



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANA KAROLINE DE OLIVEIRA
ANDREZA ALVES DE CARVALHO**

**INTERFACE ESPACIAL ENTRE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO E
OCUPAÇÃO RESIDENCIAL: UMA ABORDAGEM DE TRIAGEM ESPACIAL DA
SENSIBILIDADE LOCACIONAL**

JUAZEIRO DO NORTE, CE

2026

ANA KAROLINE DE OLIVEIRA
ANDREZA ALVES DE CARVALHO

**INTERFACE ESPACIAL ENTRE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO E
OCUPAÇÃO RESIDENCIAL: UMA ABORDAGEM DE TRIAGEM ESPACIAL DA
SENSIBILIDADE LOCACIONAL**

Projeto de pesquisa em formato de artigo apresentado à Universidade Federal do Cariri, como requisito para ingresso no Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Saneamento Básico.

Orientador: Prof. Dra. Maria Gorethe De Sousa Lima Brito.

JUAZEIRO DO NORTE, CE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

O48i Oliveira, Ana Karoline de.

Interface espacial entre estações de tratamento de esgoto e ocupação residencial:
uma abordagem de triagem espacial da sensibilidade locacional / Ana Karoline de
Oliveira; Andreza Alves de Carvalho. – 2026.
38 f. : il. color.

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências e Tecnologia, Curso
de Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, CE, 2026.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Gorethe de Sousa Lima Brito.

1. Engenharia civil. 2. Estações de tratamento de esgoto - Juazeiro do Norte (CE). 3.
Análise espacial - SIG. 4. Planejamento urbano. 5. Saneamento básico. I. Carvalho,
Andreza Alves de. II. Brito, Maria Gorethe de Sousa Lima (Orient.). III. Universidade
Federal do Cariri. IV. Título.

CDD 628.3



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Interface espacial entre estações de tratamento de esgoto e ocupação residencial: uma abordagem de triagem espacial da sensibilidade locacional

Ana Karoline de Oliveira e Andreza Alves de Carvalho

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Engenharia Civil.

Aprovada em 07 de abril de 2026.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIA GORETHE DE SOUSA LIMA BRITO
Data: 24/04/2026 14:56:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Gorethe de Sousa Lima Brito
Orientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br ANIELLE DOS SANTOS BRITO
Data: 11/04/2026 17:42:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Anielle Santos Brito
1º Membro examinador

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDRE RAMOS DE SOUZA
Data: 12/04/2026 10:35:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

André Ramos de Souza
2º Membro examinador

Documento assinado digitalmente
gov.br FLAVIO CESAR BRITO NUNES
Data: 22/04/2026 23:06:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Flávio César Brito Nunes
3º Membro examinador

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Universidade Federal do Cariri (UFCA) pelo apoio institucional ao desenvolvimento da pesquisa e às instituições responsáveis pela disponibilização das bases cartográficas e das informações públicas utilizadas na análise.

Agradecem, de forma especial, à Profa. Dra. Maria Gorethe de Sousa Lima Brito pelo apoio constante, pela paciência, dedicação e valiosa orientação ao longo de todo o processo. Seu profundo conhecimento na área de Saneamento constitui uma fonte de inspiração, especialmente para todas as jovens que aspiram trilhar caminhos nesta área e contribuir significativamente para a sociedade.

Manifestam, ainda, sua gratidão à Profa. Dra. Anielly Santos Brito pela colaboração na elaboração deste artigo. Sua expertise, entusiasmo e escuta atenta foram fundamentais para o aprimoramento e enriquecimento deste trabalho.

Aos amigos e familiares, agradecem o apoio, incentivo e compreensão ao longo desta trajetória, que foram essenciais para a concretização deste trabalho.

Por fim, expressam sua gratidão a Deus, pela vida, pela sabedoria e pela força concedidas ao longo desta jornada, fundamentais para superar desafios e alcançar os objetivos proposto

RESUMO

Este estudo analisa a interface espacial entre estações de tratamento de esgoto (ETEs) e a ocupação residencial em Juazeiro do Norte (Ceará), com o objetivo de identificar a distribuição espacial das ETEs neste município, avaliando potenciais implicações para o planejamento urbano-sanitário. Foram avaliadas três ETEs em operação, com distintas configurações tecnológicas: Malvas (lagoas de estabilização), Três Marias (reator UASB) e Tenente Coelho (reator UASB com tanque de decantação). A metodologia baseia-se em análise geoespacial, utilizando Sistema de Informação Geográfica (SIG), na qual faixas de distância de 100 m, 500 m e 1 km foram integradas, em ambiente QGIS, à leitura interpretativa da ocupação residencial e de elementos urbanos relevantes, subsidiada pela triangulação entre a base cartográfica disponível e imagens de satélite. Os resultados foram interpretados com base em referenciais normativos e técnico-locacionais do saneamento, do licenciamento ambiental e do uso e ocupação do solo, sem tratar as faixas analíticas como recuos legais universais. A análise evidenciou contextos territoriais contrastantes: a ETE Malvas permaneceu comparativamente mais periférica, com menor ocupação residencial imediata e maior interface espacial nas faixas mais amplas; a ETE Três Marias apresentou padrão intermediário; e a ETE Tenente Coelho exibiu maior inserção em malha urbana consolidada e, conseqüentemente, maior sensibilidade locacional. Conclui-se que a abordagem proposta trata-se de um protocolo replicável e de baixo custo para a triagem espacial da sensibilidade locacional no entorno de ETEs, útil para hierarquizar áreas prioritárias para monitoramento territorial e para subsidiar o planejamento urbano-sanitário e o licenciamento ambiental em contextos de rápida expansão urbana.

Palavras-chave: estações de tratamento de esgoto; análise espacial; sensibilidade locacional; QGIS; planejamento urbano-sanitário; uso e ocupação do solo.

ABSTRACT

This study analyzes the spatial interface between wastewater treatment plants (WWTPs) and residential occupation in Juazeiro do Norte (Ceará), with the objective of identifying the spatial distribution of WWTPs in this municipality, evaluating potential implications for urban-sanitary planning. Three operating WWTPs with distinct technological configurations were evaluated: Malvas (stabilization ponds), Três Marias (UASB reactor), and Tenente Coelho (UASB reactor with settling tank). The methodology is based on geospatial analysis, using Geographic Information Systems (GIS), in which distance ranges of 100 m, 500 m, and 1 km were integrated, in a QGIS environment, with the interpretative reading of residential occupation and relevant urban elements, supported by triangulation between the available cartographic base and satellite images. The results were interpreted based on normative and technical-locational references of sanitation, environmental licensing, and land use and occupation, without treating the analytical strips as universal legal setbacks. The analysis revealed contrasting territorial contexts: the Malvas WWTP remained comparatively more peripheral, with less immediate residential occupation and greater spatial interface in the wider strips; the Três Marias WWTP presented an intermediate pattern; and the Tenente Coelho WWTP exhibited greater insertion in a consolidated urban network and, consequently, greater locational sensitivity. It is concluded that the proposed approach is a replicable and low-cost protocol for the spatial screening of locational sensitivity in the vicinity of WWTPs, useful for prioritizing areas for territorial monitoring and for supporting urban-sanitary planning and environmental licensing in contexts of rapid urban expansion.

Keywords: Wastewater treatment plants; spatial analysis; location sensitivity; QGIS; urban and sanitary planning; land use and occupation.

LISTA DE SIGLAS

ARCE — Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados do Estado do Ceará

CAGECE — Companhia de Água e Esgoto do Ceará

CONAMA — Conselho Nacional do Meio Ambiente

ETE — Estação de Tratamento de Esgoto

FEPAM — Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler

IBGE — Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PDM — Plano Diretor Municipal

QGIS — Quantum Geographic Information System

SES — Sistema de Esgotamento Sanitário

SIG — Sistema de Informação Geográfica

SINISA — Sistema Nacional de Informações em Saneamento

SNIS — Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

UASB — Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente)

UFCA — Universidade Federal do Cariri

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização de Juazeiro do Norte (CE) e posicionamento das ETEs Malvas, Três Marias e Tenente Coelho	13
Figura 2 – Mapa síntese da distribuição espacial das ETEs em relação à mancha urbana municipal	22
Figura 3 – Mapas de buffers da ETE Malvas (100 m, 500 m e 1 km) e padrão de ocupação residencial no entorno	23
Figura 4 – Mapas de buffers da ETE Três Marias (100 m, 500 m e 1 km) e padrão de ocupação residencial no entorno	24
Figura 5 – Mapas de buffers da ETE Tenente Coelho (100 m, 500 m e 1 km) e padrão de ocupação residencial no entorno	25
Fluxograma 1 – Encadeamento metodológico da triagem espacial	20

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Referenciais legais, normativos e técnico-locacionais utilizados como apoio interpretativo da triagem espacial	17
Quadro 2 – Critérios qualitativos adotados para a triagem da sensibilidade locacional	19
Quadro 3 – Síntese comparativa das ETEs analisadas	21
Quadro 4 – Síntese comparativa da interface espacial e da sensibilidade locacional no entorno das ETEs analisadas.....	25
Quadro 5 – Foco de planejamento recomendado de acordo com o padrão de triagem observado	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
2.1 ÁREA DE ESTUDO	12
2.3 BASE ESPACIAL E PROCEDIMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO	14
2.4 MODELO DE TRIAGEM BASEADO EM FAIXAS DE DISTÂNCIA	15
2.5 REFERENCIAIS NORMATIVOS E CRITÉRIOS LOCACIONAIS DE REFERÊNCIA.....	16
2.6 CRITÉRIOS INTERPRETATIVOS E LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	18
3. RESULTADOS DA TRIAGEM ESPACIAL	21
3.1 PADRÃO ESPACIAL GERAL.....	21
3.2 TRIAGEM COMPARATIVA POR ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO	22
4. DISCUSSÃO: SENSIBILIDADE LOCACIONAL, CRITÉRIOS TERRITORIAIS E IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO.....	27
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
AGRADECIMENTOS	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

A expansão urbana observada em muitos municípios brasileiros tem intensificado a proximidade entre infraestruturas sanitárias preexistentes e novos usos residenciais do solo, produzindo desafios crescentes de compatibilização entre proteção ambiental, saúde pública e ordenamento territorial. Entre essas infraestruturas, as estações de tratamento de esgoto (ETEs) ocupam posição particularmente sensível, uma vez que sua relevância para a universalização do saneamento e para a proteção dos corpos hídricos não depende exclusivamente do desempenho operacional das unidades, mas também de sua inserção territorial e da forma como o entorno urbano é progressivamente ocupado, regulado e transformado ao longo do tempo (Brasil, 2007; Brasil, 2020; Heller e Castro, 2013). Nessa perspectiva, a relação entre ETEs e áreas residenciais deve ser compreendida não apenas como questão técnica associada ao tratamento de efluentes, mas também como problema de planejamento urbano, gestão ambiental e prevenção de conflitos de uso do solo.

Em contextos urbanos marcados por rápida expansão territorial, essa discussão assume relevância particular, pois a expansão da mancha urbana tende a ocorrer de forma rápida, fragmentada e, muitas vezes, mais veloz do que a atualização dos instrumentos de controle territorial. Como consequência, infraestruturas originalmente implantadas em áreas periféricas ou pouco adensadas podem passar a integrar setores progressivamente urbanizados, alterando sua relação com o entorno e ampliando a necessidade de avaliação locacional. No caso das ETEs, essa avaliação torna-se ainda mais importante porque a compatibilidade territorial entre infraestrutura sanitária e ocupação humana não depende apenas da presença física das unidades, mas também da tecnologia empregada, das características operacionais do sistema, da configuração espacial da malha urbana e da existência, ou não, de critérios preventivos suficientemente claros para orientar a expansão urbana em seu entorno (Heller e Castro, 2013). Pois, levanta questionamento quanto à adequação da inserção territorial desses equipamentos e seus possíveis impactos sobre a população do entorno,

No entanto, é importante destacar que a proximidade espacial entre ETEs e moradias não implica, necessariamente, a ocorrência de impactos ambientais diretos, como odores, ruídos, emissões atmosféricas ou proliferação de vetores de doenças. Logo, esta interface espacial foi adotada como indicador preliminar de sensibilidade locacional e de potencial conflito de uso do solo, e não como evidência automática de impacto ambiental direto. Essa delimitação é importante porque permite situar o trabalho no campo da triagem territorial, voltado a subsidiar o planejamento urbano-sanitário, o licenciamento ambiental e a priorização

de áreas para monitoramento territorial mais detalhado.

Ainda assim, essa proximidade pode ser utilizada como indicador preliminar de sensibilidade locacional em estudos de triagem, especialmente em contextos marcados por escassez de monitoramento ambiental sistemático, ausência de séries operacionais detalhadas e limitações institucionais para avaliações ambientais mais complexas. Nesses casos, os sistemas de informação geográfica (SIG) e as técnicas de geoprocessamento oferecem base metodológica consistente para integrar camadas espaciais, reconhecer padrões territoriais, comparar situações locacionais distintas e apoiar a identificação de áreas que demandam maior cautela analítica ou prioridade de intervenção (Burrough e McDonnell, 2000; Câmara *et al.*, 2001; Longley *et al.*, 2015). Trata-se, portanto, de uma abordagem útil, não para substituir medições ambientais diretas, mas para estruturar procedimentos iniciais de triagem territorial capazes de subsidiar decisões de planejamento, licenciamento e monitoramento.

Além da dimensão locacional, a gestão do entorno de ETEs pode ser interpretada sob a perspectiva de sistemas de gestão ambiental, nos quais a identificação de aspectos e impactos, o monitoramento, a conformidade legal, o tratamento de reclamações e a ação corretiva integram o ciclo de melhoria contínua. Nessa perspectiva, o odor deixa de ser apenas um incômodo perceptivo eventual e passa a constituir aspecto ambiental relevante, sobretudo em unidades inseridas em áreas urbanas adensadas ou em expansão. Guias técnicos e referenciais de gestão indicam que planos de gerenciamento de odores devem articular-se aos procedimentos operacionais e ao sistema de gestão ambiental da instalação, com revisão periódica segundo o ciclo Plan-Do-Check-Act (PDCA) (ISO, 2015; EPA Ireland, 2019).

Apesar da relevância prática do tema, ainda são limitados, em municípios brasileiros com expansão urbana recente, os estudos que utilizam procedimentos espaciais simples, replicáveis e baseados em dados cartográficos, acessíveis para examinar a interface entre ETEs e ocupação residencial. Embora pesquisas internacionais já tenham empregado SIG para apoiar a seleção locacional de ETEs e interpretar processos de avanço urbano sobre o entorno dessas infraestruturas (Zhou *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2025), a literatura brasileira ainda carece de protocolos operacionais simples, replicáveis e de baixo custo voltados à triagem locacional em contextos municipais com escassez de monitoramento ambiental e de dados operacionais.

A lacuna específica que este estudo procura enfrentar reside, portanto, na ausência de procedimentos metodológicos acessíveis que permitam comparar o entorno de diferentes ETEs e hierarquizar áreas prioritárias para monitoramento territorial em municípios com rápida expansão urbana. Em muitos casos, a discussão permanece concentrada nos aspectos de eficiência do tratamento ou nos padrões de lançamento de efluentes, dedicando menor atenção

à dimensão territorial da infraestrutura sanitária e às suas implicações para o uso e ocupação do solo. Nesse sentido, abordagens de triagem espacial podem representar alternativa metodológica viável para a identificação preliminar de áreas de maior sensibilidade locacional e para o direcionamento de prioridades de gestão.

No município de Juazeiro do Norte, situado em posição estratégica no sul do Ceará, marcado por dinâmica recente de crescimento urbano, essa discussão mostra-se especialmente pertinente. A expansão da ocupação urbana, associada às transformações na cobertura e na organização dos serviços de esgotamento sanitário, reforça a necessidade de avaliar espacialmente o entorno das ETEs existentes, de modo a compreender em que medida sua inserção territorial permanece compatível com os usos residenciais que se consolidam ou avançam em suas proximidades (IBGE, s.d.; Ambiental Ceará, 2023).

Além disso, do ponto de vista normativo, o ordenamento brasileiro estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a gestão ambiental de efluentes, mas não define, em escala federal, um afastamento único e obrigatório entre ETEs e residências. Assim, a compatibilidade locacional dessas infraestruturas depende da articulação entre o marco legal do saneamento, o licenciamento ambiental, o planejamento urbano municipal e referências técnicas complementares. Em Juazeiro do Norte, essa problemática torna-se ainda mais atual diante da recente aprovação do Plano Diretor Municipal e da legislação local de parcelamento, uso e ocupação do solo, instrumentos diretamente relacionados ao ordenamento das frentes de expansão urbana e à regulação dos conflitos territoriais associados à infraestrutura urbana (Brasil, 2007; Brasil, 2011; Brasil, 2020; Juazeiro do Norte, 2026a; Juazeiro do Norte, 2026b).

Diante desse contexto, o presente estudo teve por objetivo analisar a interface espacial entre três estações de tratamento de esgoto e a ocupação residencial em Juazeiro do Norte (CE), por meio de procedimentos baseados em QGIS, propondo uma abordagem de triagem espacial para identificar padrões de sensibilidade locacional e subsidiar o planejamento urbano-sanitário. Com isso, a pesquisa busca oferecer subsídio técnico para tomada de decisão, que seja replicável e de baixo custo, aplicável à triagem locacional no entorno de ETEs em municípios com rápida expansão urbana e disponibilidade limitada de dados ambientais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

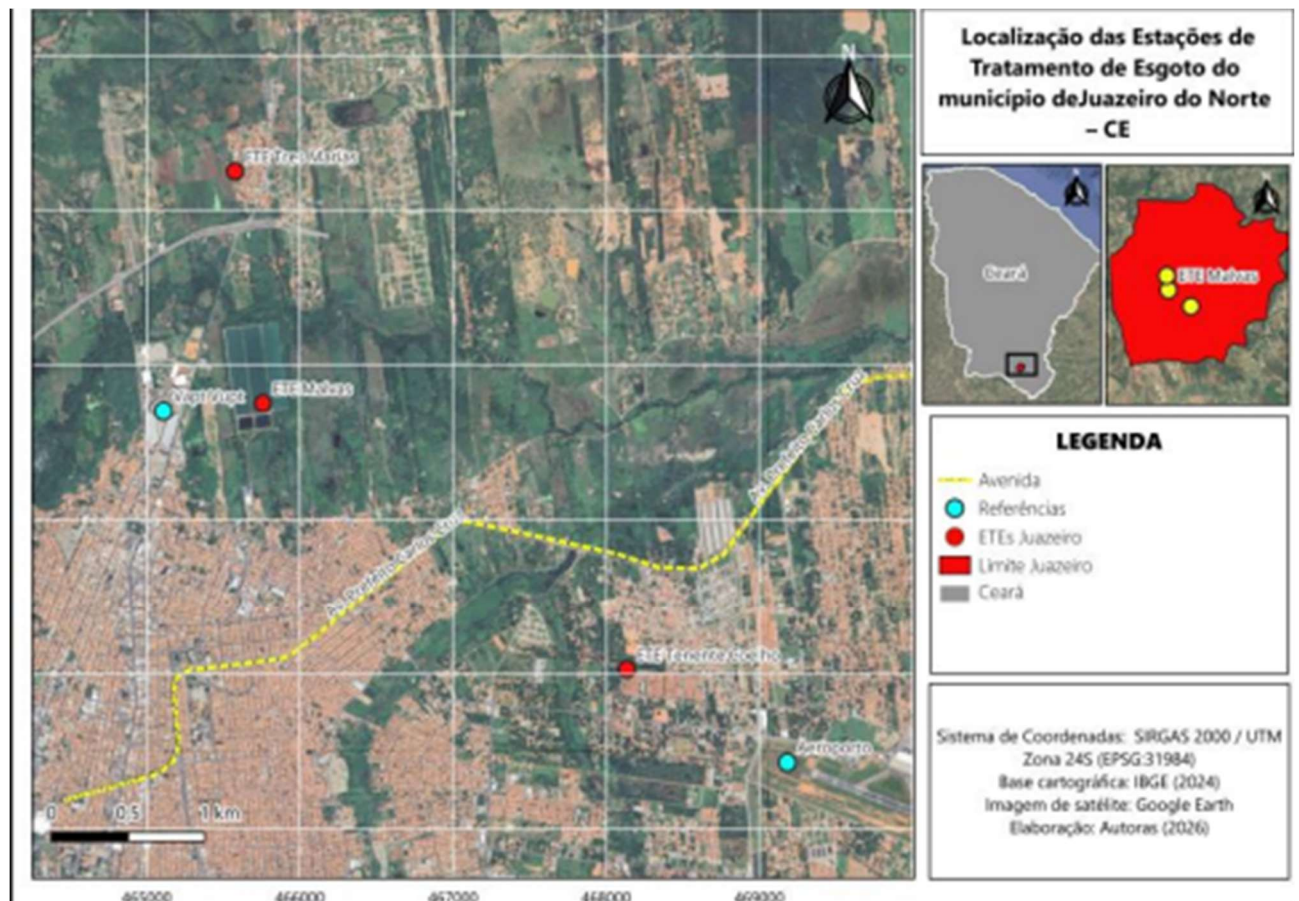
Juazeiro do Norte localiza-se no sul do estado do Ceará, integra a aglomeração urbana do Crajubar e exerce papel regional relevante no comércio, nos serviços e na atração populacional (IBGE, s.d.). O município vem experimentando expansão urbana contínua nas

últimas décadas, condição que o torna cenário adequado para investigar a interface entre infraestrutura de saneamento e mudança no uso do solo.

O contexto local do saneamento também justifica a análise. A expansão recente da cobertura e da organização dos serviços de esgotamento sanitário no Ceará e em Juazeiro do Norte vem se articulando a transformações territoriais em curso, incluindo o crescimento de novos loteamentos e a densificação de setores anteriormente periféricos (Ambiental Ceará, 2023). Nesse cenário, o entorno das ETEs existentes torna-se área estratégica para o monitoramento territorial.

A localização do município e o posicionamento das três ETEs analisadas são apresentados na Figura 1. No arranjo institucional vigente, Juazeiro do Norte integra o Bloco 1 da Parceria Público-Privada do Esgoto firmada entre a Cagece e a Ambiental Ceará 1 SPE S.A. Nesse modelo, a Ambiental Ceará é responsável pela ampliação, operação e manutenção do sistema de esgotamento sanitário, enquanto o atendimento ao cliente permanece sob a responsabilidade da Cagece (ARCE, 2024; Ambiental Ceará, 2024).

Figura 1 – Localização de Juazeiro do Norte (CE) e posicionamento das ETEs Malvas, Três Marias e Tenente Coelho



Fonte: elaboração própria, com base em IBGE (s.d.), Ambiental Ceará (2023) e

procedimentos de geoprocessamento em QGIS.

2.2 Seleção das estações de tratamento de esgoto

Foram selecionadas três ETEs em operação: Malvas, Três Marias e Tenente Coelho. As unidades foram escolhidas por representarem configurações tecnológicas distintas e padrões contrastantes de inserção na malha urbana. A ETE Malvas baseia-se em lagoas de estabilização, enquanto a ETE Três Marias opera com reator UASB e a ETE Tenente Coelho combina reator UASB com tanque de decantação. A inclusão de estações com diferentes configurações tecnológicas foi relevante porque as tecnologias de tratamento implicam exigências distintas de área, implantação e interação com o entorno. Sistemas de lagoas, por exemplo, geralmente requerem áreas maiores e historicamente foram implantados em zonas mais periféricas, ao passo que sistemas anaeróbios mais compactos tendem a ajustar-se a áreas menores e podem tornar-se mais expostos à densificação urbana ao longo do tempo (Chernicharo, 2007; von Sperling, 2009; von Sperling, 2014).

2.3 BASE ESPACIAL E PROCEDIMENTOS DE GEOPROCESSAMENTO

Do ponto de vista do delineamento, trata-se de estudo aplicado, exploratório e descritivo, conduzido como análise espacial de triagem apoiada em sistemas de informação geográfica. Tal enquadramento é coerente com problemas em que o interesse analítico reside na identificação inicial de padrões territoriais, e não na mensuração direta de impactos, sendo o geoprocessamento particularmente útil para integrar bases heterogêneas, examinar relações de proximidade e apoiar decisões em planejamento ambiental e urbano (Gil, 2008; Burrough e McDonnell, 2000; Câmara *et al.*, 2001; Longley *et al.*, 2015).

A análise foi realizada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), com a utilização do software QGIS, combinando dados vetoriais de limites municipais e ocupação urbana com interpretação visual de imagens de satélite disponíveis no Google Earth. Todos os procedimentos foram executados no sistema de referência SIRGAS 2000 / UTM zona 24S, de modo a assegurar consistência geométrica e comparabilidade entre os conjuntos de dados utilizados.

O fluxo de trabalho foi organizado em quatro etapas complementares. Na primeira, realizou-se a verificação da posição espacial de cada ETE e a compatibilização das camadas de base. Na segunda, procedeu-se à delimitação interpretativa da ocupação residencial e de elementos urbanos relevantes no entorno imediato e intermediário das unidades. Na terceira, foram geradas zonas de proximidade por meio da ferramenta buffer. Na quarta, efetuou-se a sobreposição e a comparação interpretativa entre as faixas de distância e o padrão de uso do

solo observado. Esse encadeamento metodológico é consistente com aplicações de SIG voltadas à análise de influência espacial, à leitura de vizinhança e à priorização de áreas para avaliação posterior mais detalhada (Burrough e McDonnell, 2000; Longley *et al.*, 2015).

A interpretação da ocupação residencial foi subsidiada pela triangulação entre a base cartográfica disponível e a leitura visual de imagens de satélite disponíveis no Google Earth, priorizando aglomerados habitacionais, loteamentos residenciais e setores já incorporados à mancha urbana. Embora se trate de procedimento interpretativo, sua adoção é metodologicamente justificável em estudos exploratórios de base espacial quando o objetivo central é identificar padrões de inserção territorial e não estimar, com precisão censitária, a população potencialmente exposta. Nessa perspectiva, a ênfase recaiu no reconhecimento comparativo de configurações espaciais do entorno, compatível com a lógica de triagem adotada no manuscrito.

2.4 MODELO DE TRIAGEM BASEADO EM FAIXAS DE DISTÂNCIA

Foram geradas três faixas analíticas de distância ao redor de cada ETE: 100 m, 500 m e 1 km. Em SIG, a análise por buffers constitui procedimento clássico de proximidade, amplamente empregado para operacionalizar zonas de influência, relações de vizinhança e gradientes espaciais entre fontes potenciais de pressão e usos sensíveis do solo (Burrough e McDonnell, 2000; Câmara *et al.*, 2001; Longley *et al.*, 2015).

Essas faixas foram utilizadas como critério de triagem espacial, e não como recuos regulatórios universais, permitindo identificar áreas com maior proximidade entre infraestrutura sanitária e ocupação residencial. Ressalta-se que a metodologia não tem como objetivo comprovar impactos ambientais, mas sim representar graus crescentes de proximidade, operacionalizar empiricamente a interface espacial proposta no título do artigo e permitir comparação sistemática entre as estações analisadas.

A faixa de 100 m foi utilizada para detectar adjacência imediata entre a infraestrutura de tratamento e a ocupação residencial, isto é, situações de contato territorial mais direto. A faixa de 500 m foi adotada para caracterizar a interface intermediária, na qual a presença de novos loteamentos, equipamentos urbanos e vetores de expansão tende a sinalizar aumento de sensibilidade locacional. Já a faixa de 1 km foi empregada como contexto ampliado de inserção urbana, permitindo captar a direção da expansão da malha e distinguir estações ainda relativamente periféricas daquelas já incorporadas a tecido urbano mais consolidado. A adoção de faixas aninhadas, portanto, reforçou o caráter comparativo da análise e reduziu o risco de interpretações baseadas em uma única distância arbitrária.

2.5 REFERENCIAIS NORMATIVOS E CRITÉRIOS LOCACIONAIS DE REFERÊNCIA

A leitura dos mapas foi contextualizada por um marco normativo e técnico composto por: as diretrizes nacionais do saneamento básico, expressas na Lei nº 11.445/2007 e atualizadas pela Lei nº 14.026/2020, que reforçam a integração entre prestação dos serviços, saúde pública e planejamento territorial; a Resolução CONAMA nº 430/2011, que disciplina condições e padrões de lançamento de efluentes e evidencia que a operação de ETEs integra agenda permanente de controle ambiental; o Plano Diretor Municipal de Juazeiro do Norte (Lei Complementar nº 149/2026) e a Lei Municipal nº 6032/2026, sobre parcelamento, uso e ocupação do solo, que estruturam a leitura local da compatibilidade territorial; e referências técnicas complementares, como a Diretriz Técnica FEPAM nº 04/2019, que adota 300 m para lagoa anaeróbia, 150 m para demais unidades de tratamento e admite distâncias inferiores mediante estudo específico.

Essas referências não foram tratadas como normas equivalentes nem automaticamente aplicáveis ao município estudado. Sua função analítica foi delimitar um horizonte de cautela locacional e demonstrar que a discussão sobre afastamentos, faixas de proteção e compatibilidade entre infraestrutura sanitária e ocupação humana já se encontra reconhecida em diferentes escalas institucionais. Por essa razão, os buffers de 100 m, 500 m e 1 km foram empregados como faixas analíticas de triagem, e não como recuos legais fixos. A faixa de 100 m permite testar cenários de adjacência imediata; a de 500 m, situações intermediárias de transição; e a de 1 km, a inserção urbana ampliada e a direção de crescimento da mancha urbana. Os principais referenciais legais, normativos e técnico-locacionais mobilizados na interpretação dos resultados estão sintetizados no Quadro 1.

Como elemento de contextualização analítica, também foram mobilizadas informações secundárias constantes no diagnóstico do sistema de esgotamento sanitário elaborado no âmbito do projeto de revisão do Plano Diretor Municipal de Juazeiro do Norte, em relatórios de fiscalização e de prestação de contas da ARCE referentes ao município e em publicação nacional recente baseada em dados do SINISA. Esses documentos foram utilizados exclusivamente para qualificar a discussão sobre cobertura do SES, tipologia das ETEs, condições operacionais, uso da infraestrutura instalada e registros de não conformidade, sem alterar o caráter exploratório, espacial e qualitativo da triagem proposta (Luna *et al.*, 2023; ARCE, 2015; ARCE, 2023; ARCE, 2024; Instituto Trata Brasil; GO Associados, 2026).

Adicionalmente, para a qualificação da discussão sobre gestão de odores e monitoramento operacional, foram consultados documentos oficiais da CAGECE e da Ambiental Ceará, bem como o caderno de encargos da concessão administrativa, com vistas a

identificar evidências públicas de soluções tecnológicas, rotinas de acompanhamento remoto, exigências de plano operacional, programas socioambientais e requisitos de regularidade ambiental relacionados à operação dos sistemas de esgotamento sanitário (CAGECE, 2023; CAGECE, s.d.; Ambiental Ceará, 2024).

Quadro 1. Referenciais legais, normativos e técnico-locacionais utilizados como apoio interpretativo da triagem espacial.

Escala / instrumento	Conteúdo principal	Relevância para o estudo	Uso na interpretação
Federal – Lei nº 11.445/2007 e Lei nº 14.026/2020	Estabelecem diretrizes nacionais do saneamento básico e reforçam a integração entre prestação do serviço, saúde pública e planejamento.	Sustentam a leitura de que a localização das ETES deve ser pensada em articulação com a dinâmica urbana.	Enquadramento institucional do problema.
Federal ambiental – Resolução CONAMA nº 430/2011	Dispõe sobre condições, parâmetros e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes.	Evidencia que ETES exigem controle ambiental contínuo, embora a norma não fixe afastamento residencial único.	Referência ambiental geral; não usada como recuo métrico.
Municipal – Lei Complementar nº 149/2026 (Plano Diretor Municipal)	Institui o Plano Diretor Municipal de Juazeiro do Norte.	Oferece base local para interpretar expansão urbana, ordenamento territorial e compatibilização de usos.	Chave interpretativa para os mapas do entorno urbano.
Municipal – Lei nº 6032/2026	Dispõe sobre o parcelamento, uso e ocupação do solo do município.	Permite discutir a interface entre expansão residencial, loteamentos e infraestrutura sanitária.	Referência local de uso do solo.

Técnica complementar – Diretriz Técnica FEPAM nº 04/2019	Adota 300 m para lagoa anaeróbia e 150 m para demais unidades, admitindo distância inferior mediante estudo específico.	Mostra que o tema dos afastamentos é reconhecido em diretrizes técnicas de licenciamento.	Parâmetro comparativo de cautela locacional; não vinculante ao caso estudado.
--	---	---	---

Fonte: elaboração própria. 2026.

2.6 CRITÉRIOS INTERPRETATIVOS E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Como a base de dados disponível não incluía medições diretas de odores, ruídos, ocorrência de vetores, emissões atmosféricas ou incidentes operacionais, a análise foi interpretada como exercício de triagem locacional.

Assim, os resultados foram lidos como evidência de potencial conflito urbano ambiental e de diferentes graus de sensibilidade locacional, e não como comprovação de impacto ambiental direto ou de desconformidade jurídica específica. Essa precaução metodológica é importante para manter coerência entre a natureza dos dados, o alcance inferencial do estudo e a interpretação dos resultados, sobretudo quando o marco normativo é utilizado como referência de cautela e não como critério automático de conformidade.

Adotou-se uma classificação qualitativa de sensibilidade para apoiar a comparação entre as três estações. A classificação foi construída a partir da combinação de três critérios: presença de habitações na faixa imediata de 100 m; intensidade da ocupação residencial e de equipamentos urbanos na faixa de 500 m; e grau de consolidação da malha urbana no raio de 1 km. Com base nessa matriz interpretativa, a menor sensibilidade foi associada à ocupação residencial inexistente ou residual na faixa imediata e à ocupação esparsa nas faixas mais amplas, enquanto a maior sensibilidade foi associada à adjacência residencial imediata, à forte inserção em malha urbana consolidada e à presença de usos urbanos capazes de intensificar incompatibilidades territoriais.

Trata-se, portanto, de classificação ordinal coerente com estudos exploratórios de triagem territorial. Foram selecionadas, de forma intencional, três ETEs em operação no município de Juazeiro do Norte, escolhidas por reunirem dois critérios analíticos centrais: diversidade tecnológica e contraste de inserção na malha urbana. A seleção concentrou-se em unidades com localização identificável, funcionamento operacional e condições mínimas de comparabilidade espacial, compatíveis com o objetivo de triagem locacional proposto.

O estudo apresenta limitações inerentes à escala e à natureza dos dados empregados.

Não foram incorporados dados operacionais específicos das estações, medições de campo, modelagem de dispersão, nem quantificação de áreas por classe de uso do solo em cada buffer. Tais restrições impedem inferências sobre magnitude de impactos, mas não invalidam o exercício de triagem, cuja finalidade é justamente produzir diagnóstico inicial, comparativo e de baixo custo para orientar etapas posteriores de monitoramento e aprofundamento analítico. Os critérios qualitativos adotados para essa classificação estão sistematizados no Quadro 2.

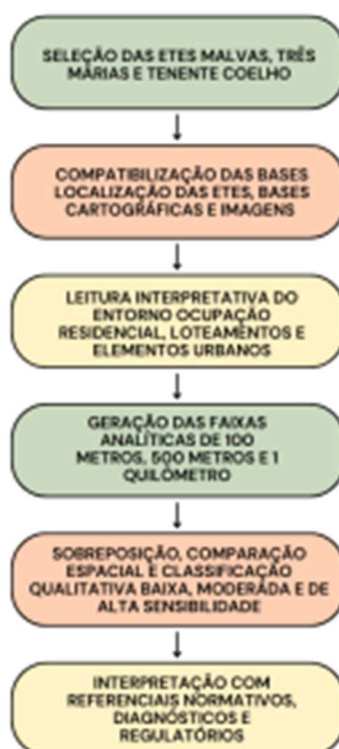
Quadro 2. Critérios qualitativos adotados para a triagem da sensibilidade locacional.

Nível de sensibilidade	Critérios espaciais	Significado interpretativo
Baixa	Ocupação residencial inexistente ou residual em 100 m; ocupação esparsa nas faixas mais amplas.	Menor interface territorial imediata entre a ETE e o uso residencial.
Modificada	Habitação limitada em 100 m, com ocupação residencial visível ou equipamentos urbanos nas faixas de 500 m e 1 km.	Contexto de transição que requer monitoramento territorial preventivo.
Alta	Ocupação residencial presente no entorno imediato e forte inserção em malha urbana consolidada.	Maior sensibilidade locacional e maior potencial de conflito urbano-ambiental.

Fonte: elaboração própria. 2026.

O encadeamento metodológico adotado no estudo está sintetizado no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 – Encadeamento metodológico da triagem espacial.



Fonte: elaboração própria.

Os critérios visuais utilizados para a classificação da sensibilidade locacional são apresentados na Matriz 1.

Matriz 1. Critérios visuais utilizados para a classificação da sensibilidade locacional.

Nível	Faixa de 100 metros	Faixa de 500 metros	Faixa de 1 km/ Interpretação
Alta	Ocupação residencial no entorno imediato	Forte presença residencial	Malha urbana consolidada e maior potencial de incompatibilidade
Moderada	Habitação limitada	Ocupação residencial visível e equipamentos urbanos	Contexto intermediário que requer monitoramento preventivo
Baixa	Ocupação residencial inexistente ou residual	Ocupação esparsa	Menor interface territorial imediata

Fonte: elaboração própria.

A síntese comparativa das ETEs analisadas está apresentada no Quadro 3:

Quadro 3. Síntese comparativa das ETEs analisadas.

Asp ecto	Malvas	Três Marias	Tenente Coelho
Tec nologia	Lagoas estabilização	Reator UABS	Reator UASB + tanque de decantaçã o
Ent orno ime diato	Menor ocupação residencial em 100 metros	Ocupação imediata limitada	Ocupação territorial no entorno imediato
Fai xas am pliadas	Interface especial ampliada em 500 metros e 1 km	Interface intermediária nas faixas maiores	Inserção intensa em malha urbana consolidad a
Sín tese de gest ão	Monitoramento efetivo nas faixas mais amplas	Monitoramento territorial preventivo	Maior prioridade para compatibilizaç ão locacional

Fonte: elaboração própria.

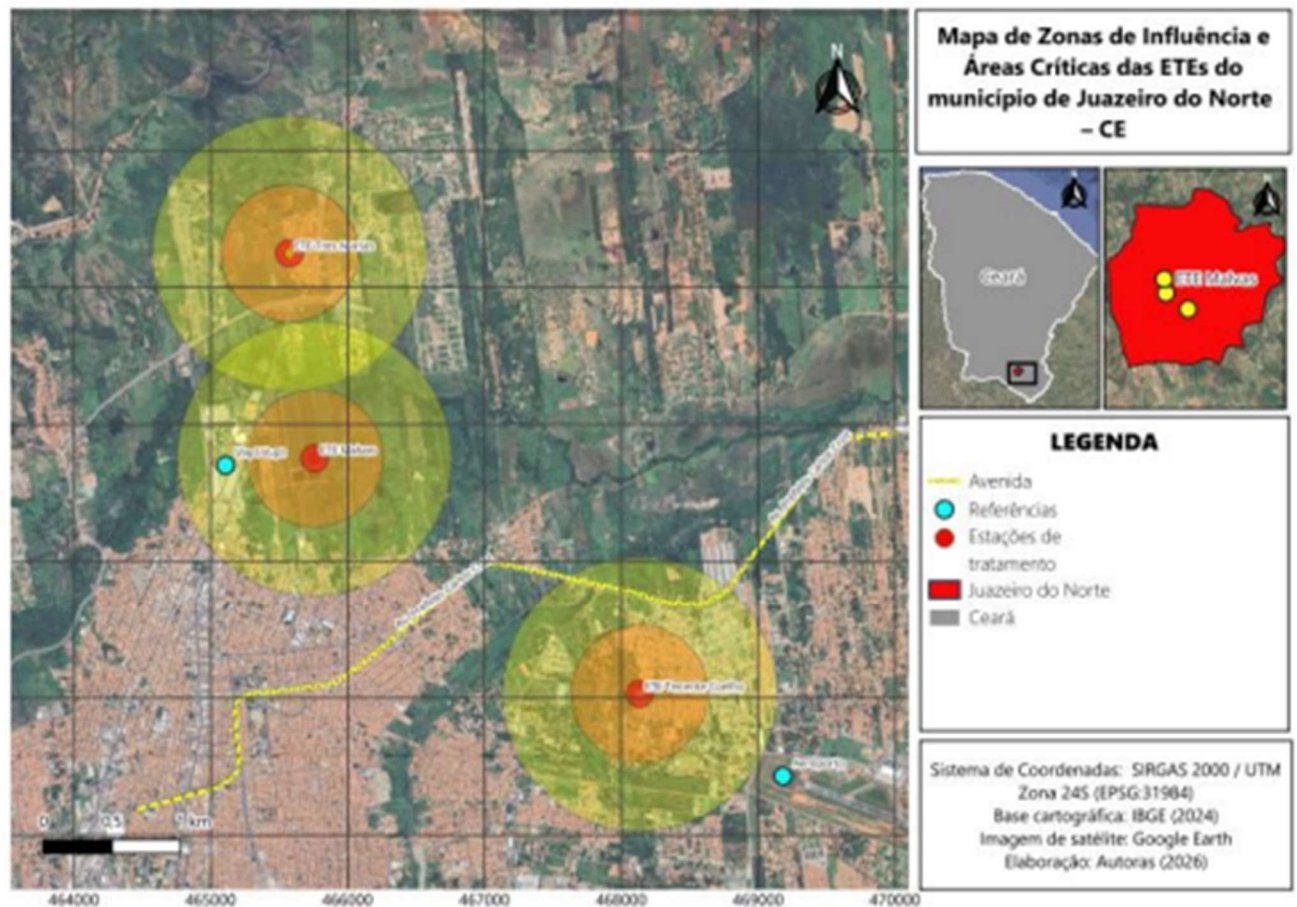
3. RESULTADOS DA TRIAGEM ESPACIAL

3.1 PADRÃO ESPACIAL GERAL

A análise espacial evidenciou diferentes padrões de inserção territorial l das três ETEs analisadas, que revelou contextos territoriais distintos em Juazeiro do Norte (Figura 2). Observou-se que as estações não estavam inseridas em configuração territorial uniforme; ao contrário, representavam diferentes estágios de interação entre a infraestrutura de saneamento e a ocupação do entorno. Essa heterogeneidade é relevante porque demonstra que a sensibilidade locacional depende da interface espacial entre a ETE e a malha residencial, e não apenas da tipologia tecnológica da unidade.

Em termos gerais, a análise indicou um gradiente que vai da condição periurbana à inserção mais intensa em malha urbana consolidada. Esse padrão expressa diferenças atuais de inserção territorial entre as estações e permite comparar quais unidades apresentam maior proximidade com usos residenciais e, portanto, maior necessidade de atenção no monitoramento territorial.

Figura 2 – Mapa síntese da distribuição espacial das ETEs em relação à mancha urbana municipal.



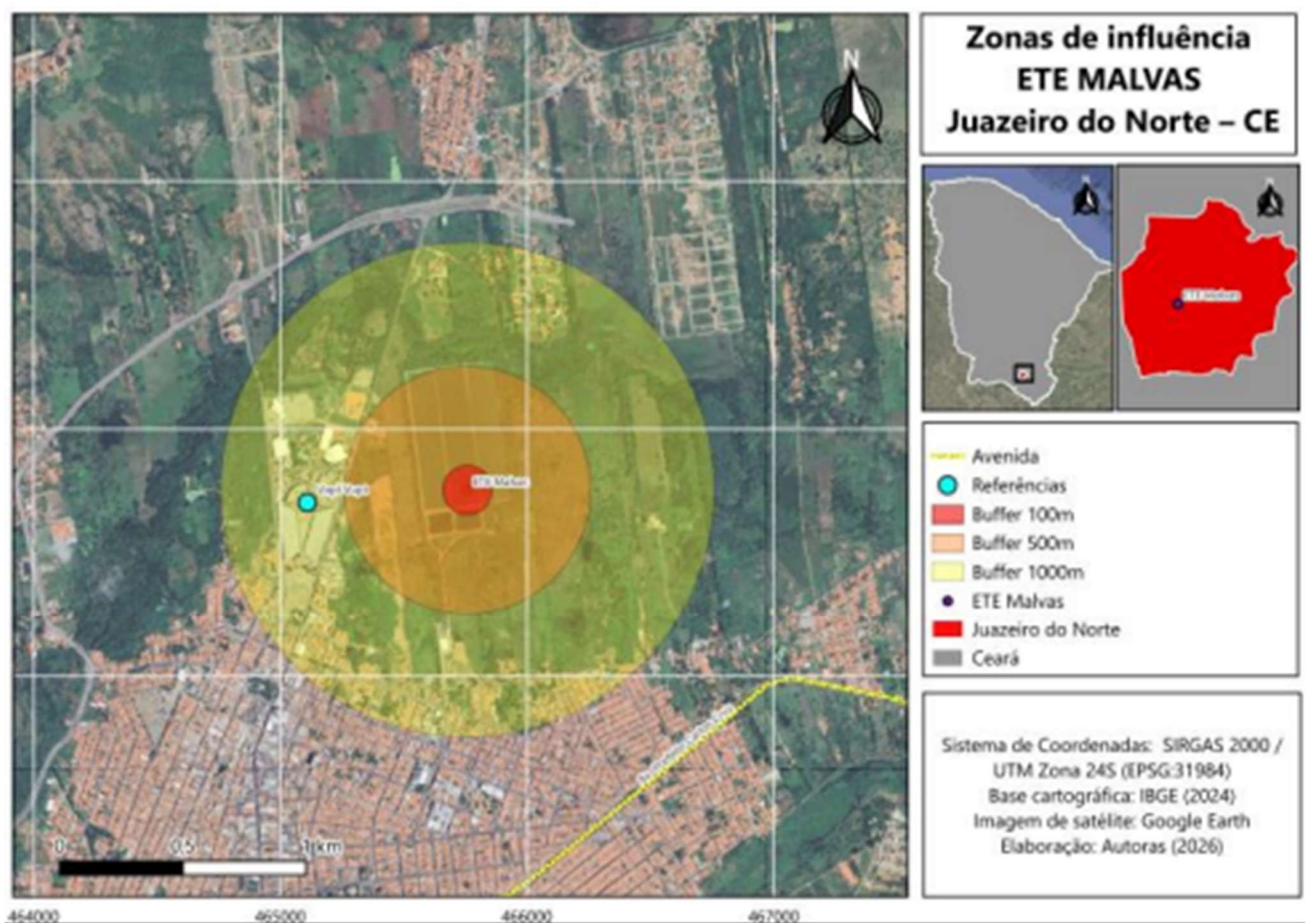
Fonte: elaboração própria, com base em IBGE (s.d.), Ambiental Ceará (2023) e procedimentos de geoprocessamento em QGIS.

3.2 TRIAGEM COMPARATIVA POR ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A ETE Malvas apresentou a menor ocupação residencial imediata entre as três estações (Figura 3). A faixa de 100 m mostrou ausência ou quase ausência de habitações, indicando inserção relativamente mais periférica. Nas faixas de 500 m e, sobretudo, de 1 km, observaram-se ocupação residencial, loteamentos e outras formas de uso urbano, o que amplia a interface espacial da unidade com o entorno. Além da menor ocupação imediata, o mapa indicou padrão

assimétrico de pressão territorial, mais evidente nos quadrantes sul/sudeste e leste, enquanto setores oeste e noroeste ainda preservaram maiores vazios e coberturas abertas. Esse arranjo sugere criticidade locacional atualmente menor no contato direto, mas com necessidade de acompanhamento nas faixas mais amplas.

Figura 3 – Mapas de buffers da ETE Malvas (100 m, 500 m e 1 km) e padrão de ocupação residencial no entorno.

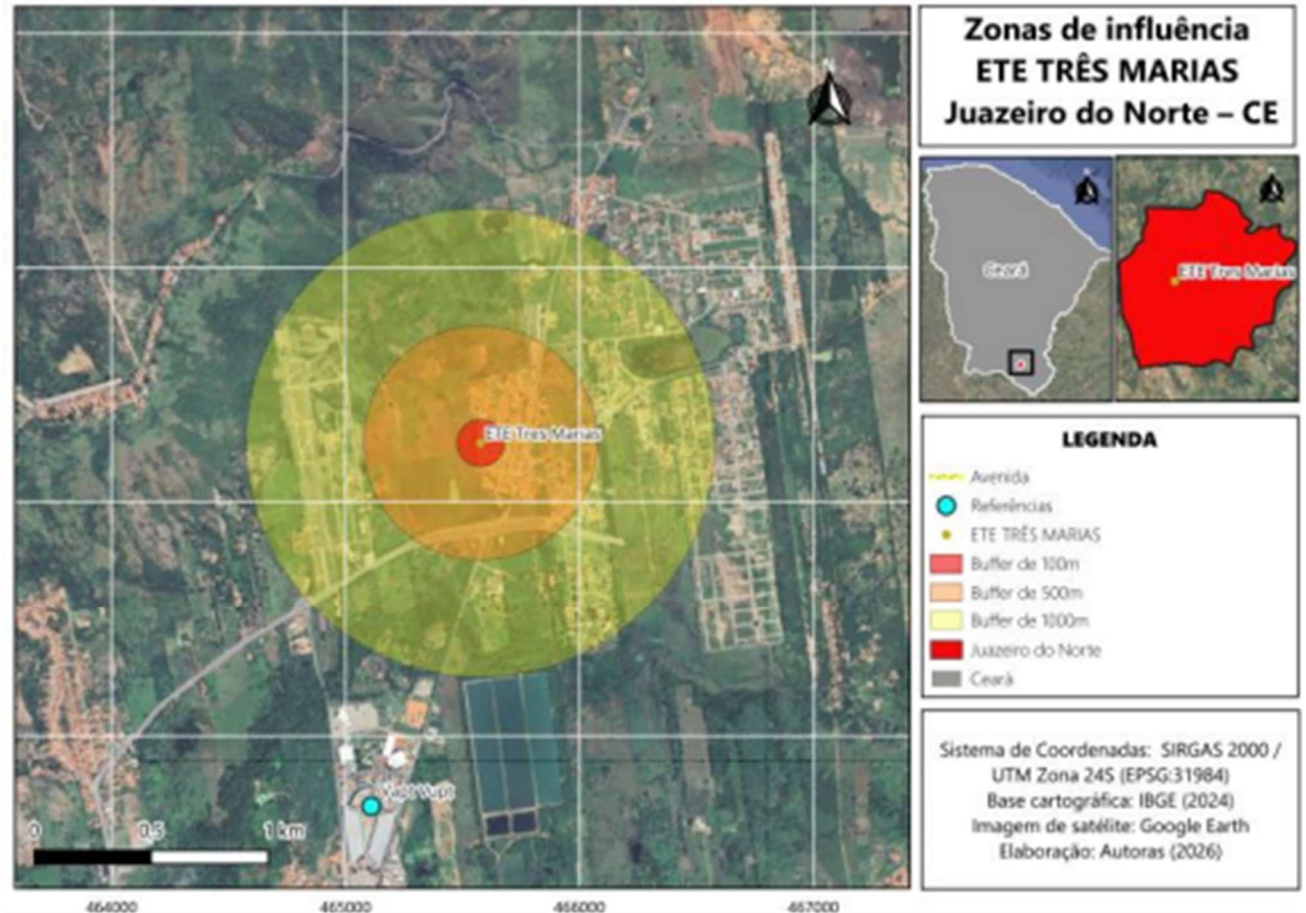


Fonte: elaboração própria, com base em IBGE (s.d.), Ambiental Ceará (2023) e procedimentos de geoprocessamento em QGIS.

A ETE Três Marias apresentou padrão intermediário (Figura 4). Embora a faixa imediata fosse menos ocupada do que a da ETE Tenente Coelho, as faixas de 500 m e 1 km incluíam usos residenciais e equipamentos urbanos, indicando interface locacional intermediária. A leitura espacial sugere configuração fragmentada, marcada por núcleos residenciais e parcelamentos mais visíveis nos setores leste e nordeste, ao passo que as porções oeste e noroeste permanecem relativamente menos consolidadas. A unidade pode, portanto, ser interpretada como caso prioritário para monitoramento territorial preventivo, sobretudo porque

a pressão observada decorre da combinação entre adjacência parcial e maior aproximação de usos urbanos nas faixas mais amplas.

Figura 4– Mapas de buffers da ETE Três Marias (100 m, 500 m e 1 km) e padrão de ocupação residencial no entorno.

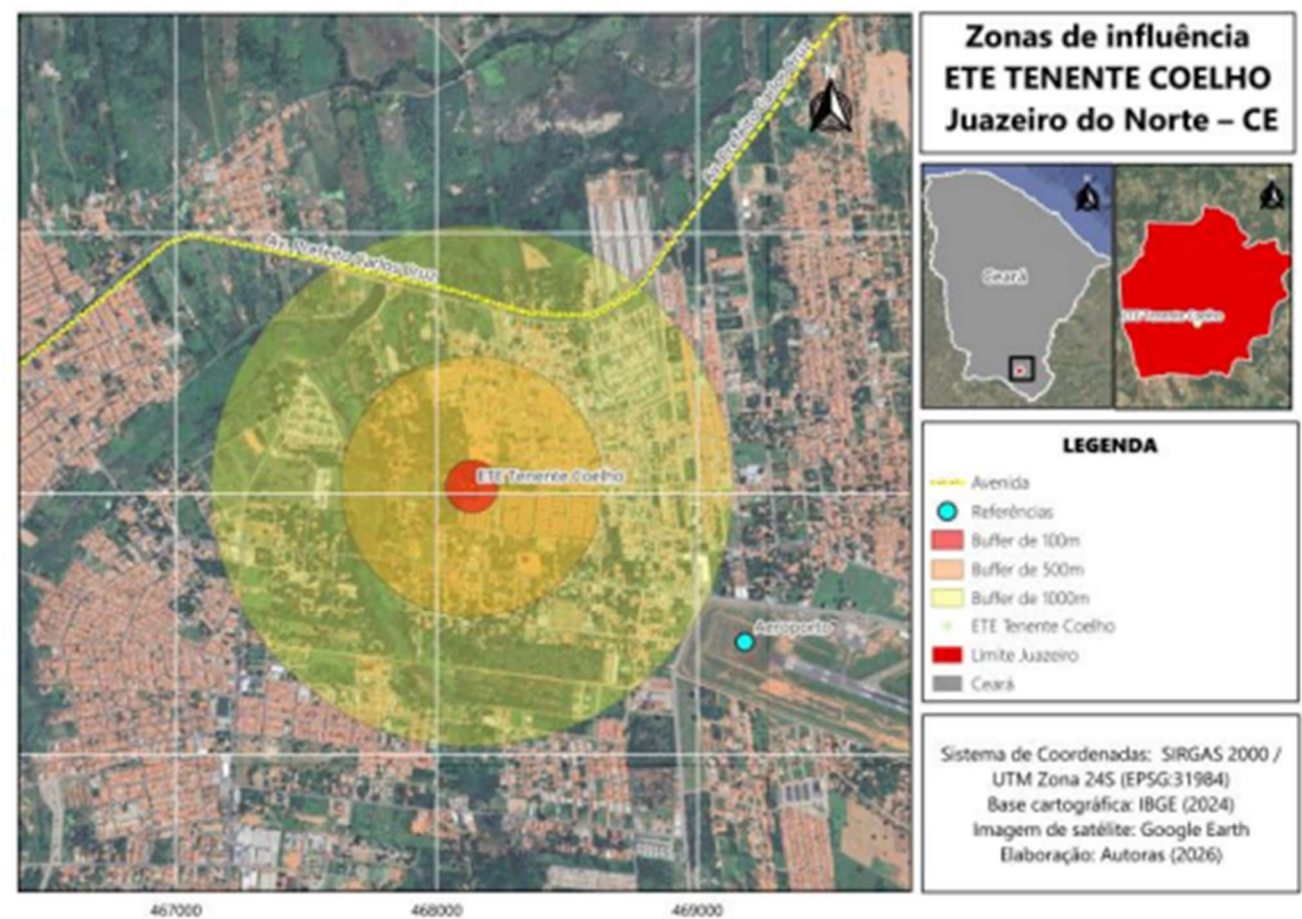


Fonte: elaboração própria, com base em IBGE (s.d.), Ambiental Ceará (2023) e procedimentos de geoprocessamento em QGIS.

A ETE Tenente Coelho apresentou a inserção mais intensa em ocupação urbana consolidada (Figura 5). Foram identificados usos residenciais no entorno imediato, e as faixas mais amplas correspondiam à malha urbana densa. Essa configuração indica a maior sensibilidade locacional entre os três casos e a necessidade mais evidente de integração entre a gestão do saneamento e a regulação do uso do solo. Os mapas também sugerem pressões territoriais em múltiplas direções, com ocupação em diferentes quadrantes, presença de eixos viários estruturantes e proximidade de outras infraestruturas urbanas, como o aeroporto, o que

reduz as margens de gestão locacional e reforça a complexidade territorial do entorno. A síntese comparativa desses padrões de inserção territorial é apresentada no Quadro 4

Figura 5 – Mapas de buffers da ETE Tenente Coelho (100 m, 500 m e 1 km) e padrão de ocupação residencial no entorno.



Fonte: elaboração própria, com base em IBGE (s.d.), Ambiental Ceará (2023) e procedimentos de geoprocessamento em QGIS.

Quadro 4. Síntese comparativa da interface espacial e da sensibilidade locacional no entorno das ETEs analisadas.

ETE	Tecnologia	Faixa de 100 m	Faixa de 500 m	Faixa de 1 km	Síntese qualitativa
Malvas	Lagoas de estabilização	Ocupação residencial inexistente ou residual	Expansão urbana em estágio inicial a intermediário	Ocupação residencial e loteamentos em expansão	Sensibilidade baixa a moderada; implantação originalmente periférica, mas com crescente aproximação da ocupação urbana.

Três Marias	Reator UASB	Ocupação imediata limitada	Presença de ocupação residencial e equipamentos urbanos	Consolidação urbana em curso	Sensibilidade moderada; contexto de transição com clara tendência de pressão territorial.
ETE	Tecnologia	Faixa de 100 m	Faixa de 500 m	Faixa de 1 km	Síntese qualitativa
Tenente Coelho	Reator UASB + tanque de decantação	Ocupação residencial nas imediações imediatas	Forte presença residencial	Malha urbana consolidada	Alta sensibilidade; interface territorial mais intensa entre a infraestrutura de saneamento e a ocupação urbana.

3.3 Setores críticos para monitoramento territorial

Os setores mais sensíveis corresponderam a situações em que a faixa de 100 m interceptava ocupação residencial ou em que a faixa de 500 m concentrava equipamentos urbanos e loteamentos recentes, conforme sintetizado na análise comparativa apresentada. Nessa lógica, a ETE Tenente Coelho representou o caso mais crítico, seguida pela ETE Três Marias. A ETE Malvas não deve ser interpretada como livre de conflitos; ao contrário, representa estação cujo entorno mais amplo já evidencia interface territorial relevante com a ocupação urbana. A leitura comparativa permite distinguir, assim, três formas de criticidade: criticidade atual por adjacência imediata, mais evidente em Tenente Coelho; criticidade intermediária por maior aproximação de usos urbanos nas faixas mais amplas, mais evidente em Três Marias; e criticidade mais baixa no entorno imediato, porém com interface territorial ampliada em escalas maiores, mais perceptível em Malvas.

Sob a perspectiva do monitoramento territorial, as três estações requerem atenção gerencial diferenciada. As preocupações imediatas de compatibilidade são mais evidentes na ETE Tenente Coelho, enquanto a ETE Três Marias requer controle preventivo em contexto de transição e a ETE Malvas demanda monitoramento preventivo nas faixas mais amplas do entorno. O mapa-síntese sugere ainda que Malvas e Três Marias compõem um setor territorial com prioridades semelhantes de acompanhamento, ao passo que Tenente Coelho se insere em área urbana distinta e mais consolidada, o que pode orientar prioridades espaciais diferenciadas de gestão.

4. DISCUSSÃO: SENSIBILIDADE LOCACIONAL, CRITÉRIOS TERRITORIAIS E IMPLICAÇÕES PARA A GESTÃO

Os resultados mostram que a sensibilidade locacional observada no entorno das ETES decorre da relação entre infraestrutura sanitária, configuração tecnológica e inserção na malha urbana. A proximidade entre estações de tratamento e ocupação residencial não foi interpretada como evidência direta de impacto, mas como indício espacial de situações que demandam maior atenção no planejamento urbano, no licenciamento ambiental e na gestão do saneamento. Essa leitura é coerente com a literatura que trata a localização de infraestruturas potencialmente geradoras de incômodos como questão territorial e não apenas operacional (Heller e Castro, 2013; Zhou *et al.*, 2022).

A incorporação de referenciais legais e técnico-locacionais amplia a capacidade interpretativa do estudo. Em âmbito federal, as normas do saneamento e da gestão de efluentes estruturam a necessidade de compatibilização entre infraestrutura sanitária, proteção ambiental e saúde pública, mas não fixam um afastamento único e obrigatório entre ETES e residências. Em razão disso, a análise locacional depende da articulação entre marco legal do saneamento, licenciamento ambiental, planejamento urbano municipal e referências técnicas complementares. Nesse quadro, a diretriz da FEPAM (2025) foi empregada apenas como parâmetro comparativo de cautela, sem ser tratada como regra automaticamente aplicável ao caso estudado.

Essa leitura territorial torna-se analiticamente mais robusta quando comparada ao diagnóstico do sistema de esgotamento sanitário produzido no âmbito da revisão do PDM/JN. Nesse diagnóstico, registrou-se para Juazeiro do Norte índice de coleta de esgotos de 21,97% no SNIS 2020, atendimento urbano de 24,3% e percentual de rede coletora disponível de 36%, caso todas as ligações existentes estivessem ativas. Em bases mais recentes, a ARCE informou índice de cobertura do SES de 38,01% e 28.142 ligações ativas de esgoto em 2022; no relatório de prestação de contas do exercício de 2023, registrou-se índice de economias residenciais atendidas com rede coletora de esgoto de 30%, extensão total de 185.285,76 m de infraestrutura de esgotamento sanitário, dos quais 122.409,74 m correspondiam à rede coletora, e índice de utilização da rede de esgoto de 64,26% em dezembro de 2023. Em fonte nacional mais recente, o Ranking do Saneamento de 2026, com base no SINISA 2024, reportou indicador de atendimento total de esgoto de 28,64% para o município. Como essas métricas não são metodologicamente idênticas ao atendimento urbano empregado no diagnóstico do PDM/JN, a comparação direta deve ser feita com cautela; ainda assim, em conjunto, elas confirmam a

permanência de um quadro de cobertura limitada, uso incompleto da infraestrutura instalada e necessidade de expansão acompanhada de ativação efetiva das ligações. O mesmo estudo assinalou que a rede coletora local foi implantada em 1988 e interpretou o avanço urbano dissociado da expansão do SES como evidência de frágil articulação entre planejamento urbano, ocupação do solo e saneamento ambiental (Luna *et al.*, 2023; ARCE, 2023; ARCE, 2024; Instituto Trata Brasil; GO Associados, 2026). Nesse contexto, a triagem espacial proposta pelo presente artigo não substitui o diagnóstico sistêmico; ela o complementa ao explicitar em que setores a desconexão entre expansão urbana e infraestrutura sanitária tende a produzir maior sensibilidade locacional.

O contraste entre Malvas, Três Marias e Tenente Coelho indica que a criticidade locacional resulta da combinação entre decisão locacional pretérita, tecnologia empregada e ritmo recente de urbanização do entorno. A ETE Malvas permanece em condição relativamente mais periférica, com baixa ocupação imediata, mas já inserida em frente de expansão nas faixas mais amplas. A ETE Três Marias apresenta situação intermediária, marcada por transição territorial e por fragmentos residenciais em progressiva aproximação. Já a ETE Tenente Coelho se destaca pela inserção mais intensa em área urbanizada, configurando o quadro de maior sensibilidade locacional entre as unidades analisadas.

Também é importante reconhecer que a probabilidade de incômodos odoríferos não decorre apenas da proximidade residencial, mas da interação entre tecnologia empregada, concepção da unidade, operação e manutenção. Diretrizes técnicas de licenciamento adotam distâncias mínimas recomendadas diferenciadas entre residências e unidades de tratamento, atribuindo maior cautela a lagoas anaeróbias do que às demais unidades, o que reforça que a tecnologia influencia a leitura da sensibilidade locacional, embora não a determine isoladamente. Em sistemas anaeróbios compactos, como reatores UASB, problemas associados a gases reduzidos e à formação de espuma podem igualmente favorecer a percepção de odores quando projeto, operação e manutenção não são adequados (Seghezze *et al.*, 1998; FEPAM, 2025).

Quando os mapas são comparados analiticamente com esses referenciais, torna-se possível distinguir entre criticidade locacional mais imediata e maior interface territorial nas faixas mais amplas. A ETE Tenente Coelho representa situação de maior criticidade imediata, porque já apresenta ocupação residencial próxima em contexto urbano consolidado. A ETE Três Marias requer atenção preventiva, uma vez que combina menor ocupação imediata com maior presença residencial e de equipamentos urbanos em faixas mais amplas. A ETE Malvas, por sua vez, exprime cenário de menor sensibilidade imediata, no qual a baixa ocupação no

entorno

imediatos não eliminam a necessidade de acompanhamento territorial nas escalas de 500 m e 1 km

Sob a perspectiva de sistemas de gestão ambiental, esse quadro sugere que ETEs situadas em áreas de maior sensibilidade locacional deveriam operar com rotinas mais robustas de identificação de aspectos ambientais significativos, monitoramento de odores e efluentes, registro e tratamento de reclamações da vizinhança, manutenção preventiva e ações corretivas. À medida que a coleta e a interligação de imóveis avançam em direção à universalização, cresce também a necessidade de maior rigor operacional e de monitoramento, porque a expansão da cobertura sem controle adequado pode deslocar o déficit histórico de acesso para problemas de desempenho, conformidade ambiental e incômodos odoríferos no entorno. Diretrizes técnicas recentes indicam que, diante da percepção de odores pela população residente no entorno imediato, devem ser priorizadas ações de controle na fonte, inibição da formação de H₂S, enclausuramento, coleta e tratamento das emissões gasosas; de modo convergente, guias de gestão de odores recomendam que tais planos integrem o sistema de gestão ambiental da instalação, com ciclos regulares de revisão (EPA Ireland, 2019; FEPAM, 2025; ISO, 2015; ARCE, 2023; ARCE, 2024).

Em revisão documental realizada para este manuscrito, não se localizou, em acesso público, um documento autônomo e formalmente publicado, com a denominação específica de plano de gerenciamento de odores, atribuído à CAGECE ou à Ambiental Ceará. Contudo, esse achado não deve ser interpretado como ausência de gestão do tema. Os documentos oficiais e regulatórios consultados indicam tratamento institucional da matéria por meio de instrumentos e rotinas correlatas: a CAGECE divulga a operação de Estação de Tratamento de Odores (ETO) vinculada à EPC de Fortaleza; a Ambiental Ceará informa monitoramento remoto 24 h de ETEs e EEEs por Centros de Operação Integrada, inclusive com unidade em Juazeiro do Norte; e o caderno de encargos da PPP exige plano operacional, plano de contingência, programas socioambientais, monitoramento e controle de estações, além de requisitos de regularidade ambiental. Em termos analíticos, isso sugere que, no arranjo institucional cearense, a gestão de odores aparece de forma distribuída entre soluções tecnológicas, rotinas operacionais e exigências regulatórias, ainda que não se tenha identificado, nos documentos públicos consultados, um plano específico de odores com essa nomenclatura (CAGECE, 2023; CAGECE, s.d.; Ambiental Ceará, 2024; ARCE, 2023; ARCE, 2024).

A interpretação da ETE Tenente Coelho como a situação mais sensível ganha consistência quando relacionada a pesquisas internacionais sobre incômodos associados à infraestrutura de esgotamento. Estudos recentes mostram que a proximidade entre sistemas de tratamento e áreas habitadas pode favorecer a emergência de queixas e de conflitos locais, sobretudo em ambientes urbanos mais densos, ainda que a confirmação de impactos específicos dependa de monitoramento direto (Felföldi, 2024; Cangialosi; Bruno; Fornaro, 2022). Assim, a maior inserção urbana observada no caso de Tenente Coelho reforça a pertinência de ações preventivas de gestão e monitoramento.

A ETE Três Marias, por sua vez, apresenta ocupação imediata mais limitada, mas já inserida em contexto de usos residenciais e equipamentos urbanos nas faixas de 500 m e 1 km. Os mapas sustentam, portanto, a interpretação de um estágio intermediário, em que a infraestrutura ainda não se encontra tão pressionada quanto Tenente Coelho, mas já exige acompanhamento territorial para evitar agravamento da incompatibilidade locacional. Essa leitura é compatível com estudos que apontam o avanço urbano sobre o entorno de infraestruturas sanitárias como processo gradual, capaz de transformar unidades originalmente periféricas em elementos progressivamente incorporados à malha urbana (Yang *et al.*, 2025).

Essa interpretação reforça que o saneamento não pode ser tratado como setor dissociado da política urbana. Conforme Heller e Castro (2013), a infraestrutura sanitária participa diretamente da produção do espaço urbano e, por isso, sua permanência e operação dependem de articulação com instrumentos de ordenamento territorial. No caso analisado, a triagem espacial mostrou-se útil justamente por evidenciar onde a relação entre infraestrutura e ocupação residencial já se apresenta mais sensível e onde a ação preventiva ainda pode ser mais eficaz.

No caso de Juazeiro do Norte, os relatórios de fiscalização da ARCE reforçam essa interpretação ao acrescentarem evidências operacionais e regulatórias ao quadro locacional. Na fiscalização de 2023, a agência registrou 28.142 ligações ativas de esgoto e índice de cobertura de 38,01% para o SES do município, além de apontar lançamento de efluentes em desacordo com padrões ambientais, falhas no monitoramento e controle de efluentes e, na ETE Malvas, presença de sobrenadantes e odores fortes na lagoa de maturação. Em relatório anterior, de 2015, a ARCE já havia registrado ausência de Licença de Operação nas ETES Malvas, Minha Casa Minha Vida, Mutirão, PROURB e Vila Três Marias, além de lançamento de esgoto a céu aberto próximo à ETE Vila Fátima (ARCE, 2015; ARCE, 2023). Esses registros não demonstram, por si só, impacto direto sobre as moradias mapeadas neste estudo, mas reforçam que a leitura da sensibilidade locacional se torna mais consistente quando

analisada em conjunto com informações de operação, fiscalização e conformidade ambiental.

Sob essa perspectiva, os mapas deixam de ser apenas representação descritiva e passam a operar como evidência territorial para a gestão urbana. Eles permitem reconhecer onde a compatibilidade entre infraestrutura sanitária e uso residencial já se encontra tensionada e onde o monitoramento deve ser mais atento. Em contextos de dados limitados, esse tipo de leitura pode apoiar a priorização de vistorias, a revisão de parâmetros de uso do solo e a análise locacional em procedimentos de licenciamento.

Do ponto de vista metodológico, o emprego do QGIS mostrou-se consistente com o problema de pesquisa por quatro razões principais. Em primeiro lugar, permitiu integrar bases vetoriais, imagens de satélite e interpretação visual do uso do solo em um mesmo ambiente analítico. Em segundo, possibilitou comparar faixas de proximidade distintas de forma padronizada. Em terceiro, favoreceu a leitura conjunta entre ocupação residencial, equipamentos urbanos e referenciais técnico-locacionais. Por fim, mostrou-se compatível com contextos institucionais de menor disponibilidade de dados, o que reforça a utilidade de procedimentos de baixo custo para a triagem espacial em contextos urbanos de rápida expansão.

Nesse sentido, a expressão “triagem espacial da sensibilidade locacional” define com maior precisão o alcance do estudo. Os resultados não substituem avaliações operacionais, medições ambientais ou modelagens específicas, mas oferecem base analítica inicial para reconhecer situações de maior sensibilidade locacional e orientar prioridades de gestão. A principal contribuição do trabalho, portanto, consiste em sistematizar um protocolo replicável e de baixo custo para apoiar o planejamento urbano-sanitário e o licenciamento ambiental em contextos de rápida expansão urbana. Quando articulada a esses documentos contextuais, a triagem espacial ganha maior utilidade para a priorização de vistorias, o monitoramento preventivo e a revisão de critérios locacionais em contextos municipais de rápida expansão urbana.

Quadro 5. Foco de planejamento recomendado de acordo com o padrão de triagem observado.

Padrão observado	Implicação interpretativa	Foco de gestão recomendado
-------------------------	----------------------------------	-----------------------------------

Adjacência residencial imediata	Maior sensibilidade locacional e pressão mais intensa de compatibilidade	Verificação de campo, monitoramento territorial e controle mais rigoroso do uso do solo no entorno
Frentes de expansão nas faixas intermediárias	Contexto de transição com potencial crescente de conflito	Revisão preventiva do zoneamento, da aprovação de loteamentos e da gestão das faixas de proteção da infraestrutura
Contexto predominantemente periférico com crescimento nas faixas mais amplas	Menor sensibilidade imediata, porém com pressão crescente no longo prazo	Atualização periódica do mapeamento do uso do solo e monitoramento preventivo da aproximação urbana

Fonte: elaboração própria. 2026.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No escopo exploratório e qualitativo adotado, o estudo alcançou o objetivo de analisar a interface espacial entre estações de tratamento de esgoto e ocupação residencial no município de Juazeiro do Norte, evidenciando que essa interface não é homogênea, mas expressa diferentes graus de sensibilidade locacional associados à localização das unidades, à tecnologia empregada e à configuração atual da ocupação urbana no entorno. Pois os resultados indicaram a existência de diferentes padrões de inserção territorial das ETEs, evidenciando variações na análise locacional. Entre as unidades avaliadas, a ETE Tenente Coelho apresentou a condição locacional mais crítica, em razão de sua maior inserção em área urbanizada; a ETE Três Marias configurou situação intermediária; e a ETE Malvas permaneceu relativamente menos pressionada nas proximidades imediatas, embora apresente interface territorial mais ampla nas escalas de 500 m e 1 km. Esses resultados indicam que a vulnerabilidade locacional das ETEs não decorre apenas de sua presença física no território, mas da combinação entre histórico de implantação, configuração tecnológica e padrão atual de uso e ocupação do solo.

A análise locacional realizada evidenciou que, a abordagem de triagem espacial mostrou-se relevante por oferecer procedimento técnico de baixo custo, replicável e útil para a identificação de áreas prioritárias para intervenção. Nesse sentido, o método pode subsidiar decisões relacionadas à revisão de parâmetros de uso do solo no entorno de infraestruturas sanitárias, à definição de critérios de compatibilidade locacional em processos de

licenciamento ambiental, ao direcionamento de ações preventivas do planejamento municipal e à priorização de áreas para monitoramento mais detalhado. Quando interpretado em conjunto com informações diagnósticas e regulatórias, esse procedimento amplia sua utilidade para orientar decisões preventivas em sistemas de esgotamento submetidos à expansão urbana e a restrições de monitoramento. Além disso, em cenários de expansão da coleta em direção à universalização, a utilidade do método cresce, porque a ampliação da cobertura deve ser acompanhada de maior rigor na operação, no monitoramento ambiental e na gestão de odores das ETEs. Em complemento, a explicitação pública de rotinas ou planos específicos de gestão de odores tenderia a fortalecer a transparência regulatória, a prevenção de conflitos de vizinhança e a integração entre expansão da cobertura, operação das ETEs e gestão ambiental preventiva (CAGECE, 2023; CAGECE, s.d.; Ambiental Ceará, 2024; ARCE, 2023; ARCE, 2024).

Além de seu valor metodológico, o estudo contribui para a compreensão de um problema recorrente em municípios brasileiros submetidos à expansão urbana recente: a aproximação entre a ocupação urbana e infraestruturas sanitárias previamente implantadas, muitas vezes sem critérios locacionais suficientemente explícitos no planejamento territorial. Ao demonstrar a utilidade da análise espacial como instrumento de apoio à decisão, o trabalho reforça a necessidade de maior articulação entre políticas de saneamento, regulação urbanística e licenciamento ambiental, de modo a antecipar conflitos e reduzir custos institucionais e socioambientais futuros.

Nessa perspectiva analítica, a articulação entre análise espacial, informações diagnósticas do SES e registros regulatórios mostrou-se particularmente útil para qualificar a priorização de áreas críticas e sustentar decisões preventivas de gestão ambiental e territorial.

Como desdobramento, recomenda-se que estudos futuros integrem análises qualitativas e dados de campo, com aprofundamento da análise por meio da quantificação das áreas residenciais por faixa de distância, da incorporação de séries temporais de mudança no uso do solo, da validação em campo das condições observadas cartograficamente e da integração com indicadores operacionais, ambientais e perceptivos.

Além disso, a metodologia proposta pode ser aplicada em outros municípios, tais avanços poderão ampliar a robustez do modelo analítico proposto e fortalecer sua aplicação como ferramenta de suporte ao planejamento urbano-sanitário em outros contextos municipais.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Universidade Federal do Cariri (UFCA) pelo apoio institucional ao desenvolvimento da pesquisa e às instituições responsáveis pela disponibilização das bases cartográficas e das informações públicas utilizadas na análise.

Agradecem, de forma especial, à Profa. Dra. Maria Gorethe de Sousa Lima Brito pelo apoio constante, pela paciência, dedicação e valiosa orientação ao longo de todo o processo. Seu profundo conhecimento na área de Saneamento constitui uma fonte de inspiração, especialmente para todas as jovens que aspiram trilhar caminhos nesta área e contribuir significativamente para a sociedade.

Manifestam, ainda, sua gratidão à Profa. Dra. Anielly Santos Brito pela colaboração na elaboração deste artigo. Sua expertise, entusiasmo e escuta atenta foram fundamentais para o aprimoramento e enriquecimento deste trabalho.

Aos amigos e familiares, agradecem o apoio, incentivo e compreensão ao longo desta trajetória, que foram essenciais para a concretização deste trabalho.

Por fim, expressam sua gratidão a Deus, pela vida, pela sabedoria e pela força concedidas ao longo desta jornada, fundamentais para superar desafios e alcançar os objetivos propostos.

REFERÊNCIAS

AMBIENTAL CEARÁ. **Ceará assume projeto de PPP de esgoto para 17 cidades cearenses.** Fortaleza: Ambiental Ceará, 2 fev. 2023. Disponível em: <https://ambientalceara.com.br/ambiental-ceara-assume-projeto-de-ppp-de-esgoto-para-17-cidades-cearenses/>. Acesso em: 21 mar. 2026.

AMBIENTAL CEARÁ. **Ambiental Ceará intensifica ações preventivas na rede de esgoto para quadra chuvosa.** Fortaleza: Ambiental Ceará, 9 jan. 2024. Disponível em: <https://ambientalceara.com.br/ambiental-ceara-intensifica-acoes-preventivas-na-rede-de-esgoto-para-quadra-chuvosa/>. Acesso em: 28 mar. 2026.

ARCE – AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DELEGADOS DO ESTADO DO CEARÁ. **Relatório de Fiscalização RF/CSB/0047/2015:** fiscalização do sistema de esgotamento sanitário da sede do município de Juazeiro do Norte. Fortaleza: ARCE, 2015. Disponível em: <https://www.arce.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/53/2023/08/RF-CSB-047-2015..pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

ARCE – AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DELEGADOS DO ESTADO DO CEARÁ. **Relatório de Fiscalização RF/CSB/019/2023:** fiscalização dos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário do município de Juazeiro do Norte. Fortaleza: ARCE, 2023. Disponível em: <https://www.arce.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/53/2023/08/RF-CSB-019-2023..pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

ARCE – AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DELEGADOS DO ESTADO DO CEARÁ. **Relatório de Prestação de Contas de Juazeiro do Norte – Exercício 2023**. Fortaleza: ARCE, 2024. Disponível em: <https://www.arce.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/53/2024/06/2.-Relatorio-de-Prestacao-de-Contas-de-Juazeiro-do-Norte-Exercicio-2023.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, DF: Presidência da República, 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm. Acesso em: 21 mar. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445/2007. Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 21 mar. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Brasília, DF: CONAMA, 2011. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=627&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em: 21 mar. 2026.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford: Oxford University Press, 2000.

CAGECE – COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ. **Cagece avança ao longo de 52 anos tornando o sistema de esgotamento sanitário no Ceará mais eficiente**. Fortaleza: Cagece, 19 jul. 2023. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/comunicacao/noticias/cagece-avanca-ao-longo-de-52-anos-tornando-o-sistema-de-esgotamento-sanitario-no-ceara-mais-eficiente/>. Acesso em: 28 mar. 2026.

CAGECE – COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ. **Anexo IV – Caderno de Encargos da Concessão Administrativa**. Fortaleza: Cagece, [s.d.]. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/wp-content/uploads/PDF/Universaliza%C3%A7%C3%A3o/ContratoeAnexo/CP-2.2-ANEXO-IV-CADERNO-DE-ENCARGOS.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CANGIALOSI, F.; BRUNO, E.; FORNARO, A. Integrating citizen science and machine learning algorithms for the recognition of odour classes nearby a wastewater treatment plant. **Chemical Engineering Transactions**, v. 95, p. 25-30, 2022. DOI: 10.3303/CET2295005.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 2007.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA IRELAND). **Odour Emissions Guidance Note (Air Guidance Note AG9)**. Wexford: EPA Ireland, 2019. Disponível em:

https://www.epa.ie/publications/compliance--enforcement/air/air-guidance-notes/AG9_Odour-Emissions-Guidance-Note_Sep2019_v1.pdf. Acesso em: 28 mar. 2026.

FELFÖLDI, T. Microbiological aspects of sewage odor problems in the urban environment: a review. **Biologia Futura**, v. 75, p. 371-377, 2024. DOI: 10.1007/s42977-024-00242-2.

FEPAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **Diretriz Técnica nº 04/2019**: critérios para licenciamento ambiental de estações de tratamento de esgoto sanitário. Porto Alegre: FEPAM, 2019. Disponível em: https://ww3.fepam.rs.gov.br/CENTRAL/DIRETRIZES/DIRET_TEC_04_2019.PDF. Acesso em: 21 mar. 2026.

FEPAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **Diretriz Técnica nº 04/2019, versão 3, setembro de 2025**: critérios para licenciamento ambiental de estações de tratamento de esgoto sanitário. Porto Alegre: FEPAM, 2025. Disponível em: <https://admin.fepam.rs.gov.br/upload/arquivos/202509/19165843-dt-04-19-versao-setembro-2025-rev-dirtec.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HELLER, L.; CASTRO, J. E. **Saneamento e saúde pública**. Belo Horizonte: UFMG, 2013.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Juazeiro do Norte (CE) | Cidades e Estados**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce/juazeiro-do-norte.html>. Acesso em: 21 mar. 2026.

INSTITUTO TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS. **Ranking do Saneamento 2026**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2026. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento-2026/>. Acesso em: 28 mar. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Introduction to ISO 14001:2015**. Geneva: ISO, 2015. Disponível em: https://www.iso.org/iso/introduction_to_iso_14001.pdf. Acesso em: 28 mar. 2026.

JUAZEIRO DO NORTE. **Lei Complementar nº 149, de 9 de fevereiro de 2026**. Institui o Plano Diretor Municipal de Juazeiro do Norte e dá outras providências. Juazeiro do Norte, CE: Prefeitura Municipal, 2026a. Disponível em: <https://juazeirodonorte.ce.gov.br/leis.php?id=9405>. Acesso em: 21 mar. 2026.

JUAZEIRO DO NORTE. **Lei Municipal nº 6032, de 9 de fevereiro de 2026**. Dispõe sobre o Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo do Município de Juazeiro do Norte e dá outras providências. Juazeiro do Norte, CE: Prefeitura Municipal, 2026b. Disponível em: <https://juazeirodonorte.ce.gov.br/leis.php?id=9408>. Acesso em: 21 mar. 2026.

LONGLEY, P.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems and Science**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2015.

LUNA, M. R. F.; PINO, A. B. S.; BRITO, M. G. S. L. Diagnóstico do sistema de esgotamento sanitário do município de Juazeiro do Norte – CE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 32., 2023, Rio de Janeiro.

Anais [...] Rio de Janeiro: ABES, 2023. Disponível em: https://abesdn.org.br/anais eletronicos/32cbesa/892_tema_ii.pdf. Acesso em: 28 mar. 2026.

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; VAN LIER, J. B.; HAMELERS, H. V. M.; LETTINGA, G. The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors: a review. **Bioresource Technology**, v. 65, p. 175-190, 1998. DOI: 10.1016/S0960-8524(98)00046-7.

VON SPERLING, M. **Sistemas de tratamento biológico de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2009.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2014.

YANG, Z.; YAN, Y.; HUANG, Z.; LIU, H. Design optimization of composite grey infrastructure from NIMBY to YIMBY: case study of five water treatment plants in Shenzhen's high-density urban areas. **Buildings**, v. 15, n. 21, art. 3966, 2025. DOI: 10.3390/buildings15213966.

ZHOU, Y.; SONG, Y.; LI, S.; QIN, W.; SUN, J. A location selection method for wastewater treatment plants integrating dynamic change of water ecosystem and socio-cultural indicators: a case study of Phnom Penh. **Water**, v. 14, n. 22, art. 3637, 2022. DOI: 10.3390/w14223637.

ANEXO
DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que este Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia/Tese/Dissertação), escrito sob minha orientação, está em versão final, de acordo com as solicitações realizadas pela banca examinadora.

Informo também que procedi à revisão final do texto, constatando que atende às especificações das normas da ABNT para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFCA, no que diz respeito ao conteúdo e à formatação.



Documento assinado digitalmente

MARIA GORETHE DE SOUSA LIMA BRITO

Data: 29/04/2026 17:51:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Data e local da assinatura eletrônica