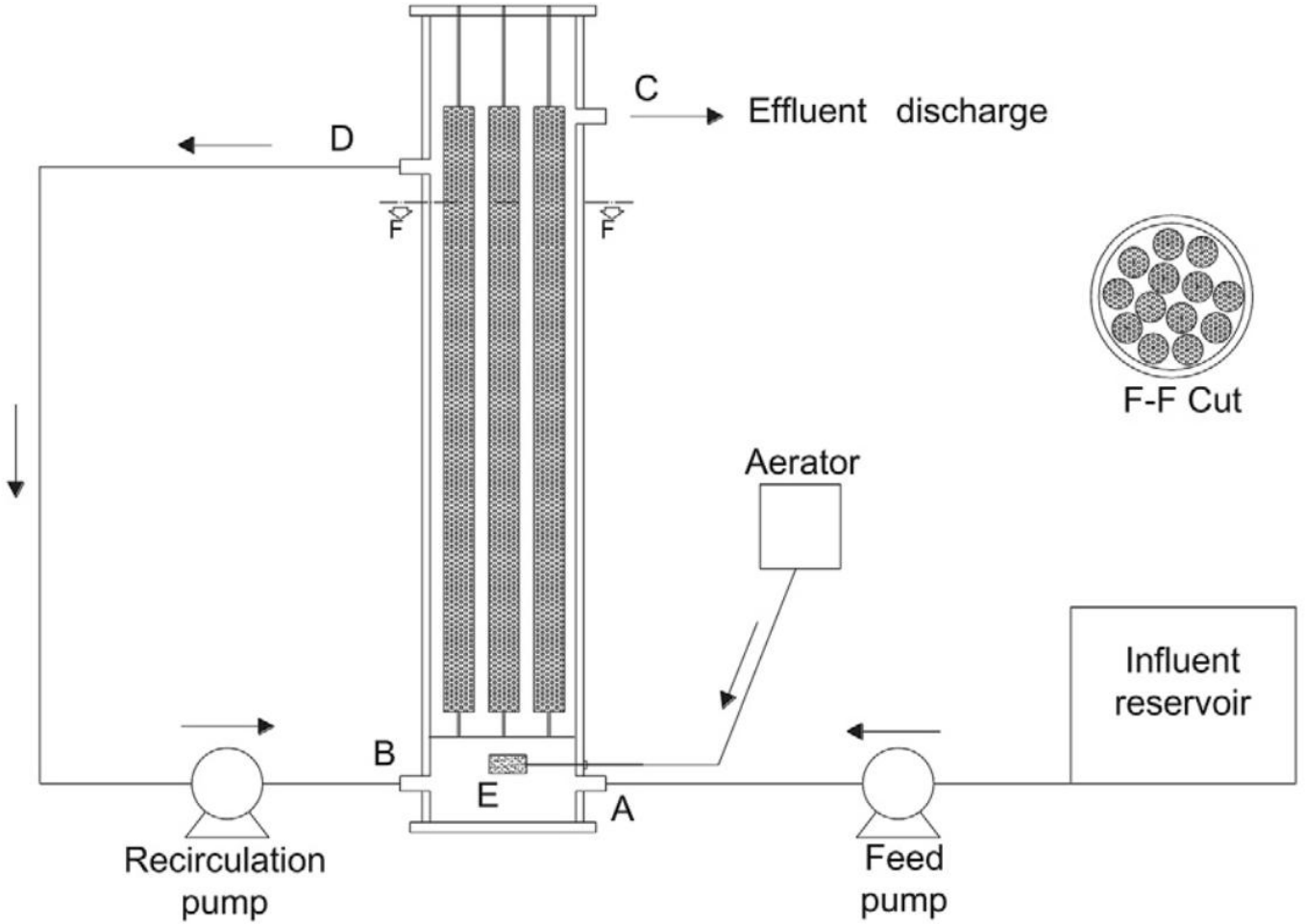
4 Solução – Sistemas que integram a remoção de dois ou mais poluentes em unidades únicas de reação

- Remoção simultânea de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo
- Processos integrados (ex.: SBRIA, MBBR, MABR, anammox)
- Soluções compactas e de menor custo operacional
- Aplicáveis a diferentes escalas

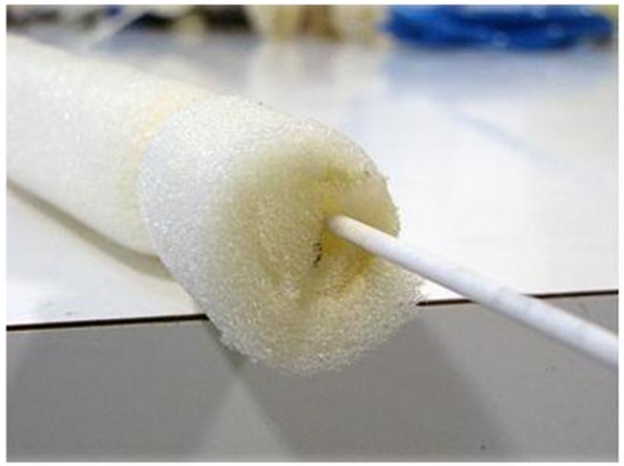


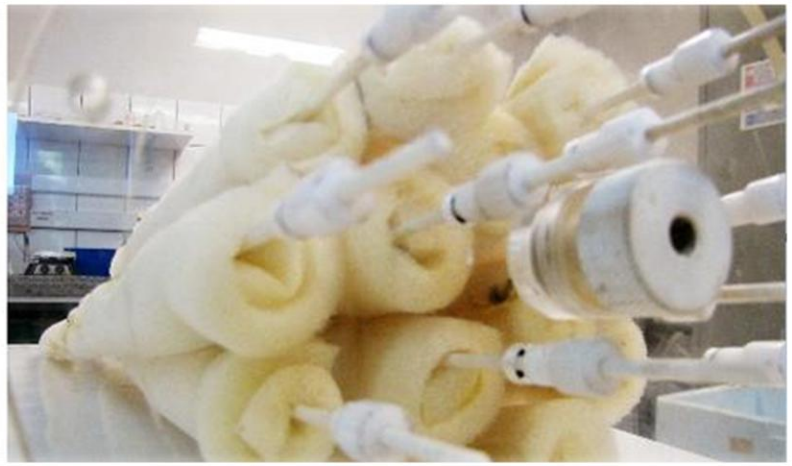
Reator de leito estruturado com aeração intermitente

- Início dos testes: 2009
- Água residuária sintética
- Aeração intermitente
- Leito fixo estruturado de espuma de poliuretano



Reator de leito estruturado com aeração intermitente





Journal of Environmental Management 98 (2012) 163–167

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Journal of Environmental Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenvman

Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration

Rafael B. Moura*, Márcia H.R.Z. Damianovic, Eugenio Foresti

Departamento de Hidráulica e Saneamento e Escola de Engenharia de São Carlos e Universidade de São Paulo (SHS/EESC/USP), Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13566-590 São Carlos – SP, Brazil



Reator de leito estruturado com aeração intermitente

- 2011: testes com esgoto sanitário
- Mesmas condições testadas anteriormente
- Maior período de operação



Reator de leito estruturado com aeração intermitente

Brazilian Journal of Chemical Engineering

Vol. 35, No. 02, pp. 641 - 648, April - June, 2018
dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20180352s20160516

ISSN 0104-6632
Printed in Brazil
www.scielo.br/bjce

(cc) BY

HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A STRUCTURED BED REACTOR SUBJECTED TO RECIRCULATION AND INTERMITTENT AERATION (SBRRIA)

Rafael B. Moura[1]*, Leonardo H. S. Damasceno[1], Márcia H.R.Z. Damianovic[2], Marcelo Zaiat[2] and Eugenio Foresti[2]

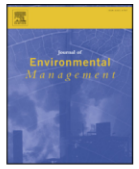
Journal of Environmental Management 224 (2018) 19–28

ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Environmental Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenvman



Research article

Carbon-nitrogen removal in a structured-bed reactor (SBRRIA) treating sewage: Operating conditions and metabolic perspectives

Rafael B. Moura[a,b,*], Carla E.D. Santos[b], Dagoberto Y. Okada[c], Tiago H. Martins[b], Antônio Djalma N. Ferraz Júnior[d], Márcia H.R.Z. Damianovic[b], Eugenio Foresti[b]





Reator de leito estruturado com aeração intermitente

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

Evolução das pesquisas sobre remoção de nitrogênio

2012

Fluxo contínuo + aeração intermitente

Moura et al.
Journal of Environmental Management

2015

Aeração e carga de nitrogênio

Wosiack et al.
Journal of Environmental Management

2016

Relação DQO/N e fonte de carbono

Santos et al.
Journal of Environmental Management

2017

Aeração e recirculação

Leick et al.
Engenharia Agrícola

2018

Esgoto real: TDH e metabolismo

Moura et al.
Journal of Environmental Management

Ciclos de aeração e microbiologia

Correa et al.
Journal of Water Process Engineering

Pós-tratamento de efluente anaeróbio

Silva et al.
Bioprocess and Biosystems Engineering

SNAD e inibição em efluente industrial

Almeida et al.
International Biodeterioration & Biodegradation

2021

Comunidade microbiana e gradiente de O_2

Santos et al.
Bioprocess and Biosystems Engineering

Escala piloto e sistema de aeração

Murata et al.
Research, Society and Development

2022

SBRIA sem recirculação: ar e ciclos

Oliveira et al.
Environmental Technology

Ciclos de aeração e biofilme

Azevedo et al.
Environmental Technology

Diâmetro do suporte e porosidade

de Souza et al.
Journal of Chemical Technology & Biotechnology

2023

Estratificação e interações microbianas

Oliveira et al.
Bioresource Technology

Efluente de laticínio e carga orgânica

Correa et al.
Environmental Science and Pollution Research

Esgoto bruto + efluente UASB

Wendling et al.
International Journal of Environmental Science and Technology

2024

SBRIA piloto: remoção de N e carbono em esgoto real

Barbosa et al.
Environmental Science and Pollution Research

2025–2026

Reator híbrido e baixa relação DQO/N

2025 · Lúcio et al.
Journal of Water Process Engineering

Piloto: contribuição industrial e variabilidade

2026 · Valim et al.
Brazilian Journal of Chemical Engineering

Reator de leito estruturado com aeração intermitente

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

Evolução das pesquisas sobre remoção de nitrogênio

2012

Fluxo contínuo + aeração intermitente

Moura et al.
Journal of Environmental Management

2015

Aeração e carga de nitrogênio

Wosiack et al.
Journal of Environmental Management

2016

Relação DQO/N e fonte de carbono

Santos et al.
Journal of Environmental Management

2017

Aeração e recirculação

Leick et al.
Engenharia Agrícola

2018

Esgoto real: TDH e metabolismo

Moura et al.
Journal of Environmental Management

Ciclos de aeração e microbiologia

Correa et al.
Journal of Water Process Engineering

Pós-tratamento de efluente anaeróbio

Silva et al.
Bioprocess and Biosystems Engineering

SNAD e inibição em efluente industrial

Almeida et al.
International Biodeterioration & Biodegradation

2021

Comunidade microbiana e gradiente de O_2

Santos et al.
Bioprocess and Biosystems Engineering

Escala piloto e sistema de aeração

Murata et al.
Research, Society and Development

2022

SBRIA sem recirculação: ar e ciclos

Oliveira et al.
Environmental Technology

Ciclos de aeração e biofilme

Azevedo et al.
Environmental Technology

Diâmetro do suporte e porosidade

de Souza et al.
Journal of Chemical Technology & Biotechnology

2023

Estratificação e interações microbianas

Oliveira et al.
Bioresource Technology

Efluente de laticínio e carga orgânica

Correa et al.
Environmental Science and Pollution Research

Esgoto bruto + efluente UASB

Wendling et al.
International Journal of Environmental Science and Technology

2024

SBRIA piloto: remoção de N e carbono em esgoto real

Barbosa et al.
Environmental Science and Pollution Research

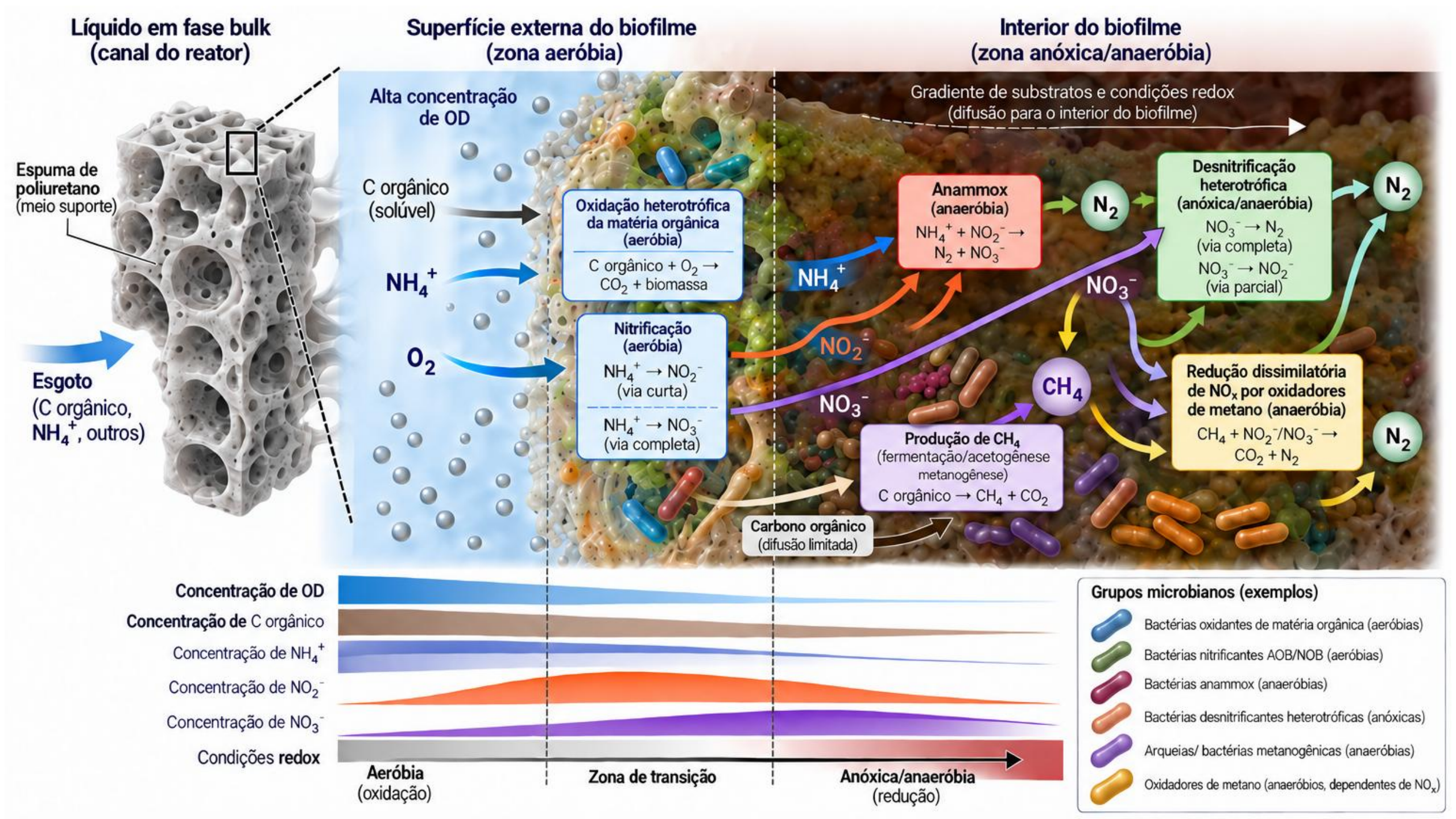
2025–2026

Reator híbrido e baixa relação DQO/N

2025 · Lúcio et al.
Journal of Water Process Engineering

Piloto: contribuição industrial e variabilidade

2026 · Valim et al.
Brazilian Journal of Chemical Engineering


Líquido em fase bulk
(canal do reator)
Superfície externa do biofilme
(zona aeróbia)
Interior do biofilme
(zona anóxica/anaeróbia)
Espuma de poliuretano
(meio suporte)
Esgoto
(C orgânico, NH4+, outros)
Alta concentração de OD
C orgânico (solúvel)
NH4+
O2
Oxidação heterotrófica da matéria orgânica (aeróbia)
C orgânico + O2 → CO2 + biomassa
Nitrificação (aeróbia)
NH4+ → NO2- (via curta)
NH4+ → NO3- (via completa)
Gradiente de substratos e condições redox
(difusão para o interior do biofilme)
Anammox (anaeróbia)
NH4+ + NO2- → N2 + NO3-
N2
Desnitrificação heterotrófica (anóxica/anaeróbia)
NO3- → N2 (via completa)
NO3- → NO2- (via parcial)
NO2-
NO3-
CH4
Produção de CH4
(fermentação/acetogênese metanogênese)
C orgânico → CH4 + CO2
Redução dissimilatória de NOx por oxidadores de metano (anaeróbia)
CH4 + NO2-/NO3- → CO2 + N2
Carbono orgânico
(difusão limitada)
Concentração de OD
Concentração de C orgânico
Concentração de NH4+
Concentração de NO2-
Concentração de NO3-
Condições redox
Aeróbia
(oxidação)
Zona de transição
Anóxica/anaeróbia
(redução)
Grupos microbianos (exemplos)
Bactérias oxidantes de matéria orgânica (aeróbias)
Bactérias nitrificantes AOB/NOB (aeróbias)
Bactérias anammox (anaeróbias)
Bactérias desnitrificantes heterotróficas (anóxicas)
Arqueias/ bactérias metanogênicas (anaeróbias)
Oxidadores de metano (anaeróbios, dependentes de NOx)

Materiais e métodos

DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

SBRIA piloto | 11 experimentos propostos

Experimento	Tempo de aeração (h)	Vazão de ar (m³/min)
1	1,50	45
2	2,00	45
3	1,50	60
4	2,00	60
5	**1,75**	**52,5**
6	**1,75**	**52,5**
7	**1,75**	**52,5**
8	1,40	52,5
9	2,10	52,5
10	1,75	42
11	1,75	63

CONDIÇÃO APRESENTADA NESTE ARTIGO

Experimentos 5, 6 e 7

TDH: 10 h
Ciclo: 3 h

Materiais e métodos

Reator SBRIA
12 m³

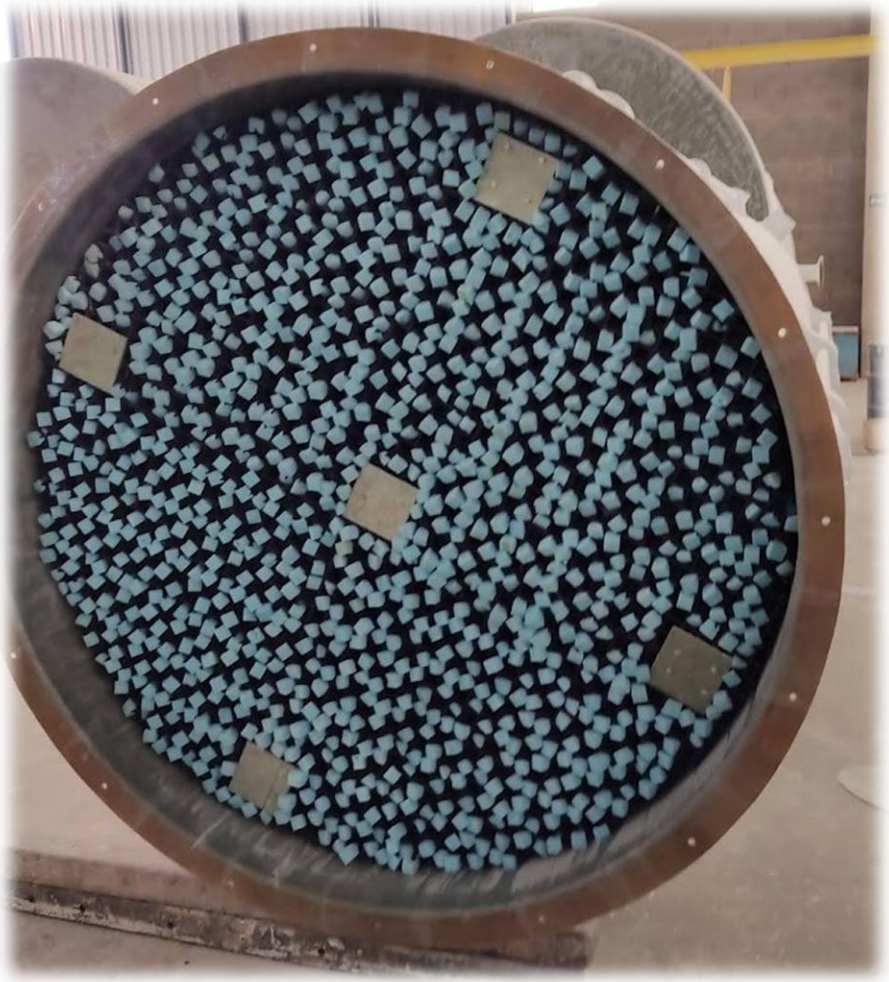
Difusores de
ar

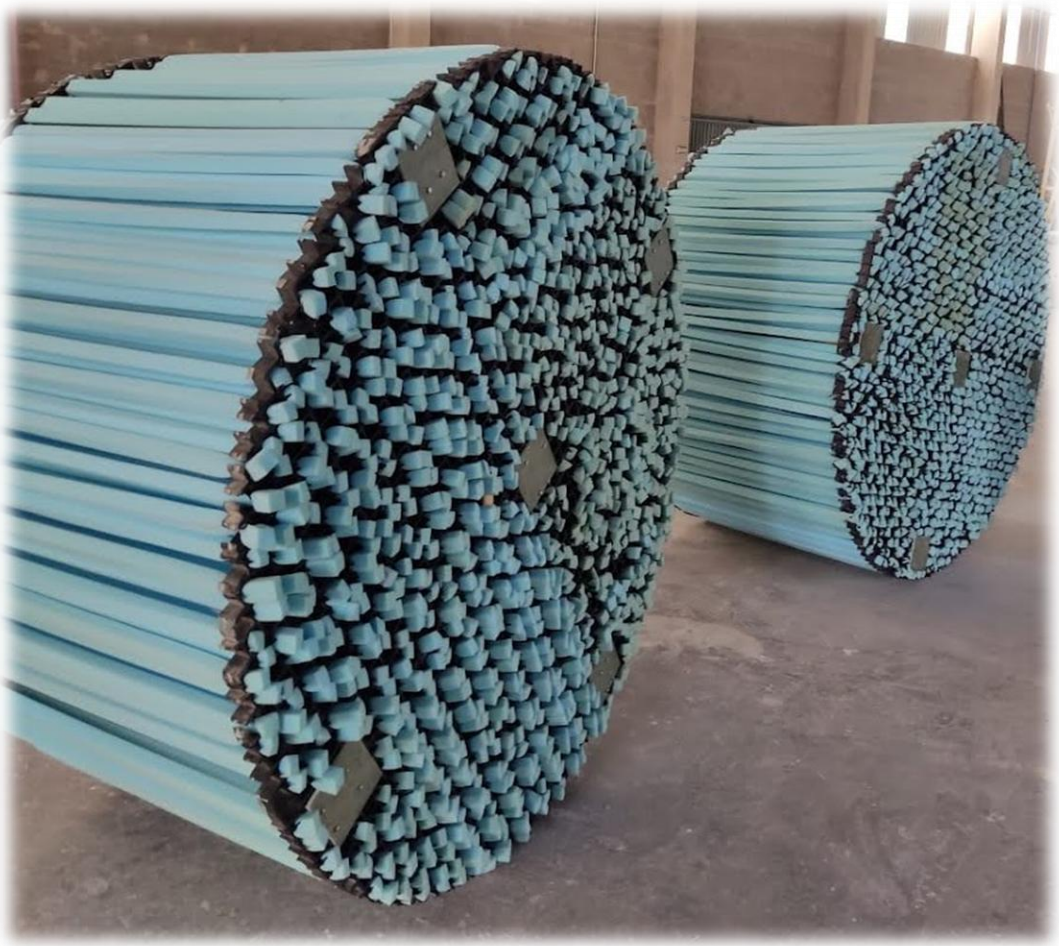




Soprador
radial
11cv

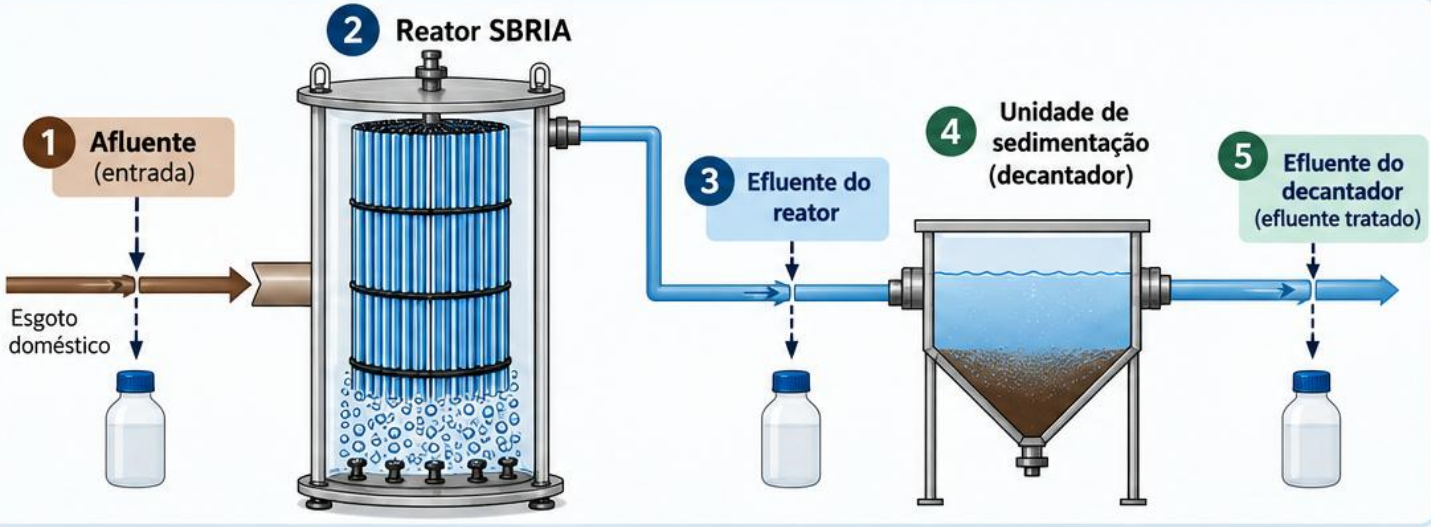
Materiais e métodos





Coleta das amostras

Amostras coletadas **duas vezes por semana**



Frequência de amostragem

2 vezes por semana

Procedimento de referência

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2017)

Parâmetros monitorados e métodos analíticos

Demanda Química de Oxigênio (DQO)
5220 D



Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)
SH-812 + BOD intelligent measuring instrument



pH
4500-H^+ B



Nitrogênio amoniacal (NH_3-N)
4500 B



Fósforo total (PT)
LPB, 2021



Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)
ECOCLASS, 2022



Sólidos totais (ST), voláteis (SV) e fixos (SF)
2540 B e 2540 E



Nitrito (NO_2^-) e Nitrato (NO_3^-)
Cromatografia iônica (SYKAM-S155)



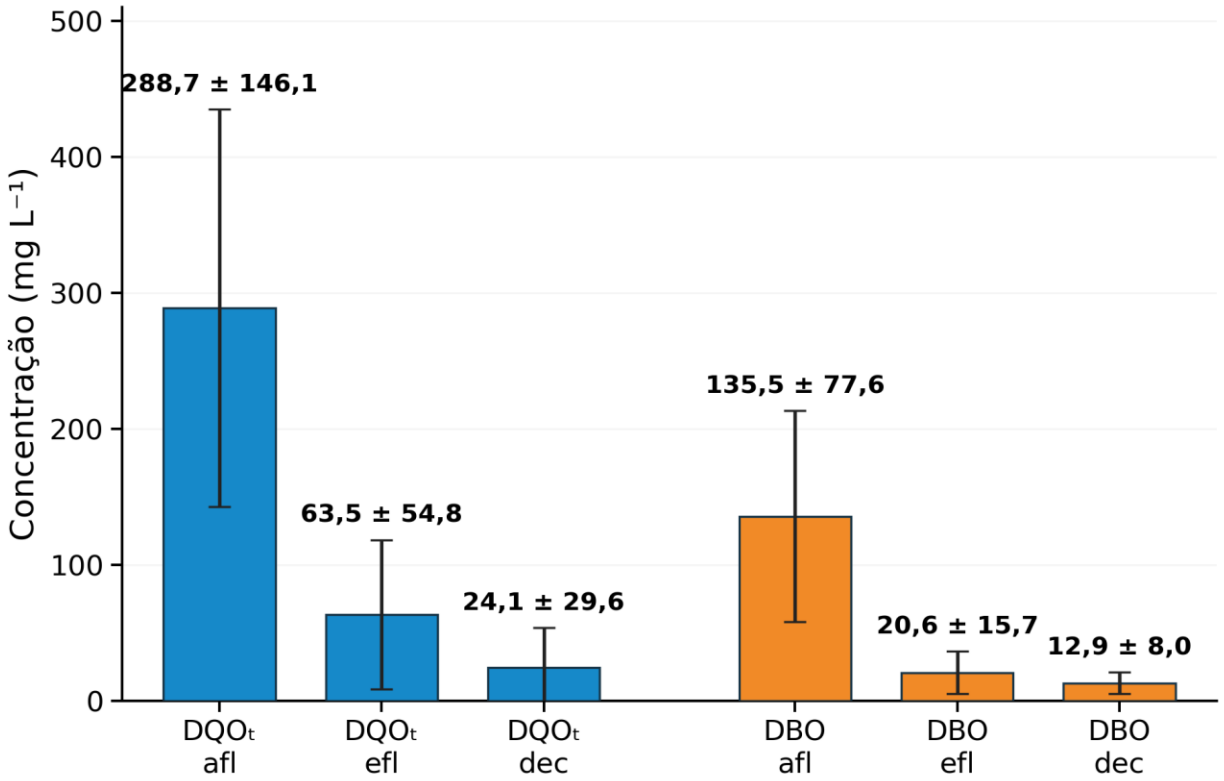
Curva de calibração a partir de padrão misto

Tratamento dos dados

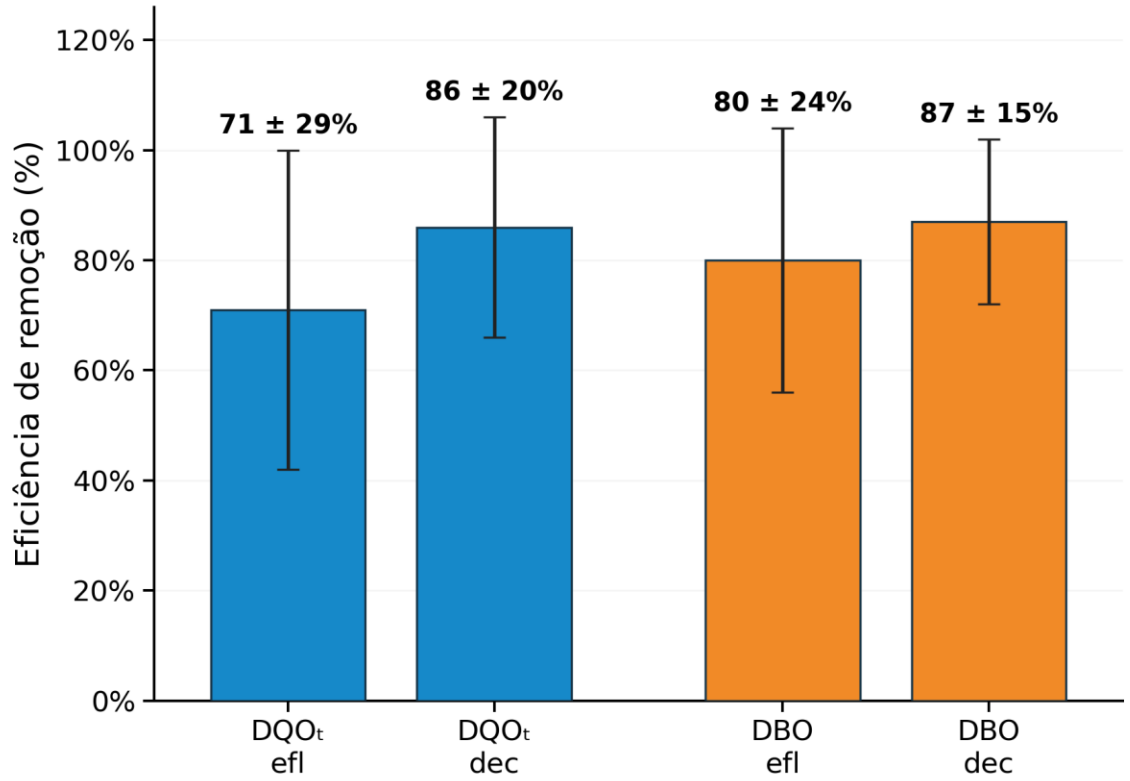
Os dados experimentais foram expressos como média ± desvio padrão.

Resultados e discussão

A Concentração

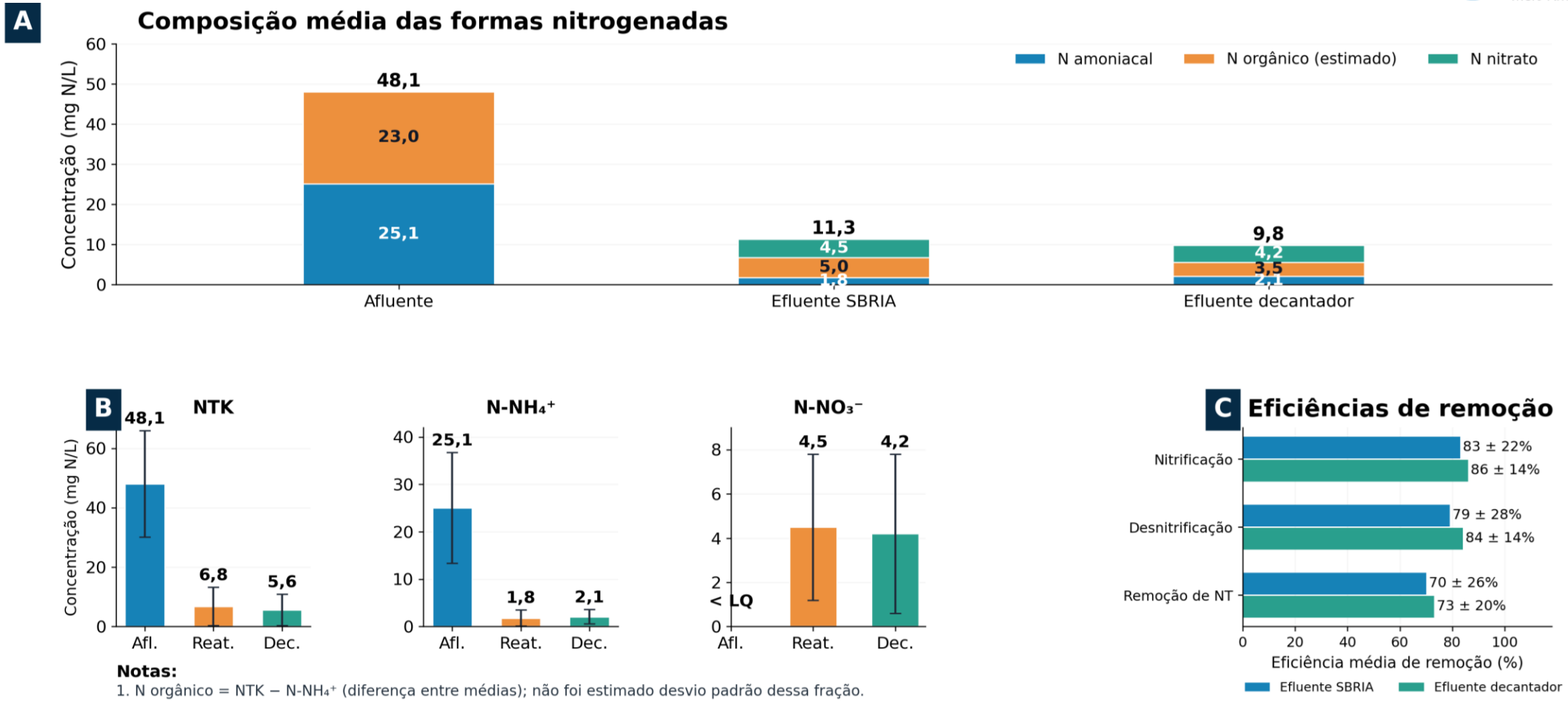


B Eficiência de remoção



Barras = médias; hastes = ± desvio padrão. afl: afluente; efl: efluente SBRIA; dec: efluente decantador.
Os intervalos média ± DP das eficiências podem ultrapassar 100%; isso não representa eficiência física superior a 100%.

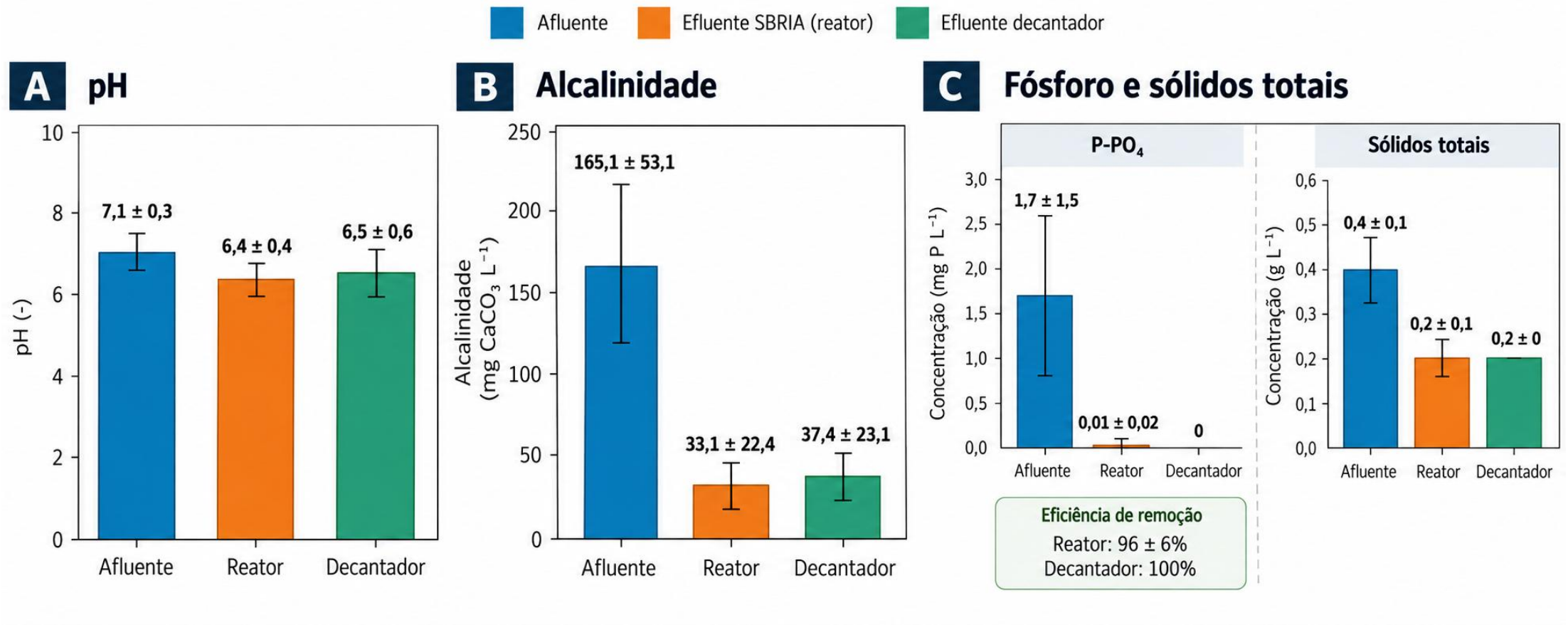
Resultados e discussão



Notas:

1. N orgânico = NTK − N-NH_4^+ (diferença entre médias); não foi estimado desvio padrão dessa fração.
2. Valores totais das barras: NTK no afluente (48,1 mg N/L); NTK + N-NO_3^- nos efluentes (11,3 e 9,8 mg N/L).
3. N-NO_3^- afluente e N-NO_2^- em todas as etapas: abaixo do limite de quantificação (< LQ).
4. Eficiências: média ± desvio padrão experimental. As barras representam somente as médias; não representam limites de 0 a 100%.

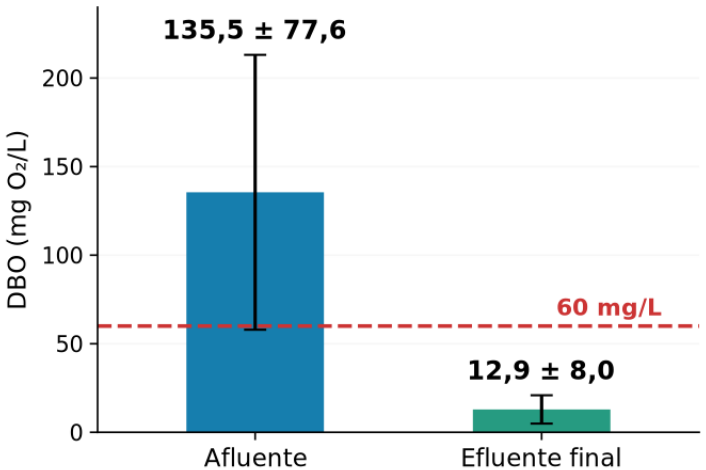
Resultados e discussão



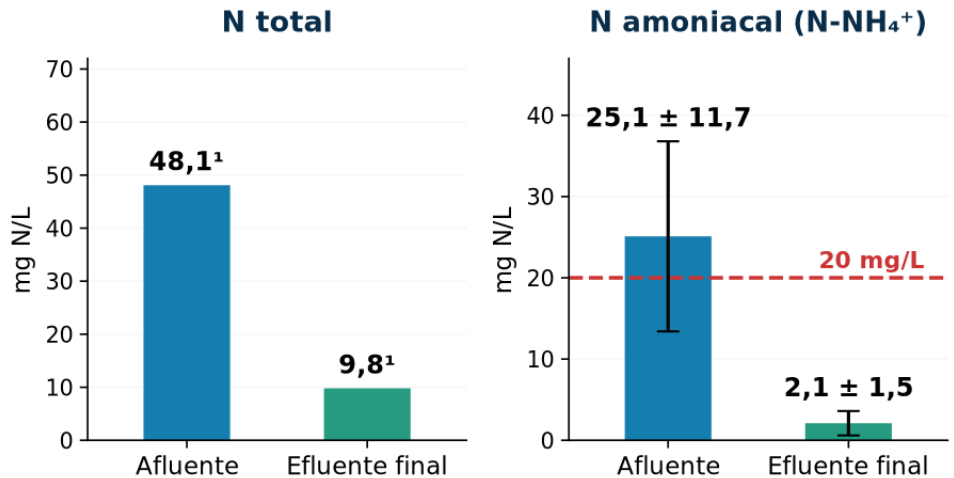
Considerações finais

Potencial de atendimento aos padrões propostos de lançamento de efluentes (Revisão da Resolução CONAMA nº 430/2011)

A Matéria orgânica (DBO)

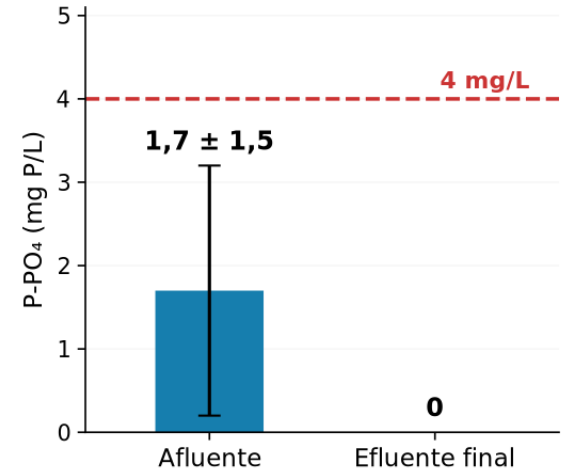


B Nitrogênio

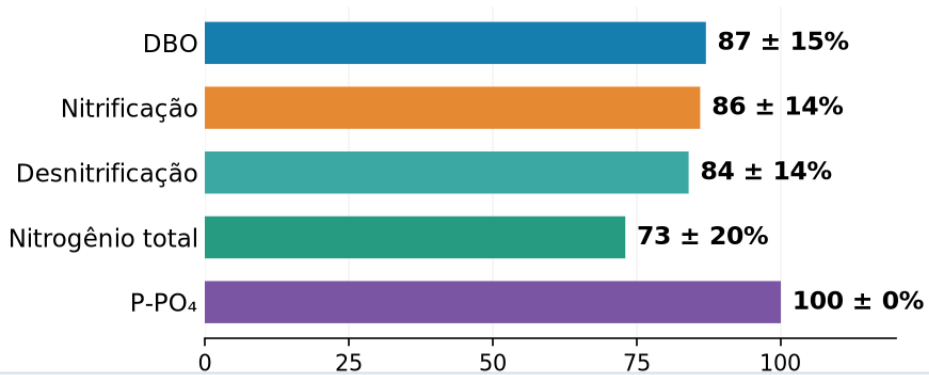


Nitrato no efluente final: 4,2 ± 3,6 mg N/L

C Fósforo (ortofosfato)



D Eficiências médias de remoção



✓ Principais evidências

- DBO final: 12,9 ± 8,0 mg/L; média abaixo de 60 mg/L.
- N amoniacal final: 2,1 ± 1,5 mg N/L; média abaixo de 20 mg/L.
- Remoção de nitrogênio total: 73 ± 20%.
- N total final: 9,8 mg N/L¹, acima do N amoniacal.
- P-PO_4 final = 0; não comprova atendimento para P total.

Notas e limitações

¹ N total calculado a partir das médias de NTK + N-NO_3^- (nitrito abaixo do LQ); sem desvio padrão calculado.
Limites da minuta fornecida: DBO 60 mg/L (90 mg/L em condições previstas para municípios menores); N amoniacal 20 mg/L; P total 4 mg/L.
P-PO_4 não equivale a P total. Médias inferiores aos limites propostos não demonstram conformidade de todas as amostras.

Obrigado!

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

AESABESP 40 Anos
Associação dos Engenheiros da Sabesp

Rafael Brito de Moura
rafael.moura@unifal-mg.edu.br
(35) 99904-3031
@rafaelbritomoura

Coautores

Ana Paula Felix
(35) 99762-0090

Alessandra Giordani
(35) 9899-2922

Duanny T. R. Caproni
(35) 9881-6941