Anais do Congresso Brasileiro de Iniciação Científica
(https://periodicos.unisanta.br/COB)

ISSN 2317-1316

AVALIAÇÃO DA TECNOLOGIA DE MICROBOLHAS DE OZÔNIO PARA A MELHORIA DA BALNEABILIDADE COSTEIRA: MODELAGEM CINÉTICA E SIMULAÇÃO DO DECAIMENTO BACTERIANO NO CANAL 4 (SANTOS-SP)

EVALUATION OF OZONE MICROBUBBLE TECHNOLOGY FOR COASTAL BATHING WATER QUALITY IMPROVEMENT: KINETIC MODELING AND SIMULATION OF BACTERIAL DECAY IN CANAL 4 (SANTOS-SP, BRAZIL)

Mariana Marques Schermack de Lima, Vinícius Lopes Camilo, Regina de Souza Ferreira, Alexandra Franciscatto Penteado Sampaio, Matheus Souza Ruiz

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Civil
E-mail para contato: marischermack@gmail.com

RESUMO – O fechamento preventivo das comportas do Canal 4 (Santos-SP) retém águas com alta carga de Enterococcus, cuja descarga na maré baixa degrada a balneabilidade das praias vizinhas. Este estudo diagnosticou a dinâmica temporal (2023–2025) e avaliou a desinfecção por microbolhas de ozônio na calha. A praia do Boqueirão registrou a maior impropriedade municipal (31,6% das semanas), associada às chuvas e à comporta do Canal 4 (fechada 79,6% do tempo; mediana: 15,2 h). No protótipo experimental de bancada com difusor poroso (10,0 L; 2.000 mg O_3/h), a inativação atingiu 93,1% aos 30 min e 98,8% aos 75 min, ajustando-se ao Modelo de Hom. O escalonamento volumétrico com difusores de microbolhas para a calha (5.400 m³; 5,0 kg O_3/h) indicou tempos de 1,1 h a 8,6 h, confirmando a viabilidade técnica dentro da retenção da comporta (15,2 h).

Palavras-chave: Saneamento costeiro; Microbolhas de ozônio; Cinética de inativação; *Enterococcus*; Modelo de Hom.

ABSTRACT – Preventive floodgate closures at Canal 4 (Santos-SP, Brazil) during high tides retain runoff with high Enterococcus loads, which may degrade adjacent beaches at low tide. This study analyzed temporal data (2023–2025) and evaluated ozone microbubble disinfection in the channel. Boqueirão showed the highest non-compliance (31.6% of weeks), possibly related to rainfall and Floodgate 4 operations (closed 79.6% of the year; 15.2 h median retention). In bench assays with a porous diffuser (10.0 L; 2,000 mg/h O_3), inactivation reached 93.1% at 30 min and 98.8% at 75 min, fitted by the Hom model. Direct volumetric scaling with microbubble diffusers for the channel (5,400 m³) with a benchmark capacity of 5.0 kg O_3/h indicated operation times of 1.1 h to 8.6 h, suggesting treatment can be completed within the floodgate retention window (15.2 h).

Keywords: Coastal sanitation; Ozone microbubbles; Inactivation kinetics; *Enterococcus*; Hom model.

ISSN 2317-1316

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização acelerada em zonas litorâneas intensificou a degradação da qualidade das águas superficiais e costeiras. O escoamento superficial urbano, agravado pela impermeabilização das bacias hidrográficas, atua como vetor de poluição difusa para o oceano, transportando matéria orgânica, sólidos suspensos e microrganismos patogênicos (Tucci, 2008). No município de Santos (SP), a rede de canais de macrodrenagem concebida no início do século XX pelo engenheiro Francisco Saturnino de Brito para o controle de inundações e saneamento da planície costeira (Brito, 1908) enfrenta o desafio de receber cargas difusas e contribuições clandestinas de esgoto doméstico, impactando a saúde pública e a balneabilidade das praias (Sampaio, 2010).

O Canal 4 (Avenida Siqueira Campos) exemplifica a complexidade dessa interação hidrometeorológica e costeira. A operação da comporta do Canal 4 instalada em sua extremidade na faixa de areia responde simultaneamente ao regime pluviométrico e às oscilações do nível do mar (Ruiz, 2016; Ribeiro et al., 2017). Durante episódios de preamar ou ressaca marítima, a comporta é mantida fechada para impedir o refluxo oceânico e o alagamento das vias urbanas. Nessas condições, o escoamento pluvial fica represado na calha do canal, acumulando bactérias do gênero Enterococcus, bioindicadores de referência para águas marinhas devido à resistência de sua parede celular Gram-positiva (CONAMA, 2000). Quando a maré entra em vazante e a comporta é aberta, o volume represado é descarregado na zona de arrebentação, o que possivelmente contribui para episódios recorrentes de impropriedade nas praias adjacentes do Boqueirão e do Embaré (CETESB, 2026).

Frente à limitação de espaço físico na malha urbana consolidada para a implantação de estações convencionais e às restrições ambientais do cloro em águas com matéria orgânica, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) baseados na injeção de ozônio (O_3) despontam como uma alternativa promissora para o tratamento in situ na própria calha de drenagem. O ozônio atua por oxidação molecular direta e pela geração secundária de radicais livres hidroxila, promovendo a inativação bacteriana sem gerar resíduos tóxicos persistentes (Von Gunten, 2003). Quando associado à tecnologia de microbolhas, o sistema aumenta a área de contato entre o gás e a água, elevando a transferência do oxidante e acelerando a desinfecção (Agarwal et al., 2011). Além disso, a matéria orgânica presente na drenagem consome o ozônio rapidamente, reduzindo a formação de subprodutos indesejados no ambiente costeiro.

ISSN 2317-1316

Considerando a hipótese de que a janela temporal de fechamento da comporta do Canal 4 proporciona tempo de detenção hidráulica suficiente para a desinfecção da calha confinada e que o decaimento de Enterococcus segue o Modelo Cinético de Hom (Hom, 1972), o presente estudo tem como objetivos: (i) diagnosticar a dinâmica temporal da contaminação no Canal 4 no triênio 2023–2025; (ii) avaliar experimentalmente a inativação de Enterococcus no protótipo experimental de bancada (10,0 L) com difusor de pedra porosa e gerador de ozônio de 2.000 mg/h ao longo de 75 minutos; (iii) calibrar os parâmetros cinéticos do Modelo de Hom com base nos resultados experimentais; e (iv) simular, por escalonamento volumétrico direto com difusores de microbolhas, o tempo de operação e a demanda de oxidante (adotando capacidade referencial de 5,0 kg de O_3/h) para desinfetar o volume confinado de 5.400 m³ do Canal 4 antes da abertura da comporta.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia combinou análises temporais, ensaios experimentais em batelada (escala de bancada) e modelagem cinética preditiva com escalonamento volumétrico direto. A área de estudo abrange a bacia do Canal 4 (Av. Siqueira Campos, Santos-SP), que possui cerca de 2,8 km de extensão e deságua entre as praias do Boqueirão e do Embaré (Figura 1).

Figura 1: Mapa de localização da bacia do Canal 4 e das estações de monitoramento hidrometeoceanográfico em Santos-SP, com destaque para o trecho de confinamento.



ISSN 2317-1316

Para o diagnóstico ambiental do triênio 2023–2025, integraram-se os dados oficiais de monitoramento de balneabilidade das praias de Santos fornecidos pela Prefeitura Municipal de Santos (Secretaria de Meio Ambiente / Seção de Controle de Balneabilidade – SECOMB) e pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2026), os registros pluviométricos das estações do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) acumulados em 24h, 48h e 72h, as séries de marés da Praticagem de Santos e do Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas (NPH-UNISANTA) e os relatórios operacionais da comporta do Canal 4 fornecidos pela Prefeitura Municipal de Santos.

Com base no mapeamento longitudinal de Enterococcus realizado por Massonetto (2020), delimitou-se como zona de projeto os últimos 900,0 m da calha a montante da comporta do Canal 4, simulando o isolamento hidráulico por uma comporta intermediária automatizada entre as ruas Bento de Abreu e Dr. Germano Melchert. O trecho apresenta largura média B = 4,0 m e lâmina d'água útil retida h = 1,50 m, totalizando um volume confinado de V = 5.400 m^3. Para os ensaios laboratoriais, utilizou-se uma calha experimental de bancada em acrílico com volume operacional de 10,0 L (50,0 cm × 10,0 cm × 20,0 cm de lâmina útil). A geração de oxidante foi realizada por gerador de ozônio de 2.000 mg de O_3/h acoplado a um difusor linear de pedra porosa de 40,0 cm de comprimento posicionado na base do protótipo experimental (recobrindo 80% do leito longitudinal da calha), gerando cortina ascendente homogênea de bolhas.

A coleta de água bruta foi realizada em 10/09/2026 às 10h30 no trecho final do Canal 4, durante evento de chuva contínua (acumulado de 35,3 mm no dia e 54,5 mm na véspera), sob maré baixa de 0,37 m e comporta aberta em regime ativo de descarga pluvial. Os parâmetros físico-químicos in situ foram monitorados com sonda multiparamétrica HORIBA U-50 (temperatura, pH, ORP, turbidez e oxigênio dissolvido) tanto na coleta matinal quanto nos intervalos do ensaio de ozonização (T0 a T75). A amostra foi analisada no Laboratório Central de Biologia da UNISANTA pelo método de filtração em membrana. O ensaio no protótipo experimental de bancada (10,0 L) operou sob injeção contínua de 2.000 mg/h de ozônio por difusor linear poroso, com alíquotas nos tempos de 30, 45, 60 e 75 minutos para quantificar a cinética de inativação frente à concentração inicial (T0), avaliada em triplicata.

Para a modelagem da cinética de inativação bacteriana, adotou-se o Modelo Cinético de Hom (Hom, 1972; Von Gunten, 2003), expresso em sua forma aparente pela Equação (1):

ISSN 2317-1316

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k' \cdot t^m \quad (1)$$

Na Equação (1), N e N_0 representam as densidades de Enterococcus nos instantes t e t = 0 (UFC/100 mL), k' é a constante cinética aparente de inativação (min^{-m}), t é o tempo de contato (min) e m é o expoente empírico de Hom (adimensional). O escalonamento volumétrico baseou-se na razão direta entre a bancada (V_b = 10,0 L) e o trecho confinado do Canal 4 (V_{canal} = 5.400 m^3), razão 1:540.000, projetando a massa de oxidante e os tempos de injeção em cinco cenários reais. Neles, o índice pluviométrico adotado corresponde ao acumulado diário de 24 horas (mm), enquanto a cota de maré reflete o instante de abertura da comporta para os eventos chuvosos (Cenários 2 a 5, em regime de vazante) e o nível retido na preamar durante o confinamento para o tempo seco (Cenário 1, comporta fechada).

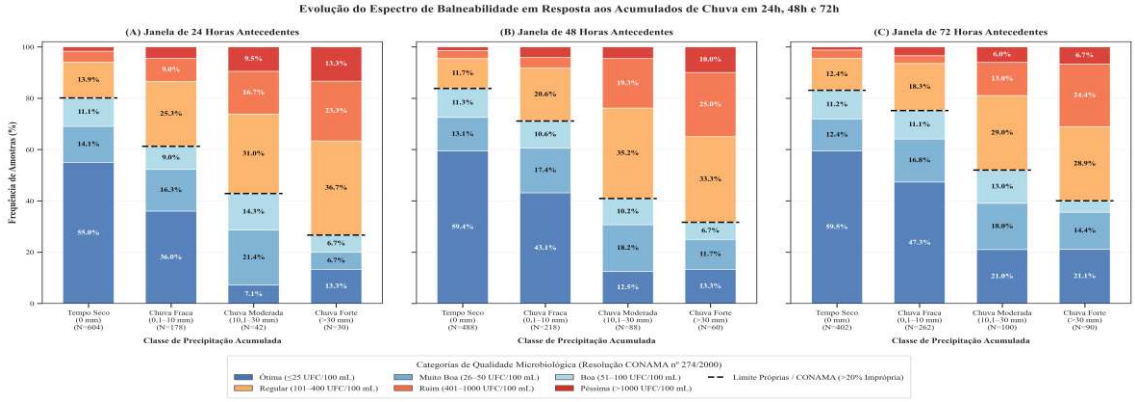
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação da balneabilidade em Santos (2023 – 2025) indicou que todas as praias monitoradas pela CETESB apresentaram médias de Enterococcus acima do padrão excelente ($\leqslant$ 25 UFC/100 mL da Resolução CONAMA nº 274/2000), variando de 25,93 UFC/100 mL na Aparecida a 39,12 UFC/100 mL na Pompeia. A praia do Boqueirão (lado oeste do Canal 4) destacou-se com 31,6% de semanas impróprias e média de 37,91 UFC/100 mL, frente a 23,4% (29,67 UFC/100 mL) no Embaré (lado leste). Esses dados evidenciam que a descarga da drenagem urbana pelo Canal 4 atua diretamente na balneabilidade local, configurando-se como uma expressiva fonte de contaminação bacteriana para as praias do Boqueirão e do Embaré.

A análise da balneabilidade por faixas de chuva acumulada (24h, 48h e 72h) sugere que as precipitações tendem a afetar diretamente a qualidade das praias (Figura 2). Em dias secos (0 mm; 604 amostras analisadas), a maioria dos testes atendeu ao padrão próprio (80,2%), mas 19,8% das amostras deram impróprias mesmo sem chuva, o que possivelmente decorre de ligações clandestinas de esgoto na rede pluvial (Almeida, 2025). Com chuvas moderadas (de 10 a 30 mm; 42 amostras), as semanas impróprias tornam-se mais frequentes (57,2%), atingindo 73,3% sob chuva forte (> 30 mm; 30 amostras). Os dados sugerem ainda efeito prolongado da contaminação: mesmo 72h após chuvas fortes, 60,0% das amostras continuavam impróprias.

ISSN 2317-1316

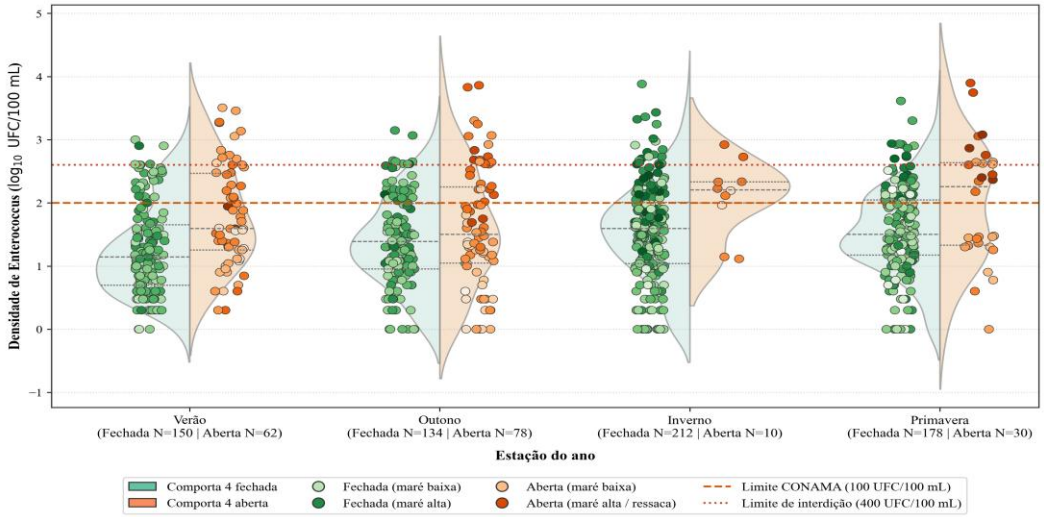
Figura 2: Frequência das classes CONAMA nº 274/2000 por faixa de precipitação acumulada em 24h, 48h e 72h nas praias adjacentes ao Canal 4.



A relação entre a presença de Enterococcus, o funcionamento da comporta do Canal 4 e os regimes de maré ao longo do ano é apresentada na Figura 3. No verão, chuvas frequentes e maior fluxo de turistas possivelmente intensificam a contaminação: quando a comporta se abre (62 vezes registradas), as bactérias tendem a ultrapassar o limite próprio (100 UFC/100 mL), atingindo níveis de interdição (400 UFC/100 mL). No outono, a comporta abriu 78 vezes com frentes frias, enquanto no inverno o período seco manteve a estrutura fechada na maior parte das semanas (212 fechada contra 10 aberta), o que possivelmente favorece a qualidade da água nos padrões próprios. Nota-se, ainda, que o deslocamento das distribuições para concentrações mais altas é um padrão que se repete independentemente da estação quando há abertura de comporta. Em termos operacionais, a comporta fecha preventivamente com a elevação do nível do mar (preamar e ressacas) para conter o refluxo oceânico; na maré baixa com chuva, a abertura tende a liberar a água acumulada de uma só vez em direção ao Boqueirão (Ruiz, 2016). Essa retenção forçada pela maré alta viabiliza a implementação de um plano de desinfecção in situ por microbolhas de ozônio durante a janela de fechamento da estrutura.

ISSN 2317-1316

Figura 3: Densidade sazonal de Enterococcus (log_{10} UFC/100 mL) por status operacional da comporta do Canal 4 (aberta vs. fechada), regimes de maré e limites da Resolução CONAMA nº 274/2000.



A caracterização operacional do regime de confinamento hidráulico da comporta do Canal 4 no triênio 2023–2025 é apresentada na Tabela 1. Nesse diagnóstico, o termo "confinamento" designa a retenção hidráulica das águas na calha quando a comporta instalada na faixa de areia permanece preventivamente fechada, contendo o refluxo oceânico durante preamares e ressacas marinhas. Por sua vez, cada "evento fechado" corresponde ao ciclo operacional contínuo em que a comporta é mantida fechada até a sua subsequente reabertura na maré vazante. Os registros indicam que a estrutura permaneceu em confinamento durante 79,6% do período total (20.928 h), com elevada consistência anual (78,1% em 2023, 81,1% em 2024 e 79,5% em 2025). A duração média de cada evento fechado foi de 20,4 h, enquanto a mediana foi de 15,2 h por ciclo (variando de 14,0 h a 16,5 h entre os anos), estabelecendo a janela temporal típica de detenção hidráulica. Em condições severas de maré meteorológica e ressacas prolongadas, o tempo máximo contínuo de confinamento atingiu 96,0 h (4 dias ininterruptos). Essa dinâmica comprova que a calha retida proporciona tempo de contato amplamente superior ao demandado para a desinfecção in situ por ozônio antes do deságue na praia do Boqueirão.

Tabela 1: Métricas operacionais de confinamento hidráulico da comporta do Canal 4 no triênio 2023–2025

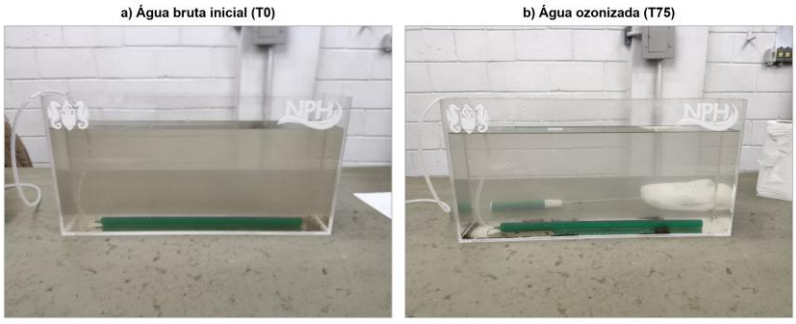
Métrica Operacional de Confinamento	2023	2024	2025	Triênio (Geral)
Total de horas em confinamento (h)	6.840	7.128	6.960	20.928
Percentual de tempo em confinamento (%)	78,1%	81,1%	79,5%	79,6%
Duração média por evento fechado (h)	18,4	22,6	20,1	20,4
Duração mediana por evento fechado (h)	14,0	16,5	15,0	15,2
Tempo máximo contínuo de confinamento (h)	72,0	96,0	84,0	96,0

ISSN 2317-1316

Os ensaios no protótipo de bancada (10,0 L e injeção de 2.000 mg/h de O_3) constam na Tabela 2 e Figura 4. A água bruta coletada no Canal 4 durante descarga sob chuva (T_0), avaliada em triplicata direta sem diluição (355, 238 e 144 UFC/100 mL), apresentou média de 245,7 ± 105,7 UFC/100 mL (faixa Imprópria > 100 UFC/100 mL). O ponto amostral de 15 minutos (T_{15} – 0,5 g O_3) não foi realizado devido a intercorrências operacionais durante o ensaio, iniciando-se a quantificação microbiológica aos 30 minutos (T_{30} a T_{75}) para a caracterização da curva de inativação.

Aos 30 minutos de ozonização (T30; 1,0 g O_3), observou-se expressiva inativação: a contagem caiu para 17 UFC/100 mL (eliminação de 93,1%; 1,16 $\log_{10}$), enquadrando a água tratada na classe Excelente (≤ 25 UFC/100 mL) da Resolução CONAMA nº 274/2000 (Figura 5a). Essa oxidação rápida é evidenciada pelo ORP da sonda HORIBA U-50, que passou de +123 mV na água bruta para +178 mV em T0, saltando para +328 mV em T30, +316 mV em T45, +363 mV em T60 e culminando em +364 mV em T75 (+104,5% frente a T0), comprovando ambiente fortemente oxidante ativo contínuo. Em seguida, verificou-se contagem de 48 UFC/100 mL em T45 (80,5%) e 40 UFC/100 mL em T60 (83,7%), mantendo a classe Muito Boa (≤ 50 UFC/100 mL). Esse comportamento correlaciona-se com a turbidez registrada pela sonda: de 34,3 NTU em T0, elevou-se para 61,9 NTU em T30 (+80,5%) pela desagregação mecânica de microflocos pelo borbulhamento gasoso, estabilizando em 60,7 NTU (T45) e recuando para 27,6 NTU em T60 e 36,5 NTU em T75, evidenciando oxidação e clarificação frente à turbidez bruta do canal (157,0 NTU). Ao final de 75 minutos (T75; 2,5 g O_3), a contagem atingiu 3 UFC/100 mL (98,8%; 1,91 $\log_{10}$). A Figura 5b indica inativação superior a 80% em todos os tempos e acima de 90% em T30 e T75.

Figura 4: Aspecto visual da água do Canal 4 no protótipo experimental de bancada: a) água bruta inicial (T_0); b) água ozonizada após 75 minutos de ozonização contínua (T_{75}).

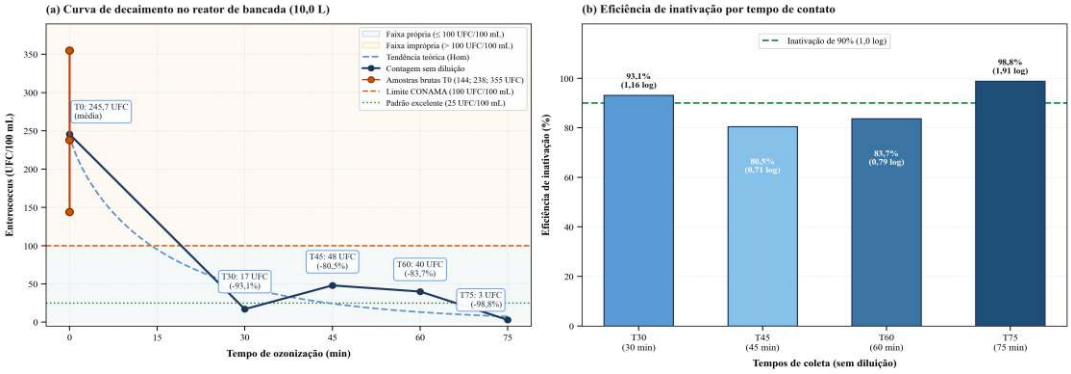


ISSN 2317-1316

Tabela 2: Resultados microbiológicos e parâmetros físico-químicos in situ (Sonda HORIBA U-50) no ensaio de bancada (10,0 L; 2.000 mg/h)

Tempo / Amostra	Enterococcus (UFC/100 mL)	Inativação (% / log_{10})	CONAMA nº 274/00	Turbidez (NTU)	pH	ORP (mV)	OD (mg/L)
Água bruta canal (manhã)*	355 / 238 / 144	—	Imprópria	157,0	7,89	+123	9,94
T0 (início bancada)	245,7 ± 105,7	0,0% (0,00)	Imprópria	34,3	8,81	+178	9,01
T15 (15 min – 0,5 g O_3)	—	—	Não realizado	—	—	—	—
T30 (30 min – 1,0 g O_3)	17	93,1% (1,16)	Excelente	61,9	8,63	+328	10,31
T45 (45 min – 1,5 g O_3)	48	80,5% (0,71)	Muito Boa	60,7	8,67	+316	10,07
T60 (60 min – 2,0 g O_3)	40	83,7% (0,79)	Muito Boa	27,6	8,74	+363	9,67
T75 (75 min – 2,5 g O_3)	3	98,8% (1,91)	Excelente	36,5	8,70	+364	10,18

Figura 5: Concentração de Enterococcus e inativação percentual ao longo do tempo no protótipo experimental de bancada (10,0 L; 2.000 mg/h).



Os dados do ensaio de bancada foram avaliados por modelos matemáticos de desinfecção, e o Modelo de Hom (Equação 2) foi o que apresentou melhor aderência aos resultados experimentais. O modelo alcançou coeficiente de determinação $R^2 = 0,9452$ (sugerindo que ele explica 94,5% da variação observada nos testes), mostrando-se superior ao ajuste linear de Chick-Watson ($R^2 = 0,9306$). Os parâmetros calibrados foram k' = 0,1058 $min^{-0,8108}$ e m = 0,8108, conforme a Equação (2):

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -0,1058 \cdot t^{0,8108} \quad (2)$$

O valor de m = 0,8108 < 1 (Figura 6a) sugere que a desinfecção tende a desacelerar ao longo do tempo, o que possivelmente ocorre porque parte do ozônio é consumida pela matéria orgânica e algumas bactérias podem ficar protegidas por partículas suspensas (Hom, 1972; Von Gunten, 2003). Com base nessa cinética, simulou-se a aplicação em escala real no trecho final do Canal 4 (5.400 m^3). Na bancada (10,0 L), o difusor convencional gerou perda de gás, aproveitando possivelmente cerca de 10 a 15% do ozônio (Langlais et al., 1991). Na escala real,

ISSN 2317-1316

difusores industriais de microbolhas tendem a elevar a dissolução para mais de 85% (Agarwal et al., 2011), viabilizando dosagens entre 1,0 e 8,0 mg/L de ozônio (Metcalf & Eddy, 2016; Von Gunten, 2003). As dosagens adotadas acompanham a elevação da carga bacteriana e da matéria orgânica carreada pelas chuvas nos cinco cenários (1,0 a 8,0 mg/L), tendo como base a dose de 2,0 mg/L validada em bancada para a água do canal (Cenário 2). A quantidade de ozônio (MO_3, em kg) e o tempo de injeção (top, em h) para um gerador referencial de 5,0 kg/h são obtidos pelas Equações (3) e (4), estruturados na Tabela 3 a partir da precipitação acumulada em 24h e das cotas maregráficas registradas na operação da comporta:

$$M_{O_3} = V_c \cdot D = 5400 \cdot D/1000 \tag{3}$$

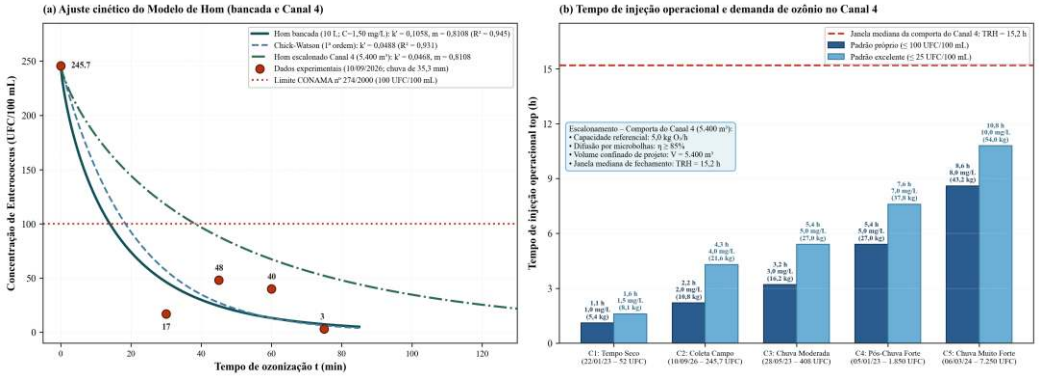
$$t_{op} = \frac{M_{O_3}}{Q_{O_3}} = M_{O_3}/5{,}0 \tag{4}$$

Tabela 3: Escalonamento da demanda de ozônio e tempo de injeção no Canal 4 (5.400 m³; 5,0 kg de O_3/h) em função de cenários reais de monitoramento e retenção da comporta (15,2 h)

Cenário Operacional (Evento / Origem)	Chuva 24h (mm)	Maré (m)	Status da Comporta	N₀ Inicial (UFC/100 mL)	Dose e Massa O_3 (mg/L | kg)	Tempo t_{op} (h)	% TRH Comporta (mediana: 15,2 h)
C1: 22/01/23 CETESB – Seco	0,0	0,70	Fechada	52,0	1,0 mg/L (5,4 kg)	1,1 h	7,2% (folga: 14,1 h)
C2: 10/09/26 UNISANTA – Campo	35,3	0,37	Aberta	245,7	2,0 mg/L (10,8 kg)	2,2 h	14,2% (folga: 13,0 h)
C3: 28/05/23 CETESB – Moderada	22,0	0,96	Aberta	408,0	3,0 mg/L (16,2 kg)	3,2 h	21,3% (folga: 12,0 h)
C4: 05/01/23 SECOMB – Forte	46,6	0,86	Aberta	1.850,0	5,0 mg/L (27,0 kg)	5,4 h	35,5% (folga: 9,8 h)
C5: 06/03/24 SECOMB – Muito forte	71,5	1,13	Aberta	7.250,0	8,0 mg/L (43,2 kg)	8,6 h	56,8% (folga: 6,6 h)

ISSN 2317-1316

Figura 6: Ajuste cinético do Modelo de Hom em bancada (10,0 L) e escalonamento volumétrico no Canal 4 (5.400 m³; gerador de 5,0 kg O₃/h) frente à janela da comporta do Canal 4 (15,2 h).



A Tabela 3 e a Figura 6b indicam a viabilidade técnica do tratamento com ozônio no Canal 4 durante o fechamento da comporta. A linha tracejada vermelha na Figura 6b demarca a retenção típica da estrutura (mediana de 15,2 h). No Cenário 1 (tempo seco; 52,0 UFC/100 mL), estimam-se apenas 1,1 h de injeção (5,4 kg de O_3) para atingir o padrão próprio com folga de 14,1 h (ou 1,6 h para Excelente). No Cenário 2 (coleta sob chuva; 245,7 UFC/100 mL), requerem-se 2,2 h (10,8 kg de O_3) com folga de 13,0 h (ou 4,3 h para Excelente). Nos Cenários 3 e 4 (chuva moderada e pós-chuva forte), os tempos foram de 3,2 h e 5,4 h (folgas de 12,0 h e 9,8 h). Sob chuva muito forte (Cenário 5; 7.250,0 UFC/100 mL), demandam-se 8,6 h para padrão próprio e 10,8 h para excelente, mantendo folga operacional mínima de 4,4 h frente às 15,2 h de retenção. Esses resultados confirmam a capacidade de desinfecção in situ antes do deságue, protegendo a balneabilidade do Boqueirão e Embaré.

4 CONCLUSÃO

O diagnóstico do triênio 2023–2025 indicou que a praia do Boqueirão (Canal 4) apresentou a maior frequência de impropriedade em Santos (31,6% das semanas), influenciada pelas chuvas e pelo fechamento preventivo da comporta durante marés altas (retida em 79,6% do tempo; mediana de 15,2 h). Os ensaios de bancada com difusor poroso (10,0 L; 2.000 mg/h de O_3) apontaram inativação de 93,1% aos 30 min e 98,8% aos 75 min, confirmando ambiente fortemente oxidante pela elevação do ORP da sonda (+178 a +364 mV) e excelente ajuste ao Modelo de Hom (R^2 = 0,9452; k' = 0,1058 $min^{-0,8108}$; m = 0,8108). O escalonamento volumétrico com microbolhas para o volume confinado de 5.400 m³ (gerador referencial de 5,0 kg de O_3/h) sugeriu tempos de desinfecção de 1,1 h em tempo seco (5,4 kg O_3), 2,2 h sob chuva contínua (10,8 kg O_3) e 8,6 h sob chuva muito forte (43,2 kg O_3; ou 10,8 h para padrão

ISSN 2317-1316

excelente), ocupando de 7,2% a 71,1% da janela da comporta e confirmando a viabilidade técnica preliminar do tratamento in situ. Os autores agradecem à UNISANTA, ao Laboratório Central de Biologia, ao NPH-UNISANTA e à Prefeitura de Santos pelo fornecimento dos dados. Como trabalhos futuros, planeja-se novos ensaios contemplando o tempo T15, visando refinar a modelagem para escala piloto.

5 DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Não foram utilizadas ferramentas de IA no desenvolvimento desse artigo.

6 REFERÊNCIAS

Agarwal A, Ng WJ, Liu Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. Chemosphere. 2011;84(9):1175-80.

Almeida AAA. Análise da qualidade das águas dos canais de drenagem pluvial de Santos (São Paulo, Brasil) e a sua influência na balneabilidade das praias durante eventos de precipitação [dissertação de mestrado]. Santos: Universidade Santa Cecília; 2025. 56 p.

Brito FS. Memória sobre as obras de saneamento de Santos. Santos: Tipografia do Diário de Santos; 1908.

CETESB. Qualidade das Praias Litorâneas do Estado de São Paulo: Relatório de Balneabilidade. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; 2026.

CONAMA. Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Brasília, DF: Diário Oficial da União; 2000.

Hom LW. Kinetics of chlorine disinfection in an ecosystem. Journal of the Sanitary Engineering Division. 1972;98(1):183-94.

Langlais B, Reckhow DA, Brink DR. Ozone in water treatment: application and engineering. Chelsea: Lewis Publishers; 1991.

Massonetto M. Monitoramento da resistência de bioindicadores fecais nos canais de Santos-SP [dissertação de mestrado]. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista (UNESP); 2020.

Metcalf & Eddy. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH; 2016.

Ribeiro RB, Leitão PC, Sampaio AFP. Modelagem como ferramenta de gestão visando a qualidade da água balnear. In: Anais do 29º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental; 2017; São Paulo. São Paulo: ABES; 2017.

Ruiz MS. Estudo comparativo do impacto da poluição difusa na balneabilidade das praias localizadas nas baías de Santos e de São Vicente [trabalho de conclusão de curso]. Santos: Universidade Santa Cecília; 2016.

Sampaio AFP. Avaliação da correlação entre parâmetros de qualidade da água e socioeconômicos no complexo estuarino de Santos-São Vicente, através de modelagem numérica ambiental [dissertação de mestrado]. São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo; 2010. 171 p.

ISSN 2317-1316

Santos. Prefeitura Municipal de Santos. Relatório operacional da comporta do Canal 4: triênio 2023–2025 [relatório técnico]. Santos: Secretaria de Meio Ambiente; 2025.

Tucci CEM. Drenagem urbana. Porto Alegre: Editora da UFRGS; 2008.

Von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. Water Research. 2003;37(7):1443-67.