

ANÁLISE TOXICOLÓGICA EM CABELO NA TOXICOLOGIA FORENSE: APLICAÇÕES, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS CLÍNICAS E PERICIAIS

TOXICOLOGICAL ANALYSIS OF HAIR IN FORENSIC TOXICOLOGY: APPLICATIONS, LIMITATIONS, AND CLINICAL AND EXPERT PERSPECTIVES

Sara Luciana de Andrade¹

Resumo: A análise toxicológica em cabelo tem se destacado como uma importante ferramenta na toxicologia clínica e forense devido à sua capacidade de identificar a exposição prolongada a drogas de abuso, medicamentos e outras substâncias químicas. Diferentemente das matrizes biológicas convencionais, como sangue, urina e saliva, o cabelo apresenta ampla janela de detecção, permitindo reconstruir o histórico de consumo durante semanas ou meses. O presente estudo teve como objetivo analisar as aplicações e as limitações da análise toxicológica em cabelo na investigação clínica e forense, destacando sua relevância para a identificação do uso de substâncias psicoativas, os métodos analíticos empregados e os desafios relacionados à interpretação dos resultados. Trata-se de uma pesquisa bibliográfica, de abordagem qualitativa e natureza descritiva, realizada por meio da análise de artigos científicos, livros, diretrizes internacionais e documentos técnicos publicados em bases de dados nacionais e internacionais. Os resultados evidenciaram que técnicas como a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS) apresentam elevada sensibilidade e especificidade, contribuindo para a confiabilidade dos exames toxicológicos. Entretanto, fatores como contaminação externa, pigmentação capilar, tratamentos cosméticos, crescimento dos fios e ausência de padroniza-

¹ Mestranda pela Universidade Ivy Enber Christian University – E-mail: drasaraandrade@yahoo.com - ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-6094-502X>



ção universal na interpretação dos resultados representam importantes limitações para sua aplicação. Conclui-se que a análise toxicológica em cabelo constitui uma ferramenta de elevado valor científico para a investigação clínica e forense, desde que os resultados sejam interpretados de forma integrada, considerando aspectos laboratoriais, clínicos e periciais, além da adoção de protocolos analíticos validados e recomendações técnicas internacionalmente reconhecidas.

Palavras-chave: Análise toxicológica em cabelo; Ciências forenses; Investigação forense; LC-MS/MS; Toxicologia forense.

Abstract: Hair toxicological analysis has become an important tool in clinical and forensic toxicology due to its ability to detect long-term exposure to drugs of abuse, medications, and other chemical substances. Unlike conventional biological matrices such as blood, urine, and saliva, hair provides a wide detection window, allowing the reconstruction of an individual's history of substance use over weeks or months. This study aimed to analyze the applications and limitations of hair toxicological analysis in clinical and forensic investigations, highlighting its relevance for detecting psychoactive substance use, the analytical methods employed, and the challenges associated with result interpretation. This is a qualitative, descriptive bibliographic review based on the analysis of scientific articles, books, international guidelines, and technical documents retrieved from national and international databases. The findings demonstrated that techniques such as Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS) and Liquid Chromatography–Tandem Mass Spectrometry (LC-MS/MS) provide high sensitivity and specificity, contributing to the reliability of toxicological examinations. However, factors such as external contamination, hair pigmentation, cosmetic treatments, hair growth rate, and the lack of universal standardization in result interpretation remain significant limitations to their application. It is concluded that hair toxicological analysis is a valuable scientific tool for clinical and forensic investigations, provided that results are interpreted comprehensively by considering laboratory, clinical, and forensic aspects, together with validated analytical protocols and internationally



recognized technical guidelines.

Keywords: Forensic investigation; Forensic toxicology; Hair toxicological analysis; LC-MS/MS; Forensic sciences.

INTRODUÇÃO

A toxicologia forense constitui uma área multidisciplinar das Ciências da Saúde que desempenha papel fundamental na investigação de eventos relacionados ao uso de substâncias psicoativas, medicamentos, venenos e outros agentes químicos capazes de provocar alterações fisiológicas ou contribuir para a ocorrência de crimes, acidentes e óbitos.

Sua atuação integra conhecimentos da toxicologia, farmacologia, química analítica, medicina legal e biologia molecular, permitindo a identificação, quantificação e interpretação da presença de substâncias em diferentes matrizes biológicas.

Nesse contexto, os exames toxicológicos representam importantes ferramentas para subsidiar decisões clínicas, periciais e judiciais, fornecendo evidências científicas que auxiliam na reconstrução de fatos e na determinação da exposição a compostos químicos (Levine, 2020).

Tradicionalmente, amostras de sangue, urina e saliva são amplamente utilizadas na investigação toxicológica devido à facilidade de coleta e à capacidade de detectar o consumo recente de drogas e medicamentos. Entretanto, essas matrizes apresentam limitações relacionadas ao curto período de detecção das substâncias, dificultando a identificação de exposições ocorridas semanas ou meses antes da coleta.

Diante dessa limitação, a análise toxicológica em cabelo vem ganhando destaque na toxicologia clínica e forense por possibilitar uma janela de detecção significativamente mais ampla, permitindo avaliar padrões de consumo crônico ou repetitivo de drogas de abuso, medicamentos e outras substâncias químicas ao longo do tempo (Cooper; Kronstrand; Kintz, 2019).



O cabelo apresenta características biológicas que o tornam uma matriz diferenciada para investigações retrospectivas. Durante seu crescimento, substâncias presentes na circulação sanguínea podem ser incorporadas à estrutura capilar, permanecendo estáveis por meses ou até anos, dependendo do comprimento da amostra analisada.

Considerando que o crescimento médio do cabelo humano é de aproximadamente um centímetro por mês, a segmentação dos fios possibilita estabelecer uma cronologia aproximada da exposição às substâncias, característica especialmente relevante em investigações criminais, perícias trabalhistas, monitoramento terapêutico, programas de abstinência, processos de guarda de crianças, acompanhamento de usuários de drogas e avaliações relacionadas à aptidão profissional (Kintz, 2018).

Os avanços tecnológicos observados nas últimas décadas contribuíram significativamente para o aprimoramento da análise toxicológica capilar. Técnicas instrumentais altamente sensíveis e específicas, como a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS), permitem identificar concentrações extremamente baixas de diferentes compostos químicos com elevada precisão analítica.

Esses métodos reduziram significativamente a ocorrência de resultados falso-positivos e falso-negativos, aumentando a confiabilidade dos exames e fortalecendo sua utilização como prova científica em processos judiciais e investigações forenses (UNODC, 2023).

Apesar das inúmeras vantagens, a interpretação dos resultados obtidos por meio da análise em cabelo permanece um dos maiores desafios da toxicologia forense contemporânea. Diversos fatores podem interferir na incorporação e permanência das substâncias nos fios, incluindo características individuais, cor e tipo do cabelo, tratamentos cosméticos, frequência de exposição, metabolismo, via de administração da droga e, principalmente, a possibilidade de contaminação externa.

A deposição ambiental de drogas por fumaça, poeira ou contato físico pode ocasionar resultados que exigem criteriosa avaliação laboratorial, tornando indispensável a adoção de protocolos rigorosos de descontaminação das amostras antes da realização das análises (Society of Hair Testing,



2023).

Além das limitações relacionadas à contaminação externa, ainda existem desafios quanto à padronização internacional dos valores de referência, dos pontos de corte analíticos e dos critérios interpretativos empregados pelos diferentes laboratórios. Essas diferenças podem influenciar diretamente a interpretação clínica e pericial dos resultados, especialmente em situações que envolvem responsabilização criminal, investigação de mortes suspeitas, monitoramento ocupacional ou avaliação da abstinência em programas de tratamento da dependência química.

Dessa forma, a interpretação dos exames deve considerar não apenas os resultados laboratoriais, mas também o contexto clínico, histórico do indivíduo, cadeia de custódia da amostra e demais evidências disponíveis.

Diante da crescente utilização da análise toxicológica em cabelo na prática clínica e forense, torna-se necessário discutir criticamente suas potencialidades, limitações e aplicações.

Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar, por meio de revisão da literatura científica, as principais aplicações da análise toxicológica em cabelo na investigação clínica e forense, abordando sua janela de detecção, os métodos analíticos empregados, especialmente LC-MS/MS e GC-MS, os fatores que podem interferir nos resultados, incluindo a contaminação externa, bem como os desafios relacionados à interpretação dos exames toxicológicos.

Espera-se que esta revisão contribua para ampliar a compreensão sobre essa importante ferramenta diagnóstica e pericial, destacando sua relevância para as Ciências da Saúde e para a produção de evidências científicas confiáveis no âmbito da toxicologia forense.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Analisar as aplicações e as limitações da análise toxicológica em cabelo na investigação clínica e forense, destacando sua importância como ferramenta para detecção do uso de substâncias psi-



coativas, os métodos analíticos empregados e os desafios relacionados à interpretação dos resultados.

Objetivos Específicos

Descrever os princípios da análise toxicológica em cabelo e sua utilização na toxicologia clínica e forense.

Discutir a janela de detecção proporcionada pela análise capilar em comparação com outras matrizes biológicas.

Apresentar as principais técnicas analíticas utilizadas na identificação de substâncias, com ênfase na cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e na cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS).

Analisar as limitações da análise toxicológica em cabelo, especialmente os riscos de contaminação externa e os fatores que interferem na incorporação das substâncias aos fios.

Discutir os desafios relacionados à interpretação dos resultados toxicológicos e sua aplicação na prática clínica e na investigação forense.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica, de abordagem qualitativa e natureza descritiva, desenvolvida com o objetivo de analisar as aplicações e as limitações da análise toxicológica em cabelo na investigação clínica e forense.

A pesquisa bibliográfica permite reunir, organizar e interpretar conhecimentos científicos já publicados, proporcionando uma compreensão ampla sobre o estado atual da temática investigada. Segundo Gil (2019), esse tipo de pesquisa é fundamentado na análise sistemática de materiais já elaborados, possibilitando a construção de discussões críticas baseadas em evidências científicas.

Para a realização da pesquisa, foram consultadas bases de dados nacionais e internacionais



reconhecidas na área das Ciências da Saúde, incluindo Scientific Electronic Library Online (SciELO), PubMed/MEDLINE, Biblioteca Virtual em Saúde (BVS), Scopus e Google Acadêmico. Também foram utilizados documentos técnicos e diretrizes publicadas por organismos de referência, como o United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC), a Society of Hair Testing (SoHT) e a European Workplace Drug Testing Society (EWDTS), considerando sua relevância para a padronização dos exames toxicológicos e para a interpretação dos resultados em diferentes contextos clínicos e periciais.

A estratégia de busca foi realizada por meio da combinação de descritores em português e inglês, utilizando os operadores booleanos AND e OR para ampliar a recuperação de estudos pertinentes. Entre os principais descritores empregados destacam-se: “toxicologia forense”, “análise toxicológica em cabelo”, “hair analysis”, “hair testing”, “forensic toxicology”, “LC-MS/MS”, “GC-MS”, “janela de detecção”, “contaminação externa”, “interpretação toxicológica” e “amostras biológicas”.

A utilização desses termos possibilitou identificar estudos relacionados às aplicações clínicas e forenses da análise capilar, aos métodos analíticos empregados e aos fatores que interferem na interpretação dos exames toxicológicos.

Foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão para garantir a qualidade e a atualidade das informações analisadas. Foram incluídos artigos científicos publicados preferencialmente entre os anos de 2018 e 2025, revisões de literatura, estudos experimentais, diretrizes técnicas e documentos oficiais relacionados à toxicologia forense, aos exames toxicológicos em cabelo e às técnicas instrumentais de cromatografia acoplada à espectrometria de massas.

Também foram considerados trabalhos clássicos amplamente reconhecidos na literatura quando indispensáveis para a fundamentação conceitual do tema. Foram excluídos estudos duplicados, publicações sem texto completo disponível, trabalhos que não abordavam diretamente a análise toxicológica em cabelo e documentos cuja metodologia apresentava limitações que comprometessem a confiabilidade dos resultados.

Após a seleção dos estudos, realizou-se a leitura exploratória, seguida da leitura analítica



e interpretativa das publicações incluídas. Os dados extraídos foram organizados de forma temática, contemplando aspectos relacionados às aplicações da análise toxicológica em cabelo, à janela de detecção das substâncias, às técnicas analíticas empregadas, especialmente a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS), bem como às limitações decorrentes da contaminação externa, dos fatores biológicos que influenciam a incorporação das substâncias aos fios e dos desafios envolvidos na interpretação dos resultados laboratoriais.

A análise dos dados foi conduzida de forma descritiva e crítica, buscando comparar as evidências disponíveis na literatura científica e identificar consensos, divergências e lacunas relacionadas ao uso da análise toxicológica em cabelo na investigação clínica e forense.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise toxicológica em cabelo e sua utilização na toxicologia clínica e forense

A análise toxicológica em cabelo consolidou-se como uma importante ferramenta na toxicologia clínica e forense por possibilitar a identificação da exposição prolongada a drogas de abuso, medicamentos, álcool e outras substâncias químicas. Diferentemente do sangue, da urina e da saliva, essa matriz biológica permite avaliar o histórico de consumo durante semanas ou meses, tornando-se especialmente útil em investigações periciais, monitoramento terapêutico e acompanhamento clínico.

Segundo Kintz (2018), a principal vantagem da análise capilar está na ampla janela de detecção, que possibilita reconstruir o perfil temporal da exposição às substâncias e identificar padrões crônicos de consumo ou abstinência.

A incorporação das substâncias ao cabelo ocorre principalmente durante a fase anágena do crescimento capilar, quando compostos presentes na corrente sanguínea alcançam o folículo piloso e permanecem retidos na estrutura da queratina. Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) explicam que esse processo ocorre predominantemente por difusão sanguínea, embora mecanismos relacionados



ao suor e ao sebo também possam contribuir para a deposição dos analitos.

Para Levine (2020), essa característica diferencia o cabelo das demais matrizes biológicas, pois permite obter informações retrospectivas que dificilmente seriam identificadas por exames de sangue ou urina realizados dias após a exposição.

Na prática clínica, a análise capilar tem sido amplamente utilizada no acompanhamento de pacientes em tratamento para dependência química e no monitoramento da adesão terapêutica. Kintz (2023) destaca que a técnica possibilita identificar recaídas e acompanhar a evolução do tratamento por meio da análise segmentar dos fios. Musshoff e Madea (2021) complementam que essa abordagem permite estimar diferentes períodos de consumo, oferecendo informações cronológicas importantes para a avaliação clínica e para o planejamento terapêutico.

No âmbito da toxicologia forense, a análise em cabelo apresenta elevado valor probatório, sendo empregada em investigações de mortes suspeitas, acidentes de trânsito, violência doméstica, crimes sexuais, disputas judiciais relacionadas à guarda de crianças e monitoramento de indivíduos submetidos a medidas judiciais.

De acordo com o United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC, 2023), a estabilidade química da amostra, a facilidade de armazenamento e a menor suscetibilidade à adulteração tornam essa matriz especialmente útil na produção de evidências científicas. Da mesma forma, a European Workplace Drug Testing Society (EWDTs, 2022) reconhece sua importância no monitoramento de profissionais que exercem atividades de risco, desde que os resultados sejam interpretados em conjunto com a avaliação clínica e ocupacional.

Apesar de suas inúmeras vantagens, a literatura destaca que a análise toxicológica em cabelo apresenta limitações que exigem interpretação criteriosa. Pragst e Balikova (2006) demonstraram que fatores como pigmentação capilar, tratamentos cosméticos e contaminação ambiental podem influenciar a incorporação das substâncias aos fios.

Corroborando essa perspectiva, Kintz (2023) afirma que a simples detecção de uma droga no cabelo não confirma, isoladamente, a frequência ou a intensidade do consumo, sendo indispensável



considerar o contexto clínico, os dados laboratoriais e as demais evidências da investigação.

Dessa forma, observa-se consenso entre os principais autores quanto à relevância da análise toxicológica em cabelo para a toxicologia clínica e forense. Conforme destacam Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) e Levine (2020), a confiabilidade dessa metodologia depende da utilização de técnicas analíticas validadas, da adoção de protocolos padronizados e da interpretação especializada dos resultados.

Assim, quando empregada de forma criteriosa, a análise capilar constitui uma ferramenta de elevado valor diagnóstico e pericial, contribuindo significativamente para a produção de evidências científicas nas Ciências da Saúde e na investigação forense.

Janela de detecção da análise capilar e comparação com outras matrizes biológicas

A escolha da matriz biológica constitui uma etapa essencial na investigação toxicológica, pois cada tipo de amostra apresenta características específicas relacionadas ao período de detecção das substâncias, facilidade de coleta e aplicabilidade clínica ou forense. Entre as matrizes mais utilizadas destacam-se o sangue, a urina, a saliva e o cabelo, sendo esta última reconhecida pela ampla janela de detecção, capaz de identificar o consumo de drogas e medicamentos semanas ou meses após a exposição (Levine, 2020).

A janela de detecção corresponde ao período em que uma substância permanece detectável em determinada matriz biológica. Segundo Kintz (2018), esse intervalo depende das características farmacocinéticas da droga, da frequência de uso, da dose administrada, do metabolismo individual e do tipo de amostra analisada. Dessa forma, a seleção da matriz deve considerar a finalidade do exame e o tempo transcorrido desde a exposição.

O sangue é a matriz mais indicada para avaliar intoxicações agudas e os efeitos imediatos das substâncias psicoativas. Musshoff e Madea (2021) afirmam que as concentrações sanguíneas refletem o estado do indivíduo no momento da coleta, sendo amplamente utilizadas em acidentes de



trânsito e investigações médico-legais. Entretanto, Levine (2020) ressalta que sua curta janela de detecção limita a identificação de exposições ocorridas há vários dias.

A urina permanece como uma das matrizes mais empregadas em programas de triagem e monitoramento do uso de drogas. Conforme a European Workplace Drug Testing Society (EWDTS, 2022), ela permite identificar metabólitos por um período que varia, em geral, entre um e sete dias. Contudo, Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) destacam que esse exame apenas confirma a exposição prévia, sem indicar o momento exato do consumo ou o grau de comprometimento do indivíduo.

A saliva, por sua vez, apresenta coleta simples e não invasiva, sendo indicada para detectar consumo muito recente. Segundo o United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC, 2023), essa matriz reflete principalmente a fração livre das substâncias presentes na circulação sanguínea, razão pela qual é frequentemente utilizada em fiscalizações de trânsito. No entanto, sua reduzida janela de detecção restringe sua aplicação em investigações retrospectivas.

Em contraste, a análise toxicológica em cabelo permite reconstruir o histórico de consumo durante longos períodos. Kintz (2023) explica que, considerando o crescimento médio de aproximadamente um centímetro por mês, uma amostra de seis centímetros pode representar cerca de seis meses de exposição. Além disso, Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) ressaltam que a análise segmentar dos fios possibilita identificar diferentes períodos de consumo, tornando essa técnica especialmente útil no acompanhamento terapêutico e em investigações forenses.

Apesar dessas vantagens, a análise capilar apresenta limitações. Levine (2020) observa que existe um intervalo de aproximadamente sete a quatorze dias entre o consumo da substância e sua incorporação ao segmento visível do cabelo, impossibilitando a detecção de exposições muito recentes.

Além disso, fatores como pigmentação capilar, velocidade de crescimento dos fios e tratamentos cosméticos podem interferir nas concentrações detectadas. Pragst e Balikova (2006) demonstraram que cabelos mais pigmentados tendem a incorporar maiores quantidades de determinadas drogas, evidenciando a necessidade de interpretação criteriosa dos resultados.

Segundo a Society of Hair Testing (SoHT, 2023), nenhuma matriz biológica deve ser consi-



derada superior às demais, pois cada uma atende a objetivos específicos. Enquanto sangue e saliva são mais indicados para identificar consumo recente, a urina é amplamente utilizada em programas de monitoramento, e o cabelo destaca-se pela capacidade de documentar exposições prolongadas. Assim, a literatura científica demonstra que a análise capilar não substitui as demais matrizes, mas as complementa, ampliando a precisão diagnóstica e fortalecendo a investigação clínica e forense quando os resultados são interpretados de forma integrada.

Métodos analíticos empregados: GC-MS e LC-MS/MS na análise toxicológica em cabelo

Os avanços das técnicas analíticas têm fortalecido significativamente a toxicologia forense, permitindo identificar substâncias químicas em concentrações cada vez menores e com elevada confiabilidade. Na análise toxicológica em cabelo, os métodos instrumentais são fundamentais devido à baixa concentração de drogas incorporadas à matriz capilar. Entre as principais técnicas empregadas destacam-se a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS), consideradas métodos de referência para confirmação analítica em laboratórios clínicos e forenses (UNODC, 2023).

Antes da análise instrumental, a amostra passa por um rigoroso preparo laboratorial. Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) descrevem que esse processo envolve coleta padronizada, descontaminação, secagem, fragmentação e extração dos analitos presentes no cabelo. Segundo os autores, essas etapas são essenciais para garantir a confiabilidade dos resultados, uma vez que resíduos ambientais podem permanecer aderidos aos fios e comprometer a interpretação toxicológica.

Nesse contexto, a Society of Hair Testing (SoHT, 2023) recomenda protocolos específicos de lavagem para remover contaminantes externos sem alterar significativamente as substâncias incorporadas ao interior da fibra capilar.

Após a descontaminação, realiza-se a extração das substâncias presentes na queratina. Levine (2020) destaca que podem ser utilizados diferentes métodos de digestão e extração, dependendo



das propriedades físico-químicas do analito e da técnica analítica empregada. Musshoff e Madea (2021) acrescentam que uma extração eficiente aumenta a recuperação dos compostos e melhora a sensibilidade dos exames, tornando os resultados mais confiáveis para aplicações clínicas e periciais.

A GC-MS permanece como uma das técnicas mais consolidadas na toxicologia forense. Levine (2020) explica que esse método separa compostos voláteis por cromatografia gasosa e realiza sua identificação molecular por espectrometria de massas, apresentando elevada especificidade e reduzindo a ocorrência de resultados falso-positivos. Entretanto, Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) observam que algumas substâncias necessitam de derivatização química antes da análise, tornando o procedimento mais complexo e limitando sua utilização para determinados compostos termolábeis.

Em contrapartida, a LC-MS/MS tem ampliado sua utilização devido à capacidade de analisar moléculas polares e termicamente instáveis sem necessidade de derivatização. Segundo Kintz (2023), essa técnica apresenta elevada sensibilidade, rapidez e versatilidade, permitindo detectar simultaneamente diferentes drogas e seus metabólitos em uma única análise. Levine (2020) reforça que essa característica é especialmente importante em investigações envolvendo políuso de substâncias psicoativas, enquanto o UNODC (2023) destaca sua ampla aplicabilidade tanto na prática clínica quanto na investigação forense.

Ao comparar os dois métodos, Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) afirmam que ambos apresentam elevado desempenho quando corretamente validados. No entanto, a LC-MS/MS vem conquistando maior espaço nos laboratórios devido à possibilidade de análises multirresíduos com menor preparo da amostra e maior produtividade, enquanto a GC-MS continua sendo considerada um padrão de excelência para diversas classes de drogas.

Para garantir a confiabilidade dos resultados, a SoHT (2023) recomenda que todos os métodos sejam previamente validados quanto à seletividade, precisão, linearidade, limites de detecção e quantificação. Além disso, o UNODC (2023) enfatiza a importância da participação dos laboratórios em programas de controle de qualidade e da adoção de normas internacionais, como a ISO/IEC 17025.

Dessa forma, observa-se consenso entre Levine (2020), Cooper, Kronstrand e Kintz (2019),



Musshoff e Madea (2021), Kintz (2023), SoHT (2023) e UNODC (2023) de que a GC-MS e a LC-MS/MS constituem as principais tecnologias da toxicologia forense moderna. Quando associadas a protocolos laboratoriais padronizados e profissionais qualificados, essas técnicas oferecem elevada sensibilidade, especificidade e confiabilidade, contribuindo para a produção de evidências científicas consistentes e para a segurança das decisões clínicas e judiciais.

Limitações da análise toxicológica em cabelo: contaminação externa e fatores que interferem na interpretação dos resultados

Embora a análise toxicológica em cabelo represente um importante avanço na toxicologia clínica e forense, sua utilização ainda apresenta limitações que exigem criteriosa interpretação dos resultados.

A literatura científica demonstra que diversos fatores biológicos, ambientais e metodológicos podem influenciar tanto a incorporação quanto a permanência das substâncias na estrutura capilar, tornando inadequada qualquer conclusão baseada exclusivamente na detecção qualitativa de um analito. Nesse contexto, a interpretação dos exames deve considerar não apenas os aspectos laboratoriais, mas também as características individuais do examinado, o histórico clínico, o contexto da investigação e os protocolos empregados durante a análise (Kintz, 2023).

Entre as principais limitações da análise capilar destaca-se a possibilidade de contaminação externa. Esse fenômeno ocorre quando partículas contendo drogas ou medicamentos aderem à superfície dos fios sem que tenha ocorrido efetivamente o consumo da substância pelo indivíduo. Segundo Cooper, Kronstrand e Kintz (2019), ambientes contaminados por fumaça de drogas ilícitas, poeiras industriais, aerossóis ou contato direto com determinadas substâncias podem favorecer esse tipo de deposição superficial. Dessa forma, a simples identificação de um composto químico no cabelo não constitui, isoladamente, evidência definitiva de ingestão ou uso da substância.

A preocupação com a contaminação ambiental tem motivado a elaboração de protocolos



internacionais voltados à padronização dos exames toxicológicos. A Society of Hair Testing (SoHT, 2023) recomenda que todas as amostras sejam submetidas a procedimentos rigorosos de descontaminação antes da análise instrumental, utilizando sequências padronizadas de lavagem capazes de remover contaminantes externos sem comprometer as substâncias efetivamente incorporadas ao interior da fibra capilar.

Entretanto, Kintz (2023) observa que ainda não existe um protocolo universal capaz de eliminar completamente todas as possibilidades de contaminação, razão pela qual os resultados laboratoriais devem sempre ser interpretados de forma integrada.

Além da contaminação externa, outro fator amplamente discutido refere-se às características biológicas do cabelo. Pragst e Balikova (2006), em estudo considerado referência na área, demonstraram que a melanina exerce importante influência sobre a incorporação de diversas drogas básicas, especialmente cocaína, anfetaminas e opioides. Segundo os autores, cabelos mais escuros, por apresentarem maior concentração de melanina, tendem a reter quantidades superiores dessas substâncias quando comparados a cabelos claros.

Essa observação continua sendo corroborada por estudos mais recentes. Kintz (2023) destaca que diferenças relacionadas à pigmentação capilar podem influenciar significativamente as concentrações encontradas, tornando necessária uma interpretação cautelosa dos resultados obtidos.

Outro aspecto relevante envolve os tratamentos cosméticos realizados nos cabelos. Procedimentos como descoloração, coloração, alisamento químico, permanente e uso frequente de altas temperaturas podem alterar a estrutura da queratina e favorecer a perda parcial das substâncias previamente incorporadas. Levine (2020) explica que essas alterações estruturais podem reduzir a concentração dos analitos detectados durante os exames laboratoriais, aumentando a possibilidade de resultados falso-negativos ou de subestimação da intensidade do consumo. Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) complementam que o histórico cosmético do indivíduo deve fazer parte da avaliação pericial, pois interfere diretamente na confiabilidade da análise quantitativa.

O crescimento capilar também representa uma variável importante na interpretação crono-



lógica dos resultados. Embora seja amplamente aceito que o cabelo humano apresente crescimento médio de aproximadamente um centímetro por mês, Musshoff e Madea (2021) ressaltam que essa velocidade sofre influência de fatores genéticos, idade, sexo, estado nutricional, doenças sistêmicas e condições hormonais.

Consequentemente, a estimativa temporal obtida pela análise segmentar deve ser considerada aproximada, não sendo possível estabelecer datas exatas de consumo apenas com base na posição da substância ao longo do fio.

Outro desafio frequentemente mencionado na literatura refere-se à variabilidade individual do metabolismo. Segundo Levine (2020), diferenças relacionadas à absorção, distribuição, metabolização e eliminação das drogas influenciam diretamente a quantidade de substância disponível para incorporação ao cabelo. Assim, indivíduos submetidos ao mesmo padrão de consumo podem apresentar concentrações distintas na análise laboratorial. Essa observação é reforçada por Kintz (2023), que destaca a impossibilidade de estabelecer relação linear entre concentração detectada no cabelo e quantidade efetivamente consumida pelo indivíduo.

A interpretação quantitativa dos exames também merece atenção especial. O United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC, 2023) enfatiza que concentrações elevadas não significam necessariamente consumo mais intenso, assim como concentrações reduzidas não excluem a ocorrência de exposição repetida. Fatores relacionados ao tipo de droga, à frequência de uso, à afinidade química pela melanina, ao crescimento capilar e aos procedimentos laboratoriais podem modificar significativamente os resultados quantitativos.

Dessa forma, os valores obtidos devem ser analisados juntamente com informações clínicas, histórico toxicológico e demais evidências periciais disponíveis.

Outro aspecto discutido refere-se à ausência de padronização universal dos valores de corte (cut-off). A SoHT (2023) estabelece recomendações para diversas substâncias, porém diferentes países e laboratórios ainda adotam critérios próprios de interpretação. Segundo Cooper, Kronstrand e Kintz (2019), essa falta de uniformidade pode gerar divergências entre laudos emitidos por diferentes



instituições, especialmente em processos judiciais nos quais pequenas diferenças analíticas podem influenciar decisões relevantes.

A cadeia de custódia da amostra também constitui fator essencial para garantir a confiabilidade dos exames toxicológicos. Levine (2020) destaca que falhas na identificação, coleta, acondicionamento, transporte ou armazenamento podem comprometer a integridade da amostra e reduzir seu valor probatório. Nesse sentido, o UNODC (2023) recomenda que todas as etapas do processamento sejam rigorosamente documentadas, assegurando rastreabilidade completa desde a coleta até a emissão do laudo pericial.

Observa-se, portanto, que as limitações da análise toxicológica em cabelo não reduzem sua importância na investigação clínica e forense, mas evidenciam a necessidade de interpretação multidisciplinar dos resultados. Os estudos de Levine (2020), Cooper, Kronstrand e Kintz (2019), Musshoff e Madea (2021), Kintz (2023), bem como as recomendações da SoHT (2023) e do UNODC (2023), convergem ao afirmar que o exame capilar deve ser compreendido como uma ferramenta complementar dentro do processo investigativo.

Quando associado a protocolos laboratoriais validados, métodos analíticos de alta precisão e avaliação criteriosa do contexto clínico e pericial, esse exame apresenta elevado potencial para contribuir com diagnósticos, monitoramento terapêutico e produção de evidências científicas confiáveis na toxicologia forense.

Desafios na interpretação dos resultados toxicológicos e perspectivas futuras

A interpretação dos resultados obtidos por meio da análise toxicológica em cabelo constitui uma das etapas mais complexas da toxicologia clínica e forense. Embora os avanços tecnológicos tenham proporcionado métodos analíticos altamente sensíveis e específicos, a simples detecção de uma substância na matriz capilar não permite, isoladamente, concluir sobre a frequência, intensidade ou circunstâncias do consumo.



Dessa forma, a interpretação dos exames exige abordagem multidisciplinar, integrando conhecimentos de toxicologia, farmacologia, medicina legal, química analítica e ciências forenses, além da análise criteriosa do contexto clínico e investigativo (Levine, 2020).

Um dos principais desafios refere-se à diferenciação entre exposição passiva e consumo efetivo da substância. Segundo Kintz (2023), determinadas drogas podem ser depositadas sobre a superfície dos fios por meio da fumaça ambiental, do contato físico ou da manipulação direta da substância, sem que tenha ocorrido absorção sistêmica pelo indivíduo. Essa possibilidade reforça a necessidade de interpretar os resultados laboratoriais juntamente com informações clínicas, histórico do examinado, circunstâncias da coleta e demais elementos da investigação pericial.

Nesse sentido, Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) afirmam que a interpretação toxicológica não deve limitar-se aos dados quantitativos fornecidos pelo laboratório. Os autores ressaltam que concentrações semelhantes podem representar situações completamente distintas, dependendo da frequência de consumo, do intervalo entre a exposição e a coleta, das características fisiológicas do indivíduo e dos fatores relacionados ao crescimento capilar. Levine (2020) compartilha desse entendimento ao destacar que o resultado laboratorial deve ser compreendido como parte de um conjunto de evidências e nunca como elemento isolado para fundamentar decisões clínicas ou judiciais.

Outro aspecto amplamente discutido na literatura diz respeito aos valores de corte (cut-off) utilizados para interpretação dos exames. Esses valores correspondem às concentrações mínimas estabelecidas para que uma amostra seja considerada positiva para determinada substância. A Society of Hair Testing (SoHT, 2023) recomenda valores específicos para diversas classes de drogas, buscando reduzir a influência de contaminações externas e aumentar a especificidade dos exames. Entretanto, Kintz (2023) observa que ainda existem diferenças entre protocolos adotados por diferentes países e laboratórios, o que pode resultar em interpretações distintas para uma mesma amostra.

O United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC, 2023) também ressalta que a ausência de padronização internacional completa representa um desafio para a harmonização dos laudos toxicológicos. Segundo a instituição, embora diversas recomendações técnicas tenham sido publicadas



nos últimos anos, ainda existem diferenças relacionadas aos métodos de lavagem, extração, validação analítica, limites de detecção e critérios interpretativos. Essa variabilidade reforça a necessidade de desenvolvimento contínuo de normas internacionais capazes de uniformizar os procedimentos laboratoriais.

Outro desafio importante refere-se à interpretação quantitativa das concentrações encontradas. Musshoff e Madea (2021) afirmam que não existe relação proporcional direta entre a quantidade de droga detectada no cabelo e o grau de comprometimento clínico apresentado pelo indivíduo. Isso ocorre porque fatores como metabolismo, frequência de uso, pigmentação dos fios, tratamentos cosméticos e velocidade de crescimento capilar podem modificar significativamente as concentrações observadas. Dessa forma, níveis elevados não necessariamente indicam consumo intenso, assim como concentrações reduzidas não excluem o uso repetitivo da substância.

Além dos aspectos biológicos, fatores técnicos relacionados ao processamento laboratorial também podem interferir na interpretação dos resultados. Levine (2020) destaca que falhas na coleta, armazenamento, identificação da amostra, cadeia de custódia ou validação metodológica podem comprometer a confiabilidade dos exames. Por esse motivo, recomenda-se que laboratórios de toxicologia operem de acordo com sistemas internacionais de garantia da qualidade, realizando controles internos, ensaios de proficiência e validação periódica dos métodos analíticos empregados.

A evolução tecnológica representa, por outro lado, uma perspectiva promissora para minimizar muitas das limitações atualmente existentes. Kintz (2023) destaca que o desenvolvimento de equipamentos de espectrometria de massas de alta resolução, novas técnicas cromatográficas e softwares avançados de processamento de dados vem aumentando significativamente a capacidade de identificação simultânea de diferentes substâncias presentes na matriz capilar. Essas inovações permitem detectar compostos em concentrações cada vez menores, reduzindo interferências analíticas e aumentando a robustez dos resultados.

Cooper, Kronstrand e Kintz (2019) acrescentam que os avanços da metabolômica, da proteômica e das tecnologias de análise molecular tendem a ampliar o potencial diagnóstico da toxicologia



capilar nos próximos anos. Segundo os autores, novas abordagens poderão possibilitar não apenas identificar a presença das substâncias, mas também compreender alterações metabólicas relacionadas ao padrão de consumo, oferecendo informações mais completas para aplicações clínicas e periciais.

Outra perspectiva importante envolve a utilização da inteligência artificial e de ferramentas computacionais para interpretação dos resultados laboratoriais. Estudos recentes apontam que algoritmos capazes de integrar informações clínicas, laboratoriais e toxicológicas poderão auxiliar na padronização da interpretação dos exames, reduzindo a subjetividade atualmente existente e aumentando a precisão diagnóstica (UNODC, 2023). Embora essa aplicação ainda esteja em fase de desenvolvimento, seu potencial para fortalecer a toxicologia forense tem sido amplamente reconhecido pela comunidade científica.

Observa-se, portanto, que a análise toxicológica em cabelo representa uma metodologia consolidada e de elevado valor científico, porém sua correta utilização depende da integração entre tecnologia, conhecimento técnico e interpretação especializada. Os estudos de Levine (2020), Cooper, Kronstrand e Kintz (2019), Musshoff e Madea (2021), Kintz (2023), bem como as recomendações da Society of Hair Testing (2023) e do United Nations Office on Drugs and Crime (2023), demonstram consenso quanto à necessidade de interpretar os exames de forma contextualizada, considerando fatores biológicos, analíticos e jurídicos.

Dessa maneira, a evolução das técnicas laboratoriais, aliada à padronização internacional dos procedimentos e ao aperfeiçoamento contínuo dos profissionais da área, tende a fortalecer ainda mais a confiabilidade da análise toxicológica em cabelo, ampliando sua contribuição para a investigação clínica, para a medicina legal e para a produção de evidências científicas no âmbito da toxicologia forense.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise toxicológica em cabelo consolidou-se como uma importante ferramenta na toxico-



logia clínica e forense devido à sua capacidade de identificar o consumo prolongado de substâncias psicoativas, medicamentos e outros agentes químicos.

Ao longo deste estudo, verificou-se que essa matriz biológica apresenta vantagens significativas em relação às matrizes convencionais, principalmente pela ampla janela de detecção e pela possibilidade de reconstrução retrospectiva do histórico de exposição do indivíduo. Essas características ampliam sua aplicabilidade em diferentes contextos, incluindo investigações criminais, monitoramento terapêutico, programas de abstinência, perícias trabalhistas e avaliações relacionadas à medicina legal.

Os resultados da revisão evidenciaram que a análise capilar constitui um método complementar aos exames realizados em sangue, urina e saliva. Enquanto essas matrizes permitem identificar exposições recentes e avaliar efeitos farmacológicos imediatos, o cabelo possibilita documentar padrões de consumo ao longo de semanas ou meses. Nesse sentido, observou-se consenso entre os autores analisados quanto ao potencial da análise toxicológica em cabelo para fortalecer a produção de evidências científicas e subsidiar decisões clínicas e judiciais mais fundamentadas.

Também foi possível verificar que os avanços tecnológicos, especialmente com a utilização da cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) e da cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS), contribuíram significativamente para o aumento da sensibilidade, especificidade e confiabilidade dos exames toxicológicos. Essas técnicas permitem identificar múltiplas substâncias em concentrações extremamente baixas, reduzindo interferências analíticas e fortalecendo a credibilidade dos laudos emitidos pelos laboratórios especializados.

Entretanto, a pesquisa também demonstrou que a interpretação dos resultados permanece como um dos maiores desafios da toxicologia forense contemporânea. Fatores como contaminação externa, características biológicas individuais, pigmentação capilar, tratamentos cosméticos, velocidade de crescimento dos fios e diferenças metabólicas podem interferir na incorporação das substâncias e modificar as concentrações detectadas. Dessa forma, a simples presença de um analito no



cabelo não deve ser considerada prova isolada de consumo, sendo indispensável a integração entre dados laboratoriais, histórico clínico, contexto investigativo e demais elementos periciais.

Outro aspecto relevante identificado refere-se à necessidade de maior padronização internacional dos procedimentos laboratoriais e dos critérios utilizados para interpretação dos exames. Embora entidades como a Society of Hair Testing (SoHT), o United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC) e a European Workplace Drug Testing Society (EWDTS) tenham publicado recomendações técnicas importantes, ainda existem diferenças metodológicas entre laboratórios e países, o que reforça a necessidade de constante atualização científica e harmonização dos protocolos empregados.

Diante dessas evidências, conclui-se que a análise toxicológica em cabelo representa uma ferramenta de elevado valor para as Ciências da Saúde e para a investigação forense, desde que utilizada de forma criteriosa, associada a métodos analíticos validados e interpretada por profissionais qualificados. A evolução contínua das tecnologias analíticas, aliada ao desenvolvimento de protocolos internacionais cada vez mais padronizados, tende a ampliar a confiabilidade dessa metodologia e fortalecer sua aplicação na prática clínica, pericial e judicial. Por fim, espera-se que este estudo contribua para ampliar o conhecimento acerca das potencialidades e limitações da análise toxicológica em cabelo, incentivando novas pesquisas que promovam o aperfeiçoamento das técnicas laboratoriais e da interpretação dos resultados toxicológicos.

REFERÊNCIAS

COOPER, G.; KRONSTRAND, R.; KINTZ, P. Society of Hair Testing guidelines for drug testing in hair. *Forensic Science International*, v. 300, p. 34-43, 2019.

EUROPEAN WORKPLACE DRUG TESTING SOCIETY (EWDTS). *European Laboratory Guidelines for Workplace Drug Testing in Hair*. London: EWDTS, 2022.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.



KINTZ, P. Analytical and practical aspects of drug testing in hair. Boca Raton: CRC Press, 2018.

KINTZ, P. Hair analysis in clinical and forensic toxicology: an updated review. Forensic Sciences Research, v. 8, n. 1, p. 1-18, 2023.

LEVINE, B. (Ed.). Principles of Forensic Toxicology. 5. ed. Cham: Springer, 2020.

MUSSHOFF, F.; MADEA, B. Handbook of Analytical Separations: Forensic Toxicology. Amsterdam: Elsevier, 2021.

PRAGST, F.; BALÍKOVÁ, M. A. State of the art in hair analysis for detection of drug and alcohol abuse. Clínica Chimica Acta, v. 370, n. 1-2, p. 17-49, 2006.

SOCIETY OF HAIR TESTING (SOHT). Consensus for hair testing in forensic toxicology. Version 2023. Disponível em: <https://www.soht.org>. Acesso em: 8 jul. 2026.

UNITED NATIONS OFFICE ON DRUGS AND CRIME (UNODC). Guidance for the validation of analytical methodology and calibration of equipment used for testing of illicit drugs in seized materials and biological specimens. Vienna: United Nations, 2023.

