

Análise de isótopos estáveis em ciências forenses: fundamentos teóricos, aplicações e avanços no Brasil

L. C. Reis ^{a,*}, V.W. Botteon ^b, P.B. Camargo ^a

^a Centro de Energia Nuclear na Agricultura - Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil

^b Polícia Científica de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil

*Endereço de e-mail para correspondência: lucas.camargo.reis@alumni.usp.br

Recebido em 24/03/2026; Revisado em 29/05/2026; Aceito em 20/06/2026

Resumo

Os isótopos estáveis constituem importantes traçadores naturais utilizados em estudos ambientais, ecológicos e forenses, pois suas variações refletem processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no ambiente e nos organismos vivos. A análise das razões isotópicas de elementos como carbono, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e enxofre permite investigar dieta, posição trófica, origem geográfica e interações ambientais, enquanto sistemas isotópicos como estrôncio e chumbo fornecem informações relacionadas à assinatura geológica de uma região. Este trabalho apresenta uma revisão dos fundamentos teóricos da análise de isótopos estáveis, incluindo fracionamento isotópico, notação delta e métodos analíticos baseados em espectrometria de massa, bem como discute as principais aplicações dessa técnica nas ciências forenses, com ênfase em estudos desenvolvidos no Brasil. Entre as aplicações destacam-se a rastreabilidade de drogas ilícitas, a determinação da origem geográfica de indivíduos e animais, a autenticação de alimentos e a investigação de crimes ambientais. Também são abordados avanços recentes relacionados ao uso de *isoscapes*, modelos geoestatísticos e técnicas de aprendizado de máquina, que têm ampliado a capacidade de inferência geográfica e a robustez das interpretações isotópicas. De modo geral, a integração entre diferentes sistemas isotópicos, bases de dados ambientais e ferramentas estatísticas tem consolidado a análise isotópica como uma ferramenta robusta para estudos de proveniência, rastreabilidade e autenticação em contextos forenses.

Palavras-Chave: Assinatura isotópica; Isotopia forense; *Isoscapes*; Proveniência geográfica; Rastreabilidade.

Abstract

Stable isotopes are important natural tracers widely used in environmental, ecological, and forensic studies because their variations reflect physical, chemical, and biological processes occurring in the environment and in living organisms. The analysis of isotopic ratios of elements such as carbon, nitrogen, oxygen, hydrogen, and sulfur allows investigation of diet, trophic position, geographic origin, and environmental interactions, while isotopic systems such as strontium and lead provide information related to the geological signature of specific regions. This article reviews the theoretical foundations of stable isotope analysis, including isotopic fractionation, delta notation, and mass spectrometry-based analytical methods, and discusses the main applications of this technique in forensic science, with emphasis on studies conducted in Brazil. These applications include the traceability of illicit drugs, determination of the geographic origin of individuals and animals, food authentication, and environmental crime investigation. Recent advances involving *isoscapes*, geostatistical models, and machine learning are also addressed, as they have expanded geographic inference and improved the robustness of isotopic interpretations. Overall, the integration of multiple isotopic systems, environmental databases, and statistical tools has consolidated isotope analysis as a powerful approach for provenance, traceability, and authentication studies in forensic contexts.

Keywords: Isotopic signature; Forensic isotopy; *Isoscapes*; Geographic provenance; Traceability.

1. INTRODUÇÃO

Os organismos vivos são constituídos por elementos químicos cujos átomos podem ocorrer em diferentes

formas isotópicas. Isótopos são átomos de um mesmo elemento que têm o mesmo número de prótons, mas diferem no número de nêutrons e, consequentemente, na massa. Entre eles, os isótopos estáveis possuem núcleo não

radioativo, ocorrem naturalmente no ambiente em abundâncias variadas e participam de ciclos biogeoquímicos e processos metabólicos sem se desintegrarem [1].

Para exemplificar, o elemento químico carbono (C) apresenta o isótopo estável ^{12}C , composto por 6 prótons e 6 nêutrons ($A=12$), e o ^{13}C , apresentando 6 prótons e 7 nêutrons ($A=13$). Já o ^{14}C é considerado um isótopo radioativo do elemento. Em outro exemplo, o nitrogênio apresenta o isótopo estável ^{14}N , constituído por 7 prótons e 7 nêutrons ($A=14$), e o ^{15}N , dotado de 7 prótons e 8 nêutrons ($A=15$). Portanto, mesmo número atômico (Z), diferente massa (A).

Apesar de apresentarem comportamento químico semelhante, os isótopos estáveis diferem em certas propriedades físicas, como massa e velocidade de reação, o que favorece sua discriminação durante processos físicos, químicos e biológicos. Como consequência, tecidos, fluidos e outros materiais biológicos registram assinaturas isotópicas que refletem dieta, origem geográfica, condições ambientais e rotas metabólicas. Essa característica faz dos isótopos estáveis traçadores valiosos em estudos ecológicos, ambientais e forenses [2-4].

Nas últimas décadas, o uso de isótopos estáveis em ciência forense expandiu-se consideravelmente. Avanços na espectrometria de massa e na modelagem geoespacial permitiram o desenvolvimento de *isoscapes* (mapas que descrevem a distribuição espacial de razões isotópicas), a integração entre dados laboratoriais e modelos estatísticos, e aplicações direcionadas à inferência de procedência

geográfica e à reconstrução de processos ambientais e biológicos [5-7].

Revisões recentes destacam o crescimento do emprego da espectrometria de razão isotópica em aplicações periciais, como rastreabilidade de materiais, discriminação de fontes e apoio a investigações de crimes ambientais e alimentares [8-10].

Diante desse cenário, o presente artigo revisa os fundamentos e principais aplicações dos isótopos estáveis na perícia criminal, com ênfase em avanços metodológicos e tendências emergentes.

2. ISÓTOPOS ESTÁVEIS

As abundâncias isotópicas de uma amostra, seja orgânica ou inorgânica, variam em função de processos físicos, químicos e biológicos. Tais variações sistemáticas permitem inferir processos ambientais e metabólicos a partir das razões isotópicas [11].

Essas variações resultam principalmente do fracionamento isotópico, no qual determinados processos favorecem a incorporação ou remoção preferencial de um isótopo em relação a outro. O fracionamento pode ocorrer durante a evaporação e condensação, trocas químicas, assimilação biológica, reações metabólicas e transportes difusivos, produzindo assinaturas distintas em compartimentos ambientais como água, solo, plantas e tecidos animais [2, 4, 12, 13].

As abundâncias naturais dos isótopos estáveis de maior interesse ambiental são apresentadas na **Tabela 1**:

Tabela 1. Isótopos estáveis de alguns elementos químicos e suas respectivas abundâncias médias (em átomos %).

Elemento Químico	Isótopo Estável	Abundância Média (%)
Carbono (C)	^{12}C	98,89
	^{13}C	1,11
Nitrogênio (N)	^{14}N	99,34
	^{15}N	0,37
Oxigênio (O)	^{16}O	99,76
	^{17}O	0,037
	^{18}O	0,199
Hidrogênio (H)	^1H	98,98
	^2H ou D	0,02
Enxofre (S)	^{32}S	95,02
	^{33}S	0,76
	^{34}S	4,21
	^{36}S	0,01

Fonte: Ferraz et al. [1].

Convencionou-se expressar a composição isotópica de uma amostra por meio da notação δ (delta), representada em partes por mil (‰). O valor de δ corresponde à diferença entre a razão isotópica da amostra e a razão isotópica de um padrão internacional de referência adotado para o elemento analisado, conforme a seguinte equação:

$$\delta^A X (\text{‰}) = \left[\frac{\text{Ramostra}}{\text{Rpadrão}} - 1 \right] \times 1000$$

R é a razão entre o isótopo raro e o isótopo abundante daquele elemento. O termo $\delta^A X$ pode representar $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ou δ de outros elementos. Multiplica-se por 1000 porque as variações naturais são pequenas. Os principais padrões internacionais

incluem *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB) para carbono, ar atmosférico (AIR) para nitrogênio, *Vienna Standard Mean Ocean Water* (VSMOW) para oxigênio e hidrogênio, e *Canyon Diablo Troilite* (CDT) para enxofre [14] (Tabela 2).

Além dos sistemas isotópicos leves amplamente utilizados, como C, N, O, H e S, elementos como o estrôncio (Sr) e o chumbo (Pb) também têm sido empregados em estudos ambientais e forenses. Diferentemente dos sistemas baseados em fracionamento isotópico, as razões isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e dos isótopos de Pb refletem

predominantemente a assinatura geológica do ambiente.

Esses elementos são incorporados aos organismos principalmente por meio da água e dos alimentos e tendem a registrar características do substrato geológico local [15]. Por essa razão, têm sido amplamente utilizados em estudos de proveniência geográfica e mobilidade, especialmente em tecidos mineralizados como dentes e ossos, complementando as informações obtidas a partir de isótopos leves.

Tabela 2. Padrões internacionais utilizados para as respectivas análises de isótopos estáveis.

Elemento Químico	δ	R da Amostra	Padrão Internacional	R do Padrão
Carbono (C)	$\delta^{13}\text{C}$	$^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$	<i>Vienna Pee Dee Belemnite</i> (VPDB)	0,0112372
Nitrogênio (N)	$\delta^{15}\text{N}$	$^{15}\text{N} / ^{14}\text{N}$	Ar atmosférico	0,003676
Oxigênio (O)	$\delta^{18}\text{O}$	$^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$	<i>Vienna Standard Mean Ocean Water</i> (VSMOW)	0,0020052
Hidrogênio (H)	δD	$^2\text{H} / ^1\text{H}$	<i>Vienna Standard Mean Ocean Water</i> (VSMOW)	0,00015575
Enxofre (S)	$\delta^{34}\text{S}$	$^{34}\text{S} / ^{32}\text{S}$	<i>Canyon Diablo Troilite</i> (CDT)	0,045005

Fonte: Adaptado de Coplen [14].

3. ANÁLISE ISOTÓPICA

A determinação de razões isotópicas em amostras naturais é realizada principalmente por espectrometria de massa de razão isotópica em fluxo contínuo (*Continuous Flow Isotope Ratio Mass Spectrometry* – CF-IRMS). Nessa técnica, amostras de sólidos ou líquidos são convertidas em gases simples (CO_2 , N_2 , H_2 ou SO_2) por combustão ou pirólise em um analisador elementar [14].

Os gases passam por sistemas de purificação para remoção de impurezas e água residual e depois são separados por cromatografia gasosa. Uma vez ionizados, os gases são acelerados em campos eletromagnéticos no espectrômetro de massa, e a razão massa/carga dos íons permite determinar as razões isotópicas com alta precisão. Os resultados são então calibrados em relação a padrões internacionais usando materiais de referência certificados [16, 17].

Nos últimos anos, avanços metodológicos ampliaram as possibilidades analíticas dessa técnica. Entre essas abordagens destaca-se a análise isotópica específica por composto (*Compound-Specific Isotope Analysis* – CSIA), que permite determinar assinaturas isotópicas em moléculas individuais separadas por cromatografia gasosa ou líquida. Essa abordagem aumenta significativamente a capacidade de discriminação entre diferentes fontes e processos, ampliando o potencial da técnica em estudos ambientais e investigações forenses [18].

Em contexto pericial, também vem crescendo a preocupação com validação analítica, qualidade metrológica e reprodutibilidade dos resultados, aspectos

fundamentais para a interpretação forense de dados isotópicos [10, 19].

As ciências forenses fornecem base científica para a elucidação de diversas questões de interesse judicial. À medida que a dinâmica criminal se torna mais complexa, cresce também a necessidade de métodos analíticos capazes de aumentar a robustez das investigações e da produção da prova pericial. Entre os elementos de maior interesse para aplicações forenses destacam-se carbono (C), nitrogênio (N), oxigênio (O), hidrogênio (H) e enxofre (S), amplamente utilizados em estudos ambientais e com potencial relevante para a perícia criminal [3, 7].

Além dos sistemas isotópicos leves analisados por CF-IRMS, a determinação de razões isotópicas de elementos como estrôncio (Sr) e chumbo (Pb) requer abordagens analíticas distintas. Nesses casos, as análises são geralmente realizadas após preparo químico da amostra e separação dos elementos de interesse, utilizando técnicas como espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado. Essa diferença metodológica reflete as propriedades físico-químicas desses elementos, que não podem ser convertidos em gases simples para análise em fluxo contínuo [15].

3.1. Carbono

O C é um dos elementos mais utilizados em estudos envolvendo isótopos estáveis. Suas aplicações abrangem desde investigações sobre processos ecológicos e impactos ambientais até estudos relacionados à rastreabilidade de produtos alimentícios e de origem animal [20-25].

Essas aplicações estão diretamente relacionadas aos diferentes mecanismos fotossintéticos das plantas. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ variam de acordo com os ciclos fotossintéticos das plantas C3, C4 e CAM. Plantas C3 sintetizam inicialmente compostos orgânicos com três átomos de carbono e representam a maior parte das espécies vegetais. Já as plantas C4, como milho e cana-de-açúcar, formam compostos iniciais com quatro átomos de carbono. Existe ainda o metabolismo ácido das crassuláceas (CAM), característico de plantas adaptadas a ambientes áridos [26-29].

As diferenças metabólicas resultam em composições isotópicas distintas nos tecidos vegetais. De maneira geral, plantas C3 apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre aproximadamente -34‰ e -24‰ , com média em torno de -27‰ , enquanto plantas C4 apresentam valores entre cerca de -16‰ e -9‰ , com média próxima de -13‰ , em relação ao padrão internacional *Vienna Pee Dee Belemnite* (VPDB) [30-33]. Valores negativos indicam que a amostra apresenta menor proporção de ^{13}C em relação ao padrão, sendo relativamente enriquecida em ^{12}C .

Por conta disso, essas diferenças permitem investigar a composição alimentar de organismos consumidores. Herbívoros tendem a refletir em seus tecidos as assinaturas isotópicas das plantas que compõem sua dieta, e esse sinal pode ser transferido ao longo da cadeia alimentar, considerando os efeitos do fracionamento isotópico entre os níveis tróficos [4, 12, 34, 35].

Além da ecologia trófica, a análise isotópica do carbono tem ampla aplicação na avaliação de autenticidade e origem de alimentos. Diferenças na proporção de insumos derivados de plantas C3 e C4 podem ser detectadas em matrizes alimentares e em produtos de origem animal, o que tem sido explorado em estudos de rastreabilidade e controle de fraude alimentar [21-23].

3.2. Nitrogênio

O N constitui outro elemento amplamente empregado em estudos ecológicos e ambientais. Seus isótopos estáveis são importantes traçadores para a investigação de relações tróficas e fluxos de matéria em ecossistemas naturais [20, 24, 34].

Enquanto os valores de $\delta^{13}\text{C}$ dos consumidores tendem a refletir de maneira relativamente próxima a composição isotópica de suas dietas, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ geralmente apresentam enriquecimento progressivo ao longo da cadeia alimentar. Esse aumento costuma variar entre aproximadamente 3‰ e 5‰ por nível trófico [4, 39-42].

Esse enriquecimento ocorre porque o isótopo mais leve (^{14}N) tende a ser eliminado preferencialmente durante processos metabólicos, resultando em enriquecimento relativo de ^{15}N nos tecidos dos consumidores. Assim, a análise combinada de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ tem sido amplamente

utilizada para investigar hábitos alimentares, estrutura trófica e fluxos de energia em ecossistemas [39, 41].

3.3. Oxigênio

Os isótopos estáveis de O variam no ambiente em função de diferenças geográficas e climáticas. Essas variações decorrem, entre outros fatores, de processos de evaporação, condensação, altitude, latitude, continentalidade e padrões regionais de precipitação. Em tecidos biológicos, como ossos e dentes, a composição isotópica do oxigênio está fortemente relacionada à água ingerida e, por isso, pode refletir padrões ambientais característicos de determinadas regiões [43, 44].

Essa característica confere ao $\delta^{18}\text{O}$ grande utilidade em estudos de procedência geográfica. Em contexto forense, o oxigênio pode auxiliar na reconstrução de histórico residencial ou de mobilidade, particularmente quando associado a outros marcadores isotópicos [43-45].

Como diferentes tecidos registram janelas temporais distintas da vida do indivíduo, a escolha da matriz analisada influencia diretamente o tipo de inferência que pode ser realizada [15, 45].

Em estudos com tecidos humanos, especialmente esmalte dentário e cabelo, a análise de $\delta^{18}\text{O}$ tem sido empregada para inferir origem geográfica e deslocamentos populacionais [15, 45].

3.4. Hidrogênio

A variação ambiental dos isótopos de H está associada principalmente a padrões climáticos, altitude, latitude, distância do oceano e distribuição espacial da precipitação. Assim como ocorre com o oxigênio, o sinal isotópico do hidrogênio em tecidos biológicos está fortemente relacionado à água ingerida e ao consumo de alimentos, de modo que suas assinaturas podem refletir características ambientais e geográficas das regiões onde os organismos se desenvolveram [44].

Em investigações forenses, o $\delta^2\text{H}$ tem sido particularmente útil em estudos de origem geográfica, sobretudo quando analisado em cabelo, unhas e outros tecidos queratinizados. Sua interpretação, no entanto, deve considerar fatores como dieta, metabolismo e *turnover* tecidual, que podem introduzir variabilidade adicional. Trabalhos com cabelo humano demonstram que a variabilidade isotópica de H pode ser explorada em estudos de mobilidade e identificação, sobretudo quando analisada em conjunto com outros elementos [46-48].

3.5. Enxofre

Os isótopos estáveis de S, especialmente o $\delta^{34}\text{S}$, também têm relevância em estudos de procedência e reconstrução dietética. Seu comportamento isotópico pode refletir influências geológicas, marinhas e ambientais, o

que torna esse elemento particularmente útil para discriminar fontes que nem sempre são bem diferenciadas apenas por carbono e nitrogênio [49, 50].

Em regiões costeiras, por exemplo, a influência marinha pode produzir assinaturas isotópicas distintas em comparação com áreas continentais interiores. Por essa razão, o enxofre frequentemente é utilizado em combinação com C, N, O e H para aumentar o poder de discriminação em estudos forenses de origem geográfica e de hábitos alimentares [49, 50].

4. APLICAÇÕES FORENSES

A utilização de isótopos estáveis em estudos ambientais passou a ganhar maior projeção a partir da década de 1980, especialmente após os avanços na compreensão dos ciclos biogeoquímicos dos elementos, no conhecimento da composição isotópica natural de organismos animais e vegetais e na disseminação de equipamentos de espectrometria de massa com maior precisão analítica [16, 20]. Desde então, a análise isotópica vem se consolidando como ferramenta relevante em diferentes áreas das ciências forenses [3, 7-10].

Avanços recentes na aplicação de isótopos estáveis têm ampliado significativamente o potencial de rastreabilidade ambiental e alimentar, especialmente com a integração de modelos espaciais e abordagens de aprendizado de máquina. Estudos no Brasil demonstram a construção de *isoscares* hidrológicos de alta resolução com base em $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, refletindo padrões climáticos dominantes e permitindo aplicações forenses [51].

De forma complementar, abordagens baseadas em múltiplos isótopos e modelos probabilísticos têm sido utilizadas para rastrear produtos da bioeconomia amazônica, como o açaí [52], e *commodities* agrícolas, como a soja, embora com limitações associadas à variabilidade espacial de diferentes sistemas isotópicos [53].

No contexto de produtos alimentícios, análises isotópicas combinadas com modelos preditivos têm permitido discriminar origem geográfica e composição em produtos complexos, como chocolates [54]. Além disso, o uso de técnicas de aprendizado de máquina tem possibilitado a modelagem de padrões isotópicos complexos em ecossistemas tropicais [55], enquanto sistemas isotópicos baseados em elementos como o estrôncio têm ampliado a capacidade de inferência geográfica ao refletirem diretamente a assinatura geológica das regiões de origem [56].

Esses avanços consolidam os isótopos estáveis como ferramentas centrais em aplicações forenses modernas, incluindo a rastreabilidade de substâncias ilícitas, a determinação de origem de indivíduos e animais e a autenticação de produtos alimentícios.

No Brasil, os estudos ainda são relativamente recentes nessa temática. A maior parte dos grupos de pesquisa historicamente concentrou-se na compreensão de fluxos de energia e interações ecológicas em ecossistemas, em estudos fisiológicos em vegetais, metabolismo e nutrição animal, dinâmica paleoambiental e aplicações nas ciências biomédicas, biológicas, agronômicas e geoquímicas [24, 25, 57-62].

Ainda assim, esse conjunto de estudos demonstra a amplitude de possibilidades para aplicações periciais. No contexto ambiental brasileiro, estudos também têm mostrado que o uso de isótopos estáveis permite investigar mudanças de uso da terra, fontes de matéria orgânica e fluxos hidrológicos em paisagens tropicais e subtropicais [63, 64].

4.1. Rastreabilidade da origem de drogas ilícitas

A investigação da origem de vestígios constitui uma das aplicações mais importantes da análise multielementar de isótopos estáveis nas ciências forenses, particularmente na rastreabilidade de substâncias ilícitas.

Pesquisadores da *Drug Enforcement Administration* (DEA) desenvolveram estudos voltados à caracterização isotópica de cocaínas apreendidas por meio da análise das razões isotópicas de C, N, H e O, buscando classificar amostras provenientes de diferentes regiões produtoras da América do Sul. Esses estudos também contribuíram para compreender o fracionamento isotópico durante o processamento da droga [65]. Além da inferência sobre a origem da cocaína [66], a análise de isótopos estáveis também tem sido empregada em estudos relacionados a outras drogas ilícitas [67].

No Brasil, foram desenvolvidos modelos baseados nas razões isotópicas de C e N, associadas às condições climáticas e de crescimento da planta *Cannabis sativa* L., que permitiram classificar a origem de amostras de maconha apreendidas na cidade de São Paulo [68, 69].

Os resultados dessas pesquisas identificaram rotas de tráfico entre Paraguai, Mato Grosso do Sul e a região Nordeste, evidenciando o potencial da técnica para monitoramento de rotas, investigação de zonas produtoras e detecção de novas vias de comercialização [68, 69].

Estudos mais recentes indicaram que a integração entre análises isotópicas multielementares e técnicas complementares de perfil químico tem ampliado consideravelmente a capacidade de discriminação entre regiões produtoras e rotas internacionais de tráfico, fortalecendo o uso da espectrometria isotópica como ferramenta de inteligência forense [7-10].

A análise isotópica também pode ser aplicada a vestígios relacionados ao acondicionamento de drogas. Dados isotópicos de carbono e hidrogênio, por exemplo, já foram empregados para determinar a origem e o lote de produção de sacos plásticos utilizados no armazenamento

de entorpecentes [70].

Além da rastreabilidade de drogas, os isótopos estáveis têm aplicação em outras áreas da toxicologia forense. Perfis isotópicos de C, N, O e H foram utilizados para rastrear a origem de sementes de mamona e da ricina, substância tóxica de reconhecida relevância forense [71].

Na investigação de doping esportivo, a metodologia também permite distinguir testosterona endógena de testosterona exógena, entre outras aplicações [72].

4.2. Rastreabilidade da origem de pessoas e animais

Os isótopos estáveis podem registrar aspectos da história de vida de um indivíduo, uma vez que tecidos biológicos refletem a composição isotópica da dieta, da água ingerida e das condições ambientais às quais a pessoa esteve exposta. Estudos realizados no Brasil demonstraram variações significativas nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ entre populações humanas de diferentes regiões e entre áreas urbanas e rurais [73, 74].

Com base nesse princípio, os isótopos estáveis podem auxiliar na vinculação entre cadáveres ou restos mortais não identificados e suas possíveis áreas de residência, sobretudo quando outros métodos de identificação estão prejudicados. Ao reduzir a área de busca e indicar a história geográfica recente do indivíduo, essa metodologia pode atuar de forma complementar à genética forense e à odontologia legal [3, 7, 10].

Mais recentemente, o desenvolvimento de modelos geoespaciais baseados em *isoscapes* globais passou a permitir estimativas probabilísticas da origem geográfica de indivíduos, integrando dados climáticos, hidrológicos e ambientais em abordagens quantitativas aplicadas a investigações forenses internacionais [6, 7, 10].

Na investigação da origem de indivíduos desconhecidos, amostras de cabelo e unha são amplamente utilizadas por serem não invasivas em pessoas vivas e por se manterem preservadas por longos períodos após a morte [46, 47]. A variabilidade natural das assinaturas isotópicas também depende de processos biológicos internos, como taxa metabólica e crescimento tecidual, de modo que diferentes tecidos podem registrar janelas temporais distintas [40, 75].

Em amostras de cabelo humano, já foram observadas diferenças significativas de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{34}\text{S}$ entre populações da Europa e dos Estados Unidos, evidenciando a heterogeneidade de padrões alimentares e ambientais entre países e reforçando o chamado fenômeno de “*glocalization*” [48]. Em outro estudo, a combinação entre dados isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ da água e perfis de cabelo permitiu estimar retrospectivamente a origem geográfica provável de restos mortais femininos encontrados em Utah, nos Estados Unidos [45].

Dentes também constituem amostras biológicas vantajosas para rastrear a origem de um indivíduo, pois se

formam em diferentes estágios da vida e resistem à degradação. Os isótopos presentes na água de determinada localidade podem ser incorporados aos dentes antes dos 12 anos de idade, auxiliando na inferência da região onde a pessoa cresceu [15].

Além disso, sistemas isotópicos como $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e isótopos de Pb podem complementar os dados obtidos com O e H, por refletirem predominantemente a assinatura geológica do ambiente e apresentarem menor influência de processos de fracionamento biológico. Essa combinação de sistemas isotópicos aumenta a resolução espacial das análises de mobilidade e proveniência [15, 56, 76].

Em um caso envolvendo um corpo masculino não identificado encontrado na Alemanha, a análise multielementar de C, N, H, Pb e Sr em cabelos, ossos cranianos e dentes permitiu atribuir a origem da vítima à Romênia, posteriormente confirmada por análise genética [76]. A análise isotópica também pode contribuir para a antropologia forense e para a arqueologia, auxiliando na reconstrução de mobilidade, dieta e processos históricos [77, 78].

Além da identificação humana, a análise isotópica apresenta grande potencial na medicina veterinária forense e na perícia ambiental, ao permitir rastrear a origem e o deslocamento de animais silvestres e subsidiar investigações de crimes contra a fauna. As assinaturas isotópicas em tecidos animais refletem componentes da dieta e condições ecológicas nas quais o organismo se desenvolveu [79, 80]. A composição isotópica de um animal é influenciada por variáveis ambientais e biológicas, como clima, solo, altitude, posição trófica e turnover tecidual [44].

Os primeiros registros expressivos dessa aplicação remontam a estudos com marfim de elefante, em que diferenças isotópicas entre populações permitiram inferir áreas de origem e apoiar o combate à caça ilegal [81, 82]. Mais recentemente, aplicações incluem a distinção entre animais silvestres e mantidos em cativeiro com base em assinaturas isotópicas, ampliando as possibilidades de fiscalização e rastreabilidade em crimes contra a fauna [83].

Aplicações recentes incluem ainda a rastreabilidade isotópica de madeira ilegal, produtos pesqueiros e espécies ameaçadas, permitindo associar materiais apreendidos a regiões específicas e contribuindo diretamente para o enfrentamento de crimes ambientais em escala global [3, 7].

Além de vertebrados, a análise isotópica também tem sido aplicada a invertebrados, especialmente insetos de interesse agrícola e ambiental, permitindo diferenciar indivíduos criados em laboratório de populações naturais e inferir padrões tróficos e fontes alimentares [42, 84].

4.3. Autenticidade de bebidas e alimentos

A caracterização geográfica de produtos alimentícios, com a finalidade de atestar origem e autenticidade, constitui

uma das aplicações mais difundidas da análise de isótopos estáveis e a área com maior número de estudos de interesse forense, internacionalmente conhecida como *Food Forensics* [21, 85].

Nos últimos anos, a autenticação isotópica de alimentos passou a ocupar posição central no combate à fraude alimentar global, sendo amplamente empregada na certificação de origem e na verificação de cadeias internacionais de produção e distribuição [7, 23, 86].

Essa área se baseia no entendimento das variações isotópicas decorrentes do ciclo biogeoquímico dos elementos, do clima, das práticas agrícolas locais e da alimentação dos animais, além do conhecimento do fracionamento isotópico em processos físicos, químicos e biológicos capazes de produzir diferenças regionais nas assinaturas isotópicas de alimentos [20].

Um exemplo clássico é o estudo dos hambúrgueres *Big Mac*® em diversos países, no qual se demonstrou que os valores de $\delta^{13}\text{C}$ variavam em função da dieta do gado em cada local, apesar da padronização industrial do produto. Hambúrgueres produzidos no Brasil e nos Estados Unidos apresentaram valores mais elevados de $\delta^{13}\text{C}$ do que os europeus, refletindo maior contribuição de milho e outras plantas C4 na alimentação animal [87].

A fraude alimentar consiste, em essência, na comercialização de produtos cuja composição, procedência ou qualidade não correspondem ao declarado. O mel é um exemplo recorrente. Em amostras brasileiras, a análise isotópica de carbono revelou adulterações com compostos derivados de cana-de-açúcar [88], e estudos subsequentes mostraram elevadas proporções de amostras adulteradas em feiras livres [89].

A análise da razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ também constitui ferramenta importante para detectar adição indevida de compostos derivados de plantas C4 em bebidas. Esse princípio já foi utilizado para identificar teores elevados de açúcares de origem C4 em vinhos e espumantes [90], bem como em sucos de frutas [91].

O mesmo raciocínio se aplica à cerveja. Avaliações isotópicas de diferentes marcas produzidas no Brasil e no exterior evidenciaram a adição de adjuntos à base de milho, arroz e outros cereais não maltados durante a fermentação, especialmente em cervejas de larga escala [92, 93]. Em outro exemplo, o molho de soja comercializado no Brasil revelou forte predominância isotópica de milho em sua composição [94].

A análise isotópica também já foi empregada para investigar a autenticidade de rações comerciais para cães, permitindo estimar as proporções relativas de ingredientes de origem vegetal e animal e detectar inconsistências com a rotulagem declarada [95].

Além disso, abordagens mais recentes têm combinado razões isotópicas estáveis com modelos estatísticos multivariados e aprendizado de máquina para verificar a origem declarada de produtos lácteos e outras matrizes

alimentares, ampliando a acurácia de classificação regional e o potencial de construção de bancos de dados isotópicos de referência [96].

4.4. Outras aplicações forenses

A análise de isótopos estáveis apresenta potencial em diversas outras áreas das ciências forenses. Na perícia ambiental, constitui ferramenta importante para caracterizar fontes e tipos de contaminantes no meio ambiente, como hidrocarbonetos, óleos e outros produtos químicos [97, 98], além de auxiliar na compreensão do comportamento dos poluentes em sistemas ambientais e biológicos [99].

No contexto brasileiro, aplicações isotópicas também vêm sendo empregadas em estudos de dinâmica de nutrientes, metabolismo animal e processos geoquímicos, ampliando a interface entre ciência ambiental e possíveis aplicações periciais [60-61].

Na balística forense, os isótopos estáveis têm capacidade de discriminar diferentes fontes de líquidos inflamáveis e de artefatos explosivos [98, 100]. Estudos com pólvora indicaram que a composição isotópica pode discriminar fabricante, lote e tipo de material, mesmo dentro de uma mesma linha de produção, sobretudo com base no nitrogênio [101]. A avaliação isotópica de cartuchos e resíduos também pode auxiliar na elucidação de investigações relacionadas a disparos de arma de fogo [102].

Na análise forense de fibras, assinaturas isotópicas multielementares já foram empregadas para discriminar amostras de algodão não processado e investigar a origem geográfica de fibras [103].

Já na documentoscopia, razões isotópicas estáveis podem auxiliar na diferenciação entre tintas de canetas esferográficas e em gel [104]. Além disso, os isótopos estáveis também já foram empregados na triagem de amostras de tintas arquitetônicas [105].

Na entomologia forense, a análise isotópica demonstrou relevância ao investigar a relação entre o valor de $\delta^{13}\text{C}$ de diferentes fontes de carne e os estágios do ciclo de vida da mosca *Calliphora vicina*, evidenciando que o valor isotópico do inseto reflete a dieta e os fracionamentos entre as fases de vida [106]. Além de espécies de interesse forense, estudos com insetos de interesse agrícola também demonstram o potencial da análise isotópica para investigar dieta, origem e diferenciação entre populações naturais e criadas em laboratório, ampliando as aplicações da técnica para rastreabilidade biológica [42, 84].

4.5. Limitações e desafios da análise isotópica

Apesar do elevado potencial analítico, a interpretação de dados isotópicos apresenta limitações importantes que devem ser consideradas em contexto forense. Uma das principais restrições está relacionada à sobreposição de assinaturas isotópicas entre regiões geográficas com

características ambientais semelhantes, o que pode reduzir a resolução espacial das inferências e tornar inadequada a atribuição de origem com base em um único elemento isotópico [6, 7, 10].

Além disso, fatores biológicos, como dieta, metabolismo e *turnover* tecidual, bem como variações ambientais locais, podem introduzir variabilidade adicional nas assinaturas isotópicas. A escolha da matriz analisada também influencia a interpretação, uma vez que diferentes tecidos registram janelas temporais distintas da vida do indivíduo ou do organismo investigado [40, 45, 75].

Outro aspecto relevante é a dependência de bancos de dados isotópicos de referência. A ausência de bases regionais robustas, especialmente em países tropicais e de grande heterogeneidade ambiental, limita a comparação entre amostras e reduz a confiança estatística das inferências. Nesse sentido, o desenvolvimento de *isoscapes*, modelos geoestatísticos e abordagens baseadas em aprendizado de máquina tem ampliado o potencial da técnica, mas também exige validação contínua e amostragem representativa [51, 55, 56].

Do ponto de vista operacional, o custo analítico, a necessidade de infraestrutura especializada e os requisitos de controle de qualidade ainda restringem a aplicação rotineira da técnica em muitos laboratórios. Por essa razão, em investigações periciais, a análise isotópica deve ser interpretada preferencialmente de forma integrada a outras evidências, como perfis químicos, análise multielementar, dados genéticos e informações contextuais do caso, atuando como ferramenta complementar na construção da prova [7-10, 19, 99].

4.6. Desenvolvimento da isotopia forense no Brasil

No Brasil, um marco importante para o desenvolvimento da análise isotópica aplicada às ciências forenses foi a criação do Laboratório Nacional de Isótopos Forenses (LANIF), iniciativa de caráter transversal e interinstitucional envolvendo a Polícia Federal e instituições de pesquisa associadas. O projeto busca integrar capacidades analíticas e científicas para ampliar a aplicação de isótopos em investigações criminais e ambientais no país [107-109].

A consolidação de iniciativas como o LANIF evidencia o crescente interesse institucional na incorporação de ferramentas isotópicas à criminalística brasileira. No entanto, sua expansão depende da formação de recursos humanos especializados, da ampliação da infraestrutura analítica, da validação interlaboratorial de métodos e da construção de bancos de dados isotópicos regionais. Esses avanços são fundamentais para que a análise isotópica possa ser utilizada de forma mais sistemática, robusta e comparável em diferentes contextos periciais [109].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de isótopos estáveis constitui uma ferramenta relevante para as ciências forenses, especialmente em estudos de proveniência, rastreabilidade e autenticação de materiais. Ao registrar variações associadas à dieta, à água, ao ambiente e à geologia, diferentes sistemas isotópicos podem fornecer informações complementares sobre a origem e a história de substâncias, organismos e produtos.

O avanço das aplicações forenses tem sido impulsionado pela integração entre múltiplos isótopos, bancos de dados ambientais, modelos espaciais e ferramentas estatísticas. No entanto, a interpretação dos resultados deve considerar as limitações da técnica, incluindo a sobreposição de assinaturas, a variabilidade biológica e ambiental, a disponibilidade de bases de referência e a necessidade de validação analítica.

Nesse contexto, a análise isotópica deve ser compreendida como uma abordagem complementar, capaz de fortalecer a interpretação da prova quando integrada a outros métodos químicos, biológicos e contextuais.

Embora seu uso ainda seja relativamente recente e limitado no Brasil, iniciativas institucionais e estudos nacionais recentes indicam um cenário promissor para a expansão dessa ferramenta nos diversos campos da criminalística brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E.S.B. Ferraz; J.P.H.B. Ometto; L.A. Martinelli; M.Z. Moreira; P.B. Camargo; R.L. Victoria. *Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis*. São Paulo: Oficina de Textos (2009).
- [2] T.E. Dawson; R.T.W. Siegwolf. *Stable Isotopes as Indicators of Ecological Change*. London: Academic Press (2007).
- [3] W. Meier-Augenstein. *Stable Isotope Forensics: An Introduction to the Forensic Application of Stable Isotope Analysis*. Chichester: Wiley (2014).
- [4] S. D. Newsome; C. Martinez Del Rio; S. Bearhop; D.L. Phillips. A niche for isotopic ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5:429-436 (2007).
- [5] J.R. Ehleringer; G.J. Bowen; L.A. Chesson; A.G. West; D.W. Podlesak; T.E. Cerling. Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography. *Proc. Nat.l Acad. Sci.* 105:2788-2793 (2008).
- [6] J.B. West; G.J. Bowen; T.E. Dawson; K.P. Tu. *Isoscapes: Understanding Movement, Pattern and Process on Earth through Isotope Mapping*. Dordrecht: Springer (2021).
- [7] T.E. Cerling; et al. Forensic stable isotope biogeochemistry. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.* 44:175-206 (2016).
- [8] N. Gentile; R.T.W. Siegwolf; P. Esseiva; S. Doyle; K. Zollinger; O. Delémont. Isotope ratio mass spectrometry as a tool for source inference in forensic science. *Forensic Sci Int.* 251:139-158 (2015).

- [9] M.P.V. Matos; G.P. Jackson. Isotope ratio mass spectrometry in forensic science applications. *Forensic Chem.* **13**:100154 (2019).
- [10] L.A. Chesson; et al. Forensic application of isotope ratio mass spectrometry (IRMS) for human identification. *Sci. Justice.* **64**:28-37 (2024).
- [11] J. Hoefs. Stable Isotope Geochemistry. 8 ed. Cham: Springer (2018).
- [12] B. Fry. Fractionation. In: Fry B. Stable Isotope Ecology. New York: Springer. 194-276 (2006).
- [13] T.E. Dawson; P.D. Brooks. Fundamentals of stable isotope chemistry and measurement. In: Unkovich M, editor. Stable Isotope Techniques in the Study of Biological Processes and Functioning of Ecosystems. Dordrecht: Kluwer Academic. 1-18 (2001).
- [14] T.B. Coplen. New guidelines for reporting stable hydrogen, carbon and oxygen isotope-ratio data. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **60**:3359-3360 (1996).
- [15] P. Budd; J. Montgomery; J. Evans; C. Chenery. Combined Pb-, Sr- and O-isotope analysis of human dental tissue for the reconstruction of archaeological residential mobility. In: Plasma Source Mass Spectrometry. Cambridge: Royal Society of Chemistry 311-324 (2001).
- [16] J.T. Brenna; T.N. Corso; H.J. Tobias; R.J. Caimi. High-precision continuous-flow isotope ratio mass spectrometry. *Mass Spectrom Rev.* **16**:227-258 (1997).
- [17] H.J. Tobias; J.T. Brenna. On-line pyrolysis as a limitless reduction source for high-precision isotopic analysis of organic-derived hydrogen. *Anal Chem.* **69**:3148-3152 (1997).
- [18] M. Elsner; G. Imfeld. Compound-specific isotope analysis (CSIA) of micropollutants in the environment: current developments and future challenges. *Curr. Opin. Biotechnol.* **41**:60-72 (2016).
- [19] P.J. Dunn; H. Salouros; J.F. Carter; S.P. Doyle. Forensic application of stable isotope delta values: proposed minimum requirements for method validation. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **31**:1476-1480 (2017).
- [20] B.J. Peterson; B. Fry. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **18**:293-320 (1987).
- [21] S.D. Kelly; K. Heaton; J. Hoogewerff. Tracing the geographical origin of food: the application of multi-element and multi-isotope analysis. *Trends in Food Science & Technology* **16**:555-567 (2005).
- [22] F. Camin; M. Perini; G. Colombari; L. Bontempo; G. Versini. Influence of dietary composition on the carbon, nitrogen, oxygen and hydrogen stable isotope ratios of milk. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **22**:1690-1696 (2008).
- [23] F. Camin; L. Bontempo; M. Perini; E. Piasentier. Stable isotope ratio analysis for assessing the authenticity of food of animal origin. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **15**:868-877 (2016).
- [24] L.A. Martinelli; M.C. Piccolo; A.R. Townsend; P.M. Vitousek; E. Cuevas; W. McDowell; G.P. Robertson; O.C. Santos; K. Treseder. Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: tropical versus temperate forests. *Biogeochemistry* **46**(1-3):45-65 (1999).
- [25] R.G. Leite; C.A.R.M. Araújo-Lima; R.L. Victoria; L.A. Martinelli. Stable isotope analysis of energy sources for larvae of eight fish species from the Amazon floodplain. *Ecology of Freshwater Fish* **11**:56-63 (2002).
- [26] J.A. Bassham; A.A. Benson; L.D. Kay; A.Z. Harris; A.T. Wilson; M. Calvin. The path of carbon in photosynthesis. XXI. The cyclic regeneration of carbon dioxide acceptor. *J. Am. Chem. Soc.* **76**:1760-1770 (1954).
- [27] M.D. Hatch; C.R. Slack. A new enzyme for the interconversion of pyruvate and phosphopyruvate and its role in the C4 dicarboxylic acid pathway of photosynthesis. *Biochem. J.* **106**:141-146 (1968).
- [28] U. Lüttge. Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). *Ann. Bot.* **93**:629-652 (2004).
- [29] K. Winter; J.A.M. Holtum. Crassulacean acid metabolism: evolution and ecophysiology. Berlin: Springer (2014).
- [30] M.H. O'Leary. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry* **20**:553-567 (1981).
- [31] M.H. O'Leary. Carbon isotopes in photosynthesis. *Bioscience* **38**:328-336 (1988).
- [32] G.D. Farquhar; J.R. Ehleringer; K.T. Hubick. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant Mol. Biol.* **40**:503-537 (1989).
- [33] B.N. Smith; S. Epstein. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. *Plant Physiol.* **47**:380-384 (1971).
- [34] M.J. DeNiro; S. Epstein. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **42**:495-506 (1978).
- [35] R. Hood-Nowotny; B. Knols. Stable isotope methods in biological and ecological studies of arthropods. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **124**:3-16 (2007).
- [36] C. Kendall; J.J. McDonnell. Isotope tracers in catchment hydrology. Amsterdam: Elsevier (1998).
- [37] M.J. DeNiro; S. Epstein. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta* **45**:341-351 (1981).
- [38] M. Minagawa; E. Wada. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains. *Geochim. Cosmochim. Acta* **48**:1135-1140 (1984).
- [39] D.M. Post. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods and assumptions. *Ecology* **83**:703-718 (2002).
- [40] M.J. Vander Zanden; J.B. Rasmussen. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation. *Limnol. Oceanogr.* **46**:2061-2066 (2001).
- [41] M.J. Vander Zanden; M.K. Clayton; E.K. Moody EK; C.T. Solomon; B.C. Weidel. Stable isotope turnover and half-life in animal tissues: A Literature Synthesis *PLoS ONE* **10**:e0116182 (2015).
- [42] A.D. Santi-Júnior; V.W. Botteon; T. Mastrangelo; M.Z. Moreira. Trophic ecology of citrus pests based on stable isotope analysis. *Scientia Agricola* **75**(6):504-508 (2018).
- [43] A.A. Levinson; B. Luz; Y. Kolodny. Variations in oxygen isotopic compositions of human teeth and urinary stones. *Applied Geochemistry* **2**:367-371 (1987).
- [44] G.J. Bowen; L.I. Wassenaar; K.A. Hobson. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics. *Oecologia* **143**:337-348 (2005).
- [45] C.D. Kennedy; G.J. Bowen; J.R. Ehleringer. Temporal variation of oxygen isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) in drinking water: Implications for specifying location of origin with human scalp hair. *Forensic Sci. Int.* **208**:156-166 (2011).
- [46] I. Fraser; W. Meier-Augenstein; R.M. Kalin. The role of stable isotopes in human identification: a longitudinal study into the variability of isotopic signals in human hair

- and nails. *Rapid Commun Mass Spectrom.* **20**:1109-1116 (2006).
- [47] F. Hülsemann; et al. Global spatial distributions of nitrogen and carbon stable isotope ratios of modern human hair. *Rapid Commun Mass Spectrom.* **29**:2111-2121 (2015).
- [48] L.O. Valenzuela; L.A. Chesson; G.J. Bowen; T.E. Cerling; J.R. Ehleringer. Dietary heterogeneity among western industrialized countries reflected in stable isotope ratios of human hair. *PLoS ONE* **7**:e34234 (2012).
- [49] M.P. Richards; B.T. Fuller; R.E.M. Hedges. Sulphur isotopic variation in ancient bone collagen from Europe: implications for human palaeodiet, residence mobility, and modern pollutant studies. *Earth Planet Sci. Lett.* **191**:185-190 (2001).
- [50] O. Nehlich. The application of sulphur isotope analyses in archaeological research: a review. *Earth Sci. Rev.* **142**:1-17 (2015).
- [51] J.P. Sena-Souza; F.J.V. Costa; T.B. Kisaka; V.E. Costa; R.O. Mascarenhas; E.A. Mazzi; M.G. Araújo; A.C.G. Batista; L.A. Martinelli; G.B. Nardoto, G. B. Spatial variation of stable hydrogen and oxygen isotopes in tap water in Brazil. *The Science of the Total Environment* **991**:179952 (2025).
- [52] L.A. Martinelli; et al. Isotope fingerprinting for traceability in the amazon bioeconomy: A Bayesian assignment approach with açaí. *Trees, Forests and People* **24**:101207 (2026).
- [53] M.G. Silva Araújo; et al. Evaluating an isotopic model for tracing the geographic origin of soybeans in Brazil. *Food Chemistry* **501**:147586 (2026).
- [54] K.G. Silva; M.Z. Moreira; A.V. Oliveira Figueira; L.A. Martinelli; P.B. Camargo. Stable isotope profiling and machine learning for determining cocoa origin, ingredient composition, and cocoa content in Brazilian chocolates. *Food Chemistry* **499**:147313 (2026).
- [55] I.M. Souza-Silva; et al. Machine-learning models of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isoscapes in Amazonian wood. *Biogeosciences* **23**(3):881–904 (2026).
- [56] L.A. Martinelli, L. A.; et al. Bioavailable strontium isoscape for the Amazon region using tree wood. *Forest Ecology and Management* **594**:122963 (2025).
- [57] L.C.R. Pessenda; R. Aravena; A.J. Melfi; E.C.C. Telles; R. Boulet; E.P.E. Valencia; M. Tomazello. The use of carbon isotopes (^{13}C , ^{14}C) in soil to evaluate vegetation changes during the Holocene in central Brazil. *Radiocarbon* **38**(2):191-201 (1996).
- [58] A.S. Carrijo; A.C. Pezzato; C. Ducatti; J.R. Sartori; L. Trinca; E.T. Silva. Traceability of bovine meat and bone meal in poultry by stable isotope analysis. *Revista Brasileira de Ciência Avícola* **8**:63-68 (2006).
- [59] E. Vidotto; L.C.R. Pessenda; A.D.S. Ribeiro; H.A.D. Freitas; J.A. Bendassolli. Dinâmica do ecótono floresta-campo no sul do estado do Amazonas no Holoceno, através de estudos isotópicos e fitossociológicos. *Acta Amazônica* **37**(3): 385-400 (2007).
- [60] S. Ana Filho; J.A. Bendassolli; A.L.R.M. Rossete; S.M.S. Piedade; C.V. Prestes. Production of ^{15}N -enriched nitric acid (H^{15}NO_3). *Brazilian Journal of Chemical Engineering* **25**(4):743-749 (2008).
- [61] V.E. Costa; E.T. da Silva; E.M. Bruder; C. A. Ducatti; M.A. Rodrigues. Uso de Isótopos Estáveis para detecção de infecção por *Helicobacter pylori* em humanos no Brasil. *Revista Brasileira de Física Médica* **7**(3):191-194 (2013).
- [62] C. A. Ducatti; M.M.P. Sartori; J.C. Denadai; V.E. Costa; V.C. Pelícia; M. Macari. Modelling and determination of metabolic pools by stable carbon isotopes in the avian duodenal mucosa and albumen. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* **100**:77-84 (2016).
- [63] F.G. Augusto; M. Tassoni Filho; A. Ferreira; A.L. Pereira; P.B. Camargo; L.A. Martinelli. Land use change in the Atlantic Forest affects carbon and nitrogen sources of streams as revealed by the isotopic composition of terrestrial invertebrates. *Biota Neotropica* **15**(2): e20140188 (2015).
- [64] J. Robinet; et al. Impacts of forest conversion and agriculture practices on water pathways in Southern Brazil. *Hydrological Processes* **32**(15):2304-2317 (2018)
- [65] J.R. Mallette; J.F. Casale; L.M. Jones; D.R. Morello. The isotopic fractionation of carbon, nitrogen, hydrogen, and oxygen during illicit production of cocaine base in South America. *Forensic Sci Int.* **270**:255-260 (2017).
- [66] J.R. Ehleringer; J.F. Casale; M.J. Lott; V.L. Ford. Tracing the geographical origin of cocaine. *Nature* **408**(6810):311-312 (2000).
- [67] T. Matsumoto; et al. Evaluation of characteristic deuterium distributions of ephedrine and methamphetamines by NMR spectroscopy for drug profiling. *Anal Chem.* **80**(4):1176-1181 (2008).
- [68] E.K. Shibuya; et al. Sourcing Brazilian marijuana by applying IRMS analysis to seized samples. *Forensic Sci. Int.* **160**:35-43 (2006).
- [69] E.K. Shibuya; J.E.S. Sarkis; O. Negrini-Neto; L.A. Martinelli. Carbon and nitrogen stable isotopes as indicative of geographical origin of marijuana samples seized in the city of São Paulo (Brazil). *Forensic Sci. Int.* **167**(1):8-15 (2007).
- [70] E. Taylor; J.F. Carter; J.C. Hill; C. Morton; N. Nic Daeid; R. Sleeman. Stable isotope ratio mass spectrometry and physical comparison for the forensic examination of grip-seal plastic bags. *Forensic Sci. Int.* **177**(2-3):214-220 (2008).
- [71] H.W. Kreuzer; J.B. West; J.R. Ehleringer. Forensic applications of light-element stable isotope ratios of *Ricinus communis* seeds and ricin preparations. *J. Forensic Sci.* **58**(Suppl1):S43-S51 (2012).
- [72] T. Piper; C. Emery; M. Saugy. Recent developments in the use of isotope ratio mass spectrometry in sports drug testing. *Anal Bioanal Chem.* **2011**;401(2):433-447. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-4886-6>
- [73] G.B. Nardoto; et al. Geographical patterns of human diet derived from stable-isotope analysis of fingernails. *Am J Phys Anthropol.* **131**(1):137-146 (2006).
- [74] J.G. Gragnani; et al. Can stable isotope analysis reveal dietary differences among groups with distinct income levels in the city of Piracicaba (southeast region, Brazil)? *J. Hum. Nutr. Diet.* **27**(3):270-279 (2014).
- [75] T.C. O'Connell; R.E.M. Hedges; M.A. Healey; A.H.R.W. Simpson. Isotopic comparison of hair, nail and bone: modern analyses. *J. Archaeol. Sci.* **28**(11):1247-1255 (2001).
- [76] E. Rauch; S. Rummel; C. Lehn; A. Büttner. Origin assignment of unidentified corpses by use of stable isotope

- ratios of light (bio-) and heavy (geo-) elements - a case report. *Forensic Sci. Int.* **168**(2-3):215-218 (2007).
- [77] C.A. Makarewicz; J. Sealy. Dietary reconstruction, mobility, and the analysis of ancient skeletal tissues: expanding the prospects of stable isotope research in archaeology. *J. Archaeol. Sci.* **56**:146-158 (2015).
- [78] M.Q. Bastos; et al. Isotopic study of geographic origins and diet of enslaved Africans buried in two Brazilian cemeteries. *J. Archaeol. Sci.* **70**:82-90 (2016).
- [79] K.A. Hobson. Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review. *Oecologia* **120**(3):314-326 (1999).
- [80] S. Bearhop; R.W. Furness; G.M. Hilton; S.C. Votier; S. Waldron. A forensic approach to understanding diet and habitat use from stable isotope analysis of (avian) claw material. *Funct. Ecol.* **17**(2):270-275 (2003).
- [81] N.J. Van der Merwe; et al. Source-area determination of elephant ivory by isotopic analysis. *Nature* **346**:744-746 (1990).
- [82] J.C. Vogel; B. Eglinton; J.M. Auer. Isotope fingerprints in elephant bone and ivory. *Nature* **346**:747-749 (1990).
- [83] L. Brasileiro; R.R. Mayrink; A.C. Pereira; F.J.V. Costa; G.B. Nardoto. Differentiating wild from captive animals: an isotopic approach. *PeerJ*. **11**:e16460 (2023).
- [84] V.W. Botteon; M.D.L.Z. Costa; A. Kovalski; L.A. Martinelli; T. Mastrangelo. Can stable isotope markers be used to distinguish wild and mass-reared *Anastrepha fraterculus* flies? *PLoS One* **13**(12):e0209921 (2018).
- [85] A. Rossman. Determination of stable isotope ratios in food analysis. *Food Rev. Int.* **17**(3):347-381 (2001).
- [86] H. Liu; et al. A review of recent compound-specific isotope analysis studies applied to food authentication. *Food Chem.* **415**:135791 (2023).
- [87] L.A. Martinelli; et al. Worldwide stable carbon and nitrogen isotopes of Big Mac[®] patties: an example of a truly "global" food. *Food Chem.* **127**(4):1712-1718 (2011).
- [88] G.J. Padovan; D. De Jong; L.P. Rodrigues; J.S. Marchini. Detection of adulteration of commercial honey samples by the ¹³C/¹²C isotopic ratio. *Food Chem.* **82**(4):633-636 (2003).
- [89] A.B. Santos; C.L. Moura; L.B. Camara. Determinação da autenticidade dos meus vendidos nas feiras livres e comércios populares. *Brazilian Educational Technology: Research and Learning* **2**(3):135-147 (2011).
- [90] L.A. Martinelli; et al. Stable carbon isotopic composition of the wine and CO₂ bubbles of sparkling wines: detecting C₄ sugar additions. *J. Agric Food Chem.* **51**(9):2625-2631 (2003).
- [91] E.C. Queiroz; C. Ducatti; W.G. Venturini Filho; E.T. Silva; T. Nojimoto. Determinação da razão isotópica delta ¹³C em bebidas comerciais a base de laranja. *Cienc. Agrotecnol.* **33**(4):1085-1094 (2009).
- [92] S.F. Mardegan; et al. Stable carbon isotopic composition of Brazilian beers - A comparison between large- and small-scale breweries. *J. Food Compos Anal.* **29**(1):52-57 (2013).
- [93] M. Sleiman; W.G. Venturini Filho; C. Ducatti; T. Nojimoto. Determinação do percentual de malte e adjuntos em cervejas comerciais brasileiras através de análise isotópica. *Cienc. Agrotecnol.* **34**(1):163-172 (2010).
- [94] M.C. Morais; T.A. Pellegrinetti; L.C. Sturion; T.M.S. Sattolo; L.A. Martinelli. Stable carbon isotopic composition indicates large presence of maize in Brazilian soy sauces (shoyu). *J. Food Compos Anal.* **70**:18-21 (2018).
- [95] L.A. Galera; A.L. Abdalla Filho; L.S. Reis; J.L. Souza; Y.A. Hernandez; L.A. Martinelli. Carbon and nitrogen isotopic composition of commercial dog food in Brazil. *PeerJ*. **7**:e5828 (2019).
- [96] R. O'Sullivan; R. Cama-Moncunill; M. Salter-Townshend; O. Schmidt; F.J. Monahan. Verifying origin claims on dairy products using stable isotope ratio analysis and random forest classification. *Food Chem X.* **19**:100858 (2023).
- [97] R.B. Coffin; P.H. Miyares; C.A. Kelley; L.A. Cifuentes; C.M. Reynolds. Stable carbon and nitrogen isotope analysis of TNT: two-dimensional source identification. *Environ. Toxicol. Chem.* **20**(12):2676-2680 (2001).
- [98] R.P. Philp. The emergence of stable isotopes in environmental and forensic geochemistry studies: a review. *Environ. Chem. Lett.* **5**:57-66 (2007).
- [99] J.G. Wiederhold. Metal stable isotope signatures as tracers in environmental geochemistry. *Environ. Sci. Technol.* **49**(5):2606-2624 (2015).
- [100] S.J. Benson; C.J. Lennard; P. Maynard; D.M. Hill; A.S. Andrew; C. Roux. Forensic analysis of explosives using isotope ratio mass spectrometry (IRMS)-discrimination of ammonium nitrate sources. *Sci Justice.* **49**(2):73-80 (2009).
- [101] N. Gentile; R.T.W. Siegwolf; O. Delémont. Study of isotopic variations in black powder: reflections on the use of stable isotopes in forensic science for source inference. *Rapid Commun Mass Spectrom.* **23**(16):2559-2567 (2009).
- [102] A. Zeichner; S. Ehrlich; E. Shoshani; L. Halicz. Application of lead isotope analysis in shooting incident investigations. *Forensic Sci Int.* **158**(1):52-64 (2006).
- [103] W. Meier-Augenstein; H.F. Kemp; E.R. Schenk; J.R. Almirall. Discrimination of unprocessed cotton on the basis of geographic origin using multi-element stable isotope signatures. *Rapid Commun Mass Spectrom.* **28**(5):545-552 (2014).
- [104] L.A. Chesson; B.J. Tipple; J.E. Barnette; T.E. Cerling; J.R. Ehleringer. The potential for application of ink stable isotope analysis in questioned document examination. *Sci Justice* **55**(1):27-33 (2015).
- [105] L.J. Reidy; W. Meier-Augenstein; R.M. Kalin. ¹³C-Isotope ratio mass spectrometry as a potential tool for the forensic analysis of white architectural paint: a preliminary study. *Rapid Commun Mass Spectrom.* **19**(13):1899-1905 (2005).
- [106] M.P.V. Matos; K.I. Konstantynova; R.M. Mohr; G.P. Jackson. Analysis of the ¹³C isotope ratios of amino acids in the larvae, pupae and adult stages of *Calliphora vicina* blow flies and their carrion food sources. *Anal Bioanal Chem.* **410**(30):7943-7954 (2018).
- [107] L.A. Martinelli; et al. Carbon and nitrogen isotope ratios of food and beverage in Brazil. *Molecules* **25**(6):1457 (2020).
- [108] R.O. Mascarenhas; et al. Building an isoscape based on tooth enamel for human provenance estimation in Brazil. *Forensic Science International* **330**:111109 (2022).

[109] G.B. Nardoto; R.R. Mayrink; C.B. Barbieri; F.J.V. Costa. *Isótopos Forenses*. Campinas: Millennium Editora (2022).