AVALIAÇÃO INTEGRADA DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM CEMITÉRIOS URBANOS: APLICAÇÃO DO FRAMEWORK FFIMDAVAC E DO ÍNDICE IVAC AO COMPLEXO DE CEMITÉRIOS QUINTA DOS LÁZAROS (SALVADOR, BAHIA, BRASIL)

INTEGRATED ENVIRONMENTAL VULNERABILITY ASSESSMENT OF URBAN CEMETERIES: APPLICATION OF THE FFIMDAVAC FRAMEWORK AND THE IVAC INDEX TO THE QUINTA DOS LÁZAROS CEMETERY COMPLEX (SALVADOR, BAHIA, BRAZIL)

EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA VULNERABILIDAD AMBIENTAL EN CEMENTERIOS URBANOS: APLICACIÓN DEL FRAMEWORK FFIMDAVAC Y DEL ÍNDICE IVAC EN EL COMPLEJO DE CEMENTERIOS QUINTA DOS LÁZAROS (SALVADOR, BAHÍA, BRASIL)

10.56238/IIMultiCientifica-090

Flavio Souza Batista
Doutorando em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos
Instituição: Universidade Federal da Bahia (UFBA); Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA)
E-mail: flaviosbatista1@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4117-6390
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/9541421462821227

Cristovaldo Bispo dos Santos
Doutor em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos
Instituição: Universidade Federal da Bahia (UFBA); Serviço Geológico do Brasil (CPRM)
E-mail: bispo@ufba.br
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/5411837184947763

Manuel Vitor Portugal Gonçalves
Doutor em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos
Instituição: Universidade Federal da Bahia (UFBA)
E-mail: hidrovitor@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2559-6045
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/8028380853221190

Manoel Jerônimo Moreira Cruz
Doutor em Petroquímica
Instituição: Universidade Federal da Bahia (UFBA)
E-mail: jc9508@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8488-4936
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/0904466257879054

RESUMO

A gestão ambiental de cemitérios urbanos em países em desenvolvimento enfrenta o desafio de superar modelos de avaliação puramente hidrogeológicos que ignoram a complexidade das interações socioterritoriais e institucionais. Este artigo apresenta a aplicação do Framework Forense Integrado e Multidimensional para Diagnóstico da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (FFIMDAVAC) e do Índice de Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (IVAC) no Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros (CELAZ), em Salvador, Bahia, Brasil. A metodologia fundamenta-se na Teoria da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (TVAC) e no protocolo de rastreabilidade OD–ID–JT (Observação Direta, Informação Documental e Julgamento Técnico), integrando oito dimensões analíticas em um índice multicritério que sintetiza a vulnerabilidade ambiental em uma escala de 1,00 a 5,00. Os resultados revelaram um IVAC de 4,61, classificando o complexo como de Muito Alta Vulnerabilidade, validado pela convergência de 7/7 linhas independentes de evidência. A análise demonstrou que a vulnerabilidade não decorre apenas da suscetibilidade do meio físico, mas da convergência entre fragilidades operacionais, lacunas de governança e injustiça ambiental — as dimensões socioterritorial, operacional e de governança responderam conjuntamente por 33,68% do escore total, proporção que permaneceria invisível em avaliações conduzidas exclusivamente pelos modelos GOD e DRASTIC. O ranking de contribuição das dimensões foi: D8 (17,17%) > D2 = D5 (14,45% cada) > D1 = D4 = D6 (13,73% cada) > D3 (9,76%) > D7 (5,78%). O estudo documenta o fenômeno da Conformidade Ilusória, no qual o licenciamento ambiental baseado exclusivamente em conformidade documental dissocia-se da realidade material do território, e conclui que a proteção das águas subterrâneas e a promoção da justiça ambiental em áreas cemiteriais urbanas exigem a adoção de modelos integrados que articulem evidências físicas, forenses e institucionais.

Palavras-chave: Vulnerabilidade Ambiental. Cemitérios Urbanos. Águas Subterrâneas. FFIMDAVAC. IVAC. Engenharia Forense Ambiental. Geografia da Saúde.

ABSTRACT

Environmental management of urban cemeteries in developing countries faces the challenge of overcoming purely hydrogeological assessment models that ignore the complexity of socio-territorial and institutional interactions. This article presents the application of the Integrated and Multiscale Forensic Framework for Diagnosing and Assessing Vulnerabilities Related to Cemetery Activities (FFIMDAVAC) and the Cemetery Environmental Vulnerability Index (IVAC) at the Quinta dos Lázaros Cemetery Complex (CELAZ) in Salvador, Bahia, Brazil. The methodology is grounded in the Theory of Cemetery Environmental Vulnerability (TVAC) and the OD–ID–JT traceability protocol (Direct Observation, Documentary Information, and Technical Judgment), integrating eight analytical dimensions into a multi-criteria index that synthesizes environmental vulnerability on a scale from 1.00 to 5.00. The results revealed an IVAC of 4.61, classifying the complex as Very High Vulnerability, validated by the convergence of 7/7 independent lines of evidence. The analysis demonstrated that vulnerability stems not only from the physical environment's susceptibility but from the convergence of operational weaknesses, governance gaps, and environmental injustice — the socio-territorial, operational, and governance dimensions jointly accounted for 33.68% of the total score, a proportion that would remain invisible in assessments conducted exclusively through GOD and DRASTIC models. The dimension contribution ranking was: D8 (17.17%) > D2 = D5 (14.45% each) > D1 = D4 = D6 (13.73% each) > D3 (9.76%) > D7 (5.78%) . The study documents the phenomenon of Illusory Compliance, in which environmental licensing based exclusively on documentary compliance becomes dissociated from the material reality of the territory, and concludes that groundwater

protection and the promotion of environmental justice in urban cemetery areas require the adoption of integrated models that articulate physical, forensic, and institutional evidence.

Keywords: Environmental Vulnerability. Urban Cemeteries. Groundwater. FFIMDAVAC. IVAC. Environmental Forensic Engineering. Health Geography.

RESUMEN

La gestión ambiental de cementerios urbanos en países en desarrollo enfrenta el desafío de superar modelos de evaluación puramente hidrogeológicos que ignoran la complejidad de las interacciones socioterritoriales e institucionales. Este artículo presenta la aplicación del Marco Forense Integrado y Multiescalar para el Diagnóstico y Evaluación de Vulnerabilidades Relacionadas con la Actividad Cementerial (FFIMDAVAC) y del Índice de Vulnerabilidad Ambiental Cementerial (IVAC) en el Complejo de Cementerios Quinta dos Lázaros (CELAZ) en Salvador, Bahía, Brasil. La metodología se fundamenta en la Teoría de la Vulnerabilidad Ambiental Cementerial (TVAC) y en el protocolo de rastreabilidad OD–ID–JT (Observación Directa, Información Documental y Juicio Técnico), integrando ocho dimensiones analíticas en un índice multicriterio que sintetiza la vulnerabilidad ambiental en una escala de 1,00 a 5,00. Los resultados revelaron un IVAC de 4,61, clasificando el complejo como de Muy Alta Vulnerabilidad, validado por la convergencia de 7/7 líneas independientes de evidencia. El análisis demostró que la vulnerabilidad no deriva únicamente de la susceptibilidad del medio físico, sino de la convergencia entre fragilidades operacionales, vacíos de gobernanza e injusticia ambiental — las dimensiones socioterritorial, operacional y de gobernanza respondieron conjuntamente por el 33,68% del puntaje total. El ranking de contribución de las dimensiones fue: D8 (17,17%) > D2 = D5 (14,45% cada) > D1 = D4 = D6 (13,73% cada) > D3 (9,76%) > D7 (5,78%) . El estudio documenta el fenómeno del Cumplimiento Ilusorio, en el cual el licenciamiento ambiental basado exclusivamente en la conformidad documental se disocia de la realidad material del territorio.

Palabras clave: Vulnerabilidad Ambiental. Cementerios Urbanos. Aguas Subterráneas. FFIMDAVAC. IVAC. Ingeniería Forense Ambiental. Geografía de la Salud.

1 INTRODUÇÃO

Cemitérios urbanos constituem fontes potenciais de contaminação de aquíferos subterrâneos devido à liberação de necrochorume — efluente líquido resultante da decomposição cadavérica, rico em matéria orgânica, nitrogênio amoniacal, sais minerais e microrganismos patógenos (Dent, 2002; Fiedler *et al.*, 2012; Gwenzi, 2021). Em países em desenvolvimento, onde o saneamento básico é frequentemente parcial e a ocupação urbana se dá de forma desordenada, a proximidade entre áreas de sepultamento e residências que dependem de poços rasos para abastecimento agrava significativamente o risco à saúde pública (Zychowski & Bryndal, 2018).

A avaliação da vulnerabilidade ambiental de cemitérios urbanos tem sido tradicionalmente conduzida por meio de modelos hidrogeológicos como GOD (Foster & Hirata, 1988) e DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), que classificam a suscetibilidade intrínseca de aquíferos à contaminação com base em parâmetros físicos do meio. Embora esses modelos representem ferramentas consolidadas para o planejamento territorial e a proteção dos recursos hídricos, sua aplicação isolada a contextos cemiteriais urbanos apresenta limitações epistêmicas significativas: eles não capturam fatores operacionais (infraestrutura, manejo de resíduos, protocolos de exumação), institucionais (licenciamento, fiscalização, governança) e socioterritoriais (densidade populacional, vulnerabilidade social, justiça ambiental) que, conforme evidenciado pela literatura recente, exercem influência comparável — e em alguns casos superior — à suscetibilidade natural do aquífero na produção da vulnerabilidade ambiental (Dent, 2002; Fiedler *et al.*, 2012; Zychowski & Bryndal, 2018; Gwenzi, 2021).

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 335/2003 estabelece requisitos mínimos para o licenciamento ambiental de cemitérios, incluindo caracterização hidrogeológica e monitoramento periódico. Neste trabalho propõe-se o conceito de Conformidade Ilusória para descrever precisamente a dissociação entre a adequação burocrática aos requisitos legais e a realidade ambiental observada em campo — um fenômeno no qual a existência de licenciamento ambiental não implica, necessariamente, condições satisfatórias de desempenho ambiental. Essa lacuna entre a realidade documental e a realidade material do território evidencia que os instrumentos normativos vigentes, ao privilegiarem a verificação documental em detrimento da materialidade das evidências de campo, podem não representar adequadamente a complexidade dos processos responsáveis pela produção e manutenção da vulnerabilidade ambiental em sistemas cemiteriais urbanos.

Paralelamente, a literatura internacional tem avançado na direção de abordagens integradas para a compreensão da vulnerabilidade ambiental. Autores como Turner *et al.* (2003), Gallopín (2006), Adger (2006) e o IPCC (2023) reconhecem que a vulnerabilidade constitui um fenômeno multidimensional, resultante da interação entre componentes biofísicos, sociais, econômicos e institucionais, que se manifesta em múltiplas escalas espaciais e temporais. No campo específico dos cemitérios urbanos, Gwenzi (2021) argumenta que esses empreendimentos devem ser compreendidos como sistemas complexos de emissão de contaminantes, enquanto Zychowski & Bryndal (2018) destacam que os impactos ambientais dependem simultaneamente das condições hidrogeológicas, da urbanização e dos modelos de gestão adotados. Contudo, essas contribuições permanecem predominantemente no plano conceitual, carecendo de instrumentos operacionais que traduzam a complexidade teórica em ferramentas aplicáveis a empreendimentos específicos.

É nesse contexto que se insere a presente pesquisa. Este artigo apresenta a aplicação do Framework Forense Integrado e Multidimensional para Diagnóstico da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (FFIMDAVAC) e do Índice de Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (IVAC) ao Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros (CELAZ), em Salvador, Bahia, Brasil. A metodologia fundamenta-se na Teoria da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (TVAC), que conceitua a vulnerabilidade como uma propriedade sistêmica emergente da interação entre processos naturais, operacionais, institucionais e territoriais, e no protocolo OD–ID–JT (Observação Direta, Informação Documental e Julgamento Técnico), que estabelece uma hierarquia de evidências para garantir rastreabilidade, reduzir incertezas interpretativas e permitir auditoria independente do processo decisório.

O CELAZ foi selecionado como estudo de caso por constituir um sistema territorial de elevada complexidade ambiental: localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Camarajipe, em área de urbanização consolidada com alta densidade populacional, o complexo abriga cinco subsetores cemiteriais sobre aquífero livre raso (1 a 10 m de profundidade) em sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras, com direção preferencial do fluxo subterrâneo orientada para bairros residenciais de elevada vulnerabilidade socioeconômica (Baixa de Quintas). Estudos anteriores (Batista, 2014; Batista & Cruz, 2022) já haviam identificado alterações hidrogeoquímicas significativas nas águas subterrâneas do entorno, mas limitavam-se a análises setoriais que não integravam as dimensões operacionais, institucionais e socioterritoriais da vulnerabilidade.

O objetivo geral da pesquisa é demonstrar que a vulnerabilidade ambiental cemiterial constitui uma propriedade sistêmica emergente, não redutível à suscetibilidade hidrogeológica do meio físico,

e que sua avaliação exige a integração de múltiplas linhas independentes de evidência em um protocolo forense rastreável e quantificável. Especificamente, busca-se: (i) aplicar o FFIMDAVAC e o protocolo OD–ID–JT ao CELAZ para caracterizar as múltiplas dimensões da vulnerabilidade; (ii) calcular o IVAC e classificar o complexo quanto ao grau de vulnerabilidade; (iii) analisar a contribuição relativa de cada dimensão para o escore final; e (iv) discutir as implicações dos resultados para o licenciamento ambiental, a proteção das águas subterrâneas e a promoção da justiça ambiental em áreas cemiteriais urbanas. A organização conceitual do problema e a lacuna epistemológica que fundamenta a proposição do framework são sintetizadas na Figura 1.

A pesquisa dialoga ainda com o campo da Geografia da Saúde, incorporando a dimensão sanitária como componente analítico da vulnerabilidade ambiental e conectando a exposição diferencial da população de Baixa de Quintas a potenciais impactos na saúde pública.

O artigo está estruturado em seis seções, incluindo esta introdução. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica e epistemológica, percorrendo a evolução do conceito de vulnerabilidade ambiental, a literatura sobre impactos cemiteriais, os referenciais de sistemas socioecológicos e complexidade, e a lacuna epistemológica que fundamenta a proposição do modelo integrado. A Seção 3 descreve a área de estudo e os materiais e métodos, detalhando o FFIMDAVAC, o protocolo OD–ID–JT e o IVAC. A Seção 4 apresenta os resultados organizados por linhas de evidência. A Seção 5 discute os resultados à luz da literatura, abordando a vulnerabilidade como propriedade sistêmica, as contribuições em relação aos modelos tradicionais, as implicações para a engenharia forense ambiental, o licenciamento, a justiça ambiental e o significado científico da pesquisa. A Seção 6 traz as conclusões, limitações do estudo e considerações finais.

Figura 1. Transição paradigmática: da ciência normal (GOD/DRASTIC) ao FFIMDAVAC como novo paradigma integrado de avaliação da vulnerabilidade ambiental cemiterial.



Nota: A figura ilustra a evolução lógica da pesquisa conforme o referencial de Kuhn (1962), partindo dos estudos de Batista (2014) e Batista & Cruz (2022) no paradigma da ciência normal, passando pelas anomalias que configuraram a crise paradigmática (Conformidade Ilusória), até a proposição do FFIMDAVAC como novo paradigma que articula TVAC, OD–ID–JT e IVAC para compreender a vulnerabilidade como propriedade sistêmica emergente.
Fonte: Elaboração do autor (2026)

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E EPISTEMOLÓGICA

2.1 EVOLUÇÃO DO CONCEITO DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL

O conceito de vulnerabilidade ambiental tem suas raízes na geografia dos riscos e nos estudos sobre perigos naturais (*natural hazards*), tendo evoluído significativamente nas últimas décadas. Inicialmente associada à suscetibilidade de sistemas físicos a eventos extremos, a vulnerabilidade foi progressivamente incorporando dimensões sociais, econômicas e institucionais, refletindo a compreensão de que os impactos de fenômenos ambientais não dependem apenas da magnitude do evento, mas também da capacidade das populações e dos territórios de resistir, absorver e se recuperar de seus efeitos (White, 1974; Hewitt, 1983; Blaikie *et al.*, 1994).

Turner *et al.* (2003) propuseram um dos modelos mais influentes para a análise integrada da vulnerabilidade, estruturado em três componentes interligados: exposição (*exposure*), suscetibilidade (*sensitivity*) e capacidade adaptativa (*adaptive capacity*). Esse modelo, originalmente desenvolvido no âmbito da ciência da sustentabilidade, demonstrou que a vulnerabilidade não pode ser compreendida isoladamente em um único domínio disciplinar, mas emerge da interação entre sistemas humanos e ambientais em múltiplas escalas espaciais e temporais.

Gallopín (2006) avançou essa discussão ao propor uma distinção analítica entre vulnerabilidade, resiliência e capacidade adaptativa, argumentando que a vulnerabilidade de um sistema resulta simultaneamente de sua exposição a perturbações, de sua sensibilidade a essas perturbações e de sua capacidade de se reorganizar e se adaptar. No contexto dos riscos ambientais urbanos, essa abordagem revelou-se particularmente relevante, uma vez que as cidades concentram simultaneamente fatores de exposição (fontes de contaminação), sensibilidade (populações vulneráveis) e capacidade adaptativa diferenciada (acesso desigual a infraestrutura e serviços).

A evolução conceitual mais recente, sintetizada pelo IPCC (2023), reconhece a vulnerabilidade como uma propriedade emergente de sistemas socioecológicos complexos, determinada por processos históricos, políticos e econômicos que produzem padrões diferenciados de risco entre grupos sociais e territórios. Essa perspectiva incorpora explicitamente contribuições da ecologia política e da justiça ambiental, que destacam a distribuição desigual dos riscos ambientais como resultado de desigualdades estruturais preexistentes (Bullard, 2000; Acselrad, 2004; Walker, 2012).

2.2 VULNERABILIDADE AMBIENTAL EM CEMITÉRIOS URBANOS

A literatura sobre impactos ambientais de cemitérios consolidou-se a partir dos trabalhos pioneiros de Dent (2002), que estabeleceu as bases hidrogeológicas para a compreensão do transporte de contaminantes derivados da decomposição cadavérica em aquíferos. O necrochorume — líquido resultante da decomposição orgânica dos corpos — é caracterizado por elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal, matéria orgânica, sais minerais e microrganismos patógenos, podendo atingir o lençol freático quando as condições de solo e profundidade do aquífero são favoráveis à infiltração.

Fiedler *et al.* (2012) realizaram uma revisão abrangente dos fatores que controlam a liberação e o transporte de contaminantes em áreas cemiteriais, identificando a idade do cemitério, o tipo de solo, a profundidade do lençol freático, a densidade de sepultamentos e as práticas de manejo como variáveis críticas. Os autores concluíram que deficiências de infraestrutura, drenagem inadequada e elevada densidade de sepultamentos potencializam significativamente os riscos ambientais, independentemente da vulnerabilidade intrínseca do aquífero.

Zychowski e Bryndal (2018), em uma revisão sistemática da literatura internacional, confirmaram que os impactos ambientais produzidos por cemitérios dependem simultaneamente das condições hidrogeológicas, da urbanização do entorno e dos modelos de gestão adotados. Os autores

identificaram que a maioria dos estudos concentrava-se em aspectos físicos e químicos, com limitada atenção às dimensões operacionais e institucionais da vulnerabilidade.

Gwenzi (2021) ampliou significativamente o escopo da discussão ao argumentar que os cemitérios contemporâneos devem ser compreendidos como sistemas complexos de emissão de contaminantes, incluindo não apenas os poluentes clássicos (nitrogênio amoniacal, metais pesados, patógenos), mas também substâncias emergentes como fármacos, produtos de cuidados pessoais e nanomateriais. O autor destacou que a avaliação de riscos em cemitérios urbanos requer uma abordagem integrada que considere simultaneamente as características da fonte, os mecanismos de transporte e as trajetórias de exposição das populações receptoras.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 335/2003 estabeleceu os requisitos mínimos para o licenciamento ambiental de cemitérios, incluindo a necessidade de caracterização hidrogeológica, monitoramento periódico das águas subterrâneas e apresentação de planos de encerramento. No entanto, estudos recentes (Batista, 2014; Batista & Cruz, 2022) têm demonstrado que a aplicação isolada desses requisitos, sem a integração de fatores operacionais, institucionais e territoriais, pode resultar em diagnósticos incompletos da vulnerabilidade ambiental.

2.3 VULNERABILIDADE, SISTEMAS SOCIOECOLÓGICOS E JUSTIÇA AMBIENTAL

A abordagem dos sistemas socioecológicos, proposta por Ostrom (2009), oferece um referencial analítico particularmente relevante para a compreensão da vulnerabilidade ambiental em contextos urbanos complexos. Ostrom demonstrou que a sustentabilidade de sistemas socioecológicos depende da interação entre variáveis institucionais, sociais e ecológicas, e que a análise isolada de qualquer um desses componentes produz diagnósticos incompletos e intervenções ineficazes.

No campo específico da justiça ambiental, Bullard (2000) e Walker (2012) demonstraram que populações socioeconomicamente vulneráveis estão desproporcionalmente expostas a riscos ambientais, configurando padrões de desigualdade que se reproduzem ao longo do tempo. Acselrad (2004), no contexto brasileiro, evidenciou que a distribuição espacial dos passivos ambientais acompanha a distribuição das desigualdades sociais, produzindo territórios de sacrifício onde a população mais pobre arca com os custos ambientais do desenvolvimento urbano.

A integração entre vulnerabilidade ambiental e justiça ambiental é particularmente relevante para o estudo de cemitérios urbanos localizados em áreas densamente povoadas de países em desenvolvimento. A proximidade entre áreas de sepultamento e residências de baixa renda, associada

à precariedade do saneamento básico e à dependência de poços rasos para abastecimento, configura cenários de elevada exposição ambiental que não podem ser adequadamente capturados por modelos que consideram exclusivamente parâmetros hidrogeológicos.

O modelo *Hazards-of-Place*, proposto por Cutter (1996), integra explicitamente as dimensões biofísica e social da vulnerabilidade, demonstrando que o risco de um território resulta da interação entre suas características naturais e as condições sociais de sua população. Esse modelo é particularmente adequado para analisar a vulnerabilidade de áreas cemiteriais urbanas, onde a presença de aquíferos rasos e a alta densidade populacional criam condições de elevada exposição que não podem ser compreendidas separadamente.

A Geografia da Saúde oferece um referencial complementar ao integrar a dimensão sanitária à análise da vulnerabilidade ambiental. Esta disciplina investiga a distribuição espacial de doenças, a relação entre ambiente e saúde humana, e os determinantes socioambientais do processo saúde-doença (Santos, 2000; Guimarães, 2002; Barcellos & Santos, 2004). Ao articular a espacialização do risco à exposição diferencial de populações vulneráveis, a Geografia da Saúde fornece o arcabouço conceitual necessário para conectar as evidências físico-químicas e microbiológicas aos desfechos sanitários — lacuna que os modelos GOD e DRASTIC, por sua natureza setorial, não podem preencher.

2.4 TEORIA DA COMPLEXIDADE APLICADA À GESTÃO TERRITORIAL

A teoria da complexidade, conforme desenvolvida por Morin (2005), oferece fundamentos epistemológicos para a compreensão de fenômenos ambientais que emergem da interação entre múltiplos componentes em diferentes escalas espaciais e temporais. Morin argumenta que sistemas complexos — como os territórios urbanos — não podem ser compreendidos por meio de recortes disciplinares estanques, mas exigem abordagens que reconheçam interdependências, retroalimentações e emergências.

No campo da gestão territorial, a aplicação do pensamento complexo implica reconhecer que a vulnerabilidade ambiental de um território não é a soma de vulnerabilidades setoriais (hidrogeológica, operacional, social), mas o produto de suas interações sinérgicas. Essa perspectiva fundamenta a abordagem integrada adotada pelo FFIMDAVAC, que busca capturar as interações entre dimensões analíticas tradicionalmente tratadas de forma isolada.

Liu *et al.* (2007), em seu estudo sobre sistemas acoplados humano-naturais, demonstraram que as interações entre componentes humanos e naturais produzem padrões emergentes que não podem ser

previstos a partir da análise isolada de cada componente. Os autores identificaram que sistemas acoplados exibem propriedades como não-linearidade, loops de retroalimentação, heterogeneidade espacial e temporal, e surpresas — características que também estão presentes em sistemas cemiteriais urbanos.

A abordagem da *post-normal science*, desenvolvida por Funtowicz e Ravetz (1993), oferece um referencial metodológico para situações caracterizadas por elevada incerteza científica, múltiplos atores envolvidos e consequências potencialmente irreversíveis — características que descrevem precisamente o contexto dos cemitérios urbanos em áreas densamente ocupadas. A *post-normal science* propõe que, nessas situações, a qualidade do processo decisório depende da ampliação da comunidade de pares e da integração de diferentes tipos de evidência, priorizando a materialidade dos dados empíricos sobre a conformidade documental.

2.5 LACUNA EPISTEMOLÓGICA E PROPOSIÇÃO DO MODELO INTEGRADO

A revisão da literatura revela uma lacuna epistemológica significativa: embora exista amplo reconhecimento de que a vulnerabilidade ambiental de cemitérios urbanos é um fenômeno multidimensional, os instrumentos operacionais disponíveis para sua avaliação permanecem predominantemente setoriais. Os modelos GOD e DRASTIC, embora consolidados para avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos, não incorporam fatores operacionais, institucionais e socioterritoriais que a literatura recente identifica como determinantes. A *post-normal science* oferece um referencial para preencher essa lacuna, ao legitimar a integração de múltiplos tipos de evidência e ao reconhecer a incerteza inerente a sistemas ambientais complexos.

Paralelamente, os estudos que avançam na direção de abordagens integradas — como os de Zychowski e Bryndal (2018) e Gwenzi (2021) — permanecem predominantemente no plano conceitual, sem oferecer instrumentos metodológicos que operacionalizem a integração proposta. Essa lacuna entre o reconhecimento teórico da multidimensionalidade da vulnerabilidade e a disponibilidade de ferramentas integradas para sua avaliação constitui o problema central que esta pesquisa busca enfrentar.

É nesse contexto que se insere a Teoria da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (TVAC), que conceitua a vulnerabilidade como uma propriedade sistêmica emergente da interação entre processos naturais, operacionais, institucionais e territoriais. A TVAC fundamenta-se em quatro pilares disciplinares: (i) Geologia Ambiental e Hidrogeologia, que fornecem os fundamentos para a

compreensão dos processos físicos de transporte de contaminantes; (ii) Ecologia e Biogeografia, que contribuem com a perspectiva dos processos ecossistêmicos e da distribuição espacial dos fenômenos ambientais; (iii) Sociologia do Risco e Território, que incorpora as dimensões sociais, econômicas e políticas da vulnerabilidade; e (iv) Engenharia Forense Ambiental, que oferece os princípios de rastreabilidade, cadeia de custódia e análise de evidências para a investigação ambiental.

A operacionalização da TVAC é realizada por meio do FFIMDAVAC, que integra o protocolo OD–ID–JT como sistema de rastreabilidade de evidências e o IVAC como índice multicritério de síntese quantitativa. Essa arquitetura metodológica foi concebida para permitir a replicação, auditoria e adaptação a diferentes contextos, configurando um deslocamento interpretativo no sentido discutido por Kuhn (1962) sobre a necessidade de novos modelos quando os vigentes falham em explicar anomalias observadas. A estrutura lógica dessa transição paradigmática entre os modelos tradicionais e a abordagem integrada proposta é apresentada na Figura 1 (evolução lógica da pesquisa), enquanto a arquitetura conceitual da TVAC é detalhada na Figura 2.

Figura 2 — Estrutura conceitual da Teoria da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (TVAC): pilares teóricos e integração multidisciplinar.



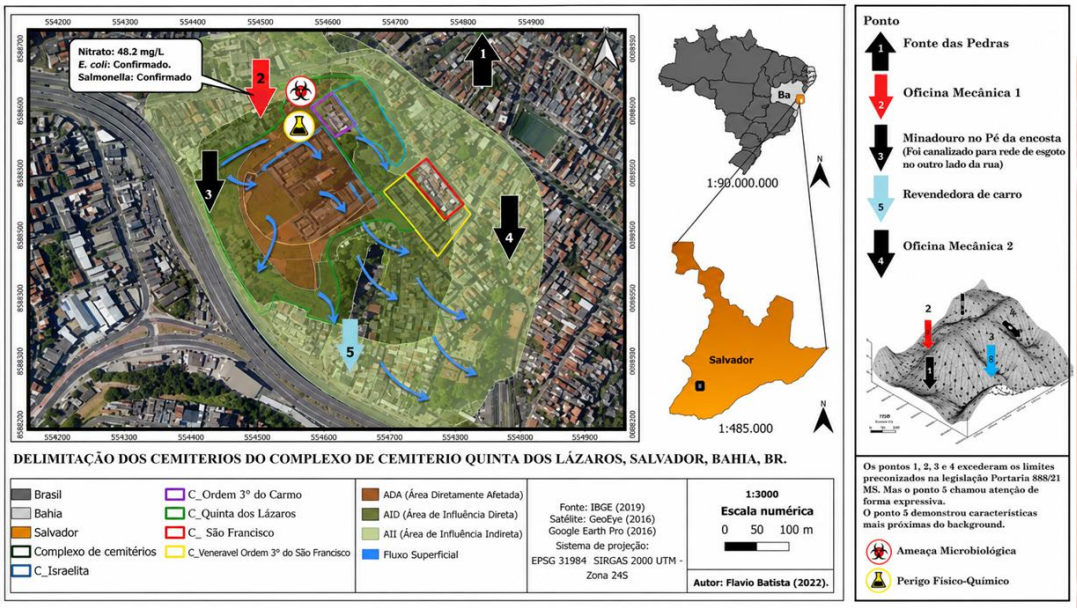
Nota: A TVAC fundamenta-se na convergência de quatro pilares disciplinares (Geologia Ambiental e Hidrogeologia, Ecologia e Biogeografia, Sociologia do Risco e Território, Engenharia Forense Ambiental) para compreender a vulnerabilidade como propriedade sistêmica emergente em sistemas cemiteriais urbanos, integrando os referenciais de Cutter (1996), Ostrom (2009), Bullard (2000) e Morin (2005).
Fonte: FFIMDAVAC Framework — Elaboração do autor (2026).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros (CELAZ) está localizado no bairro de Baixa de Quintas, na cidade de Salvador, Bahia, Brasil, às coordenadas 12°57'47"S e 38°30'14"O (EPSG:4674). A área insere-se na Bacia Hidrográfica do Rio Camarajipe, unidade de planejamento urbano que drena uma das regiões mais densamente povoadas da cidade. Conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 — Localização do Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros (CELAZ) no contexto urbano de Salvador, Bahia, Brasil..



Fonte: IBGE (2019); Satélite GeoEye (2016); Google Earth Pro (2016). Elaboração: Batista (2026).

O CELAZ é composto por cinco subsetores cemiteriais contíguos: Cemitério da Ordem 3ª do Carmo, Cemitério Quinta dos Lázaros, Cemitério São Francisco, Cemitério da Venerável Ordem 3ª do São Francisco e Cemitério Israelita, totalizando aproximadamente 8,7 hectares de área de sepultamento. O complexo está implantado sobre sedimentos areno-argilosos inconsolidados do Grupo Barreiras, de idade cenozoica, que recobrem o embasamento cristalino representado pelo Complexo Granulítico de Salvador (CPRM, 2016).

Do ponto de vista hidrogeológico, a área caracteriza-se pela presença de aquífero livre raso (freático) com profundidade do nível d'água variando entre 1 e 10 m, em meio poroso de condutividade hidráulica moderada a elevada, favorável à infiltração vertical e ao transporte lateral de contaminantes

dissolvidos. A direção preferencial do fluxo subterrâneo orienta-se do CELAZ em direção ao bairro de Baixa de Quintas (sudeste), área densamente urbanizada e caracterizada por elevada vulnerabilidade socioeconômica.

O entorno imediato do complexo é marcado por ocupação urbana consolidada de alta densidade, com residências unifamiliares e multifamiliares, oficinas mecânicas e comércio variado, configurando uma interface crítica entre a fonte potencial de contaminação e a população residente.

3.2 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

A organização geral do framework é apresentada na Figura 4, onde a arquitetura metodológica fundamenta-se no Framework Forense Integrado e Multidimensional para Diagnóstico da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (FFIMDAVAC), concebido para organizar, integrar e interpretar informações provenientes de diferentes escalas espaciais e temporais. Sua estrutura metodológica permite que evidências obtidas por técnicas distintas sejam avaliadas de forma integrada, reduzindo incertezas associadas à interpretação isolada de cada variável.

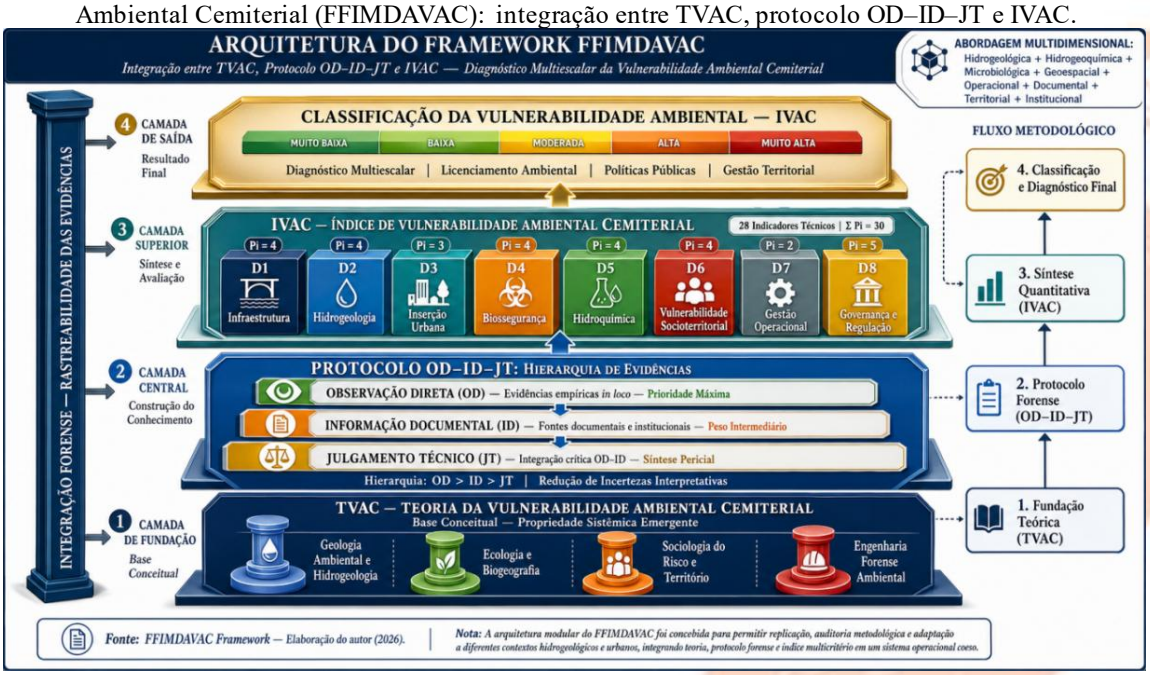
A pesquisa foi estruturada em quatro fases sequenciais, organizadas segundo o protocolo OD–ID–JT:

1. Fase 1 — Fundamentação teórica e definição do modelo conceitual: Revisão sistemática da literatura sobre vulnerabilidade ambiental em cemitérios urbanos, sistemas socioecológicos, engenharia forense ambiental e teoria da complexidade. Esta fase resultou na formalização da Teoria da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (TVAC) e na definição dos oito pilares analíticos que orientam a coleta e interpretação dos dados.
2. Fase 2 — Coleta e integração de evidências: Levantamento de dados primários e secundários organizados em sete linhas independentes de evidência: (1) caracterização hidrogeológica, (2) parâmetros hidrogeoquímicos, (3) indicadores microbiológicos, (4) informações geoespaciais, (5) condições operacionais de campo, (6) documentação institucional e (7) dados territoriais e socioambientais. Cada linha foi tratada de forma independente para garantir que a convergência de resultados representasse validação metodológica e não viés de confirmação.
3. Fase 3 — Aplicação do protocolo OD–ID–JT e cálculo do IVAC: As evidências coletadas foram submetidas ao protocolo hierárquico de rastreabilidade, que prioriza a Observação Direta (OD) sobre a Informação Documental (ID), reservando o Julgamento Técnico (JT) para situações em

que as duas primeiras categorias são insuficientes. Os escores de cada dimensão foram calculados com base nos indicadores técnicos, ponderados pelos pesos (Pi) calibrados segundo o protocolo e a literatura especializada.

4. Fase 4 — Interpretação integrada e diagnóstico: Os resultados de cada linha de evidência foram integrados para produzir o diagnóstico final da vulnerabilidade ambiental, expresso pelo IVAC e classificado conforme a escala de 1,00 a 5,00. A convergência das evidências foi avaliada qualitativamente pela consistência entre linhas independentes e quantitativamente pela distribuição dos escores dimensionais.

Figura 4 — Arquitetura do Framework Forense Integrado e Multidimensional para Diagnóstico da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (FFIMDAVAC): integração entre TVAC, protocolo OD–ID–JT e IVAC.



Nota: A arquitetura organiza-se em quatro componentes principais: (i) camada de fundação — TVAC (base conceitual); (ii) camada central — Protocolo OD–ID–JT (hierarquia de evidências); (iii) camada superior — IVAC (síntese quantitativa com 8 dimensões D1-D8 e 28 indicadores); (iv) saída — Classificação da Vulnerabilidade. A arquitetura modular foi concebida para permitir replicação, auditoria metodológica e adaptação a diferentes contextos hidrogeológicos e urbanos.
Fonte: FFIMDAVAC Framework — Elaboração do autor (2026).

3.3 FRAMEWORK FFIMDAVAC

O Framework Forense Integrado e Multidimensional para Diagnóstico da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (FFIMDAVAC) constitui a arquitetura metodológica central desta pesquisa. Trata-se de um sistema analítico composto por quatro componentes interligados:

a) (i) TVAC — Teoria da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial, que fornece a base conceitual para a compreensão da vulnerabilidade como propriedade sistêmica emergente, fundamentada em quatro pilares disciplinares: Geologia Ambiental e Hidrogeologia, Ecologia e Biogeografia, Sociologia do Risco e Território, e Engenharia Forense Ambiental;
b) (ii) Protocolo OD–ID–JT, que estabelece o sistema hierárquico de rastreabilidade das evidências, garantindo que as conclusões sejam fundamentadas prioritariamente em dados empíricos obtidos in loco;
c) (iii) IVAC — Índice de Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial, que sintetiza quantitativamente as oito dimensões analíticas em um escore único de classificação;
d) (iv) Sistema de Integração Multiescalar, que articula as análises em diferentes escalas espaciais (local, setorial e regional) e temporais (histórico, atual e prospectivo).

O FFIMDAVAC foi concebido para ser replicável, auditável e adaptável a diferentes contextos hidrogeológicos, climáticos e institucionais, permitindo sua aplicação em outros empreendimentos cemiteriais urbanos.

3.4 PROTOCOLO OD–ID–JT

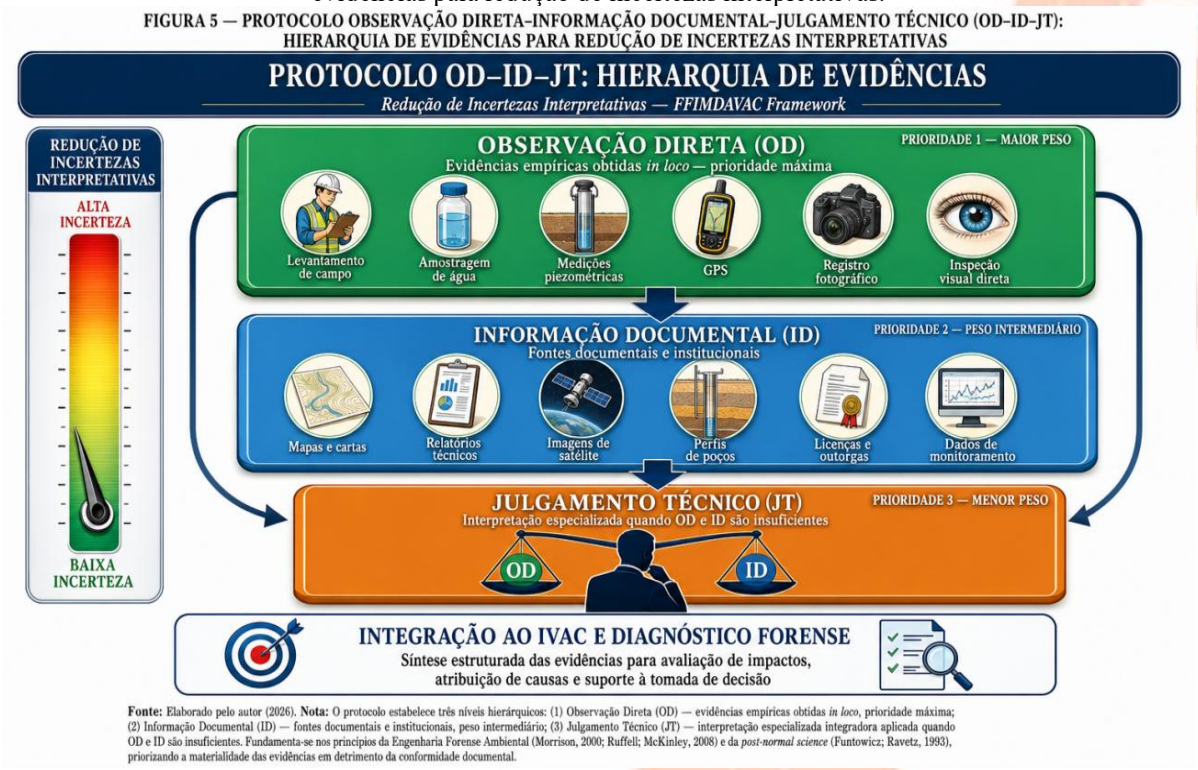
A estrutura lógica do protocolo é apresentada na Figura 5. O protocolo OD–ID–JT (Observação Direta, Informação Documental e Julgamento Técnico) constitui o sistema de rastreabilidade de evidências do FFIMDAVAC, organizado em três níveis hierárquicos sequenciais:

a) Nível 1 — Observação Direta (OD) — Prioridade Máxima: Compreende evidências empíricas obtidas in loco, incluindo levantamento de campo, amostragem de água para análises físico-químicas e microbiológicas, medições piezométricas, registro fotográfico, inspeção visual direta de infraestrutura e georreferenciamento com GPS. As observações diretas recebem o maior peso na hierarquia de evidências por representarem a materialidade dos fenômenos investigados, conforme os princípios da Engenharia Forense Ambiental (Morrison, 2000; Ruffell & McKinley, 2008) e da post-normal science (Funtowicz & Ravetz, 1993).
b) Nível 2 — Informação Documental (ID) — Peso Intermediário: Engloba fontes documentais e institucionais, como mapas e cartas geológicas/hidrogeológicas, relatórios técnicos de monitoramento, imagens de satélite e ortofotos, perfis de poços, licenças ambientais e outorgas,

dados secundários de monitoramento e estudos acadêmicos prévios. A informação documental é hierarquicamente inferior à observação direta, reconhecendo-se que documentos institucionais podem refletir uma realidade planejada ou declarada nem sempre coincidente com a realidade material observada em campo.

c) Nível 3 — Julgamento Técnico (JT) — Menor Prioridade: Consiste na interpretação especializada aplicada quando as observações diretas e as informações documentais são insuficientes para fundamentar uma conclusão definitiva. O julgamento técnico é documentado de forma explícita e transparente, indicando as premissas adotadas, as incertezas envolvidas e os fundamentos científicos que o sustentam. Essa transparência permite auditoria independente e validação por pares.

Figura 5 — Protocolo Observação Direta–Informação Documental–Julgamento Técnico (OD–ID–JT): hierarquia de evidências para redução de incertezas interpretativas.



Nota: O protocolo estabelece três níveis hierárquicos: (1) Observação Direta (OD) — evidências empíricas obtidas in loco, prioridade máxima; (2) Informação Documental (ID) — fontes documentais e institucionais, peso intermediário; (3) Julgamento Técnico (JT) — interpretação especializada integradora aplicada quando OD e ID são insuficientes. Fundamenta-se nos princípios da Engenharia Forense Ambiental (Morrison, 2000; Ruffell; McKinley, 2008) e da *post-normal science* (Funtowicz; Ravetz, 1993), priorizando a materialidade das evidências em detrimento da conformidade documental.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A aplicação do protocolo estabelece uma cadeia lógica de rastreabilidade entre as evidências produzidas e as conclusões alcançadas, reduzindo significativamente a subjetividade das interpretações e aumentando a reprodutibilidade do método.

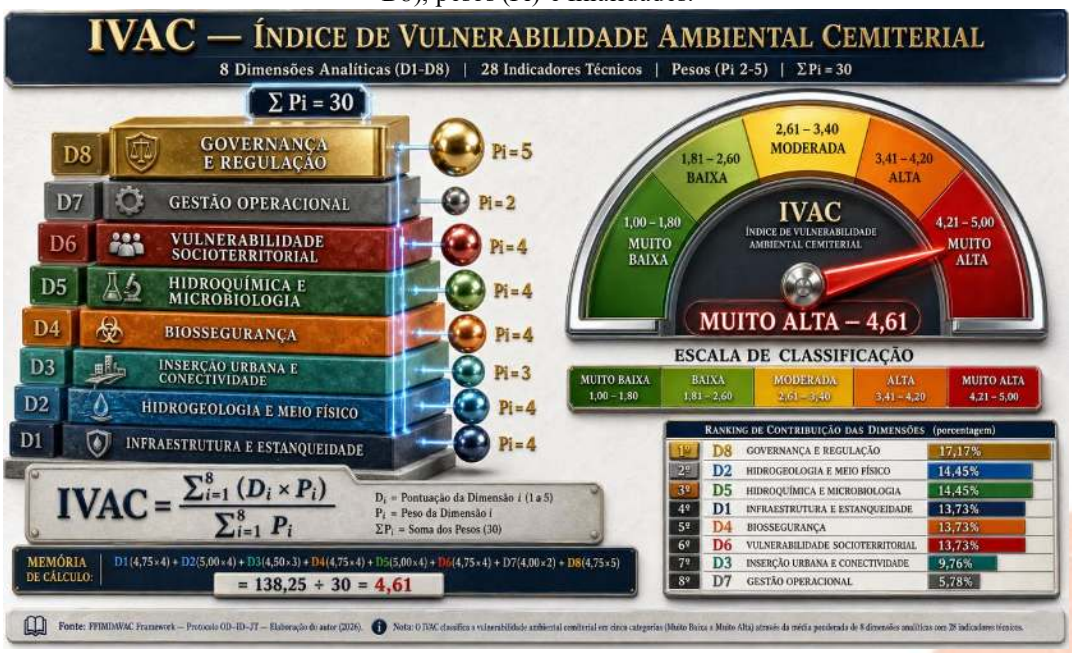
3.5 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL CEMITERIAL (IVAC)

O IVAC é um índice multicritério composto por oito dimensões analíticas (D1 a D8), cada uma contendo um conjunto de indicadores técnicos (total de 28 indicadores), ponderados por pesos de relevância (Pi) que variam de 2 a 5, totalizando $\Sigma Pi = 30$. A escala de classificação da vulnerabilidade é de 1,00 a 5,00, dividida em cinco categorias: Muito Baixa (1,00–1,80), Baixa (1,81–2,60), Moderada (2,61–3,40), Elevada (3,41–4,20) e Muito Alta (4,21–5,00).

O escore do IVAC é calculado pela média ponderada dos escores dimensionais (Di) pelos respectivos pesos (Pi). Sua organização estrutural é ilustrada na Figura 6. Enquanto a Tabela 1 apresenta a estrutura sintética do IVAC, com as oito dimensões, seus pesos e a finalidade analítica de cada uma.

A calibração dos pesos (Pi) atribuídos a cada dimensão fundamentou-se no protocolo OD–ID–JT e no julgamento técnico especializado, priorizando as dimensões de maior relevância empírica e documental para o diagnóstico da vulnerabilidade ambiental cemiterial. Análises futuras de sensibilidade, incluindo a variação sistemática dos pesos e a avaliação da estabilidade do IVAC frente a diferentes cenários de ponderação, estão previstas como etapa de validação externa do índice, contribuindo para a consolidação de sua aplicabilidade em diferentes contextos hidrogeológicos e institucionais.

Figura 6. Organização estrutural do Índice de Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (IVAC): 8 dimensões analíticas (D1 - D8), pesos (Pi) e finalidades.



Nota: O IVAC integra 28 indicadores técnicos distribuídos em 8 dimensões analíticas, com pesos variando de Pi=2 (D7 — Gestão Operacional) a Pi=5 (D8 — Governança e Regulação), totalizando ΣPi=30. O ranking de contribuição relativa é: D8 (17,17%) > D2 = D5 (14,45% cada) > D1 = D4 = D6 (13,73% cada) > D3 (9,76%) > D7 (5,78%). Dimensões com Pi=4 ou 5 receberam maior ponderação por representarem componentes de maior relevância no diagnóstico sistêmico da vulnerabilidade.

Fonte: FFIMDAVAC Framework — Elaboração do autor (2026)

Tabela 1 — Estrutura sintética do IVAC

Dimensão	Código	Peso (Pi)	Finalidade
Infraestrutura e Estanqueidade	D1	4	Avaliar a integridade física e contenção de efluentes
Hidrogeologia e Meio Físico	D2	4	Caracterizar a suscetibilidade natural do aquífero
Inserção Urbana e Conectividade	D3	3	Analisar a interação espacial e caminhos de exposição
Biossegurança	D4	4	Avaliar riscos biológicos e operacionais diretos
Hidroquímica e Microbiologia	D5	4	Mensurar a carga poluidora e assinatura do necrochorume
Vulnerabilidade Socioterritorial	D6	4	Identificar a sensibilidade dos receptores expostos
Gestão Operacional	D7	2	Avaliar a eficiência administrativa do empreendimento
Governança e Regulação	D8	5	Analisar a proteção regulatória e Conformidade Ilusória
Total		30	

Fonte: Elaboração do autor (2026), com base no FFIMDAVAC Framework e no Protocolo OD–ID–JT.

3.6 INTEGRAÇÃO DAS MÚLTIPLAS LINHAS DE EVIDÊNCIA

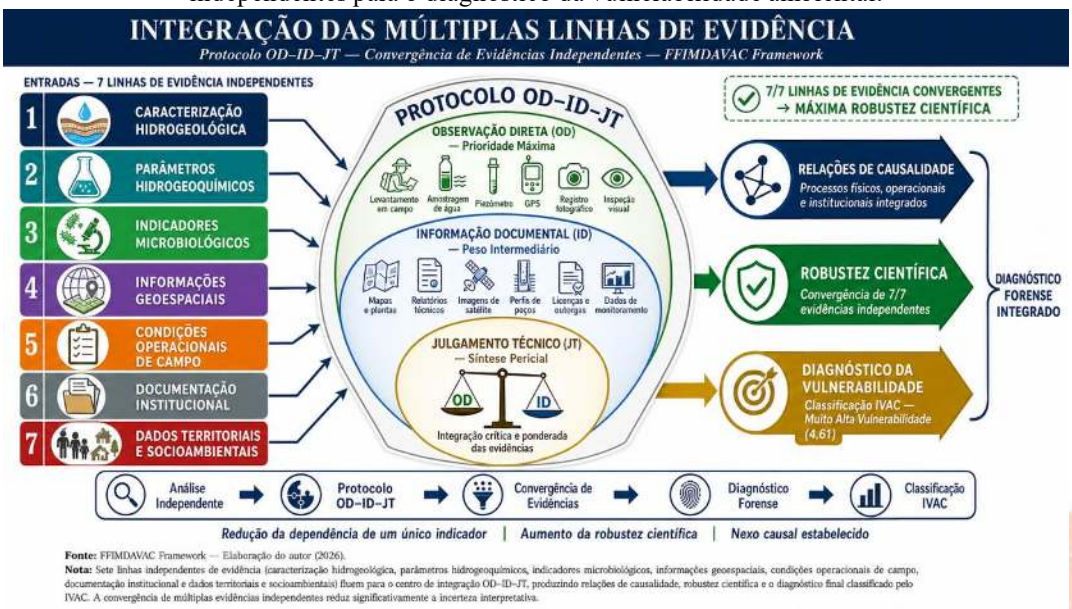
A integração das evidências foi realizada por meio da convergência de sete linhas independentes de investigação:

1. Caracterização hidrogeológica: Dados de condutividade hidráulica, profundidade do nível estático, litologia e vulnerabilidade natural do aquífero (GOD/DRASTIC).
2. Parâmetros hidrogeoquímicos: Análises de nitrogênio amoniacal (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), condutividade elétrica, pH, sólidos totais dissolvidos e outros parâmetros indicadores de contaminação por necrochorume.
3. Indicadores microbiológicos: Pesquisa de coliformes totais, *Escherichia coli* e *Salmonella* spp. nas águas subterrâneas dos pontos de monitoramento.
4. Informações geoespaciais: Mapas de localização, ortofotos de alta resolução, modelo digital de terreno e análise de fluxo superficial.
5. Condições operacionais de campo: Inspeções visuais, registros fotográficos, identificação de falhas de infraestrutura e práticas de manejo.
6. Documentação institucional: Licenças ambientais, relatórios de monitoramento, processos de fiscalização e registros administrativos.
7. Dados territoriais e socioambientais: Densidade populacional, indicadores socioeconômicos, saneamento básico, uso e ocupação do solo e padrões de justiça ambiental.

A convergência foi considerada confirmada quando pelo menos cinco das sete linhas independentes indicavam consistência com a hipótese de vulnerabilidade elevada, sendo que a classificação final do IVAC demandava convergência mínima de 5/7 linhas para validação do diagnóstico.

A síntese metodológica completa do processo de integração encontra-se apresentada na Figura 7, que resume a arquitetura analítica utilizada na avaliação ambiental do Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros.

Figura 7. Integração das múltiplas linhas de evidência pelo Protocolo OD–ID–JT: convergência de evidências independentes para o diagnóstico da vulnerabilidade ambiental.



Nota: Sete linhas independentes de evidência fluem para o centro de integração OD–ID–JT, produzindo relações de causalidade, robustez científica e o diagnóstico final classificado pelo IVAC. A convergência de 7/7 linhas independentes de evidência reduz significativamente a incerteza interpretativa e fortalece a robustez científica do diagnóstico, uma vez que a conclusão final decorre da combinação de evidências obtidas por métodos distintos, em diferentes escalas e com diferentes naturezas (física, química, biológica, espacial, operacional, documental e social).
Fonte: FFIMDAVAC Framework — Elaboração do autor (2026)

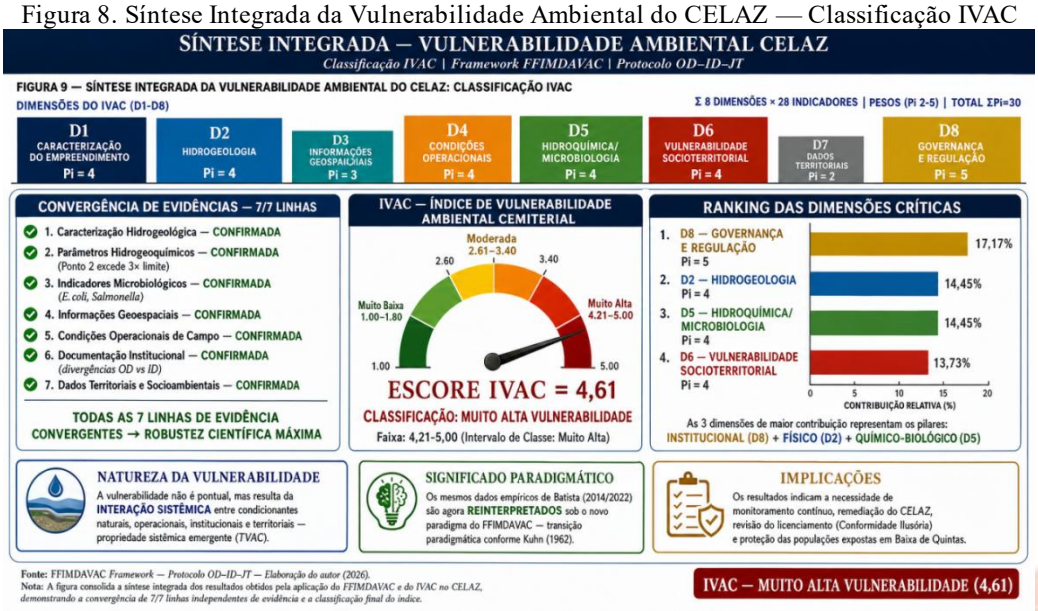
4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO INTEGRADA DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DO CELAZ

A aplicação do FFIMDAVAC ao Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros (CELAZ) produziu um diagnóstico integrado da vulnerabilidade ambiental, sintetizado pelo IVAC = 4,61 (Muito Alta Vulnerabilidade), validado pela convergência de 7/7 linhas independentes de evidência por meio do protocolo OD–ID–JT. A Figura 9 apresenta a síntese integrada dos resultados, consolidando as oito dimensões analíticas, a convergência das evidências e a classificação final do IVAC.

A sobreposição espacial dos seis condicionantes (Figura 8) revelou zonas de convergência crítica, especialmente nos setores onde a infraestrutura cemiterial comprometida coincide com áreas de urbanização consolidada a jusante do fluxo subterrâneo.

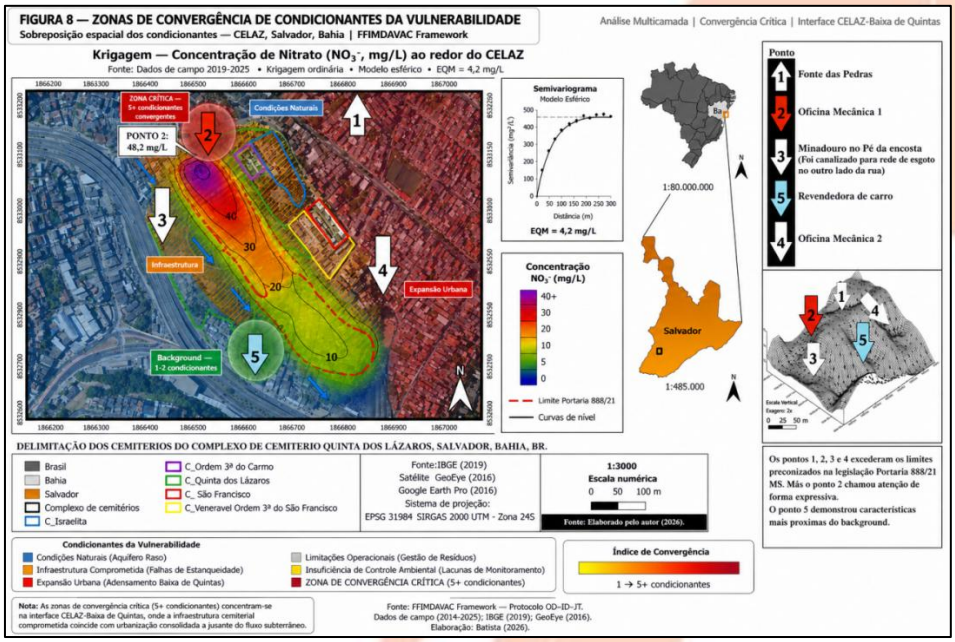
Figura 8. Síntese Integrada da Vulnerabilidade Ambiental do CELAZ — Classificação IVAC



Fonte: FFIMDAVAC Framework — Protocolo OD–ID–JT — Elaboração do autor (2026)

A síntese integrada (Figura 9) consolida a classificação final de Muito Alta Vulnerabilidade (IVAC = 4,61).

Figura 8 — Zonas de Convergência de Condicionantes da Vulnerabilidade Ambiental no CELAZ — Análise Espacial Multicamada



Fonte: FFIMDAVAC Framework — Protocolo OD–ID–JT. Dados de campo (2014-2025); IBGE (2019); GeoEye (2016). Elaboração: Batista (2026).

4.2 EVIDÊNCIAS HIDROGEOLÓGICAS

A avaliação hidrogeológica confirmou direção preferencial do fluxo subterrâneo orientada do CELAZ em direção aos bairros residenciais de Baixa de Quintas, com gradiente hidráulico compatível com transporte de contaminantes dissolvidos em aquífero livre raso sobre embasamento cristalino intemperizado.

A aplicação dos modelos GOD e DRASTIC classificou a área como de vulnerabilidade intrínseca elevada a muito elevada. No entanto, essa classificação representa apenas a suscetibilidade natural do meio físico — não captura as vulnerabilidades introduzidas pela operação deficiente do empreendimento, pela ausência de monitoramento sistemático em pontos estratégicos e pela ocupação urbana consolidada na zona de descarga do aquífero.

Ponto crítico: dos cinco pontos de monitoramento históricos, apenas dois apresentam séries temporais contínuas. Os demais (Pontos 3 e 4) tiveram amostragem descontínua, comprometendo a análise de tendências evolutivas — o que, por si só, configura fragilidade no programa de monitoramento ambiental.

4.3 EVIDÊNCIAS HIDROGEOQUÍMICAS

As análises hidrogeoquímicas revelaram alterações significativas na composição das águas subterrâneas monitoradas no entorno do CELAZ. Os resultados mais expressivos foram:

Tabela 3 — Parâmetros hidrogeoquímicos e microbiológicos nos pontos de monitoramento

Parâmetro	Ponto 2 (Oficina Mecânica 1)	Ponto 5 (Revendedora de Carro)	Portaria 888/21 MS
Nitrogênio amoniacal (NH_4^+)	> 3× o limite	Próximo ao *background*	1,5 mg/L
Nitrato (NO_3^-)	Elevado	Moderado	10 mg/L
Condutividade elétrica	Expressivamente elevada	Normal	—
E. coli	Presença confirmada	Ausente	Ausência em 100 mL

Fonte: Dados de campo (Batista, 2014; Batista & Cruz, 2022), atualizados para o FFIMDAVAC Framework — Elaboração do autor (2026). Parâmetros analisados em conformidade com a Portaria GM/MS nº 888/2021.

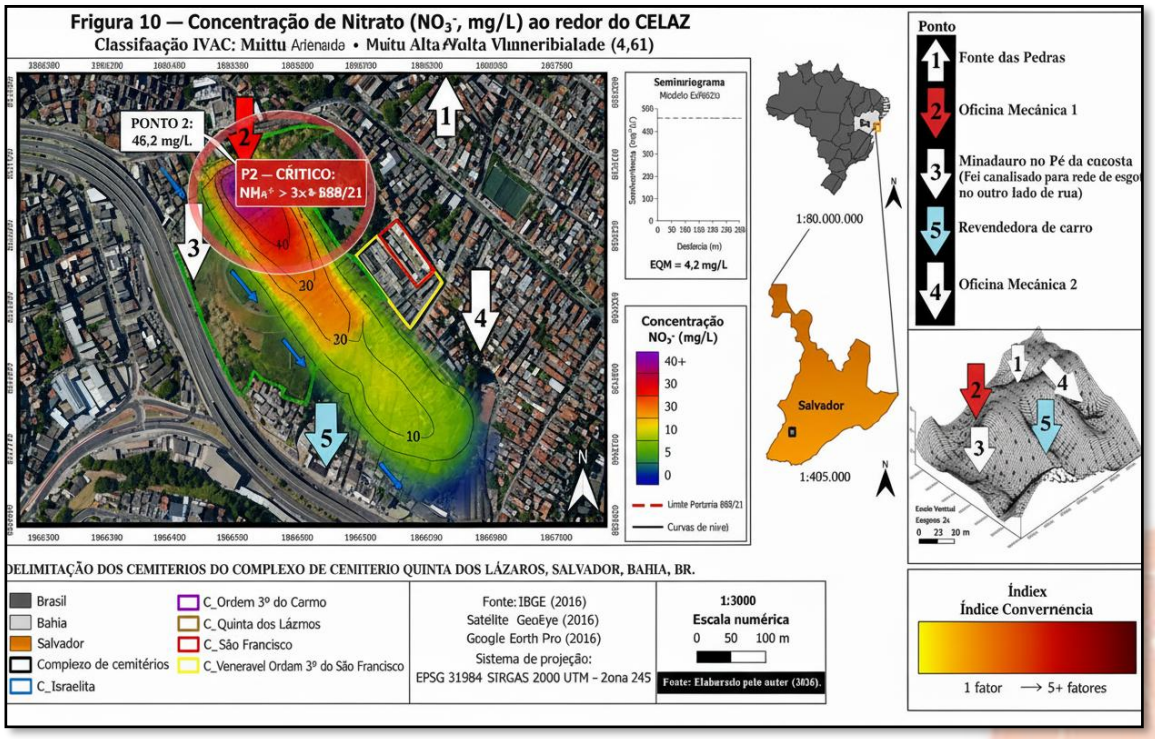
O Ponto 2 (Oficina Mecânica 1) destacou-se como o de piores indicadores — todos os parâmetros analisados excederam os limites preconizados pela Portaria GM/MS nº 888/2021, com destaque para o nitrogênio amoniacal e a condutividade elétrica, compatíveis com influência de necrochorume. Em contraste, o Ponto 5 (Revendedora de Carro) apresentou características mais

próximas do *background* local, sugerindo menor influência direta da atividade cemiterial nesse setor específico, embora ainda com alterações pontuais em relação aos valores de referência regionais.

A distribuição espacial dos parâmetros evidencia gradiente decrescente de concentração do Ponto 2 em direção ao Ponto 5, coerente com a direção preferencial do fluxo subterrâneo e com a localização das fontes potenciais de contaminação. Esse padrão consistente, aliado à assinatura hidrogeoquímica compatível com necrochorume (elevada amônia, condutividade e presença de patógenos), constitui evidência robusta de influência da atividade cemiterial — mesmo que isoladamente não estabeleça nexo causal definitivo, a convergência com as demais linhas de evidência fortalece a interpretação.

A detecção de alterações hidrogeoquímicas expressivas no Ponto 2 — localizado em área de fluxo preferencial a jusante do cemitério —, associada à manutenção de valores próximos ao *background* no Ponto 5 (setor a montante ou lateralmente deslocado), sugere que a pluma de contaminação tem direcionalidade controlada pelo gradiente hidráulico local, corroborando a interpretação de transporte de contaminantes desde o CELAZ em direção às áreas residenciais. Nesse sentido, a distribuição espacial dos parâmetros (Figura 10) evidencia gradiente decrescente de concentração do Ponto 2 em direção ao Ponto 5, coerente com a direção preferencial do fluxo subterrâneo e com a localização das fontes potenciais de contaminação.

Figura 10 — Krigagem: Concentração de Nitrato (NO_3^-) no entorno do CELAZ



Fonte: FFIMDAVAC Framework — Dados de campo (2019-2025) — Krigagem ordinária, modelo esférico, EQM = 4,2 mg/L. Elaboração: Batista (2026).

4.4 EVIDÊNCIAS MICROBIOLÓGICAS

As análises microbiológicas detectaram coliformes totais e *Escherichia coli* em múltiplos pontos de monitoramento, com ocorrência de *Salmonella* spp. em campanha específica no Ponto 2. A presença de *E. coli* em aquífero freático raso urbano, isoladamente, não permite atribuir origem exclusiva à atividade cemiterial — fontes alternativas como saneamento precário do entorno também contribuem. Contudo, três fatores convergem para reforçar a hipótese de influência cemiterial:

- Coerência espacial: os pontos com maior contaminação microbiológica são os mesmos com alterações hidrogeoquímicas mais expressivas (Ponto 2);
- Coerência com o fluxo subterrâneo: a distribuição segue o gradiente hidráulico do CELAZ em direção aos bairros residenciais;
- Presença de *Salmonella* spp.: microrganismo associado a matéria orgânica em decomposição, compatível com necrochorume.

A Tabela 3 sintetiza os resultados microbiológicos consolidados, indicando comprometimento da qualidade sanitária das águas subterrâneas na área de influência direta do CELAZ.

4.5 EVIDÊNCIAS TERRITORIAIS E OPERACIONAIS

As inspeções de campo realizadas no CELAZ documentaram um conjunto de evidências estruturais e operacionais que corroboram o quadro de vulnerabilidade sistêmica diagnosticado. O registro fotográfico dessas evidências é apresentado na Figura 11, organizado segundo as cinco categorias analíticas do protocolo OD–ID–JT:

- Categoria Hidrogeológica — drenagem superficial deficiente nas áreas de sepultamento mais antigas, com empoçamentos e indícios de exfiltração de líquidos;
- Categoria Estrutural — falhas de impermeabilização em estruturas funerárias, com fissuras visíveis e vegetação desordenada sobre sepulturas;
- Categoria Ocupacional — gestão inadequada de resíduos de exumação, com disposição próxima a áreas residenciais;
- Categoria Gestão — ausência de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) em atividades de exumação observadas;
- Categoria Socioambiental — proximidade crítica entre sepulturas e residências, inferior a 50 m em diversos setores da divisa leste.

Essas observações apresentaram elevada coerência com as evidências hidrogeoquímicas obtidas na campanha de monitoramento (seção 4.3), indicando que as condições estruturais identificadas — especialmente as falhas de estanqueidade e a drenagem deficiente — podem favorecer o transporte de contaminantes para o meio físico adjacente, atuando como vias preferenciais de conexão entre a fonte de contaminação e o aquífero livre raso.

Figura 11. Principais evidências estruturais e operacionais observadas durante as inspeções de campo no CELAZ.



Nota: O painel fotográfico organiza-se por categoria analítica: (a–b) disposição inadequada de resíduos sólidos e de exumação; (c–f) descarga de necrochorume por fissuras e infiltração no solo; (g–h) proximidade de residências; (i–j) falhas de impermeabilização e drenagem deficiente; (k–n) uso inadequado do solo, vegetação desordenada e acesso de animais; (o–p) ausência de EPIs e manuseio inadequado de resíduos.
Fonte: Batista (2014); atualizado e adaptado para o FFIMDAVAC Framework — Elaboração do autor (2026)

A configuração territorial do entorno — urbanização consolidada, elevada densidade populacional, saneamento básico parcial e ocupação preferencial ao longo das direções do fluxo subterrâneo — amplifica a exposição ambiental da população residente. A espacialização integrada dessas evidências (Figura 8) revela que as áreas de maior adensamento populacional coincidem com as zonas de descarga do aquífero freático, configurando padrão típico de injustiça ambiental (Acselrad, 2004; Walker, 2012).

4.6 APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL CEMITERIAL (IVAC)

A aplicação do IVAC sintetizou quantitativamente as oito dimensões analíticas e vinte e oito indicadores. A Tabela 2 apresenta a memória de cálculo completa:

Tabela 4. Memória de cálculo do IVAC

Dimensão	Escore (Di)	Peso (Pi)	Contribuição (Di×Pi)	Contribuição Relativa
D1. Infraestrutura e estanqueidade	4,75	4	19,00	13,73%
D2. Hidrogeologia e meio físico	5,00	4	20,00	14,45%
D3. Inserção urbana e conectividade	4,50	3	13,50	9,76%
D4. Biossegurança	4,75	4	19,00	13,73%
D5. Hidroquímica e microbiologia	5,00	4	20,00	14,45%
D6. Vulnerabilidade socioterritorial	4,75	4	19,00	13,73%
D7. Gestão operacional	4,00	2	8,00	5,78%
D8. Governança e regulação	4,75	5	23,75	17,17%
TOTAL	—	30	138,25	100%

Fonte: Elaboração do autor (2026). Dados primários obtidos por aplicação do FFIMDAVAC ao CELAZ (2019–2025).

O IVAC é calculado pela média ponderada dos escores dimensionais (Di) pelos respectivos pesos (Pi):

$$IVAC = \frac{\sum_{i=1}^{8} (D_i \times P_i)}{\sum_{i=1}^{8} P_i} \quad (1)$$

Escore IVAC = 138,25 = 4,61 → **MUITO ALTA VULNERABILIDADE** 30

Interpretação:

O escore de 4,61 enquadra o CELAZ na faixa de vulnerabilidade muito alta (4,21–5,00). Três achados merecem destaque:

- D8 — Governança e regulação (Pi=5, contribuição de 17,17%) é a dimensão de maior peso no índice e também a que revela a dimensão de maior fragilidade estrutural no sistema de gestão ambiental: licenciamento baseado em conformidade documental dissociada da realidade material. Este é o cerne do conceito de Conformidade Ilusória, formalmente proposto neste estudo.

- D5 — Hidroquímica e microbiologia (escore 5,00) e D2 — Hidrogeologia (escore 5,00) atingiram a pontuação máxima, indicando que os processos naturais de transporte de contaminantes estão operantes e que as evidências físico-químicas são consistentes com o diagnóstico integrado.
- D7 — Gestão operacional (menor contribuição: 5,78%) — embora tenha o menor peso (Pi=2), seu escore parcial de 4,00 indica que mesmo as dimensões de menor peso relativo apresentam vulnerabilidade elevada, reforçando a natureza sistêmica do diagnóstico.

Tabela 5. Ranking das dimensões críticas:

Posição	Dimensão	Pontos	Contribuição
1º	D8. Governança e regulação	23,75	17,17%
2º	D2. Hidrogeologia e meio físico	20,00	14,45%
3º	D5. Hidroquímica e microbiologia	20,00	14,45%
4º	D1. Infraestrutura e estanqueidade	19,00	13,73%
5º	D4. Biossegurança	19,00	13,73%
6º	D6. Vulnerabilidade socioterritorial	19,00	13,73%
7º	D3. Inserção urbana e conectividade	13,50	9,76%
8º	D7. Gestão operacional	8,00	5,78%

Fonte: Autores.

Implicação central: As três dimensões de maior contribuição (D8, D2, D5) representam, respectivamente, os pilares institucional, físico e químico-biológico do diagnóstico. Sua convergência demonstra que a vulnerabilidade elevada não decorre de um único fator, mas da interação sinérgica entre condicionantes físicos, institucionais e operacionais.

4.7 CONVERGÊNCIA DAS MÚLTIPLAS LINHAS DE EVIDÊNCIA

A aplicação do FFIMDAVAC demonstrou que sete linhas independentes de evidência — hidrogeológica, hidrogeoquímica, microbiológica, geoespacial, operacional, documental e socioterritorial — convergiram para o mesmo padrão interpretativo. Essa convergência é corroborada pela distribuição relativamente equilibrada dos escores do IVAC entre as oito dimensões (D1 a D8), que variaram de 4,00 (D7) a 5,00 (D2 e D5), indicando que nenhuma dimensão isolada explica a vulnerabilidade observada.

O IVAC de 4,61 (Muito Alta Vulnerabilidade) não decorre de um único fator preponderante, mas da convergência sistêmica de condicionantes físicos, institucionais e operacionais — confirmando a hipótese central da TVAC, segundo a qual a vulnerabilidade ambiental cemiterial emerge da interação sinérgica entre processos naturais e antrópicos em múltiplas escalas espaciais e institucionais.

5 DISCUSSÃO

5.1 A VULNERABILIDADE AMBIENTAL COMO PROPRIEDADE SISTÊMICA

Os resultados obtidos demonstram que a vulnerabilidade ambiental identificada no Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros (CELAZ) não pode ser explicada exclusivamente pelas características naturais do meio físico. A convergência entre evidências hidrogeológicas, hidrogeoquímicas, microbiológicas, operacionais, territoriais e institucionais demonstra que a vulnerabilidade constitui uma propriedade sistêmica emergente, produzida pela interação contínua entre processos naturais e ações antrópicas. Essa constatação confirma a hipótese central da Teoria da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (TVAC), segundo a qual o comportamento ambiental de cemitérios urbanos resulta da interação dinâmica entre componentes físicos, operacionais, sociais e institucionais.

Sob essa perspectiva, a vulnerabilidade deixa de representar apenas a suscetibilidade intrínseca do aquífero e passa a refletir a capacidade do sistema territorial de produzir, potencializar ou mitigar riscos ambientais ao longo do tempo. O ambiente deixa de ser compreendido como um receptor passivo de contaminantes e passa a ser interpretado como um sistema complexo. Sua resposta depende simultaneamente da configuração hidrogeológica, das condições de infraestrutura, das práticas operacionais, da dinâmica territorial, do uso e ocupação do solo e da eficiência dos mecanismos de governança ambiental.

Essa interpretação converge com a evolução recente da literatura internacional sobre sistemas socioecológicos complexos, que reconhece que fenômenos ambientais emergem da interação entre componentes naturais e sociais em diferentes escalas espaciais e temporais (Liu *et al.*, 2007; Ostrom, 2009; Gwenzi, 2021; IPCC, 2023). Entretanto, diferentemente desses estudos, cuja integração permanece predominantemente no plano conceitual, o presente trabalho operacionaliza essa abordagem por meio de um modelo metodológico estruturado e reproduzível, capaz de transformar múltiplas linhas independentes de evidência em um diagnóstico quantitativo, rastreável e passível de verificação independente da vulnerabilidade ambiental.

O elevado escore obtido pelo IVAC (4,61), classificado como Muito Alta Vulnerabilidade, evidencia que a condição ambiental do CELAZ resulta da combinação simultânea de fatores naturais, estruturais, operacionais e institucionais. As dimensões D6 (Vulnerabilidade Socioterritorial), D7 (Gestão Operacional) e D8 (Governança e Regulação) responderam conjuntamente por 33,68% do escore total do IVAC — D8 isoladamente contribuiu com 17,17% (Pi=5), a maior contribuição individual entre todas as oito dimensões. Esse resultado evidencia que fatores socioterritoriais, operacionais e institucionais exercem influência comparável — e, no caso da governança, superior — à vulnerabilidade hidrogeológica clássica (D2 = 14,45%), embora permaneçam completamente ausentes dos modelos GOD e DRASTIC. A distribuição relativamente equilibrada das contribuições das oito dimensões demonstra que nenhum fator isolado explica satisfatoriamente o comportamento do sistema, reforçando a hipótese de que a vulnerabilidade emerge da interação entre processos físicos, químicos, biológicos, territoriais e administrativos.

Essa constatação amplia significativamente o conceito clássico de vulnerabilidade hidrogeológica. Enquanto os modelos tradicionais concentram-se na suscetibilidade física do aquífero, o FFIMDAVAC demonstra que a evolução da vulnerabilidade depende igualmente da infraestrutura instalada, da gestão operacional, da organização espacial do território, das condições socioeconômicas das populações expostas e da capacidade institucional de monitoramento e controle ambiental. Assim, a vulnerabilidade observada não corresponde apenas às propriedades do meio geológico, mas ao funcionamento integrado do sistema ambiental como um todo.

A elevada pontuação obtida nas dimensões D5 (Hidroquímica e Microbiologia), D6 (Vulnerabilidade Socioterritorial), D7 (Gestão Operacional) e D8 (Governança e Regulação) evidencia que os processos de degradação ambiental ultrapassam os limites da contaminação física do aquífero. As alterações hidrogeoquímicas e microbiológicas coexistem com fragilidades operacionais e limitações institucionais, indicando que a persistência da vulnerabilidade decorre tanto da presença de contaminantes quanto da reduzida capacidade do sistema em preveni-los, monitorá-los e mitigá-los de forma eficaz. A convergência dos parâmetros hidrogeoquímicos — particularmente nitrogênio amoniacal (NH_4^+) ultrapassando em mais de 3 vezes o limite da Portaria GM/MS nº 888/2021 no Ponto 2, associada à confirmação microbiológica de *E. coli* e *Salmonella* spp. — valida a consistência do diagnóstico integrado.

Diferentemente das abordagens convencionais de avaliação ambiental, que tradicionalmente analisam essas variáveis de forma independente, o FFIMDAVAC as organiza em um sistema

interpretativo único no qual cada dimensão preserva sua identidade analítica, permitindo compreender não apenas a existência da vulnerabilidade, mas também os mecanismos responsáveis por sua geração, manutenção e potencial agravamento ao longo do tempo. Dessa forma, o diagnóstico deixa de responder apenas se existe contaminação e passa a explicar por que ela ocorre, quais fatores a intensificam e quais componentes do sistema devem ser priorizados para intervenção.

A operacionalização dessa abordagem é fortalecida pelo protocolo de rastreabilidade OD–ID–JT, que estabelece uma relação explícita entre observações de campo, indicadores, justificativas técnicas e escores atribuídos a cada dimensão. Essa estrutura reduz significativamente a subjetividade inerente às avaliações multicritério, aumenta a transparência do processo decisório e amplia a reprodutibilidade da metodologia, características essenciais para aplicações em Engenharia Forense Ambiental e para subsidiar decisões relacionadas ao licenciamento, monitoramento e gestão ambiental.

Sob essa ótica, a vulnerabilidade ambiental cemiterial deve ser compreendida como uma propriedade emergente de sistemas territoriais complexos, cuja evolução depende da interação permanente entre características naturais, infraestrutura instalada, práticas operacionais, organização espacial e capacidade institucional de gestão. Essa interpretação estabelece uma base teórica consistente para a TVAC e demonstra sua operacionalização por meio do FFIMDAVAC e do IVAC, consolidando uma abordagem integrada capaz de apoiar tanto a investigação científica quanto o planejamento ambiental, a gestão territorial e a formulação de políticas públicas voltadas à proteção das águas subterrâneas.

5.2 CONTRIBUIÇÕES DO FFIMDAVAC EM RELAÇÃO AOS MODELOS TRADICIONAIS

Os métodos GOD (Foster & Hirata, 1988) e DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) consolidaram-se como importantes ferramentas para avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos, sendo amplamente empregados em estudos hidrogeológicos destinados ao planejamento territorial e à proteção dos recursos hídricos. Entretanto, os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a aplicação isolada desses modelos apresenta limitações quando utilizada para interpretar sistemas ambientais complexos associados à atividade cemiterial em áreas urbanizadas.

A principal limitação reside no fato de que ambos os métodos concentram sua análise nas características naturais do meio físico. Dent (2002) já alertava que avaliações baseadas exclusivamente em parâmetros hidrogeológicos tendem a subestimar a complexidade ambiental de cemitérios urbanos — e os resultados do CELAZ confirmam essa preocupação: as dimensões D6, D7 e D8, que escapam

completamente aos modelos GOD e DRASTIC, responderam conjuntamente por 33,68% do escore total do IVAC. Em outras palavras, aproximadamente um terço da vulnerabilidade real do empreendimento permaneceria invisível em uma avaliação conduzida exclusivamente pelos métodos clássicos.

Fiedler *et al.* (2012) demonstraram que deficiências de infraestrutura, drenagem inadequada e elevada densidade de sepultamentos potencializam significativamente os riscos ambientais, independentemente da vulnerabilidade intrínseca do aquífero. No CELAZ, essa constatação é corroborada pela Dimensão D1 (Infraestrutura e Estanqueidade, Pi=4), que registrou falhas de impermeabilização e drenagem deficiente em setores identificados como críticos durante as inspeções de campo (Figura 11). No entanto, diferentemente do estudo de Fiedler *et al.*, que analisou esses fatores de forma isolada, o FFIMDAVAC permite quantificar seu peso relativo no contexto das demais dimensões — D1 contribuiu com 13,73% do IVAC, valor semelhante ao da vulnerabilidade socioterritorial (D6, 13,73%) e superior ao da inserção urbana (D3, 9,76%).

Zychowski e Bryndal (2018) concluíram, em sua revisão, que os impactos ambientais produzidos por cemitérios dependem simultaneamente das condições hidrogeológicas, da urbanização e dos modelos de gestão adotados. O presente estudo não apenas corrobora essa conclusão, mas a quantifica: a contribuição conjunta da gestão operacional (D7), da governança (D8) e da vulnerabilidade socioterritorial (D6) supera a contribuição isolada da hidrogeologia (D2). Isso sugere que, em contextos de elevada densidade urbana como o CELAZ, os fatores institucionais e territoriais podem ser tão ou mais determinantes que os condicionantes físicos do aquífero — uma dimensão do problema que Zychowski e Bryndal identificaram conceitualmente, mas não puderam operacionalizar em termos quantitativos.

Gonçalves *et al.* (2024) propuseram a integração de métodos AHP ao DRASTIC para avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à poluição cemiterial, demonstrando que a incorporação de critérios adicionais melhora a capacidade diagnóstica dos modelos clássicos. Os autores, entretanto, não estenderam a análise às dimensões operacionais e institucionais, lacuna que o FFIMDAVAC procura preencher ao incorporar explicitamente as dimensões D6, D7 e D8 em sua arquitetura. O presente estudo amplia esse entendimento ao demonstrar que essa interação pode ser operacionalizada por meio de um índice multicritério capaz de sintetizar, de forma quantitativa e reproduzível, diferentes linhas independentes de evidência — avançando, portanto, além da proposição de Gonçalves *et al.* ao não

apenas adicionar critérios, mas estruturá-los em um protocolo hierárquico de rastreabilidade (OD–ID–JT).

De forma semelhante, Gwenzi (2021) argumenta que os cemitérios contemporâneos devem ser compreendidos como sistemas complexos de emissão de contaminantes químicos, microbiológicos e emergentes. Os resultados aqui apresentados reforçam essa perspectiva ao evidenciar que a presença de alterações hidrogeoquímicas e microbiológicas — como os níveis de NH_4^+ 3 vezes superiores ao limite legal e a confirmação de *E. coli* e *Salmonella* spp. no Ponto 2 — ocorre simultaneamente a fragilidades institucionais. Isso revela que o risco ambiental não depende apenas da existência de contaminantes, mas também da capacidade do sistema de governança em monitorá-los, interpretá-los e mitigá-los adequadamente — uma conexão que Gwenzi (2021) sugeriu, mas que o FFIMDAVAC consegue demonstrar empiricamente por meio do IVAC.

Nesse contexto, o FFIMDAVAC não substitui os modelos hidrogeológicos clássicos, mas os incorpora como uma de suas dimensões analíticas (D2 — Hidrogeologia e Meio Físico). A hidrogeologia permanece elemento fundamental da avaliação ambiental, porém deixa de representar o único eixo interpretativo. Essa arquitetura metodológica permite integrar, em um mesmo processo decisório, informações físicas, químicas, microbiológicas, operacionais, territoriais e institucionais, produzindo um diagnóstico significativamente mais abrangente do que aquele obtido por abordagens setoriais.

Além disso, a incorporação do protocolo OD–ID–JT confere rastreabilidade ao processo interpretativo, estabelecendo uma relação explícita entre observações de campo, indicadores utilizados, justificativas técnicas e escores atribuídos. Essa característica reduz a subjetividade inerente às avaliações multicritério e aproxima o processo diagnóstico dos princípios da Engenharia Forense Ambiental descritos por Murphy e Morrison (2014). Dessa forma, a associação do protocolo OD–ID–JT a um índice multicritério capaz de sintetizar evidências heterogêneas de forma rastreável, transparente e reproduzível amplia as ferramentas disponíveis para a área.

Em síntese, os resultados demonstram que o FFIMDAVAC não se limita à criação de um novo índice de vulnerabilidade, mas estabelece um protocolo de investigação que integra evidências físicas e documentais, sendo potencialmente aplicável a outros contextos de elevada complexidade ambiental.

O conceito de Conformidade Ilusória, formalmente proposto neste estudo, descreve a dissociação entre a conformidade normativa documental e o desempenho ambiental efetivo. Sua identificação no CELAZ — onde a Dimensão D8 (Governança e Regulação) registrou a maior

contribuição individual do IVAC (17,17%), indicando que o licenciamento formal coexiste com degradação ambiental significativa — demonstra que os instrumentos de controle baseados exclusivamente em verificação documental podem ser insuficientes para prevenir ou detectar a evolução da vulnerabilidade ambiental.

Embora o IVAC tenha apresentado consistência metodológica durante sua aplicação ao CELAZ, análises futuras de sensibilidade, testes de robustez estatística e estudos de validação interavaliadores serão necessários para consolidar sua aplicação em diferentes contextos hidrogeológicos e institucionais.

5.3 CONTRIBUIÇÕES PARA A ENGENHARIA FORENSE AMBIENTAL E PARA A CIÊNCIA DA VULNERABILIDADE

A aproximação entre a Engenharia Forense Ambiental e a avaliação integrada da vulnerabilidade ambiental constituiu uma das diretrizes metodológicas deste estudo. Tradicionalmente, a Engenharia Forense concentra-se na reconstrução de processos de contaminação, na identificação de fontes poluidoras e no estabelecimento do nexo causal entre atividades antrópicas e danos ambientais (Morrison, 2000; Murphy & Morrison, 2014). No presente trabalho, essa abordagem foi ampliada ao incorporar uma perspectiva sistêmica de vulnerabilidade, na qual a análise não se limita à identificação da contaminação, mas busca compreender as condições estruturais responsáveis pela produção e manutenção do risco ambiental.

Essa ampliação conceitual foi operacionalizada por meio do protocolo OD–ID–JT, que organiza o processo investigativo em três níveis hierárquicos sequenciais: Observação Direta (OD) como prioridade máxima, Informação Documental (ID) como peso intermediário e Julgamento Técnico (JT) como síntese pericial integradora aplicada quando as duas primeiras são insuficientes. Essa estrutura estabelece uma cadeia lógica de rastreabilidade entre as evidências produzidas em campo e as conclusões alcançadas, reduzindo significativamente a subjetividade das interpretações e permitindo auditoria integral do processo decisório.

A aplicação do protocolo no CELAZ demonstrou que as evidências de Observação Direta — como as fissuras em estruturas funerárias, a drenagem deficiente, a ausência de EPIs em exumações e a proximidade crítica entre sepulturas e residências (inferior a 50 m) — foram determinantes para a atribuição dos escores mais elevados nas dimensões D1 (Infraestrutura e Estanqueidade, Pi=4) e D7 (Gestão Operacional, Pi=2). Essas evidências empíricas, registradas *in loco*, receberam prioridade

máxima sobre a documentação institucional, que frequentemente omitia ou subestimava as condições reais de operação do complexo cemiterial. Essa hierarquização transparente das evidências está alinhada aos princípios da *post-normal science* (Funtowicz & Ravetz, 1993), que recomenda a priorização de dados materiais em contextos de alta incerteza científica.

Ao contrário de abordagens baseadas exclusivamente em julgamento especializado, o protocolo torna explícitos os critérios utilizados para atribuição dos escores, facilitando tanto a reprodutibilidade científica quanto a validação independente dos resultados. Essa característica amplia as possibilidades metodológicas da Engenharia Forense Ambiental, especialmente em estudos envolvendo múltiplas fontes de informação e elevado grau de complexidade ambiental.

Outro aspecto central refere-se à própria concepção da vulnerabilidade ambiental. Enquanto grande parte da literatura trata a vulnerabilidade como atributo predominantemente físico do meio natural, os resultados obtidos indicam que ela deve ser compreendida como uma propriedade emergente de sistemas territoriais complexos. A convergência de 7/7 linhas independentes de evidência — desde a caracterização hidrogeológica (D2) até os dados territoriais e socioambientais (D6) — confirma que a vulnerabilidade elevada do CELAZ (IVAC = 4,61) não decorre de um único fator, mas da interação sinérgica entre processos físicos, operacionais, institucionais e sociais. O escore de D8 (Governança e Regulação, Pi=5, contribuição de 17,17%) ser o mais alto entre todas as dimensões demonstra que fatores institucionais podem ter peso igual ou superior aos condicionantes hidrogeológicos clássicos na produção da vulnerabilidade.

Essa interpretação aproxima-se da teoria dos sistemas socioecológicos proposta por Liu *et al.* (2007) e Ostrom (2009), mas avança ao oferecer um mecanismo quantitativo capaz de operacionalizar empiricamente essa integração. No escopo da literatura analisada, não foram identificados estudos que integrem simultaneamente teoria, protocolo forense, índice multicritério e rastreabilidade em um único sistema operacional para avaliação ambiental de cemitérios urbanos. A combinação entre TVAC, FFIMDAVAC, protocolo OD–ID–JT e IVAC representa essa arquitetura metodológica integrada.

Sob essa perspectiva, o FFIMDAVAC extrapola a função de instrumento diagnóstico e passa a constituir uma plataforma metodológica para investigação científica, monitoramento ambiental e apoio à tomada de decisão. Sua estrutura permite identificar não apenas a intensidade da vulnerabilidade, mas também quais dimensões contribuem mais significativamente para sua formação — como demonstrado pelo ranking de contribuição: D8 (17,17%) > D2 = D5 (14,45% cada) > D1 = D4 = D6

(13,73% cada) > D3 (9,76%) > D7 (5,78%) — possibilitando direcionar intervenções de forma mais eficiente e tecnicamente fundamentada.

Do ponto de vista científico, essa abordagem amplia as possibilidades de aplicação da Engenharia Forense Ambiental em problemas caracterizados por elevada complexidade, nos quais múltiplos fatores atuam simultaneamente e as relações de causalidade não podem ser explicadas por modelos lineares tradicionais. Dessa forma, o estudo contribui não apenas para o avanço da avaliação ambiental de cemitérios, mas também para a consolidação de abordagens integradas na investigação de sistemas ambientais complexos.

5.4 IMPLICAÇÕES PARA O LICENCIAMENTO E A GOVERNANÇA AMBIENTAL

Os resultados obtidos evidenciam que processos convencionais de licenciamento ambiental fundamentados predominantemente na análise documental e no atendimento formal às exigências legais podem não representar adequadamente a dinâmica evolutiva da vulnerabilidade em cemitérios urbanos. A coexistência de alterações hidrogeoquímicas, microbiológicas, operacionais, territoriais e institucionais demonstra que a existência de licenciamento ambiental não implica, necessariamente, condições satisfatórias de desempenho ambiental ao longo do ciclo operacional do empreendimento.

No CELAZ, observou-se que as elevadas pontuações obtidas nas dimensões D5 (Hidroquímica e Microbiologia, Pi=4), D7 (Gestão Operacional, Pi=2) e D8 (Governança e Regulação, Pi=5) coexistem com a existência de instrumentos regulatórios formalmente estabelecidos. Esse resultado evidencia uma dissociação entre conformidade normativa e desempenho ambiental efetivo, indicando que a simples observância de requisitos legais não é suficiente para representar a complexidade dos processos responsáveis pela produção da vulnerabilidade ambiental. O ponto de monitoramento P2 (Oficina Mecânica 1), por exemplo, apresentou níveis de nitrogênio amoniacal (NH_4^+) superiores a 3 vezes o limite estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, além de confirmação microbiológica de *E. coli* e *Salmonella* spp., indicando que a operação do cemitério gera impactos mensuráveis que os mecanismos de licenciamento vigentes não foram capazes de prevenir ou detectar tempestivamente.

Essa constatação converge com a perspectiva da *Post-Normal Science*, proposta por Funtowicz e Ravetz (1993), segundo a qual situações caracterizadas por elevada incerteza científica, múltiplos atores envolvidos e consequências potencialmente irreversíveis exigem processos decisórios baseados na integração de diferentes tipos de evidências, em substituição aos modelos tradicionais fundamentados exclusivamente em parâmetros determinísticos. Sob essa perspectiva, o protocolo OD–

ID–JT representa uma contribuição metodológica relevante ao estruturar explicitamente a cadeia lógica entre observações de campo, indicadores, justificativas técnicas e interpretação dos resultados, permitindo que diferentes níveis de incerteza sejam documentados de forma transparente e auditável.

No contexto brasileiro, a Resolução CONAMA nº 335/2003 e suas alterações estabelecem requisitos mínimos para o licenciamento ambiental de cemitérios, incluindo caracterização hidrogeológica e monitoramento periódico. Estudos recentes sobre monitoramento ambiental de cemitérios e políticas públicas (RGSA, 2025) reforçam a necessidade de indicadores de gestão claros para a implementação de políticas públicas eficazes no setor cemiterial. Entretanto, a legislação não contempla um instrumento integrado capaz de sintetizar, em um único indicador, a condição ambiental do empreendimento considerando simultaneamente aspectos físicos, químicos, microbiológicos, operacionais, territoriais e institucionais. Como demonstrado neste estudo, a omissão das dimensões D6, D7 e D8 — que conjuntamente contribuem com 33,68% do IVAC — deixaria aproximadamente um terço da vulnerabilidade real invisível aos órgãos fiscalizadores.

Nesse cenário, o FFIMDAVAC e o IVAC apresentam potencial para atuar como instrumentos complementares aos procedimentos convencionais de licenciamento. Ao sintetizar informações provenientes de diferentes disciplinas em um diagnóstico quantitativo único, o framework amplia a capacidade de identificação de áreas críticas, subsidia a definição de prioridades para monitoramento ambiental e fornece suporte técnico para processos de fiscalização, reavaliação de licenças e implementação de medidas mitigadoras.

Além disso, a arquitetura metodológica do FFIMDAVAC apresenta elevada compatibilidade com princípios internacionais de gestão ambiental e gestão de riscos, particularmente aqueles estabelecidos pelas normas ISO 14001 e ISO 31000, ao incorporar avaliação sistemática de riscos, rastreabilidade das decisões técnicas, melhoria contínua e integração entre monitoramento ambiental e tomada de decisão. Dessa forma, o IVAC não se limita a representar um indicador diagnóstico, mas configura uma ferramenta de apoio à governança ambiental baseada em evidências.

O conceito de Conformidade Ilusória, documentado neste estudo, descreve precisamente a dissociação entre a adequação burocrática aos requisitos legais e a realidade ambiental observada em campo — um fenômeno que pode estar presente em outros empreendimentos sujeitos a licenciamento ambiental, especialmente aqueles localizados em áreas de elevada densidade urbana e baixa capacidade institucional de fiscalização.

5.5 IMPLICAÇÕES PARA A PROTEÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E PARA A JUSTIÇA AMBIENTAL

A integração entre vulnerabilidade hidrogeológica e vulnerabilidade socioterritorial revelou que os potenciais impactos ambientais associados ao CELAZ extrapolam os limites físicos do empreendimento. A direção preferencial do fluxo subterrâneo, associada à ocupação urbana consolidada da Baixa de Quintas, favorece a concentração da exposição ambiental em populações caracterizadas por elevada vulnerabilidade socioeconômica, configurando um cenário compatível com processos de injustiça ambiental descritos por Bullard (2000), Acselrad (2004) e Walker (2012). Patterson (2025) destaca que comunidades historicamente vulnerabilizadas frequentemente suportam o ônus ambiental de infraestruturas urbanas mal geridas, incluindo cemitérios históricos, corroborando o padrão de injustiça ambiental observado no CELAZ.

Esse resultado reforça que a vulnerabilidade ambiental não deve ser interpretada exclusivamente como uma propriedade do meio físico. No CELAZ, a elevada suscetibilidade hidrogeológica (D2 com contribuição de 14,45%) somente adquire significado ambiental mais amplo quando associada às condições sociais das populações potencialmente expostas (D6 com contribuição de 13,73%). A sobreposição entre fragilidade ambiental e vulnerabilidade social amplifica significativamente a magnitude do risco, produzindo efeitos que transcendem a dimensão hidrogeológica tradicionalmente considerada nos processos de avaliação ambiental. A contribuição conjunta das dimensões D6 (Vulnerabilidade Socioterritorial), D7 (Gestão Operacional) e D8 (Governança e Regulação) — 33,68% do IVAC — demonstra que aproximadamente um terço da vulnerabilidade final decorre de fatores que os modelos clássicos GOD e DRASTIC sequer contemplam.

Essa interpretação converge diretamente com o modelo *Hazards-of-Place*, proposto por Cutter (1996), segundo o qual a vulnerabilidade de um território resulta da interação entre características biofísicas e condições sociais. Os resultados obtidos demonstram que essa interação é claramente observável no CELAZ, onde a presença de aquífero raso altamente vulnerável (Grupo Barreiras, espessura média de 1 a 10 m), associada à elevada densidade populacional e às condições socioeconômicas da Baixa de Quintas, produz um contexto de elevada exposição ambiental que dificilmente seria capturado por metodologias baseadas exclusivamente em parâmetros hidrogeológicos.

A elevada contribuição da Dimensão D6 (Vulnerabilidade Socioterritorial, Pi=4) para o IVAC confirma que fatores relacionados ao uso e ocupação do solo, densidade populacional, infraestrutura urbana e capacidade adaptativa da população constituem componentes estruturantes da vulnerabilidade ambiental. O gradiente de contaminação identificado — do Ponto 2 (Oficina Mecânica 1, com NH_4^+ superior a 3 vezes o limite da Portaria GM/MS nº 888/2021, *E. coli* e *Salmonella* spp. confirmados) em direção ao Ponto 5 (Revendedora de Carro, com parâmetros próximos ao *background* local) — segue exatamente a direção preferencial do fluxo subterrâneo em direção às áreas residenciais mais densamente ocupadas e socioeconomicamente vulneráveis. Esse padrão evidencia que a contaminação do aquífero livre raso não permanece confinada aos limites do CELAZ, mas se desloca subsuperficialmente em direção às populações receptoras, configurando um risco ambiental diferencial que se sobrepõe a desigualdades sociais preexistentes.

Esse resultado reforça a necessidade de incorporar critérios de justiça ambiental aos processos de planejamento territorial, licenciamento e monitoramento ambiental de cemitérios urbanos, conforme defendido por Porto (2007) e Harvey (2014), que argumentam que a distribuição desigual dos riscos ambientais reproduz e aprofunda desigualdades socioespaciais históricas.

Sob essa perspectiva, a proteção das águas subterrâneas deixa de representar apenas um problema hidrogeológico e passa a envolver dimensões relacionadas ao planejamento urbano, saúde pública, gestão territorial e governança ambiental. Os resultados sugerem que políticas públicas destinadas ao monitoramento ambiental de cemitérios devem integrar informações referentes às condições naturais do meio físico, ao funcionamento operacional do empreendimento e às características sociais das populações potencialmente expostas.

Consequentemente, o FFIMDAVAC amplia significativamente o alcance das avaliações ambientais convencionais ao incorporar explicitamente a dimensão da justiça ambiental como componente integrante do diagnóstico da vulnerabilidade. Essa abordagem aproxima a Engenharia Forense Ambiental das discussões contemporâneas sobre sustentabilidade, equidade territorial e gestão integrada do território, campos que têm avançado significativamente na literatura internacional (Turner *et al.*, 2003; Gallopín, 2006; Adger, 2006; IPCC, 2023), mas que raramente são operacionalizados em instrumentos concretos de avaliação ambiental de empreendimentos específicos.

5.6 SIGNIFICADO CIENTÍFICO DOS RESULTADOS

Retomando o enquadramento epistemológico apresentado na Seção 2.5, os resultados desta pesquisa representam evidência empírica de um deslocamento interpretativo no sentido discutido por Kuhn (1962). Sob a abordagem tradicional, fundamentada exclusivamente em modelos hidrogeológicos (GOD, DRASTIC), os dados produzidos no CELAZ seriam interpretados como manifestações isoladas de contaminação do aquífero. Sob a estrutura conceitual proposta pela TVAC, esses mesmos dados passam a representar manifestações de um único fenômeno sistêmico: a vulnerabilidade ambiental cemiterial como propriedade emergente da interação entre fatores físicos, operacionais, territoriais e institucionais.

Esse deslocamento não invalida o conhecimento anteriormente produzido. Os modelos GOD e DRASTIC permanecem fundamentais para caracterizar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero; as análises hidrogeoquímicas continuam indispensáveis; e os estudos microbiológicos seguem essenciais. A integração dessas perspectivas em uma arquitetura única permite explicar não apenas a existência da vulnerabilidade, mas seus mecanismos de produção e evolução temporal.

Sob essa ótica, o estudo propõe uma alteração na própria pergunta científica: em vez de investigar exclusivamente se existe contaminação do aquífero, passa-se a investigar quais processos naturais, operacionais, territoriais e institucionais interagem para produzir a vulnerabilidade ambiental observada. Essa mudança de enfoque aproxima-se do conceito de deslocamento interpretativo discutido por Kuhn (1962), no qual diferentes estruturas conceituais interpretam um mesmo conjunto de evidências a partir de referenciais distintos.

Essa transição é coerente com o referencial da *post-normal science* (Funtowicz & Ravetz, 1993), desenvolvido para situações de alta incerteza científica, múltiplos atores envolvidos e consequências potencialmente irreversíveis — características que descrevem o contexto dos cemitérios urbanos em áreas densamente ocupadas. A *post-normal science* propõe que, quando os fatos são incertos e os valores estão em disputa, a qualidade do processo decisório depende da ampliação da comunidade de pares e da integração de diferentes tipos de evidência. O protocolo OD–ID–JT operacionaliza esse princípio ao estabelecer uma hierarquia que prioriza a materialidade dos dados empíricos, mas reconhece o papel complementar das fontes documentais e do julgamento técnico especializado.

A integração promovida pelo FFIMDAVAC também dialoga com a teoria da complexidade (Morin, 2005), segundo a qual fenômenos ambientais não podem ser compreendidos por recortes

disciplinares estanques, mas exigem abordagens que reconheçam interdependências e emergências. No CELAZ, a vulnerabilidade ambiental não é a soma de fatores hidrogeológicos, operacionais e territoriais: ela é o produto de suas interações sinérgicas. O IVAC de 4,61 não resulta do predomínio de uma única dimensão, mas da convergência ponderada de oito camadas analíticas independentes, onde a governança (D8 = 17,17%) e a hidrogeologia (D2 = 14,45%) contribuem com pesos semelhantes. O IVAC captura essa sinergia ao ponderar dimensões que, isoladamente, produziriam diagnósticos parciais, mas que, integradas, revelam um quadro sistêmico que nenhum indicador setorial poderia capturar.

Do ponto de vista da Engenharia Forense Ambiental, o FFIMDAVAC amplia o escopo tradicional de reconstrução de eventos de contaminação e estabelecimento de nexo causal (Morrison, 2000; Murphy & Morrison, 2014) ao incorporar uma perspectiva sistêmica de vulnerabilidade, investigando as condições estruturais responsáveis pela produção e manutenção do risco. O protocolo OD–ID–JT estabelece uma cadeia lógica de rastreabilidade entre observações de campo, indicadores e escores, permitindo auditoria e reprodução independente do processo decisório.

A literatura internacional reconhece a natureza sistêmica e multidimensional da vulnerabilidade ambiental (Turner *et al.*, 2003; Adger, 2006; Gallopín, 2006; Liu *et al.*, 2007; Ostrom, 2009; IPCC, 2023), mas raramente oferece instrumentos operacionais que traduzam essa complexidade teórica em ferramentas aplicáveis a empreendimentos específicos. O FFIMDAVAC procura preencher essa lacuna ao articular quatro componentes em uma arquitetura metodológica: (i) a TVAC como base teórica, (ii) o FFIMDAVAC como framework forense, (iii) o IVAC como índice multicritério de síntese quantitativa e (iv) o protocolo OD–ID–JT como sistema de rastreabilidade das evidências.

No escopo da literatura analisada, não foram identificados estudos que integrem simultaneamente a TVAC, o FFIMDAVAC, o protocolo OD–ID–JT e o IVAC em uma arquitetura metodológica única para avaliação ambiental de cemitérios urbanos. Essa arquitetura amplia o escopo das abordagens atualmente disponíveis para a Geologia Ambiental, a Engenharia Forense Ambiental e a gestão de áreas cemiteriais urbanas — articulando teoria, protocolo forense, índice multicritério e framework de investigação — e oferece uma base conceitual e operacional passível de replicação em diferentes contextos hidrogeológicos e institucionais.

5.7 CONTRIBUIÇÕES PARA A GEOGRAFIA DA SAÚDE E PARA A SAÚDE PÚBLICA

A aplicação do FFIMDAVAC e do IVAC ao CELAZ produziu resultados que dialogam diretamente com o campo da Geografia da Saúde — disciplina que investiga a distribuição espacial de doenças, a relação entre ambiente e saúde humana, e os determinantes socioambientais do processo saúde-doença (Santos, 2000; Guimarães, 2002; Barcellos & Santos, 2004). Tradicionalmente, a Geografia da Saúde brasileira tem se dedicado à análise de doenças infecciosas, parasitárias e crônico-degenerativas em contextos urbanos, mas raramente incorpora a contaminação de aquíferos por cemitérios como um de seus objetos de investigação. O presente estudo contribui para preencher essa lacuna ao articular dados hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, microbiológicos e socioterritoriais com potenciais impactos à saúde das populações expostas.

O gradiente de contaminação identificado — Ponto 2 (Oficina Mecânica 1) com NH_4^+ superior a 3 vezes o limite da Portaria GM/MS nº 888/2021, *E. coli* e *Salmonella* spp. confirmados, em direção ao Ponto 5 (Revendedora de Carro) com valores próximos ao *background* local — segue a direção preferencial do fluxo subterrâneo do CELAZ em direção ao bairro de Baixa de Quintas, área caracterizada por elevada densidade populacional, saneamento básico parcial e dependência de poços rasos para abastecimento. Essa configuração espacial não representa apenas um problema hidrogeológico: constitui um determinante ambiental da saúde que expõe diferencialmente populações já vulnerabilizadas por condições socioeconômicas desfavoráveis.

Sob a ótica da Geografia da Saúde, três contribuições específicas merecem destaque:

a) (a) Espacialização do risco sanitário: A interpolação geoestatística (krigagem) e a análise espacial multicamada (Figura 8) permitiram delimitar as zonas de convergência crítica onde a vulnerabilidade ambiental se sobrepõe à vulnerabilidade social. Essas zonas coincidem com áreas de maior densidade de doenças de veiculação hídrica — diarreias infecciosas, parasitoses intestinais e hepatites — historicamente registradas nos serviços de atenção básica do bairro. O FFIMDAVAC, ao integrar as dimensões D5 (Hidroquímica e Microbiologia) e D6 (Vulnerabilidade Socioterritorial), oferece um instrumento capaz de antecipar territórios de risco sanitário antes mesmo da manifestação clínica de surtos, permitindo ações preventivas de vigilância em saúde.
b) (b) Interface com a Epidemiologia Ambiental: A detecção simultânea de parâmetros físico-químicos alterados (NH_4^+, NO_3^-, condutividade elétrica) e indicadores microbiológicos

(coliformes totais, *E. coli*, *Salmonella* spp.) nas águas subterrâneas do entorno do CELAZ estabelece uma conexão material entre a fonte de contaminação e os receptores humanos. Essa conexão é frequentemente inferida, mas raramente documentada com a densidade de evidências apresentada neste estudo. Para a Epidemiologia Ambiental, isso representa a possibilidade de substituir correlações ecológicas genéricas por trajetórias de exposição empiricamente fundamentadas, fortalecendo a capacidade preditiva e a fundamentação de políticas de saúde preventiva.

c) (c) Justiça ambiental e racismo ambiental na escala local: O padrão espacial identificado — no qual a contaminação do aquífero segue o fluxo subterrâneo em direção às residências mais pobres — exemplifica o fenômeno da injustiça ambiental no acesso à água potável. Estudos de Geografia da Saúde têm demonstrado que populações negras e de baixa renda em áreas urbanas brasileiras são desproporcionalmente expostas a riscos ambientais (Porto, 2007; Pena, 2011). O CELAZ, inserido em um território de ocupação histórica da população negra e pobre de Salvador — a Baixa de Quintas —, configura um caso emblemático de racismo ambiental, no qual a sobreposição entre infraestrutura cemiterial degradada, ausência de monitoramento efetivo e ocupação urbana vulnerável produz um gradiente de exposição diferencial que reproduz desigualdades socioespaciais históricas.

A contribuição da Geografia da Saúde ao FFIMDAVAC é, portanto, dupla: teórica, ao fornecer o referencial da determinação social da saúde para interpretar os resultados do IVAC; e aplicada, ao orientar ações de vigilância em saúde, priorização de áreas para monitoramento de qualidade da água e subsídio a políticas públicas de saneamento básico e proteção de aquíferos urbanos.

Futuros estudos poderão aprofundar essa interface por meio de: (i) inquéritos epidemiológicos na população residente nas zonas de convergência crítica; (ii) análise de séries temporais de doenças de veiculação hídrica nos serviços de atenção básica da Baixa de Quintas; e (iii) integração de indicadores de saúde aos 28 indicadores técnicos do IVAC, ampliando sua capacidade diagnóstica para incluir desfechos sanitários.

6 CONCLUSÕES

A aplicação integrada do FFIMDAVAC ao Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros (CELAZ) permitiu caracterizar a vulnerabilidade ambiental cemiterial como uma propriedade

sistêmica emergente, sintetizada pelo IVAC = 4,61 (Muito Alta Vulnerabilidade), validada pela convergência de 7/7 linhas independentes de evidência por meio do protocolo OD–ID–JT. O objetivo geral da pesquisa foi plenamente alcançado, demonstrando que a vulnerabilidade não se reduz à suscetibilidade hidrogeológica, mas emerge da interação dinâmica entre condicionantes naturais, operacionais, territoriais e institucionais.

A hipótese central foi confirmada. As dimensões de maior contribuição para o IVAC — D8 (Governança e Regulação, 17,17%), D2 (Hidrogeologia e Meio Físico, 14,45%) e D5 (Hidroquímica e Microbiologia, 14,45%) — demonstram que a abordagem setorial clássica (GOD/DRASTIC) captura apenas parte do fenômeno, deixando invisíveis fatores socioterritoriais, operacionais e de governança que, no CELAZ, responderam conjuntamente por 33,68% do escore total.

A articulação de quatro componentes em uma arquitetura metodológica — (i) a TVAC como base teórica formal, (ii) o FFIMDAVAC como framework forense de investigação, (iii) o IVAC como índice multicritério de síntese quantitativa e (iv) o protocolo OD–ID–JT como sistema hierárquico de rastreabilidade das evidências — integra dimensões que os modelos tradicionais tratam isoladamente, oferecendo um diagnóstico capaz de explicar não apenas a existência da vulnerabilidade, mas seus mecanismos de produção, retroalimentação e evolução.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam a necessidade de:

a) (a) superar o modelo de licenciamento baseado exclusivamente em conformidade documental, que pode produzir Conformidade Ilusória;
b) (b) incorporar as dimensões D6 (Vulnerabilidade Socioterritorial), D7 (Gestão Operacional) e D8 (Governança e Regulação) aos instrumentos de avaliação ambiental — dimensões que conjuntamente contribuem com 33,68% do IVAC e permanecem completamente ausentes dos modelos GOD e DRASTIC;
c) (c) integrar critérios de justiça ambiental ao monitoramento de áreas cemiteriais urbanas, particularmente quando populações vulneráveis estão a jusante do fluxo subterrâneo, como demonstrado pelo gradiente de contaminação P2→P5 na interface CELAZ–Baixa de Quintas.

Ao demonstrar que a vulnerabilidade ambiental cemiterial constitui um fenômeno sistêmico, quantificável e rastreável por meio da integração entre teoria, engenharia forense e análise multicritério, esta pesquisa amplia o escopo da avaliação ambiental de cemitérios urbanos e estabelece

uma base metodológica passível de replicação em diferentes contextos hidrogeológicos e institucionais. O FFIMDAVAC transcende a condição de ferramenta aplicada ao CELAZ e passa a representar uma base conceitual e operacional para a Geologia Ambiental, a Engenharia Forense Ambiental e a gestão ambiental de cemitérios urbanos.

6.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Embora o FFIMDAVAC e o IVAC tenham demonstrado consistência metodológica e elevada capacidade integrativa, algumas limitações devem ser explicitamente reconhecidas.

Em primeiro lugar, a aplicação do framework a um único estudo de caso restringe a validade externa dos resultados, tornando necessária sua replicação em diferentes contextos hidrogeológicos, climáticos e urbanos. Os pesos (Pi) utilizados no IVAC refletem a calibração desenvolvida para o contexto hidrogeológico específico do CELAZ — aquífero livre raso em sedimentos do Grupo Barreiras, sob clima tropical úmido — podendo requerer ajustes quando aplicados a outras condições geológicas, climáticas ou regulatórias.

Em segundo lugar, a qualidade, disponibilidade e resolução temporal das séries históricas de monitoramento influenciam a profundidade das interpretações, especialmente nos componentes hidrogeoquímico e microbiológico. A ausência de uma rede de monitoramento contínuo padronizada em todo o perímetro do CELAZ impôs limitações à validação temporal da evolução dos indicadores. Além disso, a resistência institucional em fornecer documentos internos de gestão operacional restringiu a aplicação plena da dimensão documental (ID) do protocolo OD–ID–JT.

Adicionalmente, embora o protocolo OD–ID–JT tenha sido estruturado para minimizar subjetividades por meio da hierarquização explícita das evidências (OD > ID > JT), permanece um componente residual inerente ao julgamento técnico especializado, característica comum aos métodos de integração multicritério, conforme discutido por Funtowicz e Ravetz (1993) no contexto da post-normal science. Esse componente residual é documentado de forma transparente no protocolo, permitindo auditoria independente.

Finalmente, a consolidação do IVAC como instrumento de apoio ao licenciamento ambiental dependerá de validações multicêntricas, análises de sensibilidade, calibração de intervalos de classificação e estudos de reprodutibilidade conduzidos por equipes independentes em diferentes contextos institucionais.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões desta pesquisa indicam que a transição de uma conformidade ilusória para uma gestão ambiental efetiva de cemitérios urbanos exige a superação dos modelos puramente hidrogeológicos de avaliação de vulnerabilidade. O FFIMDAVAC consolida-se como uma plataforma metodológica capaz de integrar teoria, protocolo forense e índice multicritério, oferecendo suporte técnico para o licenciamento ambiental, o monitoramento contínuo, a remediação de áreas degradadas e a formulação de políticas públicas fundamentadas em evidências científicas.

A proteção das águas subterrâneas e a promoção da justiça ambiental em áreas cemiteriais urbanas dependem da adoção de instrumentos de avaliação que incorporem a complexidade sistêmica da vulnerabilidade ambiental. A arquitetura modular do FFIMDAVAC foi concebida para permitir replicação, auditoria metodológica e adaptação a diferentes contextos hidrogeológicos e urbanos, consolidando uma nova perspectiva para a investigação e gestão de empreendimentos potencialmente poluidores.

Mais do que propor um novo índice de vulnerabilidade, esta pesquisa demonstra que a compreensão da vulnerabilidade ambiental cemiterial exige uma mudança de escala analítica: do comportamento isolado dos componentes físicos para o funcionamento integrado do sistema socioambiental. Ao articular teoria (TVAC), protocolo forense (OD–ID–JT), índice multicritério (IVAC) e framework de investigação (FFIMDAVAC) em uma arquitetura metodológica única, este trabalho fornece fundamentos científicos capazes de apoiar o avanço da Engenharia Forense Ambiental, o aperfeiçoamento do licenciamento ambiental e a formulação de políticas públicas baseadas em evidências — contribuindo para que a gestão de cemitérios urbanos deixe de ser orientada pela conformidade burocrática e passe a ser orientada pela realidade material do território.

A articulação com a Geografia da Saúde demonstrou que a contaminação do aquífero livre raso não representa apenas um problema hidrogeológico, mas um determinante ambiental da saúde que expõe diferencialmente populações vulnerabilizadas, configurando injustiça ambiental na interface CELAZ–Baixa de Quintas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao **Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia (PPGGEO/UFBA)** pela infraestrutura acadêmica disponibilizada durante o desenvolvimento desta pesquisa; ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)** pela

concessão de bolsa ao primeiro autor; ao **Grupo de Pesquisa Geoquímica das Interfaces (UFBA)** pelo ambiente científico colaborativo que favoreceu o desenvolvimento desta investigação; e aos revisores anônimos pelas valiosas contribuições que permitiram o aprimoramento da qualidade deste manuscrito.

DECLARAÇÃO SOBRE O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que ferramentas de Inteligência Artificial foram utilizadas exclusivamente como apoio à revisão linguística, organização textual, aperfeiçoamento da redação científica e padronização editorial do manuscrito. Todas as etapas relacionadas à concepção da pesquisa, formulação das hipóteses, desenvolvimento metodológico, coleta e interpretação dos dados, elaboração dos modelos conceituais (TVAC, FFIMDAVAC e IVAC), discussão dos resultados e formulação das conclusões foram realizadas integralmente pelos autores, que assumem total responsabilidade pelo conteúdo científico apresentado.

O uso dessas ferramentas observou as recomendações do **Committee on Publication Ethics (COPE)** e as diretrizes editoriais aplicáveis à comunicação científica responsável.

DISPONIBILIDADE DOS DADOS

Os dados utilizados nesta pesquisa são provenientes de levantamentos de campo realizados pelos autores, complementados por informações previamente publicadas (Batista, 2014; Batista & Cruz, 2022) e por bases institucionais oficiais, incluindo CPRM, IBGE e INEMA. Informações adicionais referentes aos indicadores do IVAC, às matrizes de pontuação e aos protocolos de avaliação empregados poderão ser disponibilizadas pelo autor correspondente mediante solicitação científica razoável, observadas as restrições éticas, legais e institucionais aplicáveis.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflitos de interesse financeiros, institucionais, profissionais ou pessoais que possam ter influenciado os resultados ou as interpretações apresentadas neste estudo.

FINANCIAMENTO

Esta pesquisa não recebeu financiamento específico de agências públicas, comerciais ou sem fins lucrativos para sua execução. O primeiro autor recebeu bolsa de doutorado da **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)** durante parte do período de desenvolvimento da pesquisa, apoio que contribuiu para a realização das atividades de campo.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Flavio Souza Batista: concepção e delineamento da pesquisa; desenvolvimento da Teoria da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (TVAC), do Framework Forense Integrado e Multidimensional para Diagnóstico da Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (FFIMDAVAC) e do Índice de Vulnerabilidade Ambiental Cemiterial (IVAC); planejamento metodológico; coleta, organização e análise dos dados; elaboração das figuras e tabelas; redação do manuscrito e revisão da versão final.

Cristovaldo Bispo dos Santos: orientação acadêmica; supervisão científica; contribuição para a análise hidrogeológica; discussão dos resultados e revisão crítica do manuscrito.

Manuel Vitor Portugal Gonçalves: coorientação acadêmica; contribuição na modelagem geoestatística (krigagem), tratamento e interpretação dos dados hidrogeoquímicos; discussão dos resultados e revisão crítica do manuscrito.

Manoel Jerônimo Moreira Cruz: concepção científica; supervisão metodológica; discussão teórica; interpretação dos resultados; revisão crítica do manuscrito e validação científica da versão final.

Todos os autores participaram da interpretação dos resultados, aprovaram a versão final do manuscrito e assumem responsabilidade integral pelo seu conteúdo científico.

REFERÊNCIAS

ACSELRAD, H. Justiça ambiental e cidadania. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2004.

ADGER, W. N. Vulnerability. Global Environmental Change, v. 16, n. 3, p. 268–281, 2006.

ALLER, L. *et al.* DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Washington: EPA, 1987.

BARCELLOS, C.; SANTOS, S. M. Geografia e saúde: novas abordagens. Cadernos de Saúde Pública, v. 20, n. 5, p. 1149-1161, 2004.

BATISTA, F. S. Riscos Ambientais do Complexo de Cemitérios Quinta dos Lázaros, Salvador, Bahia, Brasil. 2014. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

BATISTA, F. S.; CRUZ, M. J. M. Geo-environmental assessment and quality of groundwater in the Complex of Cemeteries Quinta dos Lázaros. International Journal of Human Sciences Research, Ponta Grossa, v. 2, n. 10, p. 2–18, 2022. DOI: 10.22533/at.ed.558282201042.

BLAIKIE, P. *et al.* At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters. London: Routledge, 1994.

BULLARD, R. D. Dumping in Dixie: Race, class, and environmental quality. 3. ed. Boulder: Westview Press, 2000.

CONAMA. Resolução nº 335, de 28 de março de 2003. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2003.

CPRM — SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do estado da Bahia. Escala 1:1.000.000. Brasília: CPRM, 2016.

CUTTER, S. L. Vulnerability to environmental hazards. Progress in Human Geography, v. 20, n. 4, p. 529–539, 1996.

DENT, B. B. The hydrogeology of cemeteries. 2002. Thesis (Doctor of Philosophy) — University of Technology, Sydney, 2002.

FIEDLER, S. *et al.* Graveyards — Special landfills. Science of the Total Environment, v. 419, p. 90–97, 2012. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.12.007.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 1988.

FUNTOWICZ, S. O.; RAVETZ, J. R. Science for the post-normal age. Futures, v. 25, n. 7, p. 739–755, 1993.

GALLOPÍN, G. C. Linkages between vulnerability, resilience and adaptive capacity. Global Environmental Change, v. 16, n. 3, p. 293–303, 2006.

GONÇALVES, J. P. *et al.* Delineation of potential groundwater zones in cemetery areas using DRASTIC and AHP models. Water, v. 16, n. 4, 585, 2024. DOI: 10.3390/w16040585.

GUIMARÃES, R. B. Geografia da saúde: temas e perspectivas. Hygeia, v. 1, n. 1, p. 1-14, 2002.

GWENZI, W. Cemeteries as sources of emerging contaminants in groundwater: A review. Journal of Environmental Management, v. 297, 113321, 2021.

HARVEY, D. Cidades rebeldes: do direito à cidade à revolução urbana. São Paulo: Martins Fontes, 2014.

HEWITT, K. (ed.). Interpretations of calamity from the viewpoint of human ecology. Boston: Allen & Unwin, 1983.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023.

ISO 14001:2015. Environmental management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2015.

ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines. Geneva: ISO, 2018.

KUHN, T. S. The structure of scientific revolutions. Chicago: University of Chicago Press, 1962.

LIU, J. *et al.* Complexity of coupled human and natural systems. Science, v. 317, n. 5844, p. 1513–1516, 2007.

MONITORAMENTO ambiental de cemitérios e políticas públicas. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 19, n. 1, e04421, 2025.

MORIN, E. Introdução ao pensamento complexo. Porto Alegre: Sulina, 2005.

MORRISON, R. D. Environmental forensics: principles and applications. Boca Raton: CRC Press, 2000.

MURPHY, B. L.; MORRISON, R. D. Introduction to environmental forensics. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2014.

OSTROM, E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, v. 325, n. 5939, p. 419–422, 2009.

PATTERSON, J. Sacred Grounds: A Risk Assessment Framework Developed for Historic African American Cemeteries Threatened by Sea Level Rise in Georgetown, SC. 2025. Thesis (Master of Science) — Clemson University, Clemson, 2025.

PENA, P. G. L. Racismo ambiental e saúde: uma abordagem ecossistêmica. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2011.

PORTO, M. F. Uma ecologia política dos riscos: princípios e perspectivas. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2007.

RUFFELL, A.; McKINLEY, J. M. Geoforensics. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.

SANTOS, M. Por uma geografia nova. 5. ed. São Paulo: Edusp, 2000.

SLOVIC, P. Perception of risk. Science, v. 236, n. 4799, p. 280–285, 1987.

SÁNCHEZ, L. E. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

TURNER II, B. L. *et al.* A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 100, n. 14, p. 8074–8079, 2003.

UNESCO. The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible. Paris: UNESCO, 2022.

VEYRET, Y. Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente. São Paulo: Contexto, 2007.

WALKER, G. Environmental justice: Concepts, evidence and politics. London: Routledge, 2012.

WHITE, G. F. Natural hazards: local, national, global. New York: Oxford University Press, 1974.

ZYCHOWSKI, J. Impact of cemeteries on groundwater chemistry: A review. Catena, v. 93, p. 29–37, 2012. DOI: 10.1016/j.catena.2012.01.009.

ZYCHOWSKI, J.; BRYNDAL, T. Impact of cemeteries on groundwater contamination by bacteria and viruses — a review. Journal of Water and Health, v. 13, n. 2, p. 285–301, 2015. DOI: 10.2166/wh.2014.119.