FACULDADE DE EXCELÊNCIA – UNEX – ITABUNA

Emile Arouca, Mariana Céo Porto, Natália Nobre dos Santos Cavalcante

MICROBIOLOGIA FORENSE: O USO DE MICRORGANISMOS NA ESTIMATIVA POST-MORTEM: REVISÃO DE LITERATURA

ITABUNA – BA
2025

Emile Arouca, Mariana Céo Porto, Natália Nobre dos Santos Cavalcante

MICROBIOLOGIA FORENSE: O USO DE MICRORGANISMOS NA ESTIMATIVA POST-MORTEM: REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unex Faculdade de Excelência Itabuna, como exigência para obtenção do grau de bacharel**.**

Orientador: Prof. Ms. Gisele Dias da Silva

Itabuna – BA
2024

Emile Arouca, Mariana Céo Porto, Natália dos Santos Cavalcante

MICROBIOLOGIA FORENSE: O USO DE MICRORGANISMOS NA ESTIMATIVA POST-MORTEM: REVISÃO DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unex Faculdade de Excelência Itabuna, como exigência para obtenção do grau de bacharel.

Orientador: Prof. Ms. Gisele Dias da Silva

Aprovado em:

_____	_____
Orientador	**Data da defesa**
_____	_____
Avaliador	**Data da defesa**
_____	_____
Avaliador	**Data da defesa**

Itabuna – BA
2024

UNEX FACULDADE DE EXCELÊNCIA DE ITABUNA
CURSO: BIOMEDICINA E FARMÁCIA

MICROBIOLOGIA FORENSE: O USO DE MICRORGANISMOS NA ESTIMATIVA POST-MORTEM: REVISÃO DE LITERATURA

FORENSIC MICROBIOLOGY: THE USE OF MICROORGANISMS IN POST-MORTEM ESTIMATION

EMILE AROUCA
MARIANA CÉO PORTO
NATÁLIA NOBRE DOS SANTOS CAVALCANTE

RESUMO

Revisão integrativa da literatura nacional e internacional sobre Microbiologia forense e a estimativa do intervalo postmortem, a partir de vinte e quatro artigos analisados na íntegra e localizados por meio de buscas sistematizadas, nas bases de dados SCIELO, PubMed, Web of Science e Scholar Google, nos últimos quinze anos. Os resultados demonstram haver dados microbiológicos com potencial para crescimento desta área de pesquisa, pois diversos estudos científicos têm comprovado a eficácia da microbiologia forense na estimativa do intervalo post-mortem, por meio da análise da sucessão microbiana, entre outros fatores. Esta pesquisa também evidencia um crescimento significativo no interesse da área, com destaque para o uso de técnicas de sequenciamento genético e modelos preditivos baseados em inteligência artificial. Além disso, aborda o conceito de “relógio microbiano”, fundamentado em sucessões bacterianas e fúngicas ao longo da decomposição especialmente em tecidos internos e amostras de solo. Em contrapartida, observou-se a necessidade de padronização metodológica, como também a escassez de estudos longitudinais com aplicação forense direta. Percebe-se que, embora existam desafios, a microbiologia forense representa uma fronteira inovadora dentro das ciências forenses.

Palavras – chave: Microbiologia Forense, Intervalo Post-Mortem, Sucessão Microbiana, Decomposição Cadavérica, Ciências Forenses, Investigação Criminal, Técnicas Moleculares

1. ABSTRACT (resumo em Inglês)

An integrative review of the national and international literature on forensic microbiology and the estimation of the post-mortem interval, based on twenty-four articles analyzed in full and located through systematized searches in the SCIELO, PubMed, Web of Science and Scholar Google databases over the last fifteen years. The results show that there is microbiological data with potential for growth in this area of research, as several scientific studies have proven the effectiveness of forensic microbiology in estimating the post-mortem interval, by analyzing microbial succession, among other factors. This research also shows a significant growth in interest in the area, with emphasis on the use of genetic sequencing techniques and predictive models based on artificial intelligence. It also addresses the concept of the “microbial clock”, based on bacterial and fungal successions throughout decomposition, especially in internal tissues and soil samples. On the other hand, there was a need for methodological standardization, as well as a shortage of longitudinal studies with direct forensic application. It can be seen that, although there are challenges, forensic microbiology represents an innovative frontier within the forensic sciences.

Keywords: Forensic Microbiology, Post-Mortem Interval, Microbial Succession, Cadaveric Decomposition, Forensic Sciences, Criminal Investigation, Molecular Techniques

2. INTRODUÇÃO

As Ciências Forenses podem ser definidas como um conjunto de conhecimentos científicos aplicados à solução de crimes. Embora existam registros de sua prática desde o século VII, foi apenas no século XIII que surgiram os primeiros compêndios de medicina legal, abordando a análise de ferimentos e sua relação com as armas utilizadas nos crimes, onde, posteriormente à sua descoberta, e ao desenvolverem-se os procedimentos da medicina legal, às práticas forenses eram desempenhadas por profissionais de formação genérica (RODRIGUES, 2011).

Com a evolução tecnológica, certos crimes tornaram-se mais complexos, tornando necessária a participação de profissionais especializados em outras áreas da ciência, com o intuito de realizar investigações policiais mais eficazes (LIMA & SOUZA, 2022).

> “Dessa forma, muitas áreas como antropologia, criminologia, entomologia, odontologia, toxicologia, engenharia, patologia, psicologia e medicina, entre outras, passaram a compor e auxiliar as ciências forenses, consideradas campo interdisciplinar. Sua área de atuação é, portanto, bastante abrangente, buscando servir à Justiça e à Sociedade” (BARROS et al 2021).

Com caráter colaborativo, essas áreas envolvem, principalmente, conhecimentos de física, química e biologia. Esta última tem desempenhado um papel fundamental por meio de diferentes áreas, como genética, biologia molecular, botânica, toxicologia, histologia e hematologia (Weçoski, D.A.D., & Dalzoto, 2023).

Ao utilizar conhecimentos científicos aplicados em evidências bioquímicas englobadas no campo das Ciências Forenses, têm se destacado o papel do profissional biomédico nas análises e resoluções de casos criminais (SOUZA et al., 2024) ao fornecer reconhecimento e interpretação dos indícios materiais extrínsecos relativos ao crime ou à identidade do criminoso utilizando técnicas de análise de DNA, onde, em complemento, diversos tipos de materiais podem tornar-se uma evidência significativa e vários métodos são usados no laboratório de Criminalística para sua análise. Muitos destes métodos são comuns da Biologia, Imunologia, Bioquímica, Microscopia ou de técnicas instrumentais utilizadas em laboratórios clínicos e de pesquisa, que competem ao domínio de atuação do biomédico. (CABRAL, 2024)

Apesar da atuação do biomédico ser essencial nas análises laboratoriais forenses, outros profissionais da área da saúde também desempenham um papel crucial na elucidação de crimes. Entre eles, destaca-se o farmacêutico, cuja expertise em química, biologia e toxicologia o torna indispensável para investigações forenses, especialmente na identificação de substâncias tóxicas e na análise de evidências químicas e biológicas (CARDOSO, K.G. 2024).

A farmacologia, embora tradicionalmente ligada ao metabolismo de substâncias no organismo vivo, também desempenha papel importante após a morte. Medicamentos utilizados em vida, como antibióticos ou imunossupressores, podem alterar significativamente a composição do microbioma humano, afetando a sucessão microbiana post-mortem e, consequentemente, a estimativa do IPM. Essa relação ainda é pouco explorada na literatura, mas há evidências de que o uso prévio de fármacos influencia diretamente a velocidade e o padrão de decomposição microbiana (Moitas, Caldas & Sampaio-Maia, 2024).

Além disso, microrganismos presentes no corpo podem interferir na degradação de medicamentos após a morte, o que impacta na interpretação de laudos toxicológicos e pode até mascarar ou potencializar os efeitos de determinadas substâncias. A compreensão dessa interação entre farmacologia e microbiota post-mortem é essencial para garantir maior confiabilidade nos exames forenses, evitando erros na

causa da morte ou na estimativa do tempo do óbito (Estracanholli, 2008).

Diante deste contexto, no eixo da microbiologia forense, encontra-se uma vertente com importância indiscutível: a atuação do farmacêutico nesse campo crescente, que com a formação sólida em microbiologia clínica, análise laboratorial e interpretação de resultados, torna-se um profissional estratégico nos processos investigativos. (OLIVEIRA, 2021)

Ademais, a micologia forense tem se mostrado uma ferramenta promissora na investigação criminal, especialmente na estimativa do intervalo post-mortem (IPM). Fungos como Aspergillus, Penicillium e Rhizopus colonizam cadáveres de forma ordenada, refletindo os estágios de decomposição e fornecendo dados temporais valiosos. Essas estruturas fúngicas podem atuar como vestígios em cenas de crime, conectando indivíduos a locais específicos (FORMIGA, 2024, p. 31).

Com a produção de provas, elucidação de criminosos e determinação da causa mortis, onde uma das funções mais importantes é realizar análises microbiológicas de amostras forenses na coleta e análise de fluidos corporais, tecidos, fragmentos ósseos e amostras ambientais para identificar microrganismos relevantes para a investigação. (PEREIRA et al. 2019)

Uma das principais áreas de atuação desse profissional é a toxicologia forense , onde ele identifica substâncias tóxicas no organismo humano, como drogas ilícitas, venenosas e medicamentos. Essa análise pode ser decisiva para explicações sobre causas de morte, verificar a presença de substâncias que alteraram o comportamento de suspeitos ou vítimas, e até mesmo confirmar envenenamentos intencionais (SILVA, R. A. 2019).

Em casos de afogamento, a presença de coliformes fecais e estreptococos na água pode indicar a causa da morte, uma vez que esses microrganismos podem ser aspirados e chegar a diferentes partes do corpo, como tamasos de síndrome da morte súbita infantil, através da análise de agentes infecciosos, bactérias e microalgas, como as diatomáceas. Também na determinação da hora da morte, a partir da análise de fungos e outros microrganismos coletados do cadáver ou local de morte (LEHMAN, 2014). Essas técnicas moleculares têm melhorado as investigações, oferecendo novas evidências e informações essenciais.

Diante deste cenário, um dos principais desafios da ciência forense é a determinação do intervalo post-mortem (IPM), uma vez que métodos tradicionais, como a análise da

rigidez cadavérica e da temperatura corporal, são suscetíveis a variações ambientais, podendo comprometer a precisão da estimativa. A estimativa do IPM é fundamental, pois auxilia na identificação de vítimas e suspeitos, validação de álibis e na emissão de atestados de óbito. Sendo assim, surge a necessidade de métodos para fornecer estimativas precisas no contexto médico-legal. As abordagens para avaliar o IPM incluem análises físicas, físico-químicas, bioquímicas, entomológicas, botânicas e microbiológicas (SILVA et al. 2020). Nesse contexto, a microbiologia surge como uma abordagem inovadora, permitindo a análise da sucessão microbiana ao longo do processo de decomposição para estimar o tempo de morte (OLIVEIRA & AMORIM, 2018). Posto isso, este trabalho tem como objetivo analisar o papel da microbiologia forense na estimativa do intervalo post-mortem, evidenciando como a análise do microbioma pode fornecer dados fidedignos que auxiliam na determinação do tempo de morte. A pesquisa busca compreender como diferentes perfis microbianos relacionados à decomposição colaboram para a construção de informações específicas e rigorosas, fundamentais para o esclarecimento de casos criminais.

METODOLOGIA

Realizou-se a presente revisão da literatura a partir da pergunta norteadora: “Como a microbiologia forense pode contribuir para a estimativa do intervalo pós-morte e aprimorar as investigações criminais?” Essa revisão constitui método de pesquisa através de estudos já publicados para elaboração de uma outra síntese conhecimento que viabiliza obter desfechos sobre o tema, auxiliando na tomada de decisão nas práticas diárias, além de completar lacunas que devem ser preenchidas no conhecimento com novas pesquisas (BARROS, et al 2021).

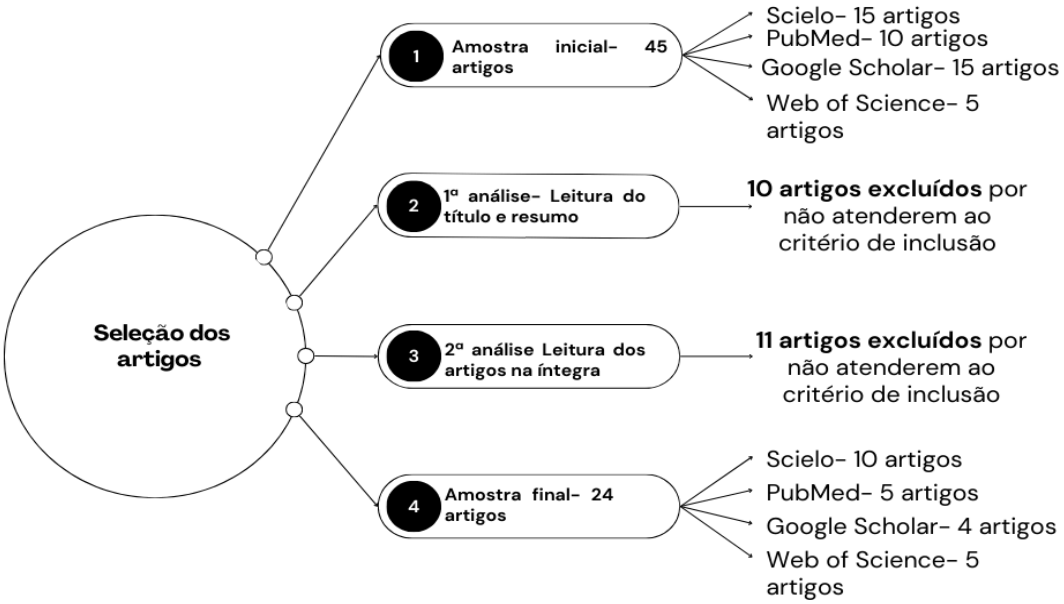
A revisão integrativa envolveu as seguintes etapas: 1) a definição do tema e dos objetivos da pesquisa; 2) a seleção da amostra com base em critérios de inclusão previamente estabelecidos; 3) caracterização dos estudos, na qual foram determinadas as informações a serem extraídas, seguindo critérios claros e um instrumento estruturado; 4) a análise dos resultados, identificando convergências e divergências entre os estudos; 5) apresentação e discussão dos achados, contextualizando-os dentro da literatura existente.

Realizou-se a busca de artigos no mês de março de 2025, indexados nas bases de

dados: SCIELO; PubMed; Web of Science e Scholar Google. A escolha destas bases de dados foi definida por incluir material técnico-científico conceituado nas áreas da saúde em contexto nacional e internacional. Os descritores na língua inglesa utilizados para busca foram: “Forensic Microbiology”, “Post-Mortem Interval”, “Microbial Succession”, “Forensic Sciences”, “Criminal Investigation” “Molecular Techniques” para a língua portuguesa os descritores foram “Microbiologia Forense”, “Intervalo Post-Mortem”, “Sucessão Microbiana”, “Ciências Forenses”, “Investigação Criminal”, “Técnicas Moleculares”.

Foram selecionados todos os artigos científicos que abordam sobre microbiologia forense e intervalo post-mortem. Adotaram-se como critérios de inclusão artigos indexados nas bases de dados, no período de 1º de janeiro de 2010 a 31 de janeiro de 2025, nos idiomas inglês, português e espanhol incluindo os de revisão, desde que completos e com resumos, de livre acesso ou por meio das bases de dados no Portal de Periódicos da CAPES, assim como deveriam responder à pergunta norteadora.

Para seleção dos artigos, realizou-se uma primeira análise dos quarenta e cinco títulos e resumos, sendo então excluídos aqueles que não se relacionavam com o objeto de estudo. Na primeira fase, foram analisados de acordo com o título e resumo do trabalho, excluídos aqueles que não condizem com a temática. Já na segunda fase, os artigos remanescentes que se aproximaram em responder à pergunta norteadora foram lidos e analisados na íntegra, o que possibilitou a definição da amostra final, como representa o fluxograma abaixo.



3. RESULTADOS

A pesquisa nas bases de dados selecionadas, segundo estratégias de busca utilizadas, resultou no total de 45 artigos; após análise minuciosa, foram selecionados 24, os quais mais se aproximaram em responder à pergunta norteadora, contemplando assim o objeto de estudo e os critérios de inclusão preestabelecidos. Dos artigos inseridos, três deles são nacionais, em idioma português, extraídos da base de dados Google Scholar. Os demais artigos (21) são internacionais, todos eles em idioma inglês, extraídos das bases de dados PubMed, Web of Science e Scielo.

Vale ressaltar que a maioria dos achados apresentavam propostas de técnicas de sequenciamento genético ou ações direcionadas a procedimentos dentro do laboratório forense, com foco na Estimativa post-mortem. No caso da influência microbiológica na estimativa do Intervalo post-mortem, os resultados obtidos e as informações detalhadas através dos artigos selecionados podem ser acompanhadas no quadro 1.

Quadro 1. Caracterização da amostra de artigos nacionais e internacionais sobre o uso de microrganismos na estimativa post-mortem, segundo título, autores, ano em que foi publicado, métodos, objetivos e principais resultados, indexados nas bases de dados SCIELO; PubMed; Web of Science e Scholar Google, de 1º/01/2010 a 31/01/2025.

Artigo, Autores, Ano, Título	Tipo de Estudo, Local, País	Objetivo(s), Métodos	Principais resultados
Artigo 01. PEREIRA, P. 2017. Microbiologia Forense e Estimativa do Intervalo Postmortem	Revisão bibliográfica, Porto, Portugal	Explorar as aplicações recentes da microbiologia forense na estimativa do intervalo postmortem, bem como esclarecer o conhecimento atual da dinâmica da atividade microbiana em cadáveres em várias fases de decomposição. A metodologia se deu através de Pesquisa bibliográfica de artigos publicados nos últimos 10 anos, no idioma inglês, tendo sido incluídos 44 artigos na análise final.	Foram fornecidas mais evidências de que um método baseado na análise do solo tem o potencial de atuar como uma ferramenta para estimar IPM mais extensos (superiores a 30 dias). As bactérias associadas ao ser humano, incluindo os Bacteroides anaeróbios obrigatórios, foram detectadas no solo em altas concentrações, até 198 dias após a morte. Foi identificado o padrão de sucessão das comunidades microbianas do solo durante a decomposição. Gêneros como *Clostridium* e *Prevotella* possuem espécies potencialmente preditivas de diferentes níveis de decomposição. Adicionalmente, *C. novyi* foi relativamente mais abundante em IPMs mais tardios, ao passo que uma espécie de Clostridium desconhecida foi mais abundante em estágios iniciais da decomposição. Em um outro estudo, a amostra de restos parcialmente esqueletizados com IPM entre 27-184 dias manifestou maior presença de *Firmicutes*. Em fase de esqueletização completa, entre 554-1962 dias, o filo Bacteroidetes registrou maior abundância.
Artigo 02. CLARK et al. 2017 Integrating the	Revisão bibliográfica, Estados Unidos	Analisar criticamente o potencial do microbioma humano e	Os autores destacam o potencial dos microrganismos para

Microbiome as a Resource in the Forensics Toolkit.		ambiental como ferramenta auxiliar na identificação forense, na estimativa do intervalo post-mortem (IPM) e na geolocalização de indivíduos. Os autores organizaram os dados a partir de estudos já publicados, incluindo grandes iniciativas como o *Human Microbiome Project (HMP)* e bancos de dados especializados, como o *Forensic Microbiome Database (FMD)*.	uso forense como a estimativa do intervalo post-mortem (IPM), a identificação de indivíduos por meio de perfis bacterianos, a geolocalização com base em assinaturas microbianas ambientais e humanas. Também abordam sobre as aplicações práticas incluem ligação de pessoas a objetos por meio de bactérias da pele, a diferenciação de locais geográficos com base em microbiomas, a estimativa do tempo de morte com base na sucessão de microrganismos durante o processo de decomposição e o uso de sequenciamento de 16S rRNA e WGS como principais abordagens tecnológicas.
Artigo 03. Pechal et al. 2018. A large-scale survey of the postmortem human microbiome, and its potential to provide insight into the living health condition.	Estudo observacional, Michigan, Estados Unidos	Analisar em larga escala, de forma transversal, o microbioma humano post-mortem. Foram coletadas amostras de 188 cadáveres em Detroit, EUA, abrangendo diferentes faixas etárias, etnias, modos de morte e intervalos post-mortem (1–73 + horas). As coletas ocorreram em seis regiões externas do corpo (ouvido, olhos, nariz, boca, umbigo e reto) com swabs estéreis, sendo o DNA extraído e sequenciado por meio da técnica de alto rendimento 16S rRNA (Illumina MiSeq). A análise dos dados incluiu ferramentas como QIIME, PICRUSt, PERMANOVA e	Os estudos revelaram que a composição microbiana variou conforme a região anatômica e o tempo desde a morte, com estabilidade relativa nas primeiras 48 horas post-mortem. Foi observada uma sucessão ecológica dos microrganismos, com aumento de *Proteobacteria* e redução de *Actinobacteria* e Bacteroidetes após dois dias. A diversidade microbiana foi maior nas mortes violentas e menor em casos com doenças crônicas, como cardiopatias. Além disso, genes associados à motilidade bacteriana aumentaram com o

		modelos de machine learning, com foco na estrutura e função das comunidades microbianas em diferentes tempos após a morte.	tempo de decomposição. O estudo sugere que o microbioma post-mortem pode refletir a saúde do indivíduo em vida e servir como ferramenta complementar na ciência forense e na vigilância em saúde pública.
Artigo 04. Metcalf et al. 2019. Estimating the postmortem interval using microbes: Knowledge gaps and a path to technology adoption.	Revisão crítica, Colorado, Estados Unidos	Realizar levantamento de estudos sobre o uso do microbioma em aplicações forenses, incluindo IPM, identificação pessoal, toxicologia e causas de morte. Foram coletadas amostras de tecidos de cadáveres em diferentes estágios de decomposição. As amostras foram submetidas a análises microbiológicas para identificar e quantificar as comunidades microbianas presentes. Utilizou-se o sequenciamento de DNA para caracterizar os microrganismos presentes nas amostras, permitindo a identificação de espécies específicas associadas a diferentes estágios de decomposição. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente para estabelecer correlações entre a composição microbiana e o tempo decorrido desde a morte.	Concluiu-se que microbioma tem se destacado como uma ferramenta promissora na ciência forense, podendo ser utilizado como indicador do intervalo post-mortem (IPM) por meio de sucessões microbianas previsíveis, conhecidas como “relógio microbiano”. Sua aplicação estende-se à identificação pessoal, com base nas chamadas “impressões digitais microbianas”, e ao apoio à toxicologia post-mortem, uma vez que microrganismos podem interferir na degradação ou produção de substâncias químicas após a morte. Outra frente emergente é a integração entre dados do microbioma e da transcriptômica humana, oferecendo novas possibilidades para inferência de causas de morte e compreensão dos processos pós-morte em nível molecular.

Artigo 05. García et al. 2020. Impact of the Human Microbiome in Forensic Sciences	Revisão sistemática, Murcia, Espanha	Identificar as principais linhas de pesquisa que estão surgindo e as possíveis contribuições ou limitações de tais estudos no campo das ciências forenses, bem como na estimativa do IPM. Os métodos utilizados para a revisão sistemática consistiu na seleção de artigos entre 2009 e 2020, onde todos os estudos que exploraram a microbiota humana na ciência forense humana em indivíduos com idade entre 0 e 89 anos foram incluídos.	Os resultados indicam que as comunidades microbianas mudam de forma previsível após a morte, o que pode ser utilizado para estimar o IPM. Além disso, a presença de certos microrganismos pode estar associada a causas específicas de morte, como *Clostridium, Bacteroides* e *Lactobacillus,* que são marcadores úteis do IPM; detém, adicionalmente, potencial para geolocalização e causa da morte.
Artigo 06. Liu et al. 2020. Predicting postmortem based on microbial community sequences and machine learning algorithms	Experimental com IA, Xi'an, Shaanxi, China	Realizar o sequenciamento de DNA microbiano em diferentes órgãos de camundongos mortos. Aplicação de algoritmos de machine learning (Random Forest, SVM, Redes Neurais Artificiais) para analisar e prever o IPM com base nos dados microbianos.	Os dados do ceco (parte do intestino) mostraram maior precisão na estimativa do IPM. Certas espécies bacterianas como *Enterococcus faecalis*, *Anaerosalibacter,* e *Lactobacillus reuteri* foram identificadas como biomarcadores relevantes. Os modelos conseguiram estimar o IPM com alta acurácia, especialmente nas primeiras 72 horas pós-morte.
Artigo 07. Guo et al. 2016. Potential use of bacterial community succession for estimating post-mortem interval as revealed by high-throughput sequecing	Estudo experimental, Changsha, China	Investigar como a sucessão das comunidades bacterianas durante a decomposição de cadáveres pode ser utilizada para estimar o IPM. A metodologia se deu através da análise do microbioma da cavidade bucal e do reto de ratos mortos,	A sucessão bacteriana seguiu padrões previsíveis, independentes da presença de insetos, e demonstrou potencial para estimar o intervalo post-mortem (IPM) com base na estrutura microbiana.

		com e sem exposição a insetos, utilizando sequenciamento Illumina MiSeq da região 16S rRNA, em múltiplos intervalos de tempo pós-morte.	
Artigo 08. Benedetti et al. 2019. “From womb to tomb; we’re bound to others”: microbiome in forensic science	Revisão de literatura, Itália	Explorar o uso do microbioma humano na ciência forense, destacando sua aplicação na estimativa do IPM por meio da sucessão microbiana durante a decomposição, conceito conhecido como “relógio microbiano”. Destaca-se abordagens com modelos preditivos de tempo de morte com machine learning, comparações entre diferentes locais de abordagens, a avaliação da influência de fatores ambientais, e análise de estudos sobre variabilidade do microbioma individual.	O microbioma pode ser usado como indicador do intervalo post-mortem (IPM) por meio de sucessões microbianas previsíveis (“relógio microbiano”), como ferramenta de identificação pessoal (impressão digital microbiana) e como apoio à toxicologia e inferência de causas de morte..
Artigo 09. Gautam & Rawal. 2022. Microbial clock: A review on forensic microbiology	Revisão de literatura, Ahmedabad, India	Revisar e analisar o conceito de "relógio microbiano" na microbiologia forense. Foram revisados sistematicamente mais de 80 artigos científicos sobre a sucessão microbiana ao longo da decomposição. Os autores exploram diferentes modelos experimentais, métodos de amostragem e tecnologias como sequenciamento 16S rRNA, metagenômica e PCR.	A maioria das pesquisas foi realizada em modelos de camundongos e suínos, o que pode dificultar a aplicação dos resultados em humanos. Além disso, a variabilidade nas condições ambientais e biológicas pode afetar a precisão dos modelos preditivos. O avanço em metagenômica e sequenciamento genético melhorou a caracterização do microbioma post-mortem. Métodos como sequenciamento e análise de dados

			bioinformáticos são essenciais para a pesquisa forense. A caracterização do microbioma post-mortem tem o potencial de revolucionar as investigações forenses, no entanto, é necessário continuar a pesquisa para abordar as lacunas de conhecimento e melhorar a aplicabilidade desses métodos no sistema legal.
Artigo 10. Sena, M. V. 2022. Verificação do conhecimento científico sobre a microbiologia forense	Estudo cienciométrico, Goiânia, Brasil	Verificar os padrões globais das tendências do conhecimento sobre as publicações na área da microbiologia forense em resoluções de crimes. Neste artigo, foi realizada a análise de 53 artigos via Scopus e VOSviewer.	Embora o trabalho de Oliveira não forneça uma lista específica de gêneros bacterianos, ele menciona que a análise do microbioma pode auxiliar na estimativa do IPM. Estudos anteriores identificaram gêneros como *Clostridium, Proteus, Ignatzschineria, Bacteroides e Parabacteroides* como indicadores de diferentes estágios da decomposição. Aponta ainda a necessidade de mais pesquisas para reunir conhecimento e melhorar a aplicabilidade dos métodos no laboratório de microbiologia forense.
Artigo 11. Weçoski & Dalzoto. 2023. Microbiologia Forense: uma revisão	Revisão sistemática, Curitiba, Brasil	O artigo teve como intuito realizar uma revisão de publicações nacionais e internacionais de diferentes áreas da microbiologia forense, criando, assim, um panorama do que já foi produzido dentro desse ramo de investigação	Estudos indicam que a composição microbiana varia com o tempo e as condições ambientais. O microbioma post-mortem pode ser utilizado para estimar o intervalo post-mortem (IPM) e auxiliar na identificação de vítimas. Apesar disso,

		criminal entre 2000 - 2022. Foram analisados artigos relevantes sobre microbiologia forense e avaliação das técnicas utilizadas e dos resultados obtidos em estudos anteriores.	há poucos estudos brasileiros sobre o tema.
Artigo 12. Moitas et al. 2023. Microbiology and Postmortem interval: A systematic review	Revisão sistemática, Porto, Portugal	Esta revisão sistemática teve como objetivo entender as mudanças na sucessão microbiana durante a decomposição e como o microbioma humano pode ser usado para indicar o IPM. Foram selecionados 14 estudos experimentais para análise.	As comunidades microbianas mudam de forma previsível ao longo do tempo após a morte, com marcadores específicos entre os estágios de decomposição. Esses microrganismos foram avaliados principalmente por meio de sequenciamento de amplicons do gene 16S rRNA em 11 artigos. Outros métodos incluíram qPCR e sequenciamento metagenômico e metatranscriptômico. A análise do microbioma humano mostrou potencial para estimar o IPM, apresentando vantagens como a presença de microrganismos em todas as estações e habitats. As descobertas sugerem que a análise das comunidades microbianas pode melhorar a precisão na estimativa do IPM, com a diversidade microbiana servindo como um bom indicador.
Artigo 13. Adserias-Garriga et al. 2023. Dynamics of the oral microbiota as a tool to estimate time since death	Revisão sistemática, Espanha	Investigar se as mudanças nas comunidades bacterianas da cavidade oral durante a decomposição podem ser utilizadas para	Os resultados mostraram padrões de sucessão microbiana entre os cadáveres: Firmicutes e Actinobacteria predominaram na fase fresca; Tenericutes

		estimar o intervalo post-mortem (IPM). A metodologia envolveu o monitoramento diário da microbiota oral de três cadáveres humanos (um homem e duas mulheres) durante diferentes estágios de putrefação por meio de swabs, seguida da extração de DNA e análise por sequenciamento de próxima geração (NGS).	estiveram associados ao estágio de inchaço; e Firmicutes voltaram a predominar na fase de decomposição avançada, mas com uma composição diferente da fase inicial. Esses achados sugerem que a análise da microbiota oral pode ser uma abordagem quantitativa e objetiva para estimar o tempo desde a morte em casos forenses, utilizando o conceito de relógio microbiano.
Artigo 14. Barbosa et al. 2012. Aplicações de fungos em estudos forenses no processo de degradação cadavérica.	Revisão de literatura, Recife, Brasil	Compreender como os fungos podem ser utilizados como indicadores temporais e espaciais em investigações forenses, especialmente na determinação do tempo de morte e na identificação de locais de decomposição. Os autores analisaram diversos estudos e casos que abordam a presença e o desenvolvimento de fungos em contextos forenses. Foram considerados aspectos como a sucessão fúngica durante a decomposição cadavérica e a influência de fatores ambientais no crescimento desses microrganismos.	.O artigo mostrou que fungos como *Aspergillus*, *Penicillium* e *Cladosporium* surgem em diferentes fases da decomposição e podem auxiliar na estimativa do intervalo post-mortem. Observou-se crescimento micelial em tecidos internos após 5 a 10 dias, variando conforme o ambiente. Os fungos também indicam possíveis movimentações do corpo e condições ambientais do local da morte, sendo úteis em contextos forenses.
Artigo 15. Javan et al. 2016. The Thanatomicrobiome: A Missing Piece of the Microbial Puzzle of	Mini revisão, Montgomery, Estados Unidos	Investigar como as comunidades microbianas nos órgãos internos humanos mudam ao longo do	O thanatomicrobioma é composto por bactérias e fungos que colonizam órgãos internos após a morte e pode ser útil

Death		tempo após a morte, com o intuito de estimar o intervalo post-mortem (IPM) com base na sucessão microbiana. A metodologia do estudo envolveu a análise de 27 cadáveres humanos com intervalos post-mortem entre 3,5 e 240 horas. Foram coletadas amostras de diversos órgãos internos, como cérebro, coração, fígado, baço, além da cavidade bucal e sangue. As comunidades bacterianas foram caracterizadas por meio do sequenciamento do gene 16S rRNA, e os dados foram analisados estatisticamente para identificar variações na composição microbiana relacionadas ao tempo após a morte e às características dos órgãos.	para estimar o intervalo post-morte (IPM). Certas bactérias (e.g., Bacteroides, Clostridium, Lactobacillus) têm padrões sucessivos previsíveis. As comunidades epinecróticas, presentes na pele e cavidades externas, também mudam com o tempo e variam conforme o ambiente (água, solo, temperatura). Estudos com suínos e ratos mostram padrões consistentes de sucessão microbiana. O conceito de "relógio microbiano" foi proposto para prever o tempo de morte com base na sucessão bacteriana.
Artigo 16. Zhou & Bian. 2018. Thanatomicrobiome composition profiling as a tool for forensic investigation	Mini revisão, Farmington, Estados Unidos	O objetivo do estudo foi investigar a sucessão e as variações das comunidades bacterianas que compõem o *thanatomicrobioma* para avaliar seu potencial na estimativa do intervalo post-mortem (IPM).. A pesquisa revisa os achados atuais sobre a diversidade da composição do *thanatomicrobioma* e os modelos preditivos propostos para estimar	O thanatomicrobioma, composto por microrganismos que colonizam órgãos internos após a morte, muda de forma previsível ao longo do tempo. Técnicas moleculares como RNA 16S são amplamente usadas, mas a metagenômica shotgun (mWGS) oferece maior resolução e potencial para rastreamento de cepas. Padrões de sucessão envolvem queda de anaeróbios (*Bacteroides,*

		o intervalo post-mortem (IPM).	*Lactobacillus*) e aumento de *Clostridiales.* Há diferenças microbianas entre órgãos, sexos e tipos de ambiente, podendo ser usadas para estimar tempo e local da morte. Modelos estatísticos e de aprendizado de máquina foram propostos para estimar IPM com base em microbiomas de pele, órgãos e solo.
Artigo 17. Fu et al. 2019. Fungal succession during mammalian cadaver decomposition and potential forensic implications	Estudo experimental, Changsha, China	Investigar a sucessão das comunidades fúngicas durante a decomposição de cadáveres de mamíferos para avaliar seu potencial na estimativa do IPM. Foram utilizados cadáveres de porcos expostos em ambientes internos e externos, nos quais foram coletadas amostras de solo e tecido em diferentes intervalos após a morte. As comunidades fúngicas presentes foram caracterizadas por meio do sequenciamento do gene ITS2, utilizando técnicas de sequenciamento de alto rendimento. Para analisar os dados, foram aplicadas avaliações da diversidade alfa e beta, além de análises de agrupamento e de correspondência canônica.	As comunidades fúngicas mostraram padrões de sucessão distintos e previsíveis. Espécies como Yarrowia lipolytica e Candida xylopsoci foram associadas a fases específicas da decomposição. O tipo de ambiente influenciou diretamente as comunidades fúngicas. O solo também apresentou mudanças microbianas relevantes, sugerindo uso na estimativa do IPM e na identificação do local original do cadáver.

Artigo 18. Neeran, J. 2021. Forensic Mycology: Fungal Evidences in Forensic Analysis: A Review	Revisão de literatura, Ad Dīwānīyah, Iraque	O objetivo do artigo foi revisar e compilar informações sobre a aplicação de fungos como evidências em análises forenses. O autor analisou 16 artigos científicos relevantes para compilar informações sobre a aplicação de fungos em análises forenses.	Fungos podem indicar tempo de morte, movimentação do corpo, local de decomposição e até causas como envenenamento. Casos reais mostraram uso de esporos e crescimento micelial para estimar o IPM.
Artigo 19. Deel et al. 2021. A Pilot Study of Microbial Succession in Human Rib Skeletal Remains during Terrestrial Decomposition	Experimental (estudo piloto), Estados Unidos	O artigo teve como objetivo realizar a análise de amostras de costelas humanas em diferentes estágios de decomposição (1 a 9 meses) A composição microbiana foi analisada por meio de sequenciamento de DNA, identificando as comunidades bacterianas presentes ao longo do tempo. Além disso, foram realizadas análises estatísticas para correlacionar a composição microbiana com o tempo desde a morte.	Houve identificação de sucessão microbiana com variação sazonal. Modelo preditivo do IPM com erro médio de ±34 dias. Sugestão de que a análise microbiana em ossos pode ser útil na estimativa do IPM.
Artigo 20. Tozzo et al. Post-Mortem Interval and Microbiome Analysis through 16S rRNA Analysis: A Systematic Review	Revisão sistemática, Padova, Itália	Análise sistemática de 25 estudos (2000–2022), em modelos humanos e animais, que utilizaram sequenciamento de 16S rRNA para estimar o intervalo post-mortem (IPM) a partir da sucessão microbiana em diferentes partes do corpo e em amostras de solo. A revisão	A composição do microbioma varia de forma previsível após a morte, especialmente em órgãos como ceco, intestino, cavidade oral, pele e solo. Bactérias como *Proteobacteria*, *Firmicutes* e *Clostridium* são marcadores recorrentes de decomposição.

		incluiu critérios como a qualidade das amostras, os métodos de coleta e processamento, bem como as técnicas de sequenciamento empregadas. A análise dos dados foi realizada de forma a identificar padrões na composição do microbioma relacionados ao tempo post-mortem e seguiu as diretrizes PRISMA.	Modelos preditivos usando algoritmos como Random Forest e redes neurais apresentaram erros médios de ±14 a ±34 horas (ou dias), dependendo do modelo e tempo de decomposição. Fatores como local de amostragem, condições ambientais e diferenças interindividuais afetam a precisão. Microbioma de órgãos internos e de solo ao redor dos corpos pode ser mais informativo que o da pele nas fases avançadas da decomposição.
Artigo 21. Abdoun et al. 2023. Thanatomicrobiome in forensic medicine	Revisão de literatura, Bejaia, Argélia	Análise de literatura sobre o papel de microrganismos (thanatomicrobioma e necrobioma) na decomposição cadavérica e sua aplicação na medicina legal. A revisão foi baseada em uma análise crítica de estudos recentes sobre a composição e dinâmica do *thanatomicrobioma* em diferentes tecidos humanos pós-morte. Foram considerados aspectos como a diversidade microbiana, as mudanças temporais nas comunidades bacterianas e as técnicas utilizadas para	O thanatomicrobioma muda de forma previsível após a morte e pode ser usado para estimar o intervalo post-morte (IPM). Fatores como temperatura, umidade, dieta e uso de antibióticos afetam a composição microbiana. Certas bactérias (como *Clostridium, Bacteroides, Lactobacillus)* estão associadas a diferentes estágios da decomposição. A análise do microbioma pode indicar causas de morte, como afogamento, infecções e overdose.

		a identificação microbiana.	
Artigo 22. Gemmellaro et al. 2023. Assessment of Fungal Succession in Decomposing Swine Carcasses Using DNA Metabarcoding	Estudo experimental, Estados Unidos	O objetivo deste estudo foi investigar como a sucessão de fungos ao longo do tempo de decomposição em carcaças de suínos pode contribuir para a estimativa do IPM. Os autores deixaram carcaças de suínos em decomposição em ambiente natural e coletaram amostras em diferentes estágios (como inchaço e decomposição ativa) e uttilizaram a técnica de DNA metabarcoding (região ITS2) para identificar os fungos presentes ao longo do tempo, correlacionando a sucessão fúngica com o tempo decorrido desde a morte, contribuindo para estimativas do IPM.	Os resultados mostraram que a diversidade fúngica aumentou conforme o tempo de decomposição avançava, com espécies específicas aparecendo em momentos distintos do processo. Algumas espécies fúngicas surgiram apenas em estágios mais avançados da decomposição, o que indica que sua presença pode servir como indicador do IPM. Além disso, a composição fúngica variou entre diferentes partes do corpo, sugerindo que certos locais anatômicos podem ser mais informativos para a estimativa do tempo de morte com base no perfil fúngico.
Artigo 23. Mason et al. 2024. Environmental predictors impact microbial-based postmortem interval (IPM) estimation models within human decomposition soils	Estudo experimental, Knoxville, Estados Unidos	Análise da sucessão bacteriana e fúngica em solos sob 19 cadáveres humanos; uso de modelos Random Forest com e sem variáveis ambientais (temperatura, pH, etc.).	Modelos com dados bacterianos (16S) estimaram o IPM com maior precisão que os baseados em fungos (ITS). A inclusão de variáveis ambientais melhorou a acurácia, principalmente nos modelos fúngicos.

Artigo 24. Piepenbring et al. 2024. Exploring the Diversity of Culturable Fungi on Corpses for Forensic Applications	Estudo experimental, revisão de literatura, Frankfurt am Main, Alemanha	O estudo teve como objetivo ampliar o conhecimento sobre a diversidade de fungos cultiváveis presentes em cadáveres humanos, visando avaliar seu potencial como indicadores forenses, especialmente na estimativa do intervalo post-mortem (IPM).Foram coletadas amostras de fungos visíveis a olho nu em 36 cadáveres encontrados em diversos ambientes entre maio de 2020 e outubro de 2021. Os fungos foram isolados, cultivados e identificados por meio de características morfológicas e sequenciamento molecular (barcoding). Além disso, foi compilada uma lista abrangente de registros de fungos em cadáveres a partir da literatura existente, resultando em uma checklist com 306 registros de 104 espécies fúngicas.	A análise revelou que 17 espécies de fungos foram identificadas em cadáveres pela primeira vez. Observou-se uma correlação negativa significativa entre o estágio de decomposição dos corpos e o valor de atividade de água (a_w) ideal para o crescimento das espécies fúngicas, indicando que fungos adaptados a ambientes mais secos tendem a colonizar corpos em estágios mais avançados de decomposição. Além disso, algumas espécies fúngicas mostraram-se específicas para determinados ambientes, como interiores ou exteriores, sugerindo que sua presença pode fornecer informações sobre o local de permanência do cadáver e o IPM, embora aponte a necessidade de mais pesquisas sobre o tema.

4. DISCUSSÃO

Com base nos dados levantados, é possível identificar tendências e desafios metodológicos que permeiam o uso da microbiologia na estimativa do intervalo post-mortem (IPM). Esses estudos evidenciam um interesse gradativo na utilização de comunidades como marcadores temporais de decomposição. Contudo, também revelam limitações que estão relacionadas à padronização de métodos, variações ambientais, diferenças interindividuais e o desprovimento de estudos longitudinais

que permitem a análise precisa da sucessão microbiana ao longo do tempo. Desse modo, a discussão a seguir procura integrar os principais achados da literatura com implicações práticas e teóricas da microbiologia forense aplicada ao IPM, destacando os avanços alcançados, limitações enfrentadas e expectativas futuras da área.

4.1 Avanços na aplicação da microbiologia forense no Intervalo Post-Mortem (IPM)

O interesse científico pela microbiologia forense vem se intensificando cada vez mais e tem sido documentado em estudos recentes (Barbosa et al., 2012; Oliveira, 2022), refletindo o avanços de técnicas e sua relevância sendo reconhecida para estimativas de intervalo post-mortem (IPM). O uso de tecnologias de sequenciamento de DNA como 16S rRNA, ITS (região- Internal Transcribed Spacer) e metagenômica shotgun têm proporcionado uma análise precisa das comunidades microbianas presentes no ambiente post-morte (Guo et al., 2016; Liu et al., 2020; Mason et al., 2024).

Entre os conceitos estudados, “relógio microbiano” (ou “microbial clock”) vem se destacando cada vez mais e mostra potencial em determinar o tempo de morte baseado nas alterações das comunidades bacterianas ao longo do tempo. Essas mudanças, conhecidas como “sucessão microbiana” , são influenciadas por fatores como localização anatômica, o ambiente externo e o perfil biológico do indivíduo. Um dos focos mais estudados dentro dessa abordagem é o thanatomicrobioma, que se resume a dinâmica de sucessão microbiana observada em tecido de órgãos internos como baço, fígado, coração e cérebro permite ser um marcador temporal para a estimativa do IPM (Javan et al., 2016; Abdoun et al., 2023).

Adicionalmente, as comunidades epinecróticas, formadas por microrganismos que se desenvolvem na superfície externa do cadáver durante a decomposição, desempenham um papel significativo na microbiologia forense. Esses microrganismos — especialmente bactérias e fungos — inicialmente colonizam a pele e os orifícios naturais logo após a morte e sofrem sucessão ao longo do tempo post-mortem, influenciados por fatores ambientais e pelas etapas de decomposição. Por apresentarem padrões temporais relativamente previsíveis, essas comunidades vêm sendo investigadas como potenciais bioindicadores do intervalo post-mortem (IPM). A

análise da composição e da dinâmica dessas populações pode, portanto, fornecer dados valiosos para estimar o tempo decorrido desde a morte, além de oferecer pistas sobre o ambiente onde o corpo esteve exposto. (Pereira, 2017)

Bactérias anaeróbias obrigatórias, ou seja, bactérias que precisam de um ambiente sem oxigênio para crescer, são constantemente associadas a essa sucessão como *Clostridium, Bacteroides, Lactobacillus*, que apresentam uma relativa abundância, durante o estágio de decomposição. Para a identificação e caracterização dessas comunidades bacterianas, o sequenciamento do gene 16S rRNA é amplamente usado, pois possui regiões conservadas para ampliação universal e regiões variáveis que permitem a distinção entre espécies. Por isso, é considerado padrão-ouro para a análise da diversidade bacteriana (Guo et al., 2016; Mason et al., 2024).

Os fungos também têm se mostrado relevantes na estimativa do intervalo post-mortem. Estudos experimentais revelam que determinadas espécies fúngicas demonstram padrões de sucessão previsível, especialmente em tecidos e solos em decomposição (Fu et al., 2019; Gemmellaro et al., 2023). A observação e investigação dessas comunidades é feita por um marcador genético muito utilizado, o ITS (Internal Transcribed Spacer), utilizado na micologia forense para identificar e caracterizar comunidades fúngicas devido a sua alta variabilidade entre espécies, possibilitando assim análise precisa da sucessão fúngica durante a decomposição cadavérica (Fu et al., 2019; Gemmellaro et al., 2023). Ainda que essa microbiota seja menos explorada do que a microbiota bacteriana, ela representa uma ferramenta promissora, especialmente em ambientes onde o desenvolvimento bacteriano é limitado.

Outro tipo de sequenciamento utilizado na microbiologia forense é a técnica metagenômica shotgun, cujo uso permite identificar as funções genéticas e potenciais metabólicos de bactérias, fungos e vírus, o que têm contribuído para aprimorar os modelos preditivos da estimativa do intervalo post-mortem.

4.2 Desafios e limitações metodológicas

Apesar do crescimento da área de microbiologia forense, com foco para a estimativa do intervalo post-mortem (IPM), há desafios metodológicos que dificultam a padronização e aplicação dos modelos propostos. Um dos empecilhos é a falta de

uniformização nos protocolos de coleta, armazenamento e análise das amostras que compromete a comparabilidade entre estudos e a validação de dados (Clarke et al., 2017; Metcalf et al., 2019).

Outro lado crítico é a grande influência dos fatores ambientais como temperatura, umidade, tipo de solo, radiação solar e presença de insetos — sobre a dinâmica da sucessão microbiana, o que dificulta a reprodutibilidade de padrões microbianos em diferentes regiões ou estações do ano (Mason et al., 2024).

Ainda há uma variabilidade interindividual, ou seja, as características biológicas do indivíduo como idade, sexo, dieta, uso de medicamentos e doenças, microbioma pré-existente, que dificulta a criação de modelos universais (Abdoun et al., 2023; Adserias-Garriga et al., 2023). No que diz respeito à utilização de modelos experimentais com animais, ainda é considerado um desafio recorrente. Embora sejam de fato úteis, não representam fielmente a complexidade dos processos de decomposição humana (Zhou & Bian, 2018; Fu et al., 2019). A falta de estudos longitudinais com cadáveres humanos com amostragem em múltiplos pontos de tempos, acaba limitando a compreensão apropriada das sucessões microbianas reais (Deel et al., 2021).

Além disso, dentre a variedade de desafios para pesquisadores que estudam comunidades microbianas durante a decomposição, vale mencionar o sequenciamento de alto rendimento, também conhecido como Next-Generation Sequencing (NGS) que ao mesmo tempo que representa um conjunto de tecnologias que permite sequenciar grandes volumes de DNA ou RNA de forma rápida, automatizada e com alto nível de paralelismo, é considerado de alto custo para análises de rotina (Guo et al. 2016).

Evidencia-se, portanto, a necessidade da criação de estratégias integradas que considerem essas variáveis biológicas e ambientais, além de esforços para desenvolvimento de protocolos padronizados e banco de dados microbiológicos que visem tornar os modelos de IPM mais precisos e aplicáveis em diferentes contextos geográficos e legais.

4.3. Necessidades de pesquisa na área

Diante desse cenário, embora a microbiologia forense se destaque por oferecer

enorme potencial para se tornar uma ferramenta forense padrão e amplamente aceita pela comunidade de cientistas forenses com o fito de estimar o intervalo post-mortem, persiste a necessidade de pesquisas básicas antes que isso possa ser concretizado (Guo et al. 2016). É sabido que após a morte, o sistema imunológico torna-se inativo, e o ambiente rico em nutrientes do cadáver favorece intensamente a proliferação microbiana. Essa abundância de microrganismos, em um cenário de decomposição, representa uma oportunidade valiosa para que a comunidade científica avance no conhecimento sobre as dinâmicas microbianas post-mortem. No entanto, a literatura ainda é limitada quanto à identificação precisa das bactérias que colonizam os órgãos internos humanos nesse contexto, o que reforça a necessidade de mais estudos experimentais e aprofundados. (Javan et al., 2016)

Outrossim, poucos estudos avaliaram a sensibilidade das tecnologias atuais para registro de perfis do microbioma através de amostras com quantidades vestigiais. Diante da necessidade de comparar grandes volumes de dados e considerar diversas variáveis simultaneamente, torna-se essencial o desenvolvimento e a utilização de novas abordagens estatísticas e computacionais capazes de processar dados microbianos de alta complexidade no contexto forense. Isso evidencia a importância da aplicação de tecnologias avançadas em investigações e pesquisas futuras na área que irão beneficiar também a inovação de técnicas que auxiliem na estimativa do IPM (Clarke et al. 2017).

Embora os fungos sejam amplamente distribuídos no ambiente e possuam grande diversidade, sua aplicação na ciência forense ainda não é devidamente explorada. A utilização da micologia na análise da decomposição cadavérica para fins investigativos permanece limitada, conforme apontam os estudos disponíveis (Piepenbring et al. 2024). Por não fornecerem indícios visíveis com facilidade, os fungos apresentam desafios na identificação, exigindo do pesquisador conhecimento especializado para reconhecer seu crescimento em restos humanos ou em vestígios potencialmente relevantes para registro.

Além disso, a escassez de publicações voltadas à Micologia Forense, evidenciada no levantamento bibliográfico, reforça a necessidade de ampliar a divulgação e o desenvolvimento dessa área, que pode representar uma ferramenta valiosa quando devidamente aplicada no contexto das investigações forenses (Barbosa et al., 2012).

4.4 Potencial e perspectiva futura na área

Diante dos avanços científicos recentes, as perspectivas futuras para a microbiologia forense mostram-se promissoras, especialmente no que diz respeito à aplicação de microrganismos na estimativa do intervalo post-mortem, que apesar de estar em fase de desenvolvimento, tem despertado crescente interesse na comunidade científica, impulsionando investigações voltadas ao tanatomicrobioma (Abdoun et al., 2023). Estudos mostraram que a vasta diversidade e as interações complexas das comunidades microbianas do solo e dos cadáveres têm grande potencial de aplicação forense, nomeadamente para estimativa do intervalo postmortem.

O sequenciamento de última geração prevê a capacidade dos ecologistas microbianos de caracterizar comunidades microbianas altamente diversas, sugerindo novas oportunidades em todas as disciplinas científicas, incluindo a microbiologia forense. (Pereira, 2017). Vale ressaltar ainda que entre as abordagens consideradas promissoras para o avanço da microbiologia forense, destaca-se o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, como o Random Forest. Segundo Breiman (2001), essa técnica permite analisar grandes volumes de dados microbiológicos, identificando padrões complexos e selecionando variáveis relevantes para a estimativa do intervalo post-mortem. Sua aplicação pode aprimorar significativamente a precisão das análises forenses, especialmente quando combinada com métodos de sequenciamento de alto rendimento citados anteriormente.

A aplicação de outras tecnologias emergentes, como o sequenciamento metagenômico e ferramentas de inteligência artificial, tende a ampliar significativamente a capacidade analítica desse campo. Grupos de pesquisa nas áreas de ciência do microbioma reconhecem o potencial da aplicação de novas abordagens para melhor compreender a ecologia da decomposição e seu potencial para desenvolver uma nova ferramenta para estimar o IPM, uma vez que a comunidade de investigação médico-legal de óbitos tem expressado a necessidade de novas tecnologias confiáveis para estimar o IPM. (Sena, 2022).

Nesse cenário, espera-se que novos estudos contribuam para consolidar a microbiologia forense como uma ferramenta robusta e complementar na investigação criminal, superando limitações atuais e expandindo seu potencial de aplicação

(Metcalf, 2019).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão da literatura aponta para o desafio de se constituir modelos investigativos capazes de integrar o uso da microbiologia forense no que se refere à estimativa do intervalo post-mortem, como ferramenta complementar e confiável nas ciências forenses. Com base nos estudos nacionais e internacionais foi evidente observar que as comunidades bacterianas e fúngicas desempenham papel principal na decomposição cadavérica e demonstra padrões de sucessão relativamente previsíveis ao longo do tempo. Esse comportamento acaba tornando essas comunidades como potenciais bioindicadores para determinar o tempo de morte de forma mais precisa, especialmente em casos em que métodos tradicionais mostram-se restritos.

Neste sentido, diversos estudos científicos têm comprovado a eficácia da microbiologia forense na estimativa do intervalo post-mortem, por meio da análise da sucessão microbiana. Técnicas avançadas como fungos, permite identificar e caracterizar com precisão as comunidades microbianas presentes durante a decomposição. Ademais, o desenvolvimento de modelos preditivos como o uso do algoritmo Random Forest, possibilita a análise de grande volumes de dados microbianos, o que aumenta significativamente a acurácia na determinação do tempo de morte. Esses avanços reforçam o papel dos microrganismos como indicadores temporais confiáveis, superando, portanto, métodos tradicionais e suas limitações.

Entretanto, apesar de apresentar um futuro promissor no que se refere a contribuições relevantes dentro das ciências forenses, o campo da microbiologia forense, com foco em estimar o intervalo post-mortem, ainda enfrenta entraves diversos que comprometem sua aplicação mais ampla e precisa. Entre os principais obstáculos estão a variabilidade ambiental, como temperatura, umidade e exposição ao oxigênio, que afetam significativamente o crescimento e a sucessão microbiana nos corpos em decomposição. Além disso, a escassez de bancos de dados microbiológicos forenses padronizados dificulta a comparação de resultados entre estudos e locais distintos, bem como o alto custo de tecnologias utilizadas no laboratório forense. Por fim, a falta de protocolos metodológicos e a necessidade de maior investimento em pesquisas e estudos experimentais limitam a consolidação dessa abordagem como uma ferramenta

precisa na estimativa do IPM.

Sob esse viés, a necessidade de mais estudos nesta perspectiva é indispensável para auxiliar a validação e padronização de metodologias, como também explorar a diversidade microbiana em diferentes contextos e condições ambientais. Investigações mais aprofundadas contribuirão expressivamente para a precisão das estimativas do intervalo post-mortem, fortalecendo a aplicação dessa abordagem no campo pericial e aprimorando a produção de provas em investigações criminais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, D. M. et al. Aplicações de fungos em estudos forenses no processo de degradação cadavérica. *SciELO Preprints*, 2012. Disponível em: https://scispace.com/pdf/aplicacao-de-fungos-em-estudos-forenses-no-processo-de-2izl5g6hyu.pdf. Acesso em: 23 de março 2025.

GUO, J. et al. Potential use of bacterial community succession for estimating post-mortem interval as revealed by high-throughput sequencing. *Scientific Reports*, v. 6, 2016. Disponível em: https://www.nature.com/articles/srep24197. 23 de março 2025.

JAVAN, G. T. et al. The Thanatomicrobiome: A Missing Piece of the Microbial Puzzle of Death. *Scientific Reports*, v. 6, 2016. Disponível em: https://www.nature.com/articles/srep29598. Acesso em: 23 de março 2025.

NOVO, P. P. Microbiologia Forense e Estimativa do Intervalo Postmortem. 2017. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/107276/2/211988.pdf. Acesso em: 24 de março 2025.

CLARKE, T. H. et al. Integrating the Microbiome as a Resource in the Forensics Toolkit. *Forensic Science International: Genetics*, v. 28, 2017. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28728057/. Acesso em: 24 de março de 2025.

PECHAL, J. L. et al. A large-scale survey of the postmortem human microbiome. *Scientific Reports*, v. 8, 2018. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-018-23989-w. Acesso em: 24 de março de 2025.

ZHOU, C.; BIAN, L. Thanatomicrobiome composition profiling as a tool for forensic investigation. *Frontiers in Microbiology*, v. 9, 2018. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6197100/. Acesso em: 02 de abril de 2025.

BENEDETTI, C. J. et al. “From womb to tomb; we’re bound to others”: microbiome in forensic science. *Forensic Science International: Genetics*, v. 39, 2019. Disponível em:

https://iris.unica.it/retrieve/handle/11584/282861/379941/813-2779-1-PB.pdf. Acesso em: 02 de abril de 2025.

FU, S. et al. Fungal succession during mammalian cadaver decomposition and potential forensic implications. *Scientific Reports*, v. 9, 2019. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-019-49361-0. Acesso em: 10 de abril de 2025.

METCALF, J. L. et al. Estimating the postmortem interval using microbes: Knowledge gaps. *Forensic Science International: Genetics*, v. 39, 2019. Disponível em: https://www.fsigenetics.com/article/S1872-4973(18)30403-4/fulltext. Acesso em: 10 de abril de 2025.

GARCÍA, J. E. et al. Impact of the Human Microbiome in Forensic Sciences. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 86, n. 17, 2020. Disponível em: https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.01451-20. Acesso em: 12 de abril de 2025.

LIU, R. et al. Predicting postmortem interval based on microbial community sequences. *Forensic Microbiology*, 2020. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/673071389/Predicting-postmortem-interval-based-on-microbial. Acesso em: 12 de abril de 2025.

JASIM, S. A. Forensic Mycology: Fungal Evidences in Forensic Analysis: A Review. *ResearchGate*, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/354651688_Forensic_Mycology_Fungal_Evidences_in_Forensic_Analysis_A_Review. Acesso em: 12 de abril de 2025.

DEEL, H. R. et al. A Pilot Study of Microbial Succession in Human Rib Skeletal Remains during Terrestrial Decomposition. *mSphere*, v. 6, n. 3, 2021. Disponível em: https://journals.asm.org/doi/10.1128/msphere.00455-21. Acesso em: 12 de abril de 2025.

GAUTAM, A.; RAWAL, G. Microbial Clock: A Review on Forensic Microbiology. *ResearchGate*, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/361597320_Microbial_Clock_A_review_on_forensic_microbiology_for_crime_scene_investigations. Acesso em: 12 de abril de 2025.

OLIVEIRA, M. V. S. Verificação dos padrões globais do conhecimento científico sobre a microbiologia forense. 2022. Disponível em: https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/5242/1/TCC%20final%20Marcos.pdf. Acesso em: 12 de abril de 2025.

TOZZO, P. et al. Post-Mortem Interval and Microbiome Analysis through 16S rRNA Analysis: A Systematic Review. *Diagnostics*, v. 12, n. 11, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-4418/12/11/2641. Acesso em: 12 de abril de 2025.

ABDOUN, M.; AMIR, A.; FATIMA, B. Thanatomicrobiome in forensic medicine. *New Microbiologica*, v. 46, n. 3, 2023. Disponível em: https://newmicrobiologica.org/wp-content/uploads/2023/09/MICRO_3_2023_1.2_REVIEW_496N369_Amir_236-245.pdf. Acesso em: 12 de abril de 2025.

GEMMELLARO, M. et al. Assessment of Fungal Succession in Decomposing Swine Carcasses Using DNA Metabarcoding. *Journal of Fungi*, v. 9, n. 9, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2309-608X/9/9/866. Acesso em: 23 de abril de 2025.

WEÇOSKI, L. E.; DALZOTO, P. R. Microbiologia Forense: uma revisão. *Revista Brasileira de Criminalística*, v. 12, n. 2, 2023. Disponível em: https://revista.rbc.org.br/index.php/rbc/article/view/572/360. Acesso em: 23 de abril de 2025.

MOITAS, C.; CALDAS, A. L.; SAMPAIO-MAIA, B. Microbiology and Postmortem Interval: A Systematic Review. *International Journal of Legal Medicine*, v. 137, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12024-023-00733-z. Acesso em: 25 de abril de 2025.

ADSERIAS-GARRIGA, J. et al. Dynamics of the oral microbiota as a tool to estimate time since death. *International Journal of Legal Medicine*, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317960467_Dynamics_of_the_Oral_Microbiota_as_a_Tool_to_Estimate_Time_Since_Death. Acesso em: 25 de abril de 2025.

MASON, A. R. et al. Environmental predictors impact microbial-based postmortem interval (PMI) estimation models within human decomposition soils. *mSystems*, v. 9, n. 1, 2024. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11469530/. Acesso em: 25 de abril de 2025.

PIEPENBRING, M. et al. Exploring the Diversity of Culturable Fungi on Corpses for Forensic Applications. *Mycological Progress*, v. 23, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11557-024-02021-8. Acesso em: 25 de abril de 2025.