JOURNAL OF EDUCATION, SCIENCE AND HEALTH – JESH
Revista de Educação, Ciência e Saúde
DOI: https://www.doi.org/ 10.52832/jesh.v6i3.767
Home page: https://bio10publicacao.com.br/jesh
e-ISSN: 2763-6119

CUPINS XILÓFAGOS EM EDIFICAÇÕES: REVISÃO DA LITERATURA SOBRE AVANÇOS EM ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS DE MONITORAMENTO E CONTROLE (2022-2026)

WOOD-FEEDING TERMITES IN BUILDINGS: A LITERATURE REVIEW ON ADVANCES IN SUSTAINABLE MONITORING AND CONTROL STRATEGIES FROM 2022 TO 2026

TERMITAS XILÓFAGAS EN EDIFICACIONES: REVISIÓN DE LA LITERATURA SOBRE LOS AVANCES EN ESTRATEGIAS SOSTENIBLES DE MONITOREO Y CONTROL (2022–2026)

Lucas Felipe Santos Maia[1]

Engenheiro Civil - Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).
Mestrando em Tecnologias e Inovações Construtivas - UFSJ, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil;
*Autor correspondente: lucasfelipe31@yahoo.com.br.

Recebido: 10/08/2026 | **Aprovado**: 10/09/2026 | **Publicado**: 16/09/2026

Resumo: Os cupins xilófagos constituem um dos principais agentes de biodeterioração de estruturas de madeira empregadas em edificações, ocasionando prejuízos econômicos significativos e reduzindo a vida útil das construções, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. Diante da crescente demanda por soluções ambientalmente responsáveis, este estudo teve como objetivo analisar os avanços científicos relacionados ao monitoramento e às estratégias sustentáveis de controle desses insetos em edificações. Realizou-se uma revisão da literatura com estratégia sistematizada de busca na base de dados Scopus, contemplando artigos publicados entre 2022 e 2026, em língua inglesa, nas áreas de Engenharia, Ciência dos Materiais e Ciências Ambientais. A busca recuperou 143 documentos e, após aplicação dos critérios de elegibilidade, foram selecionados 15 estudos para síntese qualitativa. Os resultados evidenciaram avanços expressivos nas tecnologias de monitoramento não destrutivo, incluindo emissão acústica, sensores eletromagnéticos e outros métodos capazes de ampliar a detecção precoce das infestações e subsidiar intervenções preventivas. Também foi observada uma tendência consistente de substituição parcial dos preservantes químicos convencionais por alternativas de menor impacto ambiental, como formulações nanoestruturadas de quitosana associadas a óleos essenciais, extratos vegetais, vinagre de madeira, compostos de boro combinados com ácido cítrico e modificações físico-químicas da madeira. Conclui-se que a integração entre tecnologias modernas de monitoramento, preservação sustentável da madeira e conhecimento da biologia dos cupins representa uma estratégia promissora para aumentar a durabilidade das edificações, reduzir impactos ambientais e fortalecer o manejo racional de espécies-praga.

Palavras-chave: Biodeterioração. Preservação da madeira. Monitoramento não destrutivo. Sustentabilidade. Manejo de cupins.

Abstract: Wood-feeding termites are among the main agents responsible for the biodeterioration of wooden structures used in buildings, causing significant economic losses and reducing the service life of constructions, particularly in tropical and subtropical regions. Given the growing demand for environmentally sustainable solutions, this study aimed to analyze recent scientific advances in monitoring technologies and sustainable termite control strategies applicable to buildings. A systematic literature review was conducted using the Scopus database, including articles published between 2022 and 2026 in English within the fields of Engineering, Materials Science, and Environmental Science. The search retrieved 143 documents, of which 15 studies met the eligibility criteria and were included in the qualitative synthesis. The findings revealed substantial advances in non-destructive monitoring technologies, including acoustic emission, electromagnetic sensors, and other inspection methods capable of improving the early detection of termite infestations and supporting preventive interventions. The review also identified a consistent trend toward the partial replacement of conventional chemical preservatives with environmentally friendly alternatives, such as chitosan-based nanoformulations combined with essential oils, plant extracts, wood vinegar, boron compounds associated with citric acid, and physicochemical wood modification techniques. It is concluded that integrating modern monitoring technologies, sustainable wood preservation strategies, and knowledge of termite biology represents a promising approach to enhance the durability of buildings, reduce environmental impacts, and strengthen the rational management of termite pest species.

Keywords: Biodeterioration. Wood preservation. Non-destructive monitoring. Sustainability. Termite management.

Resumen: Las termitas xilófagas constituyen uno de los principales agentes de biodeterioro de las estructuras de madera utilizadas en edificaciones, ocasionando importantes pérdidas económicas y reduciendo la vida útil de las construcciones, especialmente en regiones tropicales y subtropicales. Ante la creciente demanda de soluciones ambientalmente sostenibles, este estudio tuvo como objetivo analizar los avances científicos relacionados con las tecnologías de monitoreo y las estrategias sostenibles para el control de estos insectos en edificaciones. Se realizó una revisión sistematizada de la literatura utilizando la base de datos Scopus, considerando artículos publicados entre 2022 y 2026, en idioma inglés, en las áreas de Ingeniería, Ciencia de los Materiales y Ciencias Ambientales. La búsqueda recuperó 143 documentos y, tras la aplicación de los criterios de elegibilidad, se seleccionaron 15 estudios para la síntesis cualitativa. Los resultados evidenciaron avances significativos en las tecnologías de monitoreo no destructivo, incluyendo emisión acústica, sensores electromagnéticos y otros métodos de inspección que favorecen la detección temprana de infestaciones y las intervenciones preventivas. También se identificó una tendencia consistente hacia la sustitución parcial de los preservantes químicos convencionales por alternativas de menor impacto ambiental, como nanoformulaciones de quitosano con aceites esenciales, extractos vegetales, vinagre de madera, compuestos de boro asociados con ácido cítrico y modificaciones fisicoquímicas de la madera. Se concluye que la integración de tecnologías modernas de monitoreo, preservación sostenible de la madera y conocimiento de la biología de las termitas constituye una estrategia prometedora para aumentar la durabilidad de las edificaciones, reducir los impactos ambientales y fortalecer el manejo racional de las especies plaga.

Palabras-clave: Biodeterioro. Preservación de la madera. Monitoreo no destructivo. Sostenibilidad. Manejo de termitas.

1 INTRODUÇÃO

A utilização da madeira como material estrutural e funcional na construção civil tem crescido globalmente devido à sua característica renovável, ao baixo consumo de energia incorporada e ao seu papel estratégico no armazenamento de carbono, na bioeconomia e na denominada construção verde. Esse cenário reforça a necessidade de protocolos rigorosos de monitoramento e controle da qualidade para garantir a integridade e a durabilidade das estruturas de madeira ao longo do tempo (Ahmed *et al.*, 2026; Bahrami *et al.*, 2025; Nasir *et al.*, 2022). Entretanto, a madeira permanece suscetível à biodeterioração, sendo os cupins (*Blattodea: Isoptera*) os principais agentes xilófagos responsáveis por danos em edificações, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (Ahmed *et al.*, 2026; Hassan & Nanda, 2024; Martha *et al.*, 2024; Medeiros Neto *et al.*, 2022).

Embora desempenhem importante função ecológica na ciclagem de nutrientes e degradação da celulose em ecossistemas naturais, algumas espécies tornam-se severas pragas em ambientes antrópicos, ocasionando prejuízos econômicos expressivos. Estima-se que os danos causados por cupins e os custos associados ao seu controle ultrapassem US$ 40 bilhões anuais em escala mundial, sendo aproximadamente 80% atribuídos aos cupins subterrâneos (Ahmed *et al.*, 2026; Hassan & Nanda, 2024; Martha *et al.*, 2024). As espécies de maior relevância econômica em edificações pertencem principalmente aos grupos dos cupins subterrâneos (famílias *Rhinotermitidae* e *Termitidae*), destacando-se os gêneros *Coptotermes*, *Reticulitermes*, *Heterotermes* e *Odontotermes*, e dos cupins de madeira seca (família Kalotermitidae), representados principalmente pelos gêneros *Cryptotermes* e *Incisitermes* (Hassan & Nanda, 2024). A natureza críptica desses insetos constitui um dos maiores desafios para seu manejo, uma vez que as colônias permanecem ocultas no interior da madeira, preservando sua superfície enquanto degradam internamente os elementos estruturais, fazendo com que os sinais de infestação sejam percebidos apenas em estágios avançados de deterioração (Bahrami *et al.*, 2025; Hassan & Nanda, 2024; Hermawan *et al.*, 2024).

O desenvolvimento de estratégias modernas de monitoramento fundamenta-se na compreensão da biologia e da etologia desses insetos. Durante a alimentação e a construção de galerias, os cupins produzem emissões acústicas decorrentes de microfraturas na madeira, além de sinais vibratórios gerados pelo comportamento de alarme dos soldados. Simultaneamente, a atividade metabólica das colônias provoca alterações térmicas, aumento da umidade e liberação de gases, como CO_2 e CH_4, parâmetros que podem ser explorados por tecnologias de monitoramento não destrutivas, conforme destacado nos estudos de Hassan & Nanda (2024) e de Nasir *et al.* (2022). Nesse contexto, destacam-se métodos como monitoramento por emissão acústica (*Acoustic Emission* - AE), sensores térmicos, detectores de gases e sistemas sem fio baseados em indução eletromagnética, capazes de detectar infestações *in situ* de forma precoce e reduzir a dependência da inspeção visual convencional, frequentemente subjetiva e limitada à identificação de danos aparentes (Fang *et al.*, 2023; Hassan & Nanda, 2024; Nasir *et al.*, 2022).

Paralelamente aos avanços em monitoramento, observa-se uma mudança nas estratégias de preservação da madeira. Segundo Ahmed *et al.* (2026) e Trabelsi & Mhamdi (2024) os métodos tradicionais baseados em biocidas sintéticos e compostos metálicos, como arseniato de cobre cromatado (CCA), creosoto e pentaclorofenol (PCP), embora eficientes no controle biológico, apresentam elevada persistência ambiental, potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas e riscos à saúde humana, motivando restrições regulatórias em diversos países. Em resposta, pesquisas recentes têm direcionado esforços para alternativas sustentáveis de menor impacto ambiental, incluindo tratamentos térmicos e modificações não biocidas, formulações à base de boro associadas ao ácido cítrico, utilização de vinagre de madeira (ácido pirolenhoso), rico em compostos fenólicos com atividade repelente e inseticida, e o encapsulamento de óleos essenciais em nanopartículas de quitosana, estratégia capaz de aumentar a estabilidade, retenção e liberação controlada dos compostos bioativos (Ahmed *et al.*, 2026; Kadir *et al.*, 2022; Martha *et al.*, 2024; Priadi, Putra & Cahyono, 2023; Trabelsi & Mhamdi, 2024). Além disso, a resistência natural de determinadas espécies de madeira está relacionada à presença de metabólitos secundários, como fenóis, flavonoides e quinonas, bem como ao maior teor de sílica, fatores que contribuem para reduzir a digestibilidade da madeira e aumentar sua resistência ao ataque de cupins (Leroy *et al.*, 2023; Martha *et al.*, 2024; Medeiros Neto *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, o presente trabalho objetiva analisar os avanços científicos publicados entre 2022 e 2026 sobre estratégias sustentáveis de monitoramento e controle de cupins xilófagos em edificações, integrando conhecimentos da biologia e etologia desses insetos com tecnologias de detecção não destrutivas e métodos ecologicamente responsáveis de preservação da madeira, alinhados aos princípios da bioeconomia e da construção sustentável.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica, de abordagem qualitativa, com objetivos descritivos e exploratórios, desenvolvida por meio de uma revisão da literatura com estratégia sistematizada de busca. A pesquisa bibliográfica fundamenta-se no levantamento e na análise de materiais

científicos já publicados, permitindo ao pesquisador conhecer a produção existente sobre determinado tema e estabelecer relações entre os conhecimentos disponíveis (Gil, 2019).

A abordagem qualitativa foi adotada por possibilitar a interpretação crítica das evidências disponíveis acerca dos impactos causados por cupins xilófagos em edificações e das estratégias sustentáveis destinadas ao seu monitoramento e controle. Quanto aos objetivos, o estudo apresenta caráter descritivo, por sistematizar as principais evidências encontradas na literatura recente, e exploratório, por ampliar a compreensão acerca das tecnologias emergentes de detecção de infestações e dos métodos alternativos de preservação da madeira empregados na construção civil.

O recorte temporal compreendeu o período de 2022 a 2026, escolhido por contemplar os avanços científicos mais recentes relacionados às tecnologias de monitoramento não destrutivo, aos biopreservativos e às alternativas sustentáveis para o controle de cupins xilófagos.

2.2 Fonte de dados e seleção dos estudos

A busca bibliográfica foi realizada exclusivamente na base de dados Scopus, selecionada em razão de sua abrangência na indexação de periódicos científicos internacionais e de sua cobertura multidisciplinar. Para recuperação dos estudos foram considerados os parâmetros de busca apresentados no Quadro 1, incluindo a base de dados, o campo de busca, o período de publicação, o idioma, os tipos de documento e as áreas temáticas selecionadas.

Quadro 1 – Parâmetros utilizados na estratégia de busca bibliográfica

Parâmetro	Critério adotado
Base de dados	Scopus
Campo de busca	TITLE-ABS-KEY
Período	2022–2026
Idioma	Inglês
Tipo de documento	Article e Review
Áreas	Engineering; Materials Science; Environmental Science
Estratégia de busca	TITLE-ABS-KEY((termites OR "termite attack" OR "termite damage") AND (wood OR timber) AND (durability OR resistance OR preservative* OR protection)) AND PUBYEAR > 2021

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A aplicação da estratégia de busca resultou inicialmente em 143 documentos. Em seguida, foi realizada uma triagem dos registros mediante leitura dos títulos, resumos e palavras-chave, com o objetivo de verificar sua pertinência em relação ao problema e ao objetivo da pesquisa. Os estudos potencialmente relevantes foram posteriormente submetidos à leitura integral, etapa em que foram avaliados quanto à sua efetiva contribuição para a análise proposta.

2.3 Critérios de seleção e análise dos estudos

Foram incluídos estudos que apresentassem relação direta com a interação entre cupins xilófagos e madeira empregada em edificações, contemplando aspectos de monitoramento, detecção, resistência,

preservação ou controle desses insetos. Também foram considerados como critérios de elegibilidade o período de publicação entre 2022 e 2026, a classificação como *Article* ou *Review* e a publicação em língua inglesa. Foram excluídos estudos que, após a análise dos títulos, resumos, palavras-chave e, quando necessário, do texto completo, não apresentassem relação direta com o objetivo da pesquisa, bem como aqueles direcionados exclusivamente a aplicações agrícolas, florestais ou a contextos não relacionados à proteção de elementos de madeira utilizados na construção civil.

A aplicação dos critérios de seleção resultou em 15 estudos, sendo cinco artigos de revisão e dez estudos experimentais. O percurso metodológico, desde a busca bibliográfica inicial até a seleção dos estudos e a posterior extração e análise das informações, encontra-se sintetizado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de seleção e análise dos estudos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após a seleção, os estudos foram submetidos à leitura integral e à extração das informações relevantes, considerando, quando disponíveis, autores, ano de publicação, objetivo, espécie ou grupo de cupins investigado, material analisado, método de monitoramento, estratégia de preservação, condições experimentais e principais resultados. Os dados foram posteriormente organizados e analisados qualitativamente, buscando identificar convergências e tendências na literatura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Detecção não destrutiva e monitoramento de infestações

A natureza críptica dos cupins constitui o principal condicionante tecnológico do monitoramento em edificações. Esses insetos evitam a exposição à luz e podem manter a superfície da madeira aparentemente íntegra enquanto consomem seu interior, estabelecendo túneis e galerias protegidos e controlando localmente a umidade e o microclima. Consequentemente, os sinais externos podem surgir apenas quando a deterioração já se encontra avançada, o que reduz a confiabilidade da inspeção exclusivamente visual e justifica a adoção de técnicas de avaliação não destrutiva (*Non-Destructive Evaluation*, NDE) capazes de identificar manifestações indiretas da atividade biológica (Ahmed *et al.*, 2026; Fang *et al.*, 2023; Hassan & Nanda, 2024; Hermawan *et al.*, 2024). Em determinados cenários, a acurácia atribuída à inspeção convencional situa-se entre 40% e 72%, além de depender da experiência do inspetor e da acessibilidade do elemento avaliado (Bahrami *et al.*, 2025; Hassan & Nanda, 2024).

Entre as técnicas analisadas, o monitoramento por emissão acústica (*Acoustic Emission*, AE) apresenta elevado potencial para identificar ondas elásticas produzidas pelas microfraturas decorrentes da alimentação e pelos sinais vibratórios de alarme associados ao comportamento de "head-banging" dos soldados. A acurácia relatada para detecção *in situ* varia de 92,67% a 97%, e a incorporação de técnicas de aprendizado de máquina amplia a capacidade de interpretação dos sinais: modelos baseados em Redes Neurais Artificiais (ANN) mostraram desempenho superior às Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) na estimativa do tamanho da população infestante (Hassan & Nanda, 2024; Nasir *et al.*, 2022). A elevada sensibilidade, entretanto, deve ser interpretada em conjunto com limitações operacionais, pois ruídos ambientais podem gerar interferências e falsos alarmes, enquanto equipamentos de maior desempenho demandam investimento e capacitação técnica para interpretação dos dados (Fang *et al.*, 2023; Hassan & Nanda, 2024; Nasir *et al.*, 2022).

Os sistemas sem fio baseados em indução eletromagnética, integrados a estações de isca, representam uma alternativa voltada ao monitoramento contínuo. Fang *et al.* (2023) relataram taxas de acerto entre 97,5% e 98,5% durante 24 meses de testes de campo, com mais de 97% dos dispositivos permanecendo funcionais ao final do período. A possibilidade de selagem da parte eletrônica, o monitoramento remoto e a dispensa da abertura manual recorrente das estações reduzem o tempo de inspeção e a demanda de mão de obra, favorecendo aplicações em redes permanentes destinadas a cupins subterrâneos, como *Coptotermes* e *Reticulitermes*.

As evidências também indicam que não existe uma única tecnologia adequada a todos os contextos. Microtomografia de raios X e tomografia computadorizada possibilitam visualizar tridimensionalmente galerias internas, enquanto resistógrafos e micro-martelos permitem inferir cavidades e perda de densidade pela resistência mecânica à perfuração, sendo particularmente úteis na avaliação de postes e outras estruturas de madeira em serviço (Bahrami *et al.*, 2025; Hassan & Nanda, 2024). Cães farejadores, por sua vez, apresentam acurácia entre 89% e 100% na localização de colônias ativas por meio de sinais olfativos associados a gases metabólicos, como CO_2 e CH_4, mostrando utilidade em locais de difícil acesso. Assim, inspeções acústicas e olfativas são particularmente úteis para diagnósticos pontuais em estruturas suspeitas, enquanto sistemas fixos de indução eletromagnética apresentam vantagens para vigilância contínua e manejo de longo prazo.

3.2 Preservação sustentável: biopreservativos e estratégias de menor impacto

No campo da preservação da madeira, os estudos apontam uma mudança de enfoque: em vez da dependência exclusiva de biocidas sintéticos persistentes e compostos metálicos, investigam-se substâncias de origem renovável, sistemas de liberação controlada e tratamentos capazes de reduzir a palatabilidade ou modificar fisicamente o substrato. Essa transição responde aos passivos associados a preservantes tradicionais, como arseniato de cobre cromatado (CCA), pentaclorofenol (PCP) e creosoto, cuja eficácia é acompanhada por riscos de contaminação de solos e águas subterrâneas, exposição ocupacional e dificuldades de destinação ao final da vida útil (Ahmed *et al.*, 2026; Trabelsi & Mhamdi, 2024).

Segundo estudos de Ahmed *et al.* (2026), a nanoencapsulação de óleos essenciais em nanopartículas de quitosana (CSNPs) destaca-se por enfrentar uma limitação recorrente dos biopreservativos: a volatilidade e a baixa permanência dos compostos ativos na madeira. Formulações contendo óleos de orégano, tomilho e capim-limão apresentaram aumento da estabilidade térmica de 126 °C para até 252 °C, associado à liberação controlada e prolongada dos ativos. A quitosana, obtida pela desacetilação da quitina presente em resíduos do processamento de crustáceos, agrega ainda uma dimensão de bioeconomia circular, pois converte um resíduo de baixo valor em nanocarreador funcional, biodegradável e de baixa toxicidade para mamíferos. Sua natureza catiônica favorece a interação com superfícies lignocelulósicas e pode reduzir perdas por lavagem em até 50%, além de proteger os compostos encapsulados contra luz UV, oxigênio e variações térmicas.

O vinagre de madeira, ou ácido pirolenhoso, constitui outra alternativa derivada do aproveitamento de subprodutos da pirólise de biomassa. Em *Coptotermes curvignathus*, concentrações de 10% ocasionaram mortalidade total em condições experimentais, efeito relacionado à presença de fenóis, ácido acético e outros constituintes identificados por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS), como seringaldeído, acetovanilona e vanilina (Kadir *et al.*, 2022). Sua composição complexa confere ação tóxica e repelente, o que explica o interesse pelo produto como alternativa a pesticidas sintéticos (Kadir *et al.*, 2022; Trabelsi & Mhamdi, 2024). De modo complementar, extratos de *Melia azedarach* apresentaram atividade antialimentar e repelência superior a 30% contra *Coptotermes sp.*, reforçando o potencial de metabólitos vegetais no manejo de cupins (Prayogo *et al.*, 2022). Enquanto Prayogo *et al.* (2022) evidenciam a repelência de extratos vegetais em baixas doses, Kadir *et al.* (2022) e Lee *et al.* (2023) indicam que compostos de ação mais lenta podem ser relevantes no manejo de colônias subterrâneas por favorecerem a transferência do ativo entre indivíduos via trofalaxia.

3.3 Resistência natural e modificações físico-químicas da madeira

A resistência ao ataque de cupins não depende apenas da aplicação de agentes externos. As propriedades intrínsecas da madeira também influenciam a suscetibilidade, especialmente o teor de cinzas, a presença de sílica e a composição dos extrativos. Em *Corymbia citriodora*, a resistência natural foi associada ao teor de cinzas e a extrativos fenólicos; a sílica atua como componente abrasivo, promovendo desgaste das mandíbulas e reduzindo a eficiência alimentar dos cupins (Medeiros Neto *et al.*, 2022). Relações semelhantes foram observadas em espécies tropicais, incluindo *Licania alba*, nas quais o conteúdo mineral contribui para menor digestibilidade

(Leroy *et al.*, 2023). Na teca (*Tectona grandis*), a tectoquinona é apontada como importante composto repelente do cerne, enquanto, em eucaliptos, diferenças na mortalidade dos cupins se relacionam à composição de fenóis e antioxidantes, com variações entre *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus grandis* (Martha *et al.*, 2024; Medeiros Neto *et al.*, 2022).

As modificações artificiais procuram reproduzir ou intensificar barreiras que, na madeira naturalmente resistente, decorrem da composição química ou da estrutura do material. A furfurilação e o tratamento com glicerol-anidrido maleico (GMA) associado ao aquecimento a 220 ºC elevaram madeira de teca de crescimento rápido às classes máximas de durabilidade, com valores entre 9 e 10. O mecanismo proposto difere da toxicidade direta: a polimerização do GMA nos componentes da madeira, especialmente na parede celular e no lúmen, cria uma matriz pouco digerível, restringindo o acesso à celulose e levando os insetos à inanição (Martha *et al.*, 2024). De forma análoga, a impregnação com poliestireno aumenta a densidade e preenche os lúmens celulares, estabelecendo uma barreira física; madeiras laminadas coladas (glulams) tratadas apresentaram perda de massa inferior a 0,5% em exposição a *Macrotermes sp.*, com resultados próximos de 0% em testes de campo (Hermawan *et al.*, 2024).

O desempenho dos tratamentos térmicos, contudo, depende da presença de agentes complementares. O aquecimento isolado pode melhorar a estabilidade dimensional e a resistência a fungos, mas não assegura proteção consistente contra cupins. Temperaturas elevadas degradam hemiceluloses e extrativos, podendo remover compostos naturalmente repelentes ou facilitar o acesso à fração celulósica; em tratamentos intensos, como a 220 °C, foram observados aumentos da perda de massa por ataque de cupins em comparação com condições menos severas (Martha *et al.*, 2024; Priadi, Putra & Cahyono, 2023). Em madeira de Samama, o tratamento a 160 °C apresentou redução inconsistente do ataque de cupins de madeira seca e ausência de efeito significativo contra cupins subterrâneos (Priadi, Putra & Cahyono, 2023). Esses achados explicam por que o calor, quando empregado isoladamente, não deve ser interpretado como mecanismo universal de resistência.

A associação entre boro, ácido cítrico e calor exemplifica a importância da sinergia entre toxicidade e fixação. Embora o boro apresente atividade contra cupins, sua elevada mobilidade favorece a lixiviação. A impregnação com compostos de boro e ácido cítrico seguida de aquecimento a 160 °C melhora a retenção do agente na madeira e aumenta a resistência contra cupins de madeira seca, incluindo *Cryptotermes brevis*, e fungos apodrecedores (Priadi, Putra & Cahyono, 2023). Nesse sistema, a proteção resulta tanto da toxicidade do boro quanto da maior permanência do composto e do efeito antialimentar da matriz tratada. Portanto, a comparação entre GMA e boro evidencia dois caminhos distintos de preservação: no primeiro, predomina a formação de uma estrutura polimérica não digerível; no segundo, a eficácia decorre da estabilização de um agente tóxico na madeira (Martha *et al.*, 2024; Priadi, Putra & Cahyono, 2023).

3.4 Síntese comparativa das tecnologias de monitoramento e controle

A síntese dos 15 estudos evidencia que as estratégias analisadas atuam em etapas complementares do manejo: as tecnologias de avaliação não destrutiva favorecem a detecção precoce, enquanto os métodos de preservação, modificação da madeira e seleção de materiais resistentes reduzem a suscetibilidade ao ataque. Os

principais resultados quantitativos são apresentados no Quadro 2, ressalvando-se que as métricas empregadas nos estudos não são diretamente equivalentes.

Quadro 2 - Síntese das tecnologias de monitoramento, preservação e modificação da madeira.

Categoria	Tecnologia/ estratégia	Alvo ou aplicação	Mecanismo/ objetivo principal	Principal resultado ou evidência	Referência
Monitoramento	Emissão acústica (AE) e processamento de sinais	Cupins subterrâneos e de madeira seca	Detecção de sinais acústicos associados à alimentação e à atividade dos insetos	83,75 - 97,17% de detecção (dependendo das condições e do sistema empregado)	Hassan & Nanda (2024); Nasir *et al.* (2022)
Monitoramento	Indução eletromagnética sem fio + identificação por radiofrequência (RFID)	Cupins subterrâneos em estações de isca	Detecção automática do consumo da isca e transmissão remota do sinal	97,5 - 98,5% de detecção correta; sistema avaliado durante dois anos	Fang *et al.* (2023)
Monitoramento	Micro-ondas/radar (Termatrac™)	Infestações ocultas em madeira e elementos construtivos	Detecção do movimento dos insetos no interior do material	Cerca de 90% de avaliações corretas em estações de agregação; desempenho dependente do operador e das condições do material	Hassan & Nanda (2024)
Monitoramento	Resistografia e micro-martelos	Postes e elementos estruturais em serviço	Identificação indireta de cavidades, perda de densidade e alterações da integridade mecânica	Permite avaliação não destrutiva de danos internos não visíveis	Bahrami *et al.* (2025)
Monitoramento	Cães farejadores	Infestações ocultas	Detecção olfativa de sinais associados à presença de cupins	89 - 100% de acurácia em estudos compilados; ocorrência de falsos positivos	Hassan & Nanda (2024)
Preservação	Nanopartículas de quitosana + óleos essenciais	Proteção da madeira contra biodeterioração	Encapsulamento, retenção e liberação controlada de compostos bioativos	Potencial para reduzir lixiviação e aumentar estabilidade; evidências ainda predominantemente laboratoriais	Ahmed *et al.* (2026)
Preservação	Vinagre de madeira/ácido pirolenhoso	*Coptotermes curvignathus* e outros cupins	Ação tóxica, repelente e antialimentar de compostos derivados da pirólise	Atividade dependente da concentração, biomassa e temperatura de pirólise; 10% aparece como concentração de referência em diferentes estudos	Kadir *et al.* (2022); Trabelsi & Mhamdi (2024)
Preservação	Extratos de *Melia azedarach*	*Coptotermes curvignathus*	Toxicidade e efeito antialimentar/repelente de metabólitos vegetais	Frações de diferentes partes da planta apresentaram atividade antitérmica	Prayogo *et al.* (2022)
Modificação	Furfurilação, tratamento térmico e GMA + 220 °C	Teca de curta rotação; cupins subterrâneos	Modificação química e térmica do substrato e redução da	FA e GMA220 apresentaram melhor desempenho em campo; aumento da classe de	Martha *et al.* (2024)

			palatabilidade	durabilidade até classe 10; efeito caracterizado como não biocida	
Modificação/ preservação	Boro + ácido cítrico + tratamento térmico	*Anthocephalus macrophyllus*	Impregnação e modificação térmica para aumentar a durabilidade	Ácido bórico reduziu a perda de massa por cupins subterrâneos; combinação com CA e 160 °C foi mais efetiva contra cupins de madeira seca, mas apresentou limitações em campo	Priadi, Putra & Cahyono (2023)
Modificação	Impregnação com poliestireno em glulam	*Coptotermes curvignathus*	Preenchimento de vazios, aumento da densidade e modificação do substrato	Em laboratório, glulams apresentaram maior resistência que madeira sólida; ganho adicional do poliestireno sobre o glulam controle foi limitado	Hadi *et al.* (2022)
Modificação	Impregnação com poliestireno em glulam	*Macrotermes sp.* e *Schedorhinotermes sp.*	Polimerização do estireno no interior dos elementos de madeira	Perda de massa de 23,05%, contra 27,55% no glulam controle e 31,00% na madeira sólida; diferença entre os dois glulams não significativa	Hermawan *et al.* (2024)
Material/ produto	Painéis de partículas e painéis estruturais de partículas	*Reticulitermes speratus*	Utilização das características físico-químicas e do processamento do painel como barreira à alimentação	Perda de massa de 1,57% no painel de partículas (PB) e de 1,36% no painel de partículas estrutural (SPB), em comparação com 65,2% na madeira de pinus e 11,9% no painel de partículas orientadas (OSB).	Lee *et al.* (2023)
Resistência natural	Seleção de espécies conforme composição química e mineral	Eucaliptos e espécies tropicais estruturais	Aproveitamento de extrativos, cinzas, sílica e outros constituintes naturalmente associados à durabilidade	Espécies apresentaram diferentes níveis de perda de massa e mortalidade de cupins, indicando influência significativa das características intrínsecas da madeira	Medeiros Neto *et al.* (2022); Leroy *et al.* (2023)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base nos dados compilados.

Os resultados demonstram diferenças importantes entre as estratégias. No monitoramento, os sistemas eletromagnéticos e acústicos apresentaram os maiores valores quantitativos de desempenho, enquanto resistografia e micro-martelos ampliam a avaliação de danos internos em elementos estruturais. Entre as estratégias de proteção, os tratamentos de modificação da madeira e os painéis de partículas apresentaram resultados expressivos de resistência, destacando-se as perdas de massa inferiores a 2% observadas para PB e SPB, em contraste com 65,2% para o pinus no mesmo estudo.

Quanto aos preservativos e modificações químicas, os resultados indicam que a eficácia está associada não apenas à toxicidade, mas também à retenção do agente e à alteração das características do substrato. A furfurilação e o GMA produziram classes de durabilidade elevadas, enquanto os tratamentos com boro

apresentaram desempenho dependente da combinação empregada e das condições de exposição. Os estudos com poliestireno, por sua vez, mostraram tendência de redução da perda de massa, mas sem evidência de superioridade consistente em relação ao glulam não impregnado.

A comparação também evidencia que não existe uma estratégia única capaz de atender às diferentes etapas do manejo. O monitoramento permite localizar ou confirmar a atividade antes que os danos sejam evidentes, enquanto a escolha de espécies resistentes, o emprego de produtos de madeira engenheirada e a aplicação localizada de tratamentos podem reduzir a suscetibilidade do material. Assim, os resultados convergem para uma abordagem integrada, na qual a detecção orienta a intervenção e reduz a necessidade de tratamentos generalizados.

3.5 Limitações de aplicação em campo e perspectivas de integração

Apesar dos resultados promissores, a extrapolação direta de ensaios laboratoriais para edificações e estruturas expostas requer cautela. Óleos essenciais, vinagre de madeira e combinações de boro e ácido cítrico apresentam elevada eficácia em condições controladas; biopreservativos podem reduzir a perda de massa associada à biodeterioração em até 70% e inibir significativamente a alimentação de cupins (Ahmed *et al.*, 2026; Priadi, Putra & Cahyono, 2023; Trabelsi & Mhamdi, 2024). Entretanto, a exposição à precipitação, à umidade cíclica e ao contato com o solo acelera a lixiviação, a volatilização e a biodegradação dos agentes protetores, reduzindo a persistência do tratamento em campo (Ahmed *et al.*, 2026; Bahrami *et al.*, 2025).

Em regiões tropicais, esse problema é particularmente relevante. Óleos essenciais não encapsulados podem perder entre 70% e 80% dos constituintes ativos em poucos dias de imersão ou exposição à umidade cíclica, enquanto o boro, apesar da elevada atividade biológica, apresenta fraca fixação na madeira e pode ser facilmente lixiviado em condições externas (Ahmed *et al.*, 2026; Bahrami *et al.*, 2025; Priadi, Putra & Cahyono, 2023). Ao mesmo tempo, o microclima úmido favorece a atividade metabólica de fungos e cupins, aumentando a pressão biológica justamente quando o preservativo está sendo progressivamente removido (Martha *et al.*, 2024; Priadi, Putra & Cahyono, 2023).

Nesse cenário, as formulações nanoestruturadas de quitosana apresentam uma resposta tecnicamente coerente às limitações de retenção e estabilidade. Além da redução da perda por lavagem em até 50%, a encapsulação protege os compostos bioativos contra fatores abióticos e permite modular sua liberação conforme as condições ambientais, aumentando a estabilidade térmica de 126 °C para até 252 °C (Ahmed *et al.*, 2026). Tais resultados não eliminam a necessidade de validação prolongada em campo, mas indicam que a eficiência futura dos biopreservativos dependerá menos da toxicidade imediata e mais da capacidade de retenção, liberação controlada e manutenção da atividade ao longo do tempo.

A síntese dos estudos também evidencia que o manejo sustentável tende a ser mais eficaz quando detecção e intervenção são tratadas como etapas complementares. A identificação precoce por sensores acústicos, térmicos ou eletromagnéticos permite direcionar tratamentos localizados, reduzindo o consumo de preservativos e evitando intervenções generalizadas. Nesse sentido, os resultados de monitoramento apresentados por Nasir *et al.* (2022), Fang *et al.* (2023) e Hassan & Nanda (2024) convergem com as estratégias

de preservação de Ahmed *et al.* (2026), Kadir *et al.* (2022), Priadi, Putra & Cahyono (2023) e Martha *et al.* (2024): a sustentabilidade do controle não decorre de uma tecnologia isolada, mas da combinação entre diagnóstico precoce, seleção de materiais ou tratamentos resistentes e aplicação racional de agentes de menor impacto. Essa integração constitui a principal tendência identificada na literatura de 2022 a 2026 para ampliar a durabilidade de elementos de madeira e reduzir os impactos ambientais associados ao controle de cupins xilófagos em edificações.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo alcançou o objetivo proposto de analisar os avanços científicos publicados entre 2022 e 2026 sobre estratégias sustentáveis de monitoramento e controle de cupins xilófagos em edificações. A síntese qualitativa dos 15 estudos selecionados que englobaram cinco revisões e dez estudos experimentais evidenciou que os progressos mais consistentes decorrem da aproximação entre o conhecimento entomológico sobre biologia, etologia e ecologia química dos cupins e o desenvolvimento de tecnologias de detecção não destrutiva e de métodos de preservação da madeira de menor impacto ambiental.

Do ponto de vista entomológico, a pesquisa reforça que a natureza críptica dos cupins e seu comportamento social permanecem o principal condicionante das estratégias de manejo. As emissões acústicas associadas à alimentação e ao comportamento de alarme dos soldados, o deslocamento dos insetos no interior da madeira, hoje detectável por sensores de micro-ondas e radar, e as alterações térmicas, o aumento de umidade e a liberação de gases metabólicos decorrentes da atividade das colônias constituem manifestações diretas da fisiologia e da etologia desses insetos, exploradas por sensores de emissão acústica, indução eletromagnética, radar e detecção olfativa. Dessa forma, o avanço tecnológico do monitoramento não decorre apenas da engenharia dos dispositivos, mas, sobretudo, do aprofundamento do conhecimento sobre a biologia e o comportamento das espécies-alvo, sobretudo dos gêneros *Coptotermes*, *Reticulitermes* e *Cryptotermes*.

De modo semelhante, as estratégias de preservação e modificação da madeira revisadas, incluindo a nanoencapsulação de óleos essenciais, o vinagre de madeira, os extratos vegetais, as formulações à base de boro, os tratamentos térmicos e os produtos de madeira engenheirada, como painéis de partículas e glulams, apresentam eficácia condicionada a mecanismos de ecologia química e de comportamento alimentar dos cupins, como a repelência, a ação antialimentar, a transferência de compostos entre indivíduos por trofalaxia e o desgaste mandibular provocado por componentes abrasivos do substrato. A resistência natural de determinadas madeiras, por sua vez, relaciona-se diretamente à interação entre a composição química e física do substrato e a fisiologia digestiva desses insetos, o que reforça a centralidade da entomologia na compreensão dos mecanismos de biodeterioração e de proteção da madeira.

A síntese comparativa dos resultados confirma que nenhuma tecnologia isolada é suficiente para todas as etapas do manejo: os sistemas de monitoramento orientam a detecção precoce e o direcionamento de intervenções localizadas, enquanto os métodos de preservação e as soluções de engenharia de materiais reduzem a suscetibilidade do substrato ao ataque. Nesse sentido, a interface entre entomologia e construção civil se consolida como campo de aplicação prática desse conhecimento biológico: quanto mais aprofundada a

compreensão da biologia, do comportamento e da ecologia química dos cupins, maior a precisão das tecnologias de detecção e maior a eficácia dos métodos de preservação empregados em edificações. A durabilidade das estruturas de madeira, portanto, não deve ser tratada como um problema exclusivamente construtivo, mas como resultado direto do manejo racional das espécies-praga, fundamentado no conhecimento entomológico.

Como principal limitação, destaca-se a dificuldade de extrapolar resultados laboratoriais para condições reais de exposição. Estudos futuros devem priorizar ensaios de campo de longo prazo, integrando monitoramento biológico e avaliação da persistência dos biopreservativos.

Conflitos de interesses

O autor declara não haver conflitos de interesse relacionados à realização, análise ou publicação deste estudo e manifesta ciência e concordância com a submissão do artigo.

Contribuições dos autores

O autor foi responsável por todas as etapas do estudo, incluindo a concepção e delineamento da pesquisa, levantamento e seleção da literatura, análise e interpretação dos dados, elaboração da matriz de extração, redação e revisão crítica do manuscrito, bem como pela aprovação da versão final para submissão.

REFERÊNCIAS

Ahmed, N., Boyd-Shields, G. D., Stokes, C. E., & Hassan, E. B. (2026). Nano-Chitosan Formulations and Essential Oil Encapsulation for Sustainable Wood Protection: A Comprehensive Review. *Applied Sciences,* 16(5), 2207. https://doi.org/10.3390/app16052207

Bahrami, N., Rajput, H., Changotra, R., Murray, G., & He, Q. (2025). Review of non-destructive testing for quality evaluation of in-service timber utility poles. *Structures,* 79, 109484. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109484

Fang, Z., Li, H., Ma, Y., Zhang, M., Gao, S., Chen, B., Shen, J., & Zhang, D. (2023). A wireless system for monitoring termite activity using electromagnetic induction with non-looping method. *Applied Sciences,* 13(21), 11956. https://doi.org/10.3390/app132111956

Gil, A. C. (2019). *Métodos e técnicas de pesquisa social.* (7ª ed.). São Paulo: Atlas.

Hadi, Y. S., Hermawan, D., Abdillah, I. B., Mubarok, M., Arsyad, W. O. M., & Pari, R. (2022). Polystyrene-impregnated glulam resistance to subterranean termite attacks in a laboratory test. *Polymers,* 14(19), 4003. https://doi.org/10.3390/polym14194003

Hassan, B., & Nanda, M. A. (2024). Detection and monitoring techniques of termites in buildings: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation,* 195, 105890. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2024.105890

Hermawan, D., Mubarok, M., Abdillah, I. B., Hadi, Y. S., Yosi, C., Chotikhun, A., Pari, R., & Pari, G. (2024). Resistance of polystyrene-impregnated glued laminated lumbers after exposure to subterranean termites in a field. *Journal of the Korean Wood Science and Technology,* 52(1), 70–86. https://doi.org/10.5658/WOOD.2024.52.1.70

Kadir, R., Mohd Ali, M. S., Kartal, S. N., Elham, P., Mohd Ali, N. A., & Awang, A. F. (2022). Chemical characterization of pyrolysis liquids from *Dyera costulata* and evaluation of their bio-efficiency against

subterranean termites, *Coptotermes curvignathus*. *European Journal of Wood and Wood Products,* 80(1), 45–56. https://doi.org/10.1007/s00107-021-01732-z

Lee, M., Kang, E.-C., Lee, S.-M., & Yoon, S.-M. (2023). Mechanical properties of structural particleboard and termite and decay resistance. *BioResources,* 18(3), 6169–6182. https://doi.org/10.15376/biores.18.3.6169-6182

Leroy, M., Candelier, K., Damay, J., Bossu, J., Lehnebach, R., Thévenon, M.-F., Beauchêne, J., & Clair, B. (2023). Natural durability of 8 tropical species suitable for structural roundwood: Laboratory screening tests for resistance to fungi and termites. *Bois et Forêts des Tropiques,* 358, 15–29. https://doi.org/10.19182/bft2023.358.a37217

Martha, R., Candelier, K., Thévenon, M.-F., George, B., Rahayu, I. S., Darmawan, W., & Gérardin, P. (2024). Non biocide treatments for the protection of short rotation teak wood against subterranean termites. *Construction and Building Materials,* 450, 138638. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138638

Medeiros Neto, P. N., Paes, J. B., Gonçalves, F. G., López, Y. M., Baraúna, E. E. P., & Ribeiro, L. S. (2022). Relation of physicochemical characteristics on biological resistance of eucalypts woods to xylophagous termites. *Journal of Building Engineering,* 52, 104462. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104462

Nasir, V., Ayanleye, S., Kazemirad, S., Sassani, F., & Adamopoulos, S. (2022). Acoustic emission monitoring of wood materials and timber structures: A critical review. *Construction and Building Materials,* 350, 128877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128877

Prayogo, Y. H., Putra, R. I., Hadiyanto, I. F., Nihayah, E., Syafii, W., Sari, R. K., & Batubara, I. (2022). Anti-termite activity of *Melia azedarach* extracts. *Jurnal Sylva Lestari,* 10(1), 1–11. https://doi.org/10.23960/jsl.v10i1.549

Priadi, T., Putra, G. S., & Cahyono, T. D. (2023). Reliability of the impregnated boron compounds, citric acid- and heat-treated Samama (*Anthocephalus macrophyllus*) wood against the fungal and termite attacks. *Journal of the Korean Wood Science and Technology,* 51(1), 49–57. https://doi.org/10.5658/WOOD.2023.51.1.49

Trabelsi, N., & Mhamdi, R. (2024). Wood vinegar's role in termite control: From mystery to reality. *European Journal of Wood and Wood Products,* 82(5), 1263–1272. https://doi.org/10.1007/s00107-024-02093-z