

# Uma revisão de escopo sobre a estimativa do intervalo pós-morte: desafios metodológicos, validação e o futuro da prática baseada em evidências (2020-2025)

M. Calmon<sup>a,b,c\*</sup>, T.E.S Tomé<sup>a,c</sup>, A.S. Costa<sup>d</sup>, A.R. Deitos<sup>d</sup>, M.A. Guimarães<sup>c</sup>, C.E.P.  
Machado<sup>d</sup>, A.O Silva<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Centro Nacional de Difusão de Ciências Forenses, Instituto Nacional de Criminalística, Polícia Federal, Brasília (DF), Brasil

<sup>b</sup> Centro Universitário de Brasília (CEUB), Brasília (DF), Brasil

<sup>c</sup> Departamento de Patologia e Medicina Legal, Faculdade de Medicina de Ribeirão-Preto, USP, Ribeirão-Preto (SP), Brasil

<sup>d</sup> Instituto Nacional de Criminalística, Polícia Federal, Brasília (DF), Brasil

\*Endereço de e-mail para correspondência: [mel.calmon@gmail.com](mailto:mel.calmon@gmail.com). Tel.: +55-27-99989-8048

Recebido em 20/01/2026; Revisado em 06/04/2026; Aceito em 06/04/2026

## Resumo

A estimativa do Intervalo Pós-Morte (IPM) é fundamental para a ciência forense, mas metodologicamente desafiadora. O IPM precoce (primeiras 72 horas) baseia-se em sinais tanatológicos tradicionais, enquanto o IPM tardio emprega técnicas diversas e conflitantes. Modelos baseados em decomposição, particularmente o Total Body Score/Accumulated Degree-Day (TBS/ADD), dominaram a antropologia forense, mas enfrentam questionamentos quanto à validade universal e robustez estatística, impulsionando mudanças para modelos regionalmente adaptados e abordagens bioquímicas/moleculares. Esta revisão de escopo mapeia a literatura de 2020-2025, fornecendo visão abrangente dos métodos atuais de estimativa do IPM. Examina validação e crítica da pontuação de decomposição macromorfoscópica, contextualizando técnicas emergentes. Seguindo diretrizes PRISMA-ScR, bases de dados (PubMed, Scopus, Web of Science) foram pesquisadas sistematicamente para publicações de janeiro/2020 a dezembro/2025. A busca incluiu estudos do IPM, pontuação de decomposição, validações e metodologias inovadoras. Dados foram mapeados para identificar abordagens metodológicas, aplicabilidade, limitações e achados sobre precisão e confiabilidade. Os resultados confirmam mudança paradigmática. A literatura demonstra evidências contundentes contra a aplicabilidade universal do modelo TBS-ADD, com estudos mostrando falhas em diversas zonas biogeográficas. Concomitantemente, métodos alternativos emergem: sucessão do tanatomicrobioma, perfis proteômicos/metabolômicos, análise de degradação de RNA e imagens avançadas. O consenso indica que nenhum método único é universalmente confiável, com ausência de taxas de erro quantificadas representando barreira fundamental. Modelos generalizados não são sustentáveis. O futuro requer abordagens integrativas multimétodo combinando observações macromorfoscópicas regionalmente validadas com análise quantitativa de biomarcadores, exigindo protocolos padronizados, infraestrutura colaborativa de dados e taxas de erro estabelecidas conforme padrões forenses modernos.

*Palavras-Chave:* Intervalo pós-morte; Tafonomia; Decomposição; Antropologia Forense; IPM Tardio.

## Abstract

Postmortem interval (PMI) estimation is fundamental to forensic science but methodologically challenging. Early PMI (first 72 hours) relies on traditional thanatological signs, while late PMI employs diverse, often conflicting techniques. Decomposition-based models, particularly the Total Body Score/Accumulated Degree-Day (TBS/ADD) method, have dominated forensic anthropology but face scrutiny regarding universal validity and statistical robustness, prompting shifts toward regionally-adapted models and biochemical/molecular approaches. This scoping review maps scientific literature from 2020-2025, providing a comprehensive overview of current PMI estimation methods. It examines validation and critique of macromorphoscopic decomposition scoring while contextualizing emerging techniques informed by recent systematic reviews. Following PRISMA-ScR guidelines, databases (PubMed, Scopus, Web of Science) were systematically searched for January 2020-December 2025 publications. The search targeted PMI estimation studies, including decomposition scoring, validation studies, and novel methodologies. Data were charted to identify

methodological approaches, applicability, limitations, and findings regarding accuracy and reliability. Results confirm a paradigm shift. Literature from 2020-2025 demonstrates overwhelming evidence against universal applicability of the TBS-ADD model, with validation studies consistently showing failure across diverse biogeoclimatic zones. Fundamental statistical flaws in error calculation challenge two decades of research. Concurrently, alternative methods are emerging: thanatomicrobiome succession, proteomic/metabolomic profiling, RNA degradation analysis, and advanced imaging. Critical consensus indicates no single method is universally reliable, with absent quantified error rates representing a fundamental barrier. Generalized decomposition models are no longer tenable. The discipline's future requires multi-method, integrative approaches combining regionally-validated macromorphoscopic observations with quantitative biomarker analysis, demanding standardized protocols, collaborative data infrastructure, and established error rates meeting modern forensic standards.

*Keywords:* Template; Postmortem interval; Taphonomy; Decomposition; Forensic Anthropology; Late PMI

## 1. INTRODUÇÃO

A estimativa do intervalo pós-morte (IPM) (também descrito na literatura como *pós-morte*, *post-mortem* ou *postmortem*), o tempo decorrido desde a morte, representa um dos desafios mais significativos e persistentes nas ciências forenses. Um IPM confiável fornece uma âncora temporal crítica para investigações, auxiliando na identificação de cadáveres desconhecidos, corroborando ou refutando álibis e reconstruindo a sequência de eventos *peri-mortem*. As metodologias para estimativa do IPM são amplamente bifurcadas com base no estágio de decomposição, correspondendo a um IPM precoce (tipicamente os primeiros 2-3 dias) e um IPM tardio (a partir do início da putrefação) [1, 2].

Embora o IPM precoce possa ser estimado com razoável grau de precisão através da avaliação de fenômenos tanatológicos clássicos (algor mortis (resfriamento corporal), livor mortis (livores cadavéricos) e rigor mortis (rigidez muscular)), esses sinais tornam-se não confiáveis à medida que a decomposição progride, com sua precisão declinando marcadamente além de 48-72 horas [2, 3]. Consequentemente, a estimativa do IPM tardio requer um arsenal analítico diferente e muito mais complexo. Isso inclui técnicas estabelecidas como a entomologia forense e uma crescente gama de métodos modernos e emergentes abrangendo degradação de RNA, biomarcadores moleculares e quantitativos, tecnologias ômicas (genômica, proteômica) e imagens avançadas [1-3].

Dentro da antropologia forense, a abordagem primária para estimativa do IPM tardio tem sido a avaliação quantitativa de alterações macromorfoscópicas associadas à decomposição. O trabalho seminal de Megyesi, Nawrocki e Haskell em 2005, que introduziu o modelo *Total Body Score/Accumulated Degree-Day (TBS/ADD)*, foi um esforço pioneiro para padronizar essas observações [4]. Este método, e seus refinamentos subsequentes [5], forneceu uma estrutura quantitativa amplamente adotada. Contudo, o desenvolvimento do modelo a partir de um conjunto de dados geograficamente e climaticamente limitado levou a questionamentos persistentes sobre sua

validade externa, uma preocupação destacada em numerosas revisões sistemáticas recentes [1, 6].

Essa incerteza fundamental impulsionou duas linhas paralelas de investigação que definem a era atual da pesquisa em IPM. A primeira é um esforço rigoroso e global para validar, criticar e adaptar regionalmente modelos baseados em decomposição, exemplificado pelo trabalho de Ribéreau-Gayon et al. (2023) no desenvolvimento de um sistema de pontuação específico para Quebec, Canadá [7]. A segunda é uma exploração mais ampla de metodologias alternativas e complementares que podem superar as limitações inerentes da pontuação visual. Como revisões abrangentes recentes enfatizaram, o objetivo final não é encontrar uma técnica única e universalmente aplicável, mas sim desenvolver uma abordagem integrada e multimétodo adaptada às circunstâncias específicas de cada caso [1-3].

Esta revisão de escopo mapeia o panorama da literatura científica publicada entre 2020 e 2025 para sintetizar o estado atual das evidências. Ela aborda especificamente a validação contínua de métodos baseados em decomposição, situando-os no contexto mais amplo das diversas técnicas atualmente investigadas para estimativa do IPM tardio. Ao mapear os desafios do campo, desde a validade estatística até a especificidade biogeoclimática, e suas direções futuras, esta revisão visa fornecer uma visão abrangente tanto para pesquisadores quanto para profissionais.

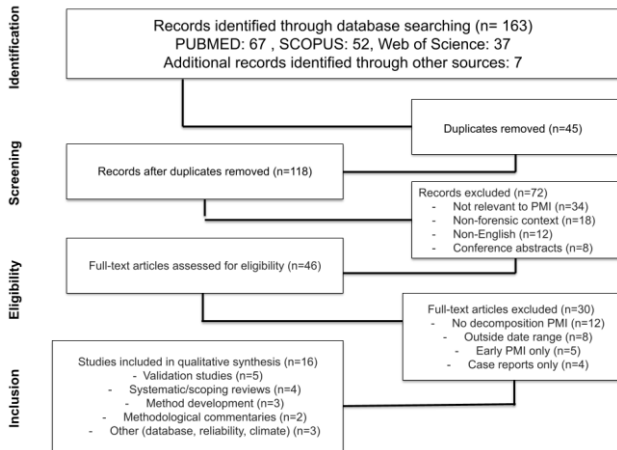
## 2. METODOLOGIA

Esta revisão de escopo foi conduzida em conformidade com as diretrizes da extensão *Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses* para Revisões de Escopo (PRISMA-ScR) (Figura 1). O objetivo foi identificar e mapear a amplitude das evidências recentes concernentes aos métodos de estimativa do IPM, com foco particular na validação de sistemas de pontuação baseados em decomposição.

### 2.1. Perguntas de Pesquisa

A revisão foi orientada pelas seguintes questões:

- 1 Qual é o espectro atual de métodos sendo investigados para estimativa do IPM tardio?
- 2 Quais são os achados de estudos recentes de validação do modelo TBS-ADD de Megyesi et al. (2005) e de outros sistemas de pontuação de decomposição?
- 3 Quais são as principais limitações, incluindo desafios geográficos, ambientais e estatísticos, identificadas na literatura recente?
- 4 Quais são as principais direções futuras e metodologias emergentes recomendadas por pesquisadores da área?



**Figura 1.** Processo de seleção dos estudos seguindo o guia PRISMA-ScR

## 2.2. Estratégia de pesquisa

Uma busca sistemática nas bases de dados PubMed, Scopus e Web of Science foi conduzida para artigos publicados entre 1º de janeiro de 2020 e 31 de dezembro de 2025. A estratégia de busca combinou palavras-chave e termos MeSH relacionados a: (postmortem interval OR PMI OR time since death) AND (decomposition OR

taphonomy OR total body score OR accumulated degree-days OR thanatomicrobiome OR proteomics) AND (validation OR review OR methodology). As strings de busca específicas utilizadas estão detalhadas na **Tabela 1**.

## 2.3. Seleção de estudos

Os critérios de inclusão foram: (1) pesquisas originais, revisões sistemáticas, revisões de escopo ou comentários metodológicos; (2) publicados em inglês entre 1º de janeiro de 2020 e 31 de dezembro de 2025 (com estudos fundamentais de datas anteriores incluídos para contexto); e (3) abordando diretamente a estimativa do IPM tardio em contexto forense. Estudos focados exclusivamente no IPM precoce (tanatologia clássica) ou entomologia sem integração com outros métodos foram excluídos, a menos que fizessem parte de uma revisão sistemática mais ampla. Um detalhamento dos critérios de inclusão e exclusão é fornecido na **Tabela 2**.

## 2.4. Fichamento e síntese dos dados

Os dados da literatura selecionada foram extraídos e mapeados tematicamente. As informações-chave incluíram o tipo de estudo, contexto geográfico, foco metodológico e principais contribuições. Os dados mapeados foram então sintetizados para identificar temas abrangentes, lacunas de pesquisa e a visão consensual sobre as melhores práticas, que serão descritos na seção de resultados. O mapeamento da literatura selecionada está disponível na **Tabela 3**.

**Tabela 1.** Strings de busca usadas para bases de dados e o número de artigos encontrados.

Base de dados	String de busca	Resultados
Pubmed	("postmortem interval" OR "PMI" OR "time since death") AND ("decomposition" OR "taphonomy" OR "total body score" OR "accumulated degree-days") AND ("validation" OR "review" OR "forensic anthropology")	67
Scopus	TITLE-ABS-KEY(("postmortem interval" OR "PMI") AND ("decomposition" OR "total body score")) AND ("forensic" OR "validation")	52
Web of Science	TS=(postmortem interval AND decomposition AND (validation OR forensic anthropology))	37
Literatura Cinzenta	Forensic anthropology AND postmortem interval	8

**Tabela 2.** Descrição dos critérios utilizados para inclusão ou exclusão dos manuscritos.

Tipo de critério	Inclusão	Exclusão
Data da publicação	1 de Janeiro 2020 – 31 de Dezembro 2025 (com estudos base de 2005-2019 para contexto)	Estudos de validação publicados antes de 2020
Idioma	Inglês	Estudos em outros idiomas
Tipo da publicação	Artigos originais, revisões sistemáticas, revisões de escopo, meta-análises, comentários metodológicos	Resumos de conferências, editoriais, peças de opinião sem dados
Foco do estudo	Métodos de estimativa de IPM, validação de pontuação de decomposição, pesquisa tafonômica com aplicação de IPM	Estudos focados exclusivamente na causa e maneira da morte sem

		componente de IPM
Contexto do IPM	IPM tardio (pós-putrefação), métodos baseados em decomposição, validação de TBS-ADD ou métodos similares	Estudos exclusivamente sobre IPM precoce (algor, livor, rigor mortis) sem integração tardia
Tipo de amostra	Cadáveres humanos, proxies animais (porcos) com aplicação forense	Modelos não-mamíferos sem discussão para aplicação humana

Tabela 3. Características dos estudos incluídos

Referência	Tipo de estudo	Contexto geográfico	Foco metodológico	Contribuição chave
Ruiz López & Partido Navadizo 2025 [2]	Revisão compreensiva	Internacional	Métodos variados	Revisão de métodos de IPM
Megyesi et al. 2005 [4]	Desenvolvimento metodológico	EUA (vários estados)	TBS-ADD	Desenvolvimento de método-base
Moffatt et al. 2016 [5]	Refinamento metodológico	EUA/UK	TBS-ADD	Refinamento de equação de regressão
López-Lázaro et al. 2024 [6]	Meta-análise	Internacional	TBS-ADD	Avaliação de acurácia sistemática
Ribéreau-Gayon et al. 2023 [7]	Desenvolvimento metodológico	Canadá (Quebec)	Pontuação regional	Modelo específico para o clima
Smith et al. 2023 [8]	Comentário estatístico	N/A	TBS-ADD	Identificação de deficiências estatísticas
Wescott et al. 2018 [9]	Estudo de validação	EUA (3 institutos)	TBS-ADD	Validação para cadáveres humanos
Forbes et al. 2019 [10]	Estudo de validação	África do Sul	TBS-ADD	Falha em validação regional
Giles et al. 2020 [11]	Estudo de validação	EUA (Tennessee)	TBS-ADD	Efeitos sazonais
Dawson et al. 2022 [12]	Estudo comparativo	Austrália	TBS vs perda de massa	Métricas alternativas
Gunawardena et al. 2023 [13]	Estudo de validação	Sri Lanka	TBS-ADD	Falha em clima tropical
Indra et al. 2024 [14]	Estudo de validação	Suíça	TBS em porcos	Adaptação europeia
Bugelli et al. 2025 [15]	Estudo de confiabilidade	Itália	TDS	Confiabilidade interobservador
Weisensee et al. 2024 [16]	Desenvolvimento de base de dados	EUA	geoFOR	Plataforma colaborativa
Strack & Smith 2023 [17]	Modelagem preditiva	Internacional	Efeitos climáticos	Projeções futuras
Franceschetti et al. 2023 [18]	Revisão sistemática	Internacional	Métodos tardios de IPM	Revisão em PRISMA

### 3. RESULTADOS

A busca sistemática identificou um corpo de literatura rico e em rápida evolução. Os achados confirmam que se trata de um campo em transição, afastando-se da dependência de modelos singulares e generalizados em direção a uma abordagem mais nuançada, multimétodos e dependente do contexto. Os resultados estão organizados em três áreas temáticas principais.

#### 3.1. O espectro metodológico para estimativa do IPM tardio

A literatura recente, particularmente as revisões sistemáticas abrangentes conduzidas por Weisensee & Atwell (2024) e Strete et al. (2025), delinea um amplo espectro de técnicas para a estimativa do IPM tardio [1, 3]. Essas técnicas podem ser classificadas em várias categorias principais, conforme resumido na Tabela 4. Embora a observação macromorfoscópica tradicional continue sendo um pilar fundamental, observa-se uma

tendência clara e acelerada em direção à investigação de biomarcadores quantitativos em nível molecular.

#### 3.2. A “crise de validação” para métodos macromorfoscópicos

O tema mais consistente e expressivo na literatura publicada entre 2020 e 2025 é o questionamento substancial da validade do modelo TBS-ADD. A convergência de estudos de validação conduzidos em diferentes regiões geográficas, aliada a uma reavaliação estatística fundamental do método, tornou inviável a utilização acrítica da fórmula originalmente proposta por Megyesi et al (2025).

**Limitações geográficas e ambientais:** Conforme apresentado na Tabela 5, estudos de validação têm demonstrado sistematicamente que o modelo TBS-ADD e suas derivações apresentam desempenho inadequado quando aplicados fora do contexto ambiental e geográfico em que foram originalmente desenvolvidos. A Tabela 6 ilustra a distribuição geográfica desses estudos. Uma

revisão sistemática com meta-análise realizada por López-Lázaro et al. (2024) confirmou elevada heterogeneidade entre os estudos e evidenciou a limitada precisão do método em diferentes cenários [6]. Pesquisas conduzidas em clima tropical no Sri Lanka não identificaram correlação significativa entre TBS e ADD [13]. De forma semelhante, estudos realizados na África do Sul e na Suíça demonstraram que modelos desenvolvidos localmente são necessários para estimativas mais confiáveis [10, 14]. Mesmo nos Estados Unidos, investigações de grande escala realizadas em centros de pesquisa em decomposição humana concluíram que a equação TBS não é adequada para estimar o ADD médio com precisão previsível, tendo alguns autores sugerido que, em determinados ambientes, a umidade

pode exercer influência mais significativa sobre o processo de decomposição do que a temperatura [9, 11].

**Limitações estatísticas:** Somando-se às críticas de ordem ambiental e geográfica, um comentário metodológico publicado por Smith et al. em 2023 identificou um erro estatístico fundamental no estudo original de Megyesi et al. (2005) [8]. Os autores demonstraram que o modelo empregou incorretamente uma estrutura de erro aditivo, quando o correto seria a aplicação de um erro multiplicativo, o que resultou em uma subestimação substancial da incerteza associada às estimativas. Tal constatação compromete as conclusões de praticamente todos os estudos anteriores que se fundamentaram nos cálculos de erro derivados da fórmula original.

**Tabela 4.** O espectro de metodologias para estimativa de Intervalo Pós-morte Tardio

<b>Categoria</b>	<b>Técnicas específicas</b>	<b>Princípio</b>	<b>IPM aplicável</b>	<b>Limitações chave</b>	<b>Estado da implementação</b>
Macromorfooscópico	Total Body Score (TBS), Total Decomposition Score (TDS), Total Aquatic Decomposition Score (TADS)	Visual, pontuação semi-quantitativa dos estágios de decomposição	Prolongado (semanas a anos)	Alta variabilidade interobservador; sensibilidade extrema ao ambiente local; ausência de validação universal; falhas estatísticas nos modelos.	Estabelecido
Bioquímica	Potássio vítreo, degradação proteica (por exemplo, troponinas, GAPDH), análise de citrato	Cinética da degradação de moléculas específicas	Curto a médio prazo (horas a semanas)	Alta variabilidade; sensibilidade à temperatura; frequentemente requer amostragem invasiva; limitado a remanescentes não esqueletizados.	Implementação parcial
Molecular (Omics)	Sucessão do tanatomicrobioma, proteômica, metabolômica, lipidômica	Sucessão preditiva de comunidades microbianas; perfis de degradação de proteínas, metabólitos e lipídios	Prolongado (dias a anos)	Alto custo e elevada complexidade; ausência de protocolos padronizados; necessidade de grandes bases de dados de referência; influência do ambiente sobre o microbioma.	Fase de pesquisa
Molecular (Ácidos Nucléicos)	Degradação de RNA (mRNA, miRNA, circRNA), Degradação de DNA	Degradação tempo-dependente da quantidade e integridade de ácidos nucleicos	Curto a médio prazo (horas a dias para RNA; prolongado para DNA)	O RNA é altamente lábil; a degradação do DNA é altamente variável; requer análises laboratoriais sofisticadas.	Fase de pesquisa
Radiológica/ Espectroscópica	Radiocarbono ( <sup>14</sup> C), outros radioisótopos ( <sup>90</sup> Sr), XRD, Espectroscopia Raman/FT-IR	Decaimento radioativo; alterações na cristalinidade óssea e na composição química	Longo prazo (anos a décadas)	A “curva-bomba” do <sup>14</sup> C limita a aplicação a casos pós-1950; requer equipamentos especializados; a contaminação ambiental pode afetar os resultados.	Fase de pesquisa

<b>Categoria</b>	<b>Técnicas específicas</b>	<b>Princípio</b>	<b>IPM aplicável</b>	<b>Limitações chave</b>	<b>Estado da implementação</b>
Entomológica	Padrões de sucessão de insetos	Colonização previsível dos remanescentes humanos por diferentes espécies de insetos	Prolongado (semanas a meses)	Altamente dependente da geografia, da estação do ano e das populações locais de insetos; a exclusão de insetos (por exemplo, em casos de sepultamento) inviabiliza sua aplicação.	Estabelecido

**Tabela 5.** Estudos de validação e críticas sobre métodos de pontuação de decomposição selecionados

<b>Estudo</b>	<b>Localização/Tipo</b>	<b>Amostra</b>	<b>Método Testado</b>	<b>Observações chave</b>	<b>Resultado</b>
Wescott et al. 2018 <sup>*1</sup>	EUA (3 institutos)	28 cadáveres humanos	TBS-ADD	Estimativas médias de ADD não apresentam boa correlação com o ADD real.	<b>NEGATIVO</b> - Acurácia insuficiente
Forbes et al. 2019 <sup>*1</sup>	Cape Town, África do Sul	Carcaças de porcos	Megyesi & Moffatt	Impreciso no inverno; apenas parcialmente preciso no verão.	<b>NEGATIVO</b> - Necessidade de modelos regionais
Giles et al. 2020	Tennessee, EUA	26 cadáveres humanos	TBS/TBSsurf	Ausência de relação entre ADD e TBS ( $R^2 = 0,025$ ); superestimação do PMI.	<b>NEGATIVO</b>
Dawson et al. 2022	Austrália	Cadáveres humanos e carcaças de porcos	TBS vs. Perda de massa	O TBS não captura informações refletidas pela perda de massa.	<b>MISTO</b> - TBS isolado é insuficiente
Smith et al. 2023	Reanálise Estatística	N/A	Megyesi & Moffatt	Identificação de erro fundamental no cálculo da incerteza (aditivo vs. multiplicativo).	<b>FALHA CRÍTICA</b>
Gunawardena et al. 2023	Sri Lanka	13 esqueletos	TBS-ADD	Ausência de correlação em clima tropical; 69% dos casos apresentaram baixa aplicabilidade.	<b>NEGATIVO</b>
López-Lázaro et al. 2024	Meta-Análise	18 estudos	TBS-ADD	Alta heterogeneidade e imprecisão; erro agrupado de $\pm 458$ ADD.	<b>FALHA CRÍTICA</b>
Indra et al. 2024	Suíça	6 carcaças de porcos	TBS em porcos	O método de Keough não é diretamente aplicável à Europa Central.	<b>NEGATIVO</b>
Bugelli et al. 2025	Itália	Casos forenses	TDS	Alta confiabilidade interobservador para o método TDS.	<b>POSITIVO</b> – Boa reprodutibilidade

<sup>1</sup> \* Estudos incluídos devido à sua perspectiva fundacional/base.

**Tabela 6.** Distribuição geográfica dos estudos de validação

Zona climática	Estudos	Resumo dos achados
Temperatura (EUA)	Wescott 2018, Giles 2020	Acurácia do TBS-ADD foi insuficiente
Mediterrâneo (África do Sul)	Fobers 2019	Modelos desenvolvidos em outros contextos não são aplicáveis
Tropical (Sri Lanka)	Gunawardena 2023	Falha completa do TBS-ADD
Temperado (Europa)	Indra 2024, Bugelli 2025	Adaptações regionais são necessárias

### 3.3. O caminho a seguir: integração metodológica e padronização

Diante dos desafios impostos aos modelos tradicionais, a literatura defende de forma contundente uma abordagem multifacetada para o futuro da estimativa do intervalo pós-morte (IPM). Não se trata apenas de empregar um maior número de métodos, mas de promover uma integração estratégica de técnicas, ajustadas ao contexto específico do caso e ao intervalo pós-morte em questão.

**A estrutura integrativa:** A síntese de revisões sistemáticas recentes [1, 3] revela um consenso quanto à necessidade de integração metodológica. A natureza complementar dos diferentes métodos — com a degradação do RNA sendo mais adequada para intervalos iniciais, a entomologia e a análise microbiana para estágios intermediários, e abordagens ômicas ou espectroscópicas para intervalos prolongados — fornece uma base lógica para o desenvolvimento de protocolos multimétodos. O fluxograma decisório para a estimativa do IPM tardio proposto por Franceschetti et al. (2023) oferece um modelo conceitual prático de como o perito pode selecionar, a partir de um conjunto de métodos disponíveis, aqueles mais apropriados com base no estado dos remanescentes humanos e nas questões investigativas específicas [18].

A transição de abordagens moleculares e ômicas, contudo, esbarra em desafios estruturais significativos quando transposta para a realidade de países em desenvolvimento. No contexto brasileiro, a aplicação rotineira de técnicas avançadas de proteômica, metabolômica ou sequenciamento de nova geração (NGS) na estimativa do IPM, enfrenta limitações severas de infraestrutura nos Institutos Médicos Legais (IMLs). Estudos recentes sobre o panorama da ciência forense no Brasil destacam que uma parcela considerável das unidades periciais carece de laboratórios específicos e equipamentos adequados para análises complexas em

remanescentes humanos decompostos [19]. A fragmentação do sistema pericial em múltiplas agências governamentais e a escassez de financiamento contínuo dificultam a aquisição e manutenção de plataformas analíticas de alto custo [20]. Consequentemente, enquanto a literatura global avança em direção a biomarcadores moleculares precisos, a prática pericial brasileira frequentemente necessita operar sob o conceito de “ciência forense frugal”, buscando maximizar a eficiência investigativa com os recursos disponíveis [20]. Essa assimetria tecnológica reforça a necessidade de que o desenvolvimento de novos métodos considere não apenas a precisão estatística, mas também a viabilidade de implementação em cenários com restrições orçamentárias e estruturais.

**A necessidade crítica de taxas de erro:** Um achado crucial, enfatizado tanto por Weisensee & Atwell (2024) quanto por Strete et al. (2025), é a quase total ausência de métodos com taxas de erro conhecidas ou quantificadas na prática médico-legal aplicada [1, 3]. Esse fato representa uma barreira fundamental à prática baseada em evidências e à admissibilidade judicial. O desenvolvimento de métodos capazes de fornecer não apenas uma estimativa pontual, mas também um intervalo de confiança estatisticamente válido, constitui um dos principais objetivos para pesquisas futuras.

**Padronização e compartilhamento de dados:** A elevada variabilidade e a ausência histórica de definições padronizadas para os estágios de decomposição têm dificultado comparações entre estudos. A literatura indica, de forma consistente, a necessidade do desenvolvimento de protocolos padronizados e baseados em evidências. Ademais, observa-se um forte incentivo à adoção dos princípios da Ciência Aberta, incluindo o compartilhamento de dados e a transparência metodológica. O banco de dados geoFOR é um exemplo emblemático desse movimento, ao buscar a criação de uma aplicação colaborativa e baseada na web, capaz de utilizar aprendizado de máquina aliado a um conjunto de

dados amplo e diversificado para gerar estimativas de IPM mais precisas e sensíveis às variações geográficas [16].

#### 4. DISCUSSÃO

Esta revisão de escopo da literatura publicada entre 2020 e 2025, contextualizada por revisões sistemáticas recentes e abrangentes [1, 3], evidencia um campo em processo de correção interna necessária e profunda. A dependência histórica de modelos macromorfoscópicos generalizados, como o TBS-ADD, para estimativa do IPM foi sistematicamente desmantelada por um corpo global de evidências. As evidências são inequívocas: a decomposição é um processo complexo e multifatorial, extremamente sensível às condições biogeoclimáticas locais, de modo que um modelo de regressão universal não é cientificamente defensável. A falha consistente do modelo de Megyesi et al. em estudos de validação realizados em diferentes regiões — da África do Sul ao Sri Lanka [10, 13] — aliada à identificação de falhas estatísticas centrais [8], marca o fim definitivo de sua aplicação acrítica.

Para a realidade brasileira, essa constatação é particularmente crítica. O Brasil, caracterizado por dimensões continentais e uma vasta diversidade de zonas biogeoclimáticas (predominando as tropicais e equatoriais), apresenta taxas aceleradas de decomposição que diferem drasticamente dos modelos desenvolvidos em climas temperados [21]. A ausência de facilidades de pesquisa em tafonomia humana (HTFs – *Human Taphonomy Facilities*) em regiões tropicais, representa uma lacuna significativa na literatura global, limitando a precisão das estimativas de IPM em países que, paradoxalmente, concentram altas taxas de mortes violentas [21]. Pesquisas experimentais recentes conduzidas em biomas brasileiros, como o Cerrado e a Amazônia, utilizando modelos animais, têm demonstrado a forte influência da temperatura, umidade e entomofauna local na sucessão tafonômica, evidenciando que a importação de fórmulas estrangeiras é inadequada [22]. Portanto, o desenvolvimento e a validação de modelos de decomposição estritamente regionais, adaptados às especificidades climáticas e ecológicas de cada estado ou bioma brasileiro, não são apenas uma recomendação metodológica, mas uma necessidade premente para a justiça criminal do país.

Essa “crise de validação” não deve ser interpretada como um fracasso da disciplina, mas como um sinal de sua maturação. Ela reflete a transição em direção a um padrão de prática mais rigoroso e fundamentado em evidências, que reconhece a complexidade dos fenômenos envolvidos e incorpora explicitamente a incerteza. O desafio central da antropologia forense deixou de ser a

busca por uma solução única e universal para o IPM e passou a ser o desenvolvimento de um conjunto metodológico robusto, flexível e validado. O caminho a seguir, conforme articulado na literatura sintetizada, é o da integração e da padronização.

O apelo por uma abordagem integrativa reconhece que métodos distintos oferecem diferentes componentes do quebra-cabeça temporal. A degradação de moléculas instáveis de RNA fornece um marcador temporal para os primeiros dias após a morte; a sucessão previsível de insetos e microrganismos oferece informações sobre semanas e meses subsequentes; e as transformações lentas da matriz mineral e das proteínas ósseas podem refletir escalas temporais de anos ou mesmo décadas [3, 18]. O desafio reside em integrar esses diferentes indicadores em uma linha do tempo coerente e estatisticamente fundamentada. Isso exige não apenas o avanço individual de cada técnica, mas também pesquisas voltadas à sua combinação, com o objetivo de reduzir a incerteza e aumentar a precisão.

De forma crucial, o campo deve enfrentar o problema da quantificação do erro. Conforme argumentado de maneira enfática nas revisões sistemáticas de Weisensee & Atwell (2024) e Strete et al. (2025), a ausência de taxas de erro conhecidas ou quantificadas na maioria dos métodos atuais de estimativa do IPM constitui uma vulnerabilidade crítica no contexto jurídico [1, 3]. O futuro da pesquisa em IPM deve dedicar atenção equivalente à quantificação da incerteza e ao aprimoramento da acurácia. Nesse cenário, o desenvolvimento e a adesão a grandes bancos de dados colaborativos, como o geoFOR, tornam-se essenciais [16]. O geoFOR, uma plataforma baseada em sistemas de informação geográfica (GIS) e aprendizado de máquina, exemplifica o futuro da estimativa do IPM ao agregar dados de milhares de casos reais e experimentais para gerar modelos preditivos mais robustos e sensíveis a variações ambientais [16]. Para o Brasil, a integração a essas iniciativas internacionais representa uma oportunidade estratégica ímpar. A inserção sistemática de dados provenientes dos IMLs brasileiros em plataformas como o geoFOR permitiria não apenas suprir a atual carência global de dados tafonômicos de regiões tropicais [21], mas também beneficiaria a perícia nacional com algoritmos preditivos treinados especificamente para as condições locais. Para que essa integração seja viável, contudo, é imperativa a superação da atual fragmentação de dados entre os estados brasileiros, exigindo a adoção de protocolos padronizados de coleta de variáveis tafonômicas e ambientais em nível nacional [23]. A agregação de dados provenientes de inúmeros casos bem documentados, distribuídos em ambientes diversos, viabiliza a construção de modelos probabilísticos capazes de fornecer não apenas estimativas pontuais, mas também

intervalos de confiança estatisticamente significativos — uma medida real da força da evidência.

## 5. CONCLUSÃO

A estimativa do intervalo pós-morte permanece como um desafio central e dinâmico na ciência forense. Esta revisão de escopo da literatura entre 2020 e 2025, sustentada por revisões sistemáticas de grande abrangência, revela uma clara mudança de paradigma. A era da dependência de modelos universais de regressão baseados na decomposição chegou ao fim, encerrada de forma definitiva por uma série de falhas de validação em escala global e pela identificação de deficiências estatísticas fundamentais. O futuro da disciplina não reside em um retorno a métodos mais simples, mas no avanço em direção a uma ciência mais complexa, rigorosa e integrada.

Os profissionais forenses devem, a partir de agora, atuar dentro de um referencial multimétodo, selecionando e combinando técnicas de acordo com a fase temporal específica da decomposição e com o contexto ambiental particular dos restos mortais. O desenvolvimento de ferramentas macromorfológicas validadas regionalmente, como o TDS e o TADS, representa um avanço importante, mas o objetivo final deve ser a integração dessas observações com biomarcadores quantitativos e objetivos oriundos da microbiologia, bioquímica e biologia molecular. O principal obstáculo à confiabilidade científica e à admissibilidade judicial desses métodos continua sendo a ausência de taxas de erro conhecidas. Assim, a principal diretriz para pesquisas futuras deve ser a quantificação rigorosa da incerteza associada a todas as técnicas de estimativa do IPM.

Iniciativas colaborativas de compartilhamento de dados em larga escala são fundamentais para a construção dos conjuntos de dados robustos exigidos por esse desafio. Ao adotar os princípios da Ciência Aberta e desenvolver ferramentas analíticas sofisticadas, o campo pode evoluir de estimativas predominantemente subjetivas para probabilidades estatisticamente defensáveis. Essa transição não é apenas um exercício acadêmico, mas um imperativo profissional e ético, garantindo que as evidências apresentadas em investigações de morte atendam aos mais elevados padrões de validade científica.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi possível graças ao fomento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do processo 171765/2023-0 para bolsa PDJ 2023, do processo 422805/2021-1 da Chamada CNPq/MCTI/FNDCT nº18/2021 – Faixa A –

Grupos Emergentes para o projeto intitulado Estudo dos processos de decomposição para emprego em casos forenses: um experimento tafonômico brasileiro, e pela bolsa de Iniciação Científica PIC\_PIBIC\_122 do Centro Universitário de Brasília (CEUB).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WEISENSEE, K. E.; ATWELL, M. M. Human Decomposition and Time Since Death: Persistent Challenges and Future Directions of Postmortem Interval Estimation in Forensic Anthropology. **American Journal of Physical Anthropology**, v. 186, n. S78, 1 dez. 2024.
- [2] RUIZ LÓPEZ, J. L.; PARTIDO NAVADIJO, M. Estimation of the post-mortem interval: a review. **Forensic Science International**, v. 369, p. 112412, abr. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2025.112412>
- [3] STRETE, G. et al. Current Understanding and Future Research Direction for Estimating the Postmortem Interval: A Systematic Review. **Diagnostics**, v. 15, n. 15, p. 1954, 4 ago. 2025. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15151954>
- [4] MEGYESI, M. S.; NAWROCKI, S. P.; HASKELL, N. H. Using accumulated degree-days to estimate the postmortem interval from decomposed human remains. **Journal of Forensic Sciences**, v. 50, n. 3, p. 618–626, 1 maio 2005. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15932096/>
- [5] MOFFATT, C.; SIMMONS, T.; LYNCH-AIRD, J. An Improved Equation for TBS and ADD: Establishing a Reliable Postmortem Interval Framework for Casework and Experimental Studies. **Journal of Forensic Sciences**, v. 61, n. S1, p. S201–S207, 21 ago. 2015. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1556-4029.12931>
- [6] LÓPEZ-LÁZARO, S.; CASTILLO-ALONSO, C. Accuracy of estimating postmortem interval using the relationship between total body score and accumulated degree-days: a systematic review and meta-analysis. **International Journal of Legal Medicine**, 8 ago. 2024. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39112744/>
- [7] AGATHE RIBÉREAU-GAYON; CARTER, D.; FORBES, S. L. Developing a new scoring method to evaluate human decomposition in a humid, continental (Dfb) climate in Quebec. **Journal of Forensic Sciences**, v. 68, n. 2, p. 536–548, 16 jan. 2023. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1556-4029.15201>
- [8] SMITH, D. H. et al. Commentary on: Megyesi MS, Nawrocki SP, Haskell NH. Using accumulated degree-days to estimate the postmortem interval from decomposed human remains. *J Forensic Sci.* 2005;50(3):618–26. doi: 10.1520/JFS2004017; and

- Moffatt C, Simmons T, Lynch-Aird J. An improved equation for TBS and ADD: Establishing a reliable postmortem interval framework for casework and experimental studies. *J Forensic Sci*. 2016;61(Suppl 1):S201–S207. doi: 10.1111/1556-4029.12931. **Journal of Forensic Sciences**, v. 68, n. 1, out. 2022. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10092795/>
- [9] WESCOTT, D. et al. Validation of the Total Body Score/Accumulated Degree-Day Model at Three Human Decomposition Facilities. **Forensic Anthropology**, v. 1, n. 3, p. 143–149, 2018. <https://journals.upress.ufl.edu/fa/article/view/584>
- [10] FORBES, M. N. S. et al. Inaccuracy of accumulated degree day models for estimating terrestrial post-mortem intervals in Cape Town, South Africa. **Forensic Science International**, v. 296, p. 67–73, mar. 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379073819300179>
- [11] GILES, S. B. et al. The effect of seasonality on the application of accumulated degree-days to estimate the early post-mortem interval. **Forensic Science International**, v. 315, p. 110419, out. 2020. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32784040/>
- [12] DAWSON, B. M.; WALLMAN, J. F.; BARTON, P. S. How does mass loss compare with total body score when assessing decomposition of human and pig cadavers? **Forensic Science, Medicine and Pathology**, v. 18, 11 maio 2022. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12024-022-00481-6>
- [13] GUNAWARDENA, S. A. et al. Retrospective analysis of factors affecting rate of skeletonization within a tropical climate. **Science & Justice**, v. 63, n. 5, p. 638–650, 1 set. 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1355030623000850>
- [14] INDRA, L. et al. Evaluation of Porcine Decomposition and Total Body Score (TBS) in a Central European Temperate Forest. **Journal of Forensic Sciences**, v. 69, n. 3, 26 fev. 2024. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1556-4029.15497>
- [15] BUGELLI, V. et al. Inter-operator reliability of the total decomposition score (TDS) method for estimating the post-mortem interval (PMI) in outdoor cases. **International Journal of Legal Medicine**, 28 nov. 2025. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00414-025-03681-1>
- [16] WEISENSEE, K. E. et al. geoFOR: a collaborative forensic taphonomy database for estimating the postmortem interval. **Forensic science international**, v. 355, p. 111934–111934, 1 fev. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.111934>
- [17] STRACK, J. E.; SMITH, M. J. Predicted changes to the rate of human decomposition due to climate change during the 21st century. **Forensic Science International: Reports**, v. 7, p. 100321–100321, 1 jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.111934>
- [18] FRANCESCHETTI, L. et al. Estimation of Late Postmortem Interval: Where Do We Stand? A Literature Review. **Biology**, v. 12, n. 6, p. 783–783, 28 maio 2023. <https://doi.org/10.3390/biology12060783>
- [19] SILVA, M. A. M. An Overview of the Field of Forensic Anthropology in Brazil: Perspectives and Challenges for the XXI Century. **Forensic, Legal & Investigative Sciences**, v. 5, p. 1–7, 21 fev. 2019. <https://doi.org/10.24966/FLIS-733X/100023>
- [20] BOUZIN, J. T. et al. Mind the gap: The challenges of sustainable forensic science service provision. **Forensic Science International: Synergy**, v. 6, p. 100318, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2023.100318>
- [21] VRÁBLOVÁ, S.; LOUKA, V. Addressing underrepresented homicide and climate data in forensic science: The case for new human taphonomy facilities in tropical regions. **Science & Justice**, v. 65, n. 5, 2025. 101299. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2025.101299>
- [22] BENTES PEREIRA, I. **Tafonomia experimental para fins forenses na região Norte do Brasil; estudo sobre decomposição cadavérica em ambiente florestal utilizando porcos domésticos**. Dissertação de Mestrado—Universidade de Coimbra: 2022.
- [23] CALMON M. Forensic data management and database systems in forensic investigations for cases of missing and unidentified persons in Brazil. **Forensic Sci Res**. 2023 Feb 12;7(4):599-608. doi: 10.1080/20961790.2022.2076994. PMID: 36817244; PMCID: PMC9930801.