

Avaliação da contaminação microbiológica em curso d'água intermitente no Parque Nacional de Jericoacoara, Ceará: influência dos efluentes provenientes de estação de tratamento de esgoto

Jardielen Chaves Sousa^[1], Antonio Lucas Rocha Santos^[2], Cassiano Ricardo de Souza^[3], Edmo Montes Rodrigues^{[4]*}

^[1] jardielen.chaves.sousa04@aluno.ifce.edu.br, ^[2] antonio.lucas.rocha62@aluno.ifce.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Camocim, Ceará, Brasil

^[3] cassiano.ricardo@ifce.edu.br, ^[4] edmo.rodrigues@ifce.edu.br. Departamento de Ensino, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Camocim, Ceará, Brasil

* autor correspondente

Resumo

A Vila de Jericoacoara, localizada no município de Jijoca de Jericoacoara, Ceará, e a estação de tratamento de esgoto (ETE) local estão situadas próximas ao Parque Nacional de Jericoacoara. O esgoto tratado pela ETE é descarregado no solo arenoso para percolação, o que pode resultar em contaminação do solo e da água subterrânea. Durante a estação chuvosa, a saturação do solo dificulta a percolação do efluente tratado, fazendo com que este adentre o parque e forme um curso d'água intermitente que, ao se unir a outros fluxos, deságua no mar após atravessar a área posterior à Duna do Pôr do Sol, um ponto turístico local. Para avaliar a qualidade microbiológica do efluente que adentra o parque, amostras de água foram coletadas ao longo de seis meses, abrangendo parte das estações chuvosa e seca, em três pontos a jusante. Foram realizadas análises físico-químicas de pH e condutividade elétrica em quinze amostras de água, além de análises microbiológicas utilizando a técnica de fermentação em tubos múltiplos para determinar o número mais provável (NMP) de coliformes totais e termotolerantes. Os resultados indicaram que os valores de pH e condutividade variaram conforme o volume de chuvas na região. Os dados microbiológicos apontaram para a presença de mais de $2,0 \times 10^6$ NMP de coliformes termotolerantes por 100 mL de água efluente, tanto na estação seca quanto na chuvosa, sugerindo que a ETE é uma fonte significativa de contaminação microbiológica no parque. Durante a estação chuvosa, essa contaminação tende a se disseminar na unidade de conservação devido à saturação do solo e à formação de cursos d'água. A presença de contaminação microbiológica representa riscos de infecções microbianas e parasitárias para visitantes e espécies locais, além de comprometer a função legal da unidade de conservação federal. Este estudo é pioneiro ao demonstrar a ocorrência de contaminação microbiológica na área do Parque Nacional de Jericoacoara.

Palavras-chave: balneabilidade; coliformes termotolerantes; risco ambiental; unidade de conservação.

Evaluation of microbiological contamination in an intermittent watercourse in Jericoacoara National Park, Ceará: influence of effluents from a sewage treatment plant

Abstract

The village of Jericoacoara, located in the municipality of Jijoca de Jericoacoara, Ceará, and the local wastewater treatment plant (WWTP) are situated adjacent to the Jericoacoara National Park. The treated wastewater from the WWTP is discharged onto sandy soil for percolation, which may lead to soil and groundwater contamination. During the rainy season, soil saturation hampers the percolation of treated effluent, causing it to enter the park and form an intermittent stream that, merging with other flows, empties into the sea after passing through the area behind the Sunset Dune, a local tourist attraction. To assess the microbiological quality of the effluent entering the park, water samples were collected over six months, covering part of both the rainy and dry seasons, at three downstream points. Fifteen water samples were subjected to physicochemical analyses of pH and electrical conductivity, as well as microbiological analyses using the multiple-tube fermentation technique to determine the most probable number (MPN) of total and thermotolerant coliforms. The results indicated that pH and conductivity values varied according to the volume of rainfall in the

region. Microbiological data showed the presence of more than 2.0×10^6 MPN of thermotolerant coliforms per 100 mL of effluent water during both dry and rainy seasons, suggesting that the WWTP is a significant source of microbiological contamination entering the park. During the rainy season, this contamination tends to spread throughout the conservation unit due to soil saturation and the formation of watercourses. Microbiological contamination poses risks of microbial and parasitic infections to visitors and local species, thus compromising the legal function of the federal conservation unit. This study is the first to demonstrate the occurrence of microbiological contamination in the Jericoacoara National Park area.

Keywords: bathing water quality; conservation unit; environmental risk; thermotolerant coliforms.

1. Introdução

A gestão de resíduos urbanos constitui uma das principais preocupações ambientais em escala global (Parde; Behera, 2023). Águas residuais ou efluentes domésticos são matrizes complexas que contêm elevadas concentrações de sólidos, matéria orgânica, micro-organismos, nutrientes orgânicos e inorgânicos, compostos recalcitrantes, metais pesados e micropoluentes (Lima *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2019; Rout *et al.*, 2021; Warwick; Guerreiro; Soares, 2013). A urbanização promove o aumento do volume de águas residuais geradas, que são fontes de patógenos, representando riscos à saúde das comunidades que residem ou frequentam áreas próximas ao local de deposição, além de ter o potencial de alterar as características dos ambientes naturais (Oliveira *et al.*, 2021; Teixeira *et al.*, 2024). De acordo com Henze e Ledin (2001), águas residuais contêm bactérias patogênicas, vírus, ovos de vermes, óleos, gorduras, solventes, bem como elevadas concentrações de compostos nitrogenados, fosfatados e sulfurados, além de metais pesados como mercúrio, chumbo, cádmio, cromo, cobre e níquel. Entre os patógenos mais prevalentes estão os vírus entéricos, bactérias entéricas, protozoários parasitas e helmintos, refletindo as doenças mais comuns na comunidade (Gerardi; Zimmerman, 2004).

Em alguns processos de tratamento de águas residuais, são gerados lodos ativados que podem ser utilizados como fertilizantes na agricultura, o que constitui uma das melhores alternativas para sua disposição (Rathod *et al.*, 2009; Zuloaga *et al.*, 2013). Por outro lado, a disposição inadequada de águas residuais pode resultar na disseminação de micro-organismos patogênicos, bem como na contaminação por compostos químicos do lençol freático e de ambientes aquáticos que recebam diretamente os efluentes (Edokpayi; Odiyo; Durowoju, 2017).

O crescimento populacional e as atividades humanas associadas tendem a aumentar o volume de águas residuais que chegam às estações de tratamento de esgoto (Drozdova *et al.*, 2018; Qadir *et al.*, 2020). Nesse contexto, o crescimento das atividades turísticas em unidades de conservação nacionais gera preocupações quanto à readequação e dimensionamento das estações de tratamento de esgoto situadas nas proximidades das unidades de proteção integral. A população flutuante, decorrente do fluxo turístico em determinadas épocas do ano, faz com que o volume de efluentes gerados seja significativamente maior, constituindo um desafio para o sistema de saneamento local (Muniz, 2022; Obaid *et al.*, 2014).

Diante desse cenário, os órgãos fiscalizadores, assim como o Ministério do Meio Ambiente e o Ministério do Turismo, devem estar atentos ao crescimento da atividade turística nas Unidades de Conservação (UCs). Atualmente, o turismo em Parques Nacionais representa 45% de todo o volume de visitantes recebidos em unidades de conservação no Brasil. O Parque Nacional de Jericoacoara corresponde a 12,6% de todas as visitas realizadas nas UCs. Em 2023, as Unidades de Conservação receberam mais de 11,8 milhões de visitantes, alcançando um recorde histórico no país (ICMBIO, 2024).

O Parque Nacional de Jericoacoara, criado pelo Decreto Federal de 4 de fevereiro de 2002, está localizado no oeste do estado do Ceará e abrange os municípios de Camocim, Cruz e Jijoca de Jericoacoara, totalizando 88,63 km². A gestão do parque é realizada pelo ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. A área do parque é composta por praias, mangues, restingas, lagoas e dunas (ICMBIO, 2009). Circundando a área do parque estão a Vila de Jericoacoara e uma área onde se encontra a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Jericoacoara, administrada pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE).

O abastecimento de água para consumo humano na Vila de Jericoacoara é realizado exclusivamente por meio da captação de água subterrânea, que ocorre de forma direta em poços tubulares ou de forma indireta pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), a qual capta a água nos poços tubulares, realiza o tratamento e a distribui. Na área da vila, o lençol freático é do tipo subaflorante, característica que o torna mais suscetível à contaminação devido à interferência direta do uso e ocupação do solo (Forte; Abreu, 2017). A Vila de Jericoacoara possui aproximadamente 3 mil residentes permanentes e recebe, em média, 6 mil visitantes por dia. Em períodos de maior demanda turística, estima-se um fluxo de cerca de 120 mil turistas mensais, como registrado em julho de 2018 (CEARÁ, 2019). Esse cenário evidencia o desafio enfrentado pela CAGECE devido à significativa variação no volume de efluentes gerados pela população flutuante. Nesse contexto, configura-se uma situação única no território brasileiro, onde o tratamento de águas residuais é realizado por uma estação de tratamento de esgoto (ETE), com posterior disposição dos efluentes no solo, nas proximidades de um parque nacional.

Segundo a CAGECE (2020), até 2020, a coleta de esgoto na vila alcançava cerca de 90% de cobertura, com um total de 1.655 ligações à rede coletora. A estação de tratamento em funcionamento é composta por tratamento preliminar por grade e caixa de areia, medidor Parshall e estação elevatória, seguido de dois módulos compostos por dois digestores anaeróbios de fluxo ascendente e filtros aerados submersos, dois decantadores lamelares, um leito de secagem de lamas e um tanque de contato para desinfecção com hipoclorito de sódio. Após o tratamento pela ETE, os efluentes são lançados diretamente sobre o solo, sem nenhum curso de água identificável, resultando em encharcamento de parte dos solos dentro da área da ETE, evaporação de parte do efluente e percolação de outra porção no solo ao longo do ano. De acordo com Braga (2018), o aquífero local é do tipo poroso, sendo considerado de média a alta vulnerabilidade à contaminação, segundo o método GOD (*G – Groundwater occurrence; O – Overall aquifer class; D – Depth to groundwater*) (Foster; Hirata, 1988).

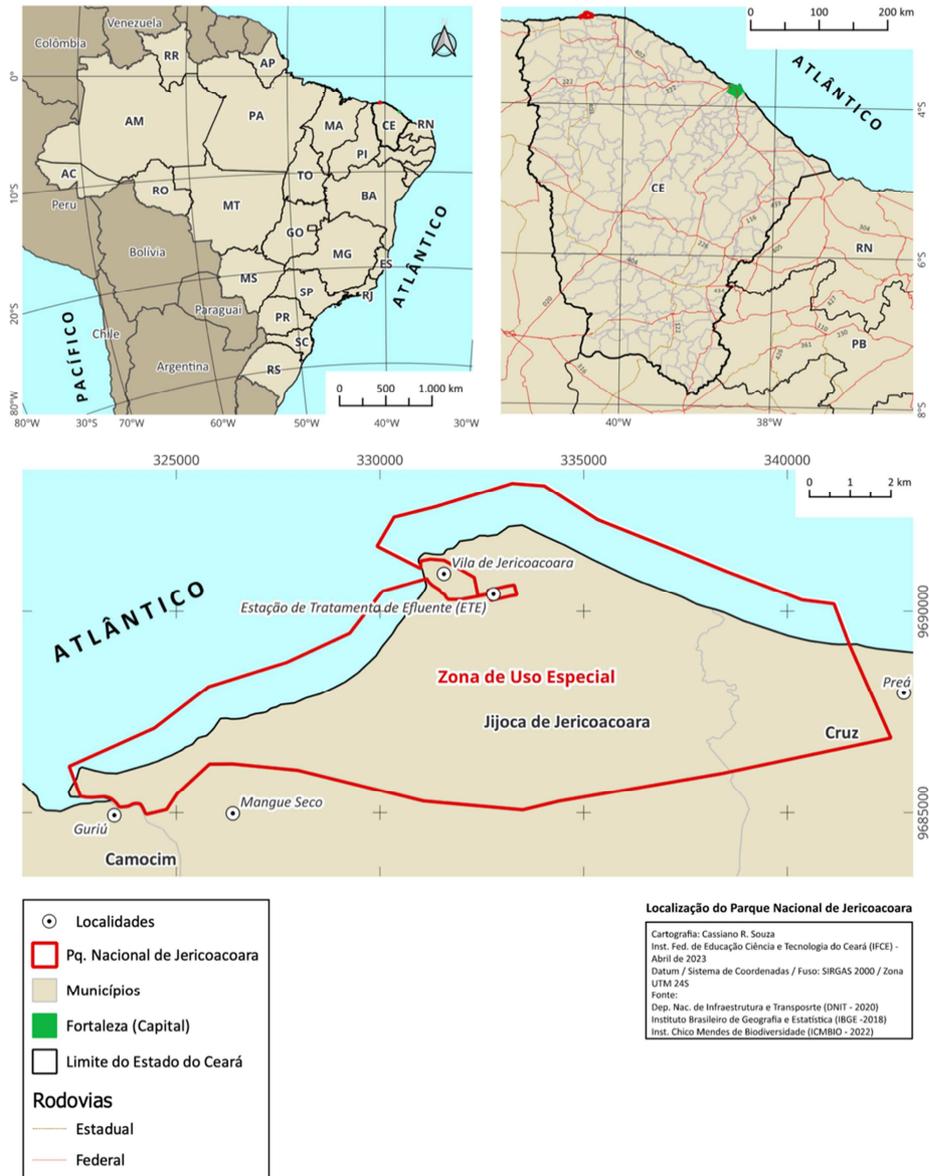
Com uma média anual de precipitação superior a 900 mm, segundo a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2024), entre janeiro e junho, período considerado chuvoso, o solo torna-se saturado devido aos elevados volumes de precipitação e à baixa capacidade de infiltração pela precipitação antecedente. A saturação de água no solo dificulta a percolação do efluente tratado pela ETE, o que, juntamente com a baixa declividade do terreno, aumenta o tempo de residência do material aquoso na superfície, ocasionalmente extrapolando para a área da unidade de conservação. O objetivo do presente estudo foi caracterizar o material aquoso que ultrapassa a área da ETE e adentra o Parque Nacional de Jericoacoara, verificando os possíveis riscos à saúde dos visitantes e à qualidade ambiental da unidade de conservação.

No restante deste artigo, a Seção 2 aborda a metodologia empregada, na qual são realizadas análises físico-químicas e microbiológicas a partir das amostras de água coletadas em diferentes locais e períodos. Em seguida, a Seção 3 apresenta os resultados obtidos e a respectiva discussão com base nessas análises. Por fim, a Seção 4 traz as conclusões referentes à temática ambiental estudada.

2 Metodologia

O estudo foi conduzido na área do Parque Nacional de Jericoacoara, localizado no noroeste do estado do Ceará (Figura 1), entre os meses de março e setembro de 2023, sob a autorização SISBIO nº 80418-3. Amostras de água foram coletadas em quatro pontos na área da unidade de conservação nos meses de março a maio. Nos meses de julho, agosto e setembro, as amostras foram obtidas apenas no Ponto 1 (Figura 2), devido ao fato de os demais pontos apresentarem escoamento de água apenas durante a estação chuvosa, que ocorre no primeiro semestre do ano.

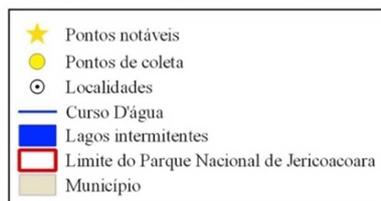
Figura 1 – Localização geográfica do Parque Nacional de Jericoacoara e da Vila de Jericoacoara, Ceará, Brasil



Fonte: elaborado pelos autores

Figura 2 – Delimitação da área da Vila de Jericoacoara, da Estação de Tratamento de Esgoto e do Parque Nacional de Jericoacoara com indicação dos pontos de coleta de água para análises físico-químicas e microbiológicas

Revisão



Ponto	Coord. X	Coord. Y
P1	332840,58	9690280,38
P2	332613,37	9690011,20
P3	331920,93	9690231,19
P4	330882,36	9690046,43

Pontos de coleta de água p/ análise físico-química e microbiológica
PARNA Jericoacoara - Ceará - CE

Cartografia: Cassiano R. Souza
 Inst. Fed. de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Julho de 2023
 Datum / Sistema de coordenadas / Fuso: SIRGAS 2000 / UTM / 24S
 Fonte:
 Dep. Nac. de Infraestrutura e Transporte (DNIT - 2020)
 Imagens Google Earth - 15/04/2023
 Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE - 2018)
 Inst. Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBIO - 2022)
 Pesquisa de campo (pontos de coleta de água)
 Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA - 2022)

Fonte: elaborado pelos autores

O Ponto 1 (P1) foi estabelecido como o limite entre a área da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) e o Parque Nacional de Jericoacoara, local onde ocorre a extrapolação de material líquido resultante da disposição de efluentes no solo da ETE para o interior da unidade de conservação. Após adentrar a área do parque, forma-se um pequeno curso d'água intermitente, que se junta a outros fluxos de água provenientes da drenagem natural do parque (Figura 2). Ao longo desse curso d'água, foram definidos mais três pontos de coleta, denominados P2, P3 e P4, sendo que o P4 está localizado na base posterior da Duna do Pôr do Sol, a poucos metros do local onde o curso d'água deságua no mar, influenciado pelas marés altas. Esses quatro pontos foram selecionados para proporcionar uma avaliação abrangente e representativa da carga microbiana ao longo do curso d'água, conforme metodologia aplicada por Amisah e Nuamah (2014). As amostras de água foram coletadas em frascos estéreis de borosilicato, resfriadas imediatamente (entre 4 °C e 10 °C) e transportadas para o Instituto

Federal do Ceará (IFCE) campus Camocim, onde foram realizadas as análises no prazo máximo de 6 horas após a coleta.

Para as amostras obtidas nos meses de março, abril e maio, foram determinados os valores médios de pH (leituras realizadas em triplicata) por meio de pHmetro de bancada digital (LUCA210 – LUCADEMA) e de condutividade elétrica, utilizando-se condutivímetro-salinômetro de bancada (AT 255 – ALFAKIT), ao longo dos pontos P1, P2, P3 e P4 para todos os momentos amostrais.

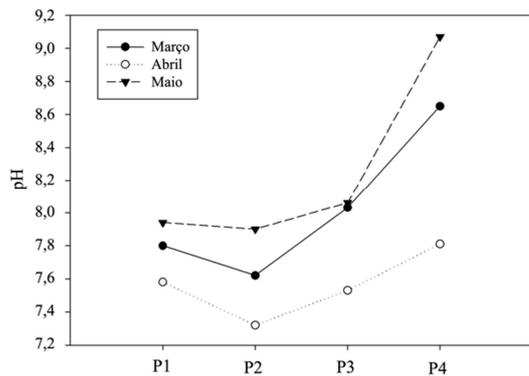
A determinação dos coliformes totais e termotolerantes foi realizada para todas as amostras seguindo-se o método dos tubos múltiplos conforme metodologia descrita pela *American Public Health Association* (APHA, 2005). Alíquotas de 1 mL de amostra foram previamente submetidas a diluições seriadas em solução salina estéril (NaCl 0,9%) de 10^{-1} a 10^{-3} . Em seguida foram realizados testes presuntivos utilizando-se tubos contendo caldo lactosado (TM Media[®]), contendo tubo de Durham invertido para a verificação da produção de gás, que foram inoculados com alíquotas de 1 mL das amostras diluídas e incubados em incubadora DBO por até 48h a 35 °C. Tubos que apresentaram turvação com produção de gás foram classificados como positivos. Em seguida seus conteúdos foram utilizados como inóculos (com inoculação por meio de alça de platina) para testes confirmativos utilizando-se tubos contendo caldo verde brilhante 2% (TM Media[®]) e caldo EC (TM Media[®]) para a detecção de coliformes totais e termotolerantes, respectivamente. Incubações em incubadora DBO ocorreram por até 48 horas a 35 °C para a detecção de coliformes totais e 24 horas a 44,5 °C para a detecção de coliformes termotolerantes, todos contendo tubo de Durham invertido para a verificação da produção de gás. As análises foram realizadas pelo método do número mais provável e expressas em NMP/100 mL.

A determinação dos coliformes totais e termotolerantes foi realizada em todas as amostras, seguindo o método dos tubos múltiplos, conforme a metodologia descrita pela *American Public Health Association* (APHA, 2005). Alíquotas de 1 mL das amostras foram submetidas a diluições seriadas em solução salina estéril (NaCl 0,9%) de 10^{-1} a 10^{-3} . Em seguida, foram realizados testes presuntivos em tubos contendo caldo lactosado (TM Media[®]), com tubo de Durham invertido para verificação da produção de gás. Esses tubos foram inoculados com alíquotas de 1 mL das amostras diluídas e incubados em incubadora DBO por até 48 horas a 35 °C. Tubos que apresentaram turvação com produção de gás foram classificados como positivos. Posteriormente, seus conteúdos foram utilizados como inóculos (por meio de alça de platina) para testes confirmativos, em tubos contendo caldo verde brilhante 2% (TM Media[®]) e caldo EC (TM Media[®]), para detecção de coliformes totais e termotolerantes, respectivamente. As incubações ocorreram por até 48 horas a 35 °C para coliformes totais e 24 horas a 44,5 °C para coliformes termotolerantes, todos contendo tubo de Durham invertido para verificação da produção de gás. As análises foram realizadas pelo método do número mais provável (NMP) e os resultados expressos em NMP/100 mL.

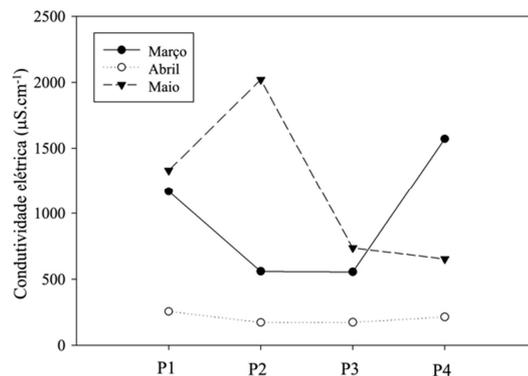
3 Resultados e discussão

O curso d'água na área do Parque Nacional de Jericoacoara durante a estação chuvosa foi analisado em termos de pH e condutividade elétrica em quatro pontos amostrais (Figura 3). Os dados mostram uma variação de pH, que oscilou entre valores próximos à neutralidade (pH 7,32) e valores mais alcalinos (pH 9,07) (Figura 3a). Essa variação de pH pode impactar o desenvolvimento e a sobrevivência de organismos estenobiontes (Frieder *et al.*, 2014; Tahlil; Dy, 2015). Em todos os períodos amostrais, observou-se uma tendência de aumento dos valores de pH à medida que o curso d'água se aproxima do mar. Esse fenômeno pode ser atribuído à mistura de compostos provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) com a água da drenagem de diferentes áreas ao longo do Parque Nacional. À medida que o fluxo de água, enriquecido com nutrientes da ETE, se desloca, é provável que o crescimento de microalgas tenha contribuído para o aumento gradual do pH (Ugya; Ajibade; Hua, 2021), explicando o aumento nos valores observados nas coletas realizadas ao longo dos três meses.

Figura 3 – Determinação de pH (a) e condutividade elétrica (b) nos quatro pontos amostrais ao longo de três meses de coletas realizadas em curso d'água intermitente no Parque Nacional de Jericoacoara



(a)

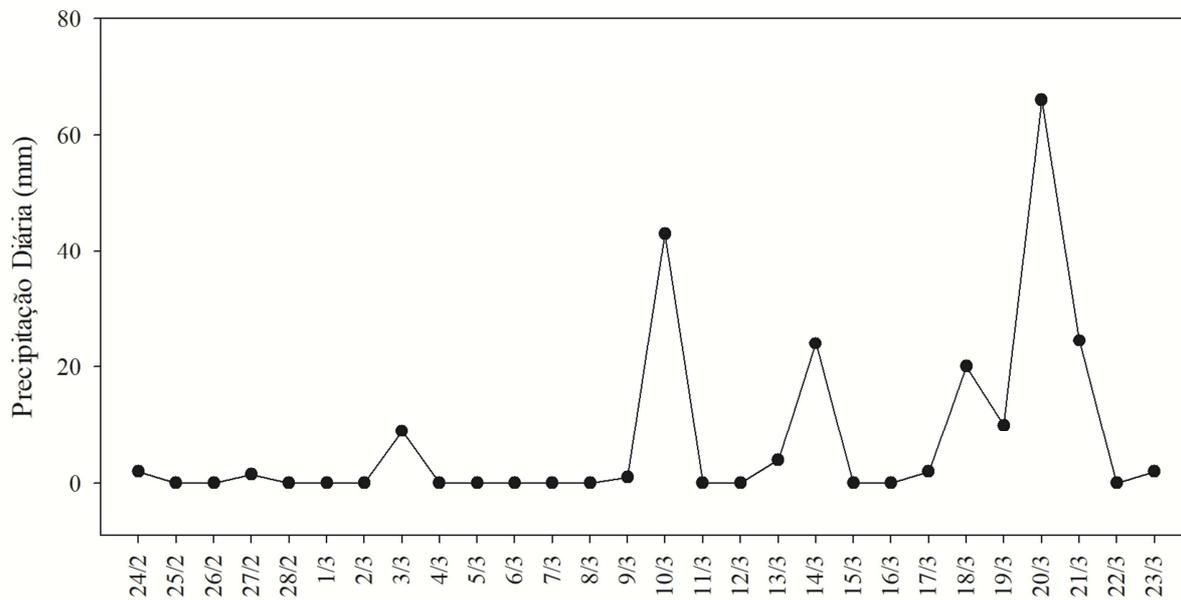


(b)

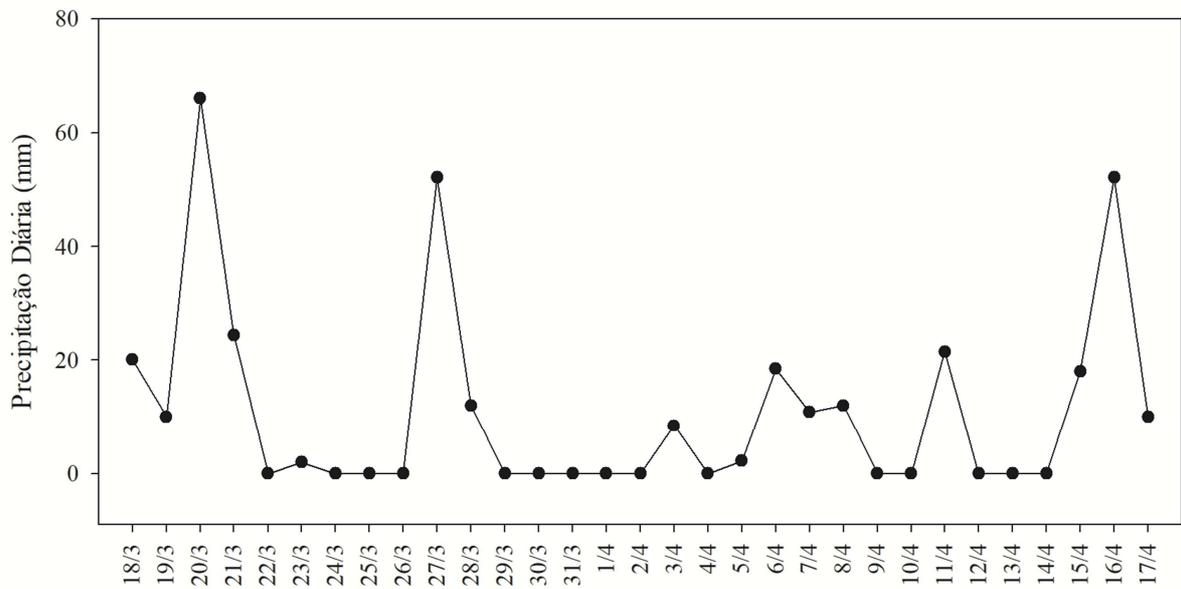
Fonte: dados da pesquisa

Durante o mês de maio, o volume de precipitação foi menor em comparação aos meses de março e abril, o que é típico da região e marca o fim da temporada chuvosa (Figura 4). Os maiores volumes de chuva observados em março e abril podem justificar os valores mais baixos de pH em relação a maio, uma vez que o pH da chuva é levemente ácido, contribuindo para a redução do pH em ambientes límnicos (Girardi *et al.*, 2016; Jia *et al.*, 2021; Ngabirano; Byamugisha; Ntambi, 2016; Vázquez *et al.*, 2023).

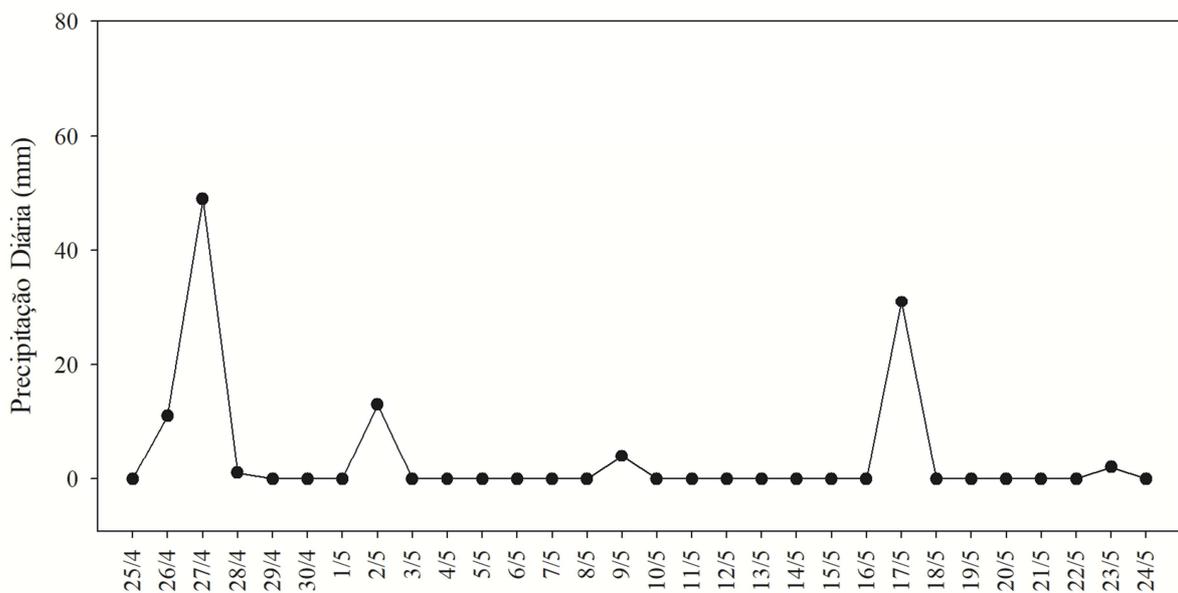
Figura 4 – Dados de precipitação dos 30 dias anteriores à coleta do mês de março (a), abril (b) e maio (c), conforme dados obtidos pela FUNCEME



(a)



(b)



(c)

Fonte: dados da pesquisa

Os dados de condutividade elétrica indicam a influência do período amostral, com o mês de abril apresentando os menores valores de condutividade, chegando a $170,9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ no P2, enquanto o mês de maio apresentou os maiores valores, alcançando $2,02 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ no P2, com exceção dos pontos P3 e P4 (Figura 3b). No ponto P4, a coleta do mês de março coincidiu com o início da maré cheia, resultando na mistura da água do mar com a água do curso d'água, explicando o valor observado. A amplitude observada pode ser um fator determinante para a seleção de organismos que não suportam variações nos níveis de condutividade na água, visto que essa variação pode afetar processos fisiológicos diretamente relacionados à osmorregulação dos organismos (Cochran; Banks; Buchwalter, 2023). Os 30 dias anteriores à coleta do mês de abril totalizaram 339 mm de precipitação (Figura 4b), o que explica a baixa condutividade elétrica nos pontos amostrais devido à diluição dos sais presentes no ambiente. Em maio, no fim da temporada chuvosa, quando os 30 dias anteriores à coleta totalizaram 111 mm de precipitação (Figura 4c), registrou-se os valores mais altos de condutividade elétrica no curso d'água.

Os dados microbiológicos indicam que o ponto amostral P1 serve como ponto de entrada de coliformes totais e coliformes termotolerantes para a área do parque, através do material aquoso que ultrapassa os limites da ETE. Os dados detalhados são apresentados na Tabela 1. Entre julho e setembro, a coleta foi realizada apenas no Ponto P1 (Figura 5a), devido à inexistência de fluxo de água superficial, cuja intermitência deve-se à baixa pluviosidade no período, impossibilitando a formação do curso d'água a partir do Ponto P1, que se tornou apenas uma poça d'água sem fluxo superficial. Durante a estiagem, ocorre rápida percolação do material aquoso proveniente da ETE no solo arenoso (ICMBIO, 2009) dentro ou nas áreas adjacentes ao parque, justificando a realização das coletas somente no ponto de entrada dos efluentes na área do Parque Nacional.

Tabela 1 – Densidade de coliformes totais e coliformes termotolerantes nas amostras de água obtidas temporalmente em quatro pontos amostrais na área do Parque Nacional de Jericoacoara

Coleta	Coliformes totais (NMP/100 mL)				Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
Março	24.000	110.000	4.300	9.300	920	9.300	2.300	920
Abril	>11.000	>11.000	>11.000	>11.000	>11.000	0	>11.000	360
Mai	>110.000	>11.000	11.000	2.400	110.000	2.100	230	210
Julho	4.600.000	–	–	–	2.100.000	–	–	–
Agosto	2.100.000	–	–	–	2.100.000	–	–	–
Setembro	2.100.000	–	–	–	2.100.000	–	–	–

Fonte: dados da pesquisa

Figura 5 – Imagens fotográficas dos pontos amostrais no mês de março de 2023. (a) Ponto P1 com delimitação da área da ETE (à esquerda da cerca) e do Parque Nacional (à direita da cerca); (b) Ponto P2 onde ocorre acúmulo de água; (c) Ponto P3 com vegetação no entorno do curso d'água; (d) Ponto P4, localizado na base posterior da Duna do Pôr-do-Sol onde é comum se observar turistas utilizando a água para fins recreativos



(a)

Revista P1



Fonte: arquivo dos autores

Para alguns pontos de coleta, não foi possível determinar com maior exatidão a densidade microbiana, uma vez que todos os tubos apresentaram resultados positivos em todas as diluições utilizadas. Por exemplo, na coleta de abril, vários pontos mostraram valores superiores a 11.000 NMP/100 mL para coliformes totais e termotolerantes. Embora a Resolução 430/2011 (BRASIL, 2011) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) não estabeleça densidades máximas específicas de coliformes em efluentes lançados no ambiente, determina-se que a disposição de efluentes no solo não deva causar poluição ou contaminação das águas superficiais ou subterrâneas.

Observou-se variação nas densidades de coliformes totais e termotolerantes ao longo dos diferentes períodos e pontos amostrados. Uma possível explicação para essa variação é o volume concentrado de chuvas em determinados períodos, o que pode diluir o material extrapolado para a área do parque e favorecer a autodepuração.

De acordo com a FUNCEME, houve precipitação de 148,5 mm nos 10 dias que antecederam a coleta de março, 113,4 mm nos 10 dias antes da coleta de abril e 33 mm nos 10 dias antes da coleta de maio (Figura 4). As coletas realizadas em julho, agosto e setembro ocorreram durante o período de estiagem, com ausência de precipitação nos 30 dias anteriores a cada coleta. Observa-se que, após o término do período chuvoso, ocorre um aumento tanto na densidade de coliformes totais quanto termotolerantes, provavelmente devido à menor diluição do efluente tratado, resultando em valores superiores a dois milhões de coliformes termotolerantes por 100 mL nas amostras obtidas nesses meses. Isso sugere que a ETE atua como uma fonte de contaminação microbiológica local. Forte e Abreu (2017) indicam que a elevada permeabilidade do solo arenoso local torna as águas subterrâneas altamente suscetíveis à contaminação devido ao uso e ocupação do solo, o que deve ser considerado quanto à disposição dos efluentes pela ETE.

Os menores valores de densidade de coliformes observados durante a estação chuvosa são atribuídos à diluição do material e ao seu escoamento pelo curso d'água na área do Parque Nacional. Atualmente, está em andamento a ampliação do sistema de saneamento básico na Vila de Jericoacoara, com a previsão de que, em breve, os efluentes tratados pela ETE sejam direcionados para um emissário submarino, eliminando a forma atual de disposição (CAGECE, 2020). Os valores de coliformes termotolerantes quantificados no ponto de coleta mais próximo à ETE (P1) indicam, exceto no mês de março, que o lançamento de efluentes não está em conformidade com a legislação estadual

vigente, conforme estabelecido na Resolução COEMA 02/2017 (CEARÁ, 2017), que estipula uma densidade máxima de 5.000 NMP/100 mL para efluentes tratados dispostos no solo. Coliformes termotolerantes são utilizados como indicadores microbiológicos, sendo sua presença associada à ocorrência de outras bactérias patogênicas, além de vírus e parasitas (Richiardi *et al.*, 2023). A liberação de efluentes com densidade desses micro-organismos acima do permitido compromete a qualidade ambiental do local receptor.

Coliformes termotolerantes são frequentemente empregados como indicadores de poluição fecal, pois seu comportamento é similar ao da maioria das bactérias patogênicas, além de serem facilmente detectáveis por métodos de cultivo (Lugo; Lugo; Puente, 2021; Wilderer, 2011). A entrada de material aquoso proveniente da ETE na área da unidade de conservação federal pode acarretar prejuízos socioeconômicos e ambientais. Ao fluir por áreas do parque frequentadas por turistas e moradores locais, essa água pode causar doenças infecciosas microbianas e parasitárias. A contaminação da água também pode afetar a preservação dos ecossistemas naturais, resultando em infecções em espécies locais e competição com micro-organismos autóctones, levando à perda ou migração de espécies sensíveis. Isso contraria o objetivo legal da unidade de conservação, que é “[...] a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica, possibilitando a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento de atividades de educação e interpretação ambiental, de recreação em contato com a natureza e de turismo ecológico”, conforme definido pela Lei nº 9.985/2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (BRASIL, 2000a).

A grande distância da área do Parque Nacional em relação aos centros urbanos pode levar turistas e moradores a acreditarem que o curso d’água não apresenta riscos para atividades recreativas. No entanto, este estudo demonstra que essa interpretação é equivocada. A exposição a patógenos em ambientes recreacionais, seja por contato dérmico, ingestão ou inalação, pode resultar em efeitos adversos à saúde humana (USEPA, 2012). Doenças como diarreia (*Escherichia coli*), leptospirose (*Leptospira* spp.), criptosporidiose (*Cryptosporidium* spp.), cólera (*Vibrio cholerae*) e giardíase (*Giardia* spp.) (Hipsey; Brookes, 2013; Wade *et al.*, 2022) estão entre as mais comuns em águas recreacionais contaminadas.

O curso d’água formado na região da ETE tem seu fluxo encerrado após passar pela parte posterior da Duna do Pôr do Sol (P4) e encontrar as águas da praia principal da Vila de Jericoacoara. Na região do ponto P4, é comum observar turistas utilizando a água para atividades recreativas, acreditando que ela, por ter origem dentro do Parque Nacional, está própria para tais atividades (Figura 5d). Contudo, os dados deste estudo mostram que, em pelo menos um dos pontos amostrais de cada coleta, a densidade de coliformes termotolerantes excede os valores que tornam a água imprópria para balneabilidade, conforme a Resolução CONAMA nº 274/2000 (BRASIL, 2000b), que define a água como imprópria para atividades recreativas quando apresenta valores superiores a 2.500 coliformes termotolerantes por 100 mL.

A variação no número de coliformes termotolerantes ao longo do tempo pode ser influenciada pela quantidade e qualidade do material descartado pela ETE que adentra o Parque Nacional. Em abril, o Ponto P3 (Figura 5c), localizado imediatamente antes do ponto de coleta na parte posterior da Duna do Pôr do Sol, apresentou densidade superior a 11.000 coliformes termotolerantes por 100 mL de água. Ademais, ao chegar à praia principal da Vila de Jericoacoara, esse curso d’água contribui para a redução da qualidade da água utilizada para banho pelos frequentadores. Considerando que o Parque Nacional de Jericoacoara é o principal atrativo turístico do estado do Ceará (Rodrigues, 2023), a diminuição da qualidade da água pode afetar o fluxo de turistas e impactar negativamente a subsistência da população local, que depende do turismo. O último relatório oficial que indicou condições impróprias para balneabilidade na praia principal de Jericoacoara foi divulgado em novembro de 2021, quando a Superintendência de Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) classificou a praia como imprópria para banho devido à contaminação microbiológica (CEARÁ, 2021). A recorrência dessa contaminação pode, a longo prazo, causar problemas de saúde aos frequentadores, prejudicando a imagem do destino turístico. Dada a dependência econômica da vila quase exclusivamente do turismo, isso pode acarretar sérios problemas socioeconômicos para a comunidade local. O redimensionamento da ETE e a operação de um emissário submarino são possíveis soluções para essa problemática a médio e longo prazo. No entanto, a curto prazo, o redimensionamento do

tanque de contato para desinfecção da ETE pode ser uma medida eficaz para garantir a liberação de efluentes com densidade microbiana dentro dos limites legais.

A redução das densidades dos grupos microbianos avaliados nos pontos 3 e 4 pode estar relacionada não apenas com os volumes de água que entram no curso d'água principal, mas também com a ramificação do curso após o Ponto P2 (Figura 5b), como mostrado na Figura 2. A ramificação do curso d'água representa um problema adicional, uma vez que a contaminação microbiológica pode se espalhar pela área onde ocorre esse fluxo até a confluência dos cursos d'água, região a montante do Ponto P4.

4 Conclusões

O curso d'água intermitente que atravessa a unidade de conservação apresentou, em todas as coletas realizadas, pelo menos um ponto com valores de densidade de coliformes termotolerantes superiores ao limite de 2.500 coliformes termotolerantes por 100 mL, tornando a água inadequada para balneabilidade. Esses valores também indicam uma violação das resoluções ambientais que estabelecem critérios para o lançamento de efluentes tratados.

A extrapolação de material aquoso da área da ETE para a rede de drenagem do Parque Nacional de Jericoacoara representa um potencial risco para os objetivos de conservação do parque, acarretando impactos ambientais e riscos à saúde dos visitantes que possam entrar em contato com esses recursos hídricos.

Embora a ETE possua um tanque de contato para desinfecção com hipoclorito de sódio, recomenda-se o redimensionamento deste processo, a fim de assegurar que a desinfecção seja eficaz e atenda aos padrões estabelecidos pelas resoluções ambientais vigentes. O redimensionamento da ETE, juntamente com a construção de um emissário submarino, tende a mitigar essa problemática a médio e longo prazos.

Este estudo é pioneiro ao demonstrar a ocorrência de contaminação microbiológica na área do Parque Nacional de Jericoacoara. Os resultados obtidos podem servir de base para a continuidade dos monitoramentos, avaliando a persistência da contaminação e seus possíveis efeitos negativos sobre a saúde humana e as espécies locais na unidade de conservação.

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão à equipe do ICMBio do Parque Nacional de Jericoacoara, em especial à Kelly Ferreira Cottens e Regina Kátia Saraiva Carneiro, pelo suporte e atenção prestados durante a realização das coletas na área do parque.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

SOUSA, J. C.: coletas, condução dos experimentos e interpretação dos dados. **SANTOS, A. L. R.:** coletas, condução dos experimentos e interpretação dos dados. **SOUZA, C. R.:** análise espacial do ambiente, interpretação dos dados geoespaciais e construção de mapas. **RODRIGUES, E. M.:** concepção e desenho experimental da pesquisa, interpretação dos dados. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

AMISAH, S.; NUAMAH, P. A. Spatial and temporal variations in microbiological water quality of the River Wiwi in Kumasi, Ghana. **Water Quality, Exposure and Health**, v. 6, p. 217-224, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12403-014-0128-4>.

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the**

examination of water and wastewater. 20. ed. Washington, D.C. 1220p. 2005.

BRAGA, M. O. **Gradientes da vulnerabilidade à contaminação aquífera do Parque Nacional/Vila de Jericoacoara/CE.** Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/49875>. Acesso em: 25 abr. 2024.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000.** Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2000a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em: 25 abr. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 274, de 29 de novembro de 2000.** CONAMA, 2000b. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2000/res_conama_274_2000_p_arametrosambientaisqualidadedasaguas.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011.** Conselho Nacional de Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 30 jul. 2024.

CAGECE. **Companhia de Água e Esgoto do Ceará.** 2020 Anteprojeto de Ampliação e Melhorias do Sistema de Esgotamento Sanitário da Vila de Jericoacoara. vol. 1. Memorial Descritivo. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/wp-content/uploads/PDF/EditaisContratacoes/ProcedimentoRegidoPelaLei13303/edital20210019/SES/VO L-I.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2024.

CEARÁ. **Resolução COEMA Nº 02, de 02 de fevereiro de 2017.** Superintendência Estadual de Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2019/09/COEMA-02-2017.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2024.

CEARÁ. 2019. **Jericoacoara ganha dois postos de guarda-vidas do Corpo de Bombeiros.** Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2019/07/04/jericoacoara-ganha-dois-postos-de-guarda-vidas-do-corpo-de-bombeiros>. Acesso em: 20 ago. 2024.

CEARÁ. 2021. Superintendência Estadual do Meio Ambiente – SEMACE. **Boletim mensal de classificação.** Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2021/10/Boletim-202110282-BOL6427212919202875862.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2024.

COCHRAN, J. K.; BANKS, C.; BUCHWALTER, D. B. Respirometry reveals major lineage-based differences in the energetics of osmoregulation in aquatic. **Journal of Experimental Biology**, v. 226, n. 20, 246376, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.246376>.

DROZDOVA, J.; RACLAVSKA, H.; RACLAVSKY, K.; SKROBANKOVA, H. Heavy metals in domestic wastewater with respect to urban population in Ostrava, Czech Republic. **Water and Environment Journal**, v. 33, n. 1, p. 77-85, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/wej.12371>.

EDOKPAYI, J. N.; ODIYO, J. O.; DUROWOJU, O. S. Impact of wastewater on surface water quality in developing countries: a case study of South Africa. In: TUTU, H. (ed.). **Water quality.** London: Intech Open, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5772/66561>.

FRIEDER, C. A.; GONZALEZ, J. P.; BOCKMON, E. E.; NAVARRO, M. O.; LEVIN, L. A. Can variable pH and low oxygen moderate ocean acidification outcomes for mussel larvae? **Global Change Biology**, v. 20, n. 3, p. 754-764, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12485>.

FORTE, F. K. M.; ABREU, M. M. **Caracterização hidroambiental da Vila de Jericoacoara, Jijoca – CE**. Monografia (Graduação em Geologia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/41059>. Acesso em: 25 abr. 2024.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81p. 1988.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Calendário de chuvas**. 2024. Disponível em: <https://chuvas.funceme.br/anual/municipios/maxima/2024>. Acesso em: 21 ago. 2024.

GERARDI, M. H.; ZIMMERMAN, M. C. **Wastewater pathogens**. 192 p. Wiley, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471710431>.

GIRARDI, R.; PINHEIRO, A.; GARBOSSA, L. H. P.; TORRES, É. Water quality change of rivers during rainy events in a watershed with different land uses in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, v. 21, n. 3, p. 514-524, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011615179>.

HENZE, M.; LEDIN, A. Types, characteristics and quantities of combined domestic wastewaters. *In: Decentralised sanitation and reuse: concepts, systems and implementation*. IWA Publishing, London, England, 2001. p. 59-72. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781780402949>.

HIPSEY, M. R.; BROOKES, J. D. Pathogen management in surface waters: Practical considerations for reducing public health risk. *In: RODRIGUEZ-MORALES, A (ed.). Current topics in public health*. Rijeka: IntechOpen, 2013. p. 445-476. DOI: <https://doi.org/10.5772/55367>.

ICMBIO. Parques Nacionais brasileiros atingem recorde de 11,8 milhões de visitas em 2023. **Ministério do Turismo**. 26 março 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/parques-nacionais-brasileiros-atingem-recorde-de-11-8-milhoes-de-visitas-em-2023-1>. Acesso em: 24 abr. 2024.

ICMBIO. **Relatório de Meio Físico**. Subsídios ao Plano de Manejo do Parque Nacional de Jericoacoara. Brasília: ICMBIO, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/marinho/lista-de-ucs/parna-de-gericoacoara/arquivos/relatorio_meiofisico.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.

JIA, Z.; CHANG, X.; DUAN, T.; WANG, X.; WEI, T.; LI, Y. Water quality responses to rainfall and surrounding land uses in urban lakes. **Journal of Environmental Management**, v. 298, 113514, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113514>.

LIMA, D. M.; COSTA, M. L. M.; LIMA, V. S.; ALVES, G. S.; LUCENA, D. R. Investigação sobre o comprometimento ambiental da balneabilidade da praia de Manaíra em João Pessoa-PB. **Revista Principia**, v. 21, p. 75-86, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n21p75-86>.

LUGO, J. L.; LUGO, E. R.; PUENTE, M. A systematic review of microorganisms as indicators of recreational water quality in natural and drinking water systems. **Journal of Water and Health**, v. 19, n. 1, p. 20-28, 2021. DOI: <https://doi.org/10.2166/wh.2020.179>.

MOURA, A. G. L.; CENTURION, V. B.; OKADA, D. Y.; MOTTERAN, F.; DELFORNO, T. P.; OLIVEIRA, V. M.; VARESCHE, M. B. A. Laundry wastewater and domestic sewage pilot-scale

anaerobic treatment: microbial community resilience regarding sulfide production. **Journal of Environmental Management**. v. 251, 109495, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109495>.

MUNIZ, C. C. Gestão, saneamento ambiental e balneabilidade das praias: um estudo de caso no município de Itanhaém, São Paulo. **Aten@-Revista Digital de Gestão & Negócios**, v. 2, n. 4, p. 1-18, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unimesvirtual.com.br/index.php/gestaoenegocios/article/view/1339>. Acesso em: 25 abr. 2024.

NGABIRANO, H.; BYAMUGISHA, D.; NTAMBI, E. Effects of seasonal variations in physical parameters on quality of gravity flow water in Kyanamira Sub-County, Kabale District, Uganda. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, n. 13, p. 1297-1309, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.813099>.

OBAID, H. A.; SHAMSUDDIN, S.; BASIM, K. N.; SHREESHIVADASAN, C. Modeling sewer overflow of a city with a large floating population. **Hydrology: Current Research**, v. 5, n. 2, 1000171, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000171>.

OLIVEIRA, A. S.; SOUSA, J. C.; SANTOS, A. L. R.; OLIVEIRA, R. S.; CESAR, D. E.; RODRIGUES, E. M. Microrganismos no sedimento de margens opostas do estuário do rio Coreaú em Camocim/CE. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, v. 18, p. 216-238, 2021. DOI: <https://doi.org/10.24021/raac.v18i1.5580>.

PARDE, D.; BEHERA, M. Challenges of wastewater and wastewater management. In: SHAH, M.P. (eds) **Sustainable industrial wastewater treatment and pollution control**. Springer, Singapore. 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2560-5_12.

QADIR, M.; DRECHSEL, P.; CISNEROS, B. J.; KIM, Y.; PRAMANIK, A.; MEHTA, P.; OLANIYAN, O. Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. **Natural Resources Forum**, v. 44, n. 1, p. 40-51. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12187>.

RATHOD, P. H.; PATEL, J. C.; SHAH, M. R.; JHALA, A. J. Recycling gamma irradiated sewage sludge as fertilizer: a case study using onion (*Alium cepa*). **Applied Soil Ecology**. v. 41, n. 2, p. 223-233, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.11.001>.

RICHIARDI, L.; PIGNATA, C.; FEA, E.; BONETTA, S.; CARRARO, E. Are indicator microorganisms predictive of pathogens in water? **Water**, v. 15, n. 6, 2964, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15162964>.

RODRIGUES, L. C Turismo, conflitos sociais e os direitos das populações tradicionais. **Revista Abya-Yala: Revista Sobre Acesso à Justiça e Direitos nas Américas**, v. 7 n. 1, p. 170-195, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26512/abya-yala.v7i1.48585>.

ROUT, P. R.; SHAHID, M. K.; DASH, R. R.; BHUNIA, P.; LIU, D.; VARJANI, S.; ZHANG, T.; SURAMPALLI, R. Y. Nutrient removal from domestic wastewater: a comprehensive review on conventional and advanced technologies. **Journal of Environmental Management**, v. 296, 113246, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113246>.

TAHIL, A. S.; DY, D. T. Effects of reduced pH on the growth and survival of postlarvae of the donkey's ear abalone, *Haliotis asinina* (L.). **Aquaculture International**, v. 23, p.141-153, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-014-9804-4>.

TEIXEIRA, M. G.; OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. M. O.; SOUZA, J. C.; RODRIGUES, E. M. Influência da urbanização na caracterização físico-química e microbiológica em ambientes lênticos de Camocim/CE. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, v. 21, n. 1, p. 1-12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24021/raac.v21i1.7189>.

UGYA, A. Y.; AJIBADE, F. O.; HUA, X. The efficiency of microalgae biofilm in the phycoremediation of water from River Kaduna. **Journal of Environmental Management**, v. 295, 113109, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113109>.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Recreational water quality criteria**. Office of Water Report EPA 820-F-12-058. Washington: USEPA, 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-10/documents/rwqc2012.pdf>. Acesso em 20 ago. 2024.

VÁZQUEZ, G.; RAMÍREZ, A.; FAVILA, M. E.; ALVARADO-BARRIENTOS, M. S. Land use scenarios, seasonality, and stream identity determine the water physicochemistry of tropical cloud forest streams. **PeerJ**, v. 5, n. 11, e15487, 2023. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.15487>.

WADE, T. J.; ARNOLD, B. F.; SCHIFF, K.; COLFORD JR, J. M.; WEISBERG, S. B.; GRIFFITH, J. F.; DUFOUR, A. P. Health risks to children from exposure to fecally-contaminated recreational water. **PLoS One**, v. 17, n. 4, e0266749, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266749>.

WARWICK, C.; GUERREIRO, A.; SOARES, A. Sensing and analysis of soluble phosphates in environmental samples: a review. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 41, 1-11, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2012.07.012>.

WILDERER, P. A. **Treatise on water science**. Amsterdam; Elsevier Science, 2011.

ZULOAGA, O.; PRIETO, A.; AHMED, K.; SARKAR, S. K.; BHATTACHARYA, A.; CHATTERJEE, M.; BHATTACHARYA, B. D.; SATTPATHY, K. K. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments of Sundarban mangrove wetland of India and Bangladesh: a comparative approach. **Environmental Earth Sciences**, v. 68, 355-367, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1743-7>.

Revista PI