

DETERMINAÇÃO DA ORIGEM GEOGRÁFICA DE VESTÍGIOS UTILIZANDO ISÓTOPOS ESTÁVEIS: BASE CIENTÍFICA E POTENCIAL DE USO NO BRASIL

FÁBIO JOSÉ VIANA COSTA

POLÍCIA FEDERAL - BRASÍLIA/DF

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

JOÃO PAULO SENA-SOUZA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB

GABRIELA BIELEFELD NARDOTO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB



RESUMO

As ciências forenses baseiam-se na análise técnico-científica dos vestígios de crimes. A utilização de isótopos estáveis para determinação da origem geográfica de vestígios (atribuição isotópica) já é realizada em diversas partes do mundo e em variados contextos forenses. No presente artigo, são apresentados os princípios biogeoquímicos e as metodologias utilizadas para atribuir amostras desconhecidas à sua origem geográfica utilizando isótopos estáveis. A aplicabilidade da ferramenta no contexto forense no Brasil é discutida para os seguintes vestígios: animais traficados, remanescentes humanos, madeira ilegal, drogas apreendidas e alimentos fraudados. Os modelos globais existentes podem ser aplicados no Brasil, sendo úteis para esclarecer algumas questões mais abrangentes. Para questões mais específicas recomenda-se utilizar as variáveis ambientais associadas aos dados isotópicos já existentes, construindo isoscapes regionais específicas. Com a disponibilização dessas isoscapes, a metodologia de atribuição isotópica explicada neste artigo poderá ser amplamente explorada e resultar em modelos espaciais possíveis de serem aplicados especificamente no contexto forense brasileiro.

PALAVRAS-CHAVES: Análise multi-isotópica. Ciências forenses. Perícia criminal. Análise espacial. Atribuição isotópica. Tráfico de animais. Desmatamento ilegal. Pessoas desaparecidas. Tráfico de drogas. Alimentos adulterados

1. INTRODUÇÃO

As ciências forenses baseiam-se na análise técnico-científica dos vestígios de crimes (VELHO; GEISER; ESPINDULA, 2012). A individualização (qualidades do vestígio que permitem classificá-lo como semelhante somente a ele mesmo), identificação (qualidades do vestígio que permitem classificá-lo em uma categoria), transferência (troca de matéria entre intervenientes – princípio de Locard), associação (entre pessoas e locais de crime) e reconstrução (entendendo a sequência de eventos passados) dos vestígios têm sido os paradigmas dos exames periciais.

A associação de um vestígio com a sua fonte está relacionada a diferentes aspectos, como exemplo: (a) autoria, em que o autor do crime seria a fonte (ex. assinatura, voz, impressões papilares, DNA); (b) autenticidade, a fonte seria determinada fábrica (ex. relógios) e (c) origem geográfica, a fonte seria o local geográfico (ex. vinhos). Essa associação leva ao conceito de *procedência da fonte* (“source inference”) (KWAN, 1977), que é amplo e pode cobrir uma variedade de questões relacionadas ao item examinado e ao contexto em análise (GENTILE *et al.*, 2015).

Dentro da física, Inman e Rudin, 2002, propõem um arcabouço para a classificação de vestígios baseada na divisibilidade da matéria: “A matéria se divide em partes componentes menores quando força suficiente é aplicada. As partes componentes adquirirão características criadas pelo próprio processo de divisão e reterão propriedades físico-químicas da peça maior. Estendendo o aspecto físico de divisão da matéria, elementos químicos também deixam traços no material analisado resultantes da interação com a sua fonte.”

Isótopos estáveis são marcadores governados por mecanismos biogeoquímicos. Nas reações entre substrato e produto, ocorre o fracionamento isotópico, em que o isótopo mais leve reage mais facilmente que o mais pesado, deixando assinaturas distintas nos materiais produzidos. O entendimento desses mecanismos torna possível a aplicação forense de isótopos estáveis, a exemplo de sua utilização já comum nos dias atuais para elucidar crimes e aceitação na justiça (EHLERINGER; MATHESON JR., 2010).

Quando se trata da origem geográfica na área forense utilizando isótopos estáveis, podem ser citados diversos casos, com materiais orgânicos e inorgânicos. São exemplos de materiais orgânicos analisados: animais e suas partes (CERLING *et al.*, 2006; HOBSON; WASSENAAR, 2018), investigação da região de origem da produção de drogas (EHLERINGER *et al.*, 2000; HURLEY; WEST; EHLERINGER, 2010; SHIBUYA *et al.*, 2006), origem de madeira ilegal (GORI; STRADIOTTI; CAMIN, 2018), reconstrução de histórias de indivíduos (EHLERINGER *et al.*, 2015; NARDOTO *et al.*, 2006) e inorgânicos: identificação de tintas utilizadas em arquivos confidenciais (CHESSON *et al.*, 2015), explosivos (GENTILE *et al.*, 2015) e análise de cena de crime (EHLERINGER *et al.*, 2015). O livro de Meier-Augenstein (2010) revisa a aplicação forense de isótopos estáveis como traçadores de materiais orgânicos e inorgânicos, incluindo a base científica para a interpretação dos dados, com uma extensiva gama de exemplos.

Os isótopos estáveis de eleição para análise espacial de materiais orgânicos são os dos elementos da água, hidrogênio (H) e oxigênio (O). Sabe-se que a proporção entre o isótopo mais pesado e o mais leve do hidrogênio presente nas penas das aves e nas asas de borboletas estão altamente correlacionadas com os isótopos de hidrogênio da precipitação das localidades em que esses tecidos se formaram (HOBSON; WASSENAAR, 1997; WASSENAAR; HOBSON, 1998). Mais recentemente, descobriu-se que a proporção dos isótopos estáveis de hidrogênio da água da torneira e o cabelo humano formado na mesma localidade também apresentam forte correlação (EHLERINGER *et al.*, 2008). Esses estudos deram origem a uma série de outros utilizando a proporção dos isótopos estáveis de um mesmo elemento químico para atribuir por exemplo aves migratórias a suas regiões de origem (HOBSON; WASSENAAR, 2018), mas também em estudos forenses com seres humanos (EHLERINGER *et al.*, 2015).

Já os isótopos estáveis de carbono (C) e nitrogênio (N) têm sido mais frequentemente associados a estudos do nicho ecológico de animais (NEWSOME *et al.*, 2007) do que a determinação de origem geográfica. No entanto, a utilização destes como marcadores geográficos tem sido feita para tecidos vegetais, como exemplos de aplicações para a origem de drogas, como maconha (SHIBUYA *et al.*, 2006),

cocaína (EHLERINGER *et al.*, 2000) e madeira (KAGAWA; LEAVITT, 2010), mas também com animais, como aves (GARCÍA-PÉREZ; HOBSON, 2014) e elefantes (CERLING *et al.*, 2006).

Um outro elemento que vem sendo utilizado cada vez com mais frequência em estudos para determinação da origem geográfica, é o estrôncio (Sr). O Sr biodisponível é resultado da integração de variadas fontes (rocha mãe, água e fontes atmosféricas) que são resultantes de interações nas escalas de tempo ecológica e geológica. Isso tem sido mapeado em algumas regiões do mundo e utilizado para estudos forenses de origem geográfica (BATAILLE *et al.*, 2014; BATAILLE; LAFFOON; BOWEN, 2012).

A possibilidade de atribuir indivíduos ou vestígios examinados às suas regiões de origem tem sido denominada na literatura internacional pelo termo, do inglês, “assignment”, no português atribuição (WUNDER; NORRIS, 2008). A metodologia utilizada para atribuição é ampla, utilizando modernas ferramentas de estatística multivariada (BOWEN *et al.* 2014; RUNDEL *et al.*, 2013).

No presente artigo são apresentados os princípios biogeoquímicos e as metodologias utilizadas para atribuir amostras desconhecidas à sua origem geográfica utilizando isótopos estáveis. Após isso, são apresentados contextos forenses de aplicação destas ferramentas e o potencial quanto à sua aplicabilidade no Brasil.

2. BASES BIOGEOQUÍMICAS

Isótopos são espécies de um mesmo elemento químico que apresentam variações no número de nêutrons em seu núcleo atômico, mantendo o mesmo número de prótons e elétrons. Quando não emitem radiação, são denominados de isótopos estáveis. Como por exemplo, o carbono (C), apresenta os isótopos estáveis ^{12}C e ^{13}C . O isótopo ^{12}C contém 6 prótons e 6 nêutrons no núcleo enquanto o isótopo ^{13}C possui 6 prótons, mas 7 nêutrons em seu núcleo. Desta forma o isótopo ^{12}C é mais leve que o isótopo ^{13}C , mais pesado por ter uma massa atômica maior. Naturalmente, os isótopos mais leves são muito mais abundantes na natureza do que os isótopos mais pesados. Desta forma

usa-se a razão isotópica (R) entre eles, onde a R da amostra é comparada à R de um padrão internacional pré-definido para definir o valor de delta: $\delta = (R_{\text{amostra}} / R_{\text{padrão}} - 1)$ e multiplicado por 1000 para se obter um valor mais fácil de ser visualizado e comparado. R_{amostra} é a razão entre átomos mais pesados e mais leves de um mesmo elemento químico de uma determinada amostra. $R_{\text{padrão}}$ é a razão entre átomos mais pesados e mais leves de um padrão internacionalmente reconhecido. No caso do carbono, este padrão é a proporção isotópica de carbono encontrada no rostró de um cefalópode do Jurássico denominado “PeeDee Belemnite” (PDB), enquanto utiliza-se o ar atmosférico para o nitrogênio. Para o hidrogênio e oxigênio, o valor de referência internacional é o oxigênio da água do mar (VSMOW – “Vienna Standard Mean Ocean Water”). O valor R é, portanto, adimensional e seu valor é multiplicado por mil, criando uma notação chamada δ por mil (‰), que, no caso do carbono, por exemplo, pode ser expressa como ou $\delta^{13}\text{C}$ ou composição isotópica do carbono.

Isótopos leves e pesados, devido a processos biogeoquímicos e físicos, reagem de modo diferente, o que gera diferentes proporções deles em materiais ou ambiente, o que é chamado de fracionamento isotópico (FRY, 2006).

Para o hidrogênio e oxigênio, a evidente marcação geográfica apresentada pela composição isotópica destes elementos ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, respectivamente) está relacionada à circulação atmosférica da água. À medida que o vapor do oceano se encaminha para o continente dando origem às chuvas, ocorre fracionamento, que é resultado da precipitação e evaporação diferenciais entre o isótopo mais pesado (precipita mais e evapora menos) e o mais leve (ficando cada vez mais predominante na atmosfera continental) (BAISDEN *et al.*, 2016). Isso gera diferenças entre as suas proporções à medida que a chuva avança sobre o interior do continente, marcando a origem geográfica da água da chuva. Esse efeito é denominado de continentalidade. Outros efeitos marcantes são temperatura e elevação. As regiões de maiores latitudes e maiores altitudes no planeta apresentam-se bastante evidenciadas em mapeamentos isotópicos globais, apresentando maior fracionamento e razões isotópicas mais baixas (BOWEN, 2010). A água disponível em cada local, apresenta diferentes razões isotópicas e isso é incorporado nos tecidos quando a água é ingerida (EHLERINGER *et al.*, 2008).

Já a variação na composição isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) reflete o tipo de fotossíntese utilizado pelas plantas (tipo C_3 , em geral leguminosas, árvores e arbustos, e tipo C_4 , em geral gramíneas tropicais como a cana-de-açúcar, milho e as utilizadas para forragem). O $\delta^{13}\text{C}$ das plantas C_3 varia entre -34‰ e -24‰ e as do tipo C_4 varia entre -15‰ e -11‰ (FARQUHAR; EHLERINGER; HUBICK, 1989). A diferente faixa de variação entre C_3 e C_4 é bastante evidente, não havendo sobreposição entre elas, o que torna fácil a diferenciação entre plantas C_3 e C_4 como fontes alimentares. O $\delta^{13}\text{C}$ das plantas consumidas pelos animais é mantido nos tecidos dos animais herbívoros, que por sua vez é mantido pelos seus predadores, de modo que é possível rastrear a base da alimentação ao longo da cadeia alimentar, uma vez que este processo de assimilação e incorporação nos tecidos (exceto o tecido adiposo), praticamente não altera o valor do $\delta^{13}\text{C}$ das plantas que foram consumidas. Utilizar o $\delta^{13}\text{C}$ como marcador geográfico de animais e humanos, está relacionado com a disponibilidade de plantas C_3 ou C_4 em uma determinada região e com o quanto cada tipo de planta será a base de consumo de toda a cadeia alimentar. Isso pode variar de espécie para espécie, dependendo das preferências alimentares, ou de região para região, de acordo com a distribuição espacial de plantas C_3 ou C_4 .

Levando em consideração somente o grupo de plantas C_3 , sabe-se que pode haver variação de $\delta^{13}\text{C}$ em função de fatores ambientais como irradiância, temperatura, umidade relativa e disponibilidade de água no solo, geralmente relacionados à geografia. Esses fatores influenciam no funcionamento dos estômatos e nas taxas fotossintéticas, influenciando no fracionamento do carbono incorporado pelas plantas. Essa característica permitiu o rastreamento de *Cannabis sativa* (SHIBUYA *et al.*, 2006) e de madeira apreendida (KAGAWA; LEAVITT, 2010), uma vez que o $\delta^{13}\text{C}$ de *Cannabis sativa*, por exemplo, pode variar de -30‰ a -24‰ dependendo das condições ambientais de cultivo. As concentrações de CO_2 ambiental também podem interferir no fracionamento isotópico, e consequentemente no $\delta^{13}\text{C}$ das plantas. Isso permite, por exemplo, a diferenciação entre maconha (*Cannabis sativa*) produzida em ambientes internos e externos, especialmente se houver adição de CO_2 oriundo de combustíveis fósseis engarrafados na atmosfera da estufa e isso é refletido na folha da maconha ($\delta^{13}\text{C}$ varia de -37‰ a -28‰, enquanto o $\delta^{13}\text{C}$ atmosférico é -8‰, em média) (HURLEY; WEST; EHLERINGER, 2010).

Já a composição isotópica de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) reflete principalmente os complexos processos biogeoquímicos que ocorrem no solo e são dependentes tanto de fatores ambientais quanto bióticos. O $\delta^{15}\text{N}$ de compostos nitrogenados produzidos a partir da fixação biológica ou produção antrópica a partir do nitrogênio atmosférico é próximo a 0‰, enquanto que os oriundos de fertilizantes orgânicos possuem $\delta^{15}\text{N}$ mais elevado (BATEMAN; KELLY, 2007). O solo em geral é o ponto de referência para estudos com esse elemento, já que a partir de seus níveis basais ocorre a interação com as plantas e a incorporação na cadeia alimentar. Por isso, estudos são feitos para entender que fatores ambientais (como precipitação, temperatura, latitude, altitude e pH), biológicos e estruturais do solo influenciam suas razões isotópicas (CRAINE *et al.*, 2015). Esses estudos permitem entender melhor como ocorrem as variações geográficas regionais e locais de $\delta^{15}\text{N}$, tornando os modelos de atribuição mais refinados.

O $\delta^{15}\text{N}$ é fortemente influenciado pela posição do consumidor na cadeia alimentar, de forma que os herbívoros apresentam discriminação isotópica de cerca de 3‰ em relação às plantas, e os predadores de 3‰ em relação às presas (NEWSOME *et al.*, 2007), por conta do fracionamento durante as atividades metabólicas dos animais. Dessa maneira, a variação do $\delta^{15}\text{N}$ de uma espécie vai depender de suas preferências alimentares. No entanto, os níveis de $\delta^{15}\text{N}$ também vão ser influenciados pelos níveis basais de cada região. Se uma determinada espécie mantiver o seu nível trófico em diferentes regiões, será melhor candidata a ser usada como modelo do uso do $\delta^{15}\text{N}$ como marcador geográfico.

Mais recentemente, a razão isotópica de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) vêm sendo utilizada para atribuição geográfica (BATAILLE; BOWEN, 2012). Esse elemento, ao contrário dos outros citados anteriormente, praticamente não sofre fracionamento entre substrato e produto (POUILLY *et al.*, 2014). A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ varia de acordo com idade da rocha mãe, de forma que valores isotópicos do solo dependem da geologia local. No entanto processos erosivos ocorrem de modo heterogêneo podendo alterar os níveis isotópicos no solo. Além disso, a deposição atmosférica também pode influenciar nos valores isotópicos do solo. Assim, modelar espacialmente a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na água e no solo não é uma tarefa simples, mas a utilização da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ como

marcador geográfico tem sido testada e se apresentado promissora (BATAILLE; BOWEN, 2012). Os valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ disponíveis no solo e na água são incorporados aos tecidos por meio da alimentação e da ingestão de água. No entanto, o estrôncio atmosférico pode se depositar no cabelo, confundindo o valor isotópico intrínseco (oriundo da água e comida) do extrínseco (oriundo do ambiente). Produtos aplicados no cabelo como shampoos e tintas também podem alterar a composição isotópica de estrôncio. No entanto, lavagens do material analisado, eliminando o estrôncio superficial, têm se mostrado eficientes em remover o isótopo acumulado mais externamente, o que torna o uso do cabelo ainda válido para análises (TIPPLE *et al.*, 2013).

Como o fracionamento isotópico de cada elemento apresenta bases biogeoquímicas diferentes as informações geradas podem ser utilizadas de modo complementar, de forma que o uso de mais de um elemento para determinar a origem geográfica de um vestígio tem sido amplamente usado na literatura e resultado em informações mais detalhadas na forma de melhor resolução espacial para a atribuição (CHABOT *et al.*, 2012; RUNDEL *et al.*, 2013).

3. TEMPO DE RENOVAÇÃO DOS TECIDOS

O crescimento dos diferentes tecidos vegetais tem periodicidade diferente e pode variar de acordo com a fenologia de cada espécie. Enquanto para folhas, flores e frutos este crescimento pode ser semestral, anual ou bianual, os troncos normalmente terão crescimento contínuo, e uma vez formados são permanentes (tecido permanente).

As árvores das florestas temperadas normalmente apresentam anéis de crescimento bem marcados relacionados a diferentes condições climáticas ao longo do ano, marcando a sazonalidade bem definida no hemisfério norte. No verão as plantas crescem mais rápido e no inverno as plantas crescem mais lentamente, marcando a estrutura do tronco, que é visualizada em seu corte transversal. Desta forma a quantidade de anéis marcados é usado como indicativo da idade da árvore. Esses anéis podem ser amostrados sequencialmente de modo a representar as variações isotópicas anuais, sendo utilizados inclusive para estudos de variações climáticas (ANCHUKAITIS *et al.*, 2008).

Por outro lado, esses anéis normalmente não são bem marcados nas regiões tropicais, já que a sazonalidade climática não é tão bem marcada com diferenças drásticas de temperatura, como no hemisfério norte. Nestas regiões alguns estudos estimam a idade das plantas a partir de estudos individuais para cada espécie (JACOBY, 1989).

Em relação aos animais, quando um indivíduo se alimenta, parte dos elementos que constituem esse alimento será absorvido pelo organismo, incorporando-se aos seus tecidos. É importante conhecer previamente a taxa de renovação (ou “turnover”) específica do tecido estudado, e com isso, o tempo que a razão isotópica dos diferentes elementos (C, N, O, H) levam desde a sua ingestão pelo organismo até a sua incorporação em cada tecido e subsequente excreção (HOBSON; CLARK, 1992). No caso dos mamíferos, células hepáticas e sanguíneas são as que se renovam mais rapidamente, enquanto as células de tecidos musculares e pelos são as mais lentas (TIESZEN *et al.*, 1983). Além disso, estas taxas também podem variar ao longo da ontogenia e de acordo com as condições a que o indivíduo está sujeito (e.g.: estresse hídrico e nutricional).

Penas de aves, cabelos e unhas são tecidos de queratina metabolicamente inertes. Estes tecidos refletem as razões isotópicas dos elementos presentes na dieta do indivíduo no momento em que foram formados (PEARSON *et al.*, 2003). As penas normalmente se formam durante a muda, que em geral ocorre uma vez ao ano (PYLE; RUTH, 2008), o cabelo humano se desenvolve cerca de 1 cm por mês (EHLERINGER *et al.*, 2008) e as unhas apresentam crescimento lento e contínuo (BEARHOP *et al.*, 2002).

Esse entendimento é importante, pois conhecendo-se a taxa de renovação do tecido, podem ser feitas interpretações isotópicas temporais do vestígio analisado. Quando se estuda aves migratórias, por exemplo, sabe-se que a pena analisada foi trocada nos locais de verão ou de invernada e as inferências sobre sua origem baseiam-se no conhecimento sobre a fenologia das mudas (HOBSON *et al.*, 2012).

O cabelo humano vai acumulando sequencialmente as variações isotópicas decorrentes da alimentação e da locomoção por diferentes regiões geográficas. A análise sequencial do cabelo em seu com-

primento, pode ser feita, o que mostra a história recente da pessoa. Um exemplo clássico é o caso de Saltair Sally, um corpo encontrado à beira de uma rodovia que pode ser reconhecido graças à utilização de isótopos estáveis para a reconstrução de sua história individual (EHLERINGER *et al.*, 2015). O cabelo é um vestígio comum em cenas de crime e sua estrutura permanece inalterada por longo tempo, o que faz dele um bom traçador isotópico.

Os dentes representam períodos distintos da vida de um indivíduo. Assim, alguns dentes permanentes são formados na primeira infância, outros na segunda infância e outros na adolescência. A análise de diferentes dentes pode fornecer informações sobre parte da história de vida da pessoa.

O esmalte dentário é a parte superficial dos dentes. É composto principalmente de hidroxiapatita de cálcio. Como tem pouca vascularização e é altamente mineralizado (~ 96% mineral), o esmalte praticamente não é remodelado ou alterado durante a vida do indivíduo. É também altamente resistente a alterações post-mortem. A razão isotópica dos diferentes elementos contidos no dente reflete a incorporação de alimentos e água consumidos durante o período de mineralização da coroa (BENTLEY, 2006). O esmalte dos dentes decíduos integra a formação ocorrida entre a formação no útero e a primeira infância; dos permanentes, diferentes períodos de mineralização de suas coroas ao longo da infância; e pré-molares por exemplo mineralizam entre 3-6 anos da vida de uma pessoa, refletindo a dieta da primeira infância (ALQAHTANI; HECTOR; LIVERSIDGE, 2010).

Desta forma, quanto mais informações sobre as diferenças na fisiologia e metabolismo das espécies e sobre as diferentes taxas de crescimento e renovação dos tecidos mais refinada será a interpretação dos valores isotópicos. Há também a assimilação diferente das razões isotópicas entre vários tipos de tecidos, devido às diferentes rotas metabólicas e fracionamento, que deve ser levada em consideração (PEARSON *et al.*, 2003; QUILLFELDT *et al.*, 2008).

4. ISOSCAPES

A distribuição da variação isotópica ambiental ao longo da geografia é representada em mapas, conhecidos como *isoscapes* (do inglês: “isoscapes” = “isotopic” + “landscapes”) (BOWEN, 2010). Isoscapes ambientais globais e regionais, de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, são largamente utilizadas na literatura (WEST; FEBRUARY; BOWEN, 2014). No contexto brasileiro, Sena-Souza *et al.*, 2019, apresentam o potencial de aplicação das isoscapes com os métodos já existentes e como preencher lacunas espaciais e metodológicas, mostrando como as isoscapes podem ser uma ferramenta fundamental em aplicações forenses.

As isoscapes refletem por diferentes processos biogeoquímicos, dependendo da escala geográfica e dos materiais estudados. As principais isoscapes ambientais disponíveis atualmente e utilizadas para atribuição são as de escalas globais e estão indicadas na Tabela 1. Para a montagem de isoscapes de escalas locais e regionais, a tendência é utilizar coletas de campo georreferenciadas e sistematizadas. De posse dos valores das razões isotópicas obtidas destas amostras reais, usa-se a krigagem ordinária (“ordinary krigging”) após a análise de semivariogramas para a construção das isoscapes (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Referência	Razão Isotópica	Tipo	Método/Equação	R ²	Tamanho do pixel
FARQUHAR <i>et al.</i> , 1993	$\delta^{18}\text{O}$	Precipitação e CO_2	$\delta^{18}\text{O} = 0.587(\text{MAT}) - 0.00993(\text{MAT})^2 + 1.152(\text{MAP}) - 0.339(\text{MAP})^2 - 0.054(\text{E}) - 13.3$	0.72	2.5° x 2.5°
LLOYD; FARQUHAR, 1994	$\delta^{13}\text{C}$	Assimilação líquida de ^{13}C por plantas	Calculado usando a temperatura média mensal e a precipitação e as temperaturas do bulbo úmido e seco		1° x 1°
FUNG <i>et al.</i> , 1997	$\delta^{13}\text{C}$	Assimilação líquida de ^{13}C por plantas	Assimilação líquida média mensal do SiB2 acoplada ao modelo climático		4° x 5°

Referência	Razão Isotópica	Tipo	Método/Equação	R ²	Tamanho do pixel
BOWEN; WILKINSON, 2002	$\delta^{18}\text{O}$	Precipitação	$\delta^{18}\text{O} = 0.1805(\text{L}) - 0.0051(\text{L})^2 - 0.002(\text{E}) - 5.2$; Regressão da base de dados GNIP com altimetria e variáveis climáticas/interpolação residual	0.76	5' x 5'
KAPLAN <i>et al.</i> , 2002	$\delta^{13}\text{C}$	Biosfera e atmosfera	Adaptação do modelo BIOME4 baseado em variáveis climáticas		0.5° x 0.5°
AMUNDSON <i>et al.</i> , 2003	$\delta^{15}\text{N}$	Planta e solo	$\delta^{15}\text{N}_{\text{soil}} = 0.2048(\text{MAT}) - 0.0012(\text{MAP}) + 4.3266$ $\delta^{15}\text{N}_{\text{plant}} = 0.1548(\text{MAT}) - 0.0016(\text{MAP}) + 0.0697$	0.39 0.34	0.5° x 0.5°
BOWEN; REVENAUGH, 2003	$\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	Precipitação	$\delta^2\text{H} = 0.562(\text{L}) - 0.0338(\text{L})^2 - 0.0136(\text{E}) + \theta$ $\delta^{18}\text{O} = 0.0780(\text{L}) - 0.00428(\text{L})^2 - 0.00194(\text{E}) + \theta$	0.58 0.61	5' x 5'
SUTTS <i>et al.</i> , 2005‡	$\delta^{13}\text{C}$	Assimilação líquida de ¹³ C por plantas	Assimilação líquida usando SiB2.5 e parâmetros de vegetação a partir de observações de satélite		1° x 1°
BOWEN <i>et al.</i> , 2005	$\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	Precipitação e penas de aves	Regressão entre $\delta^2\text{H}_f$ and $\delta^2\text{H}_p$ de Bowen e Revenaugh (2003): $\delta^2\text{H}_f = 0.89(\delta^2\text{H}_p) - 25.2$	0.67	20' x, 20'
WEST <i>et al.</i> , 2008	$\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	Água foliar	Combination of biophysical models of isotope fractionation and Bowen and Revenaugh (2003) model		10' x 10'

Referência	Razão Isotópica	Tipo	Método/Equação	R ²	Tamanho do pixel
VAN DER VEER <i>et al.</i> , 2009	$\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	Precipitação	$\delta^2\text{H} = -51.2$ $\exp[-0.040(\text{CQT})]$ $- 5.1$ $\delta^{18}\text{O} = -5.9$ $\exp[-0.041(\text{CQT})]$ $- 2.4]$	0.79 0.79	10' x 10'
POWELL <i>et al.</i> , 2012	$\delta^{13}\text{C}$	Cobertura da terra e solo	Divisão entre as formas de crescimento da vegetação e classificação de pixels como favoráveis a C3 ou C4		5' x 5'
TERZER <i>et al.</i> , 2013	$\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	Precipitação	Precipitação Regional Isotópica da Água Baseada em Cluster (RCWIP)		10' x 10'

Tabela 1 – Exemplos de modelos de isoscapes globais. R² é o coeficiente de determinação estatística

Abreviações: “CQT”, temperatura do quarto mais frio; E, elevação (m); L, latitude (°); “MAT”, temperatura média anual (°C); “MAP”, precipitação média anual (mm); θ , interpo-
lação residual; “GPP”, produção primária bruta; “SiB2” modelo simples da biosfera.

4.1. CALIBRAÇÃO

O termo *calibração* tem sido utilizado na literatura com o objetivo de projetar as informações das isoscapes ambientais para tecidos ou materiais orgânicos para se obter uma representação espacial contínua dos valores isotópicos teciduais, gerando uma isoscape tecidual. A amostra de origem desconhecida vai pertencer, de modo probabilístico, a determinadas regiões dessa isoscape tecidual.

A forma como os tecidos orgânicos incorporam a variação geográfica ambiental dos isótopos estáveis de um determinado elemento depende de uma série de fatores. Diferenças entre as espécies, características dos micro-habitat de uma determinada região, o momento da muda e o nicho trófico de uma determinada espécie, já foram identificadas como cruciais para a calibração (HOBSON *et al.*, 2012). Assim, uma etapa essencial no processo de criação de modelos de atribuição é saber como o tecido estudado varia ao longo da geografia.

Se existem amostras suficientemente distribuídas ao longo do espaço estudado, podem ser utilizados métodos geoestatísticos para a interpolação dos dados e gerada uma isoscape a partir do próprio tecido de um determinado material (HOBSON *et al.*, 2009). Essa seria a situação ideal para um melhor refinamento do modelo de atribuição. No entanto, amostrar amplas áreas geográficas pode ser inviável do ponto de vista prático, por demandar uma logística complexa, assim como recursos financeiros. Por isso, a calibração é feita para se extrapolar informações para áreas não amostradas.

A relação entre a razão isotópica de um elemento que se encontra no ambiente e nos tecidos animais pode ser estimada de algumas maneiras. Uma delas é conhecer quais os mecanismos que influenciam na incorporação destes elementos. Essa relação pode ser estimada a partir de experimentos em cativeiro, por exemplo (PODLESÁK *et al.*, 2008). Outra forma é, a partir de pontos de amostras de origem conhecida, fazer uma aproximação estatística (p.ex. regressão) entre a isoscape ambiental e os valores das razões isotópicas do material em questão. Quando essa relação é encontrada, outros estudos podem utilizá-la como padrão (GARCÍA-PÉREZ; HOBSON, 2014). No entanto, Wunder e Norris, 2008, sugerem que uma simples função de calibração não deve ser usada em muitos casos diferentes, mas que uma calibração específica seja feita para cada caso para que se produza resultados mais robustos e confiáveis. Por exemplo, isoscapes teciduais podem ser geradas para grupos de espécies (HOBSON *et al.*, 2012) ou a partir das isoscapes de outras espécies. Hobson *et al.*, 2009, fizeram ampla amostragem de penas de pardais no México e geraram um modelo de isoscape de $\delta 2H$ para o país. Os autores sugerem o uso desse modelo para subsidiar outros estudos sobre origem de animais.

5. MODELOS DE ATRIBUIÇÃO ISOTÓPICA

A base primordial da atribuição isotópica é referenciar uma amostra ou grupo de amostras de origem desconhecida às localidades com razões isotópicas mais condizentes com a razão isotópica desta amostra ou grupo de amostras.

O modo mais intuitivo de atribuição é, de posse do resultado isotópico da amostra de origem desconhecida, localizar visualmen-

te na isoscape os locais mais prováveis de ocorrência (“map-lookup approach”, WUNDER, 2010). No entanto, esta abordagem apresenta a desvantagem de considerar um mesmo valor isotópico para uma ampla faixa geográfica, que por sua vez pode apresentar uma variação natural intrínseca. Além disso, esta abordagem visual não leva em consideração a variabilidade (ou incertezas) das variáveis ambientais e biológicas, seja individualmente, temporalmente ou em decorrência da análise laboratorial.

Modelos estatísticos de atribuição consideram esta variação ambiental e biológica e são capazes de apresentar as prováveis áreas de origem de modo espacialmente contínuo ou discreto (WUNDER; NORRIS, 2008).

Áreas contínuas são denominadas de superfícies probabilísticas, que na prática são *rasters* (imagem formada por matriz de pontos que representa uma grade retangular de pixels ou células), contendo pixels com valores de probabilidade. Quando se trabalha com dados contínuos, a isoscape tecidual é a base para se estimar a probabilidade de atribuição, utilizando-se funções de distribuição normal. O valor da razão isotópica da amostra que se quer atribuir, e sua variação, estimada a partir da variância estatística dos valores isotópicos de origem conhecida, são utilizados para estimar a superfície probabilística de atribuição.

As áreas discretas são localidades, blocos ou regiões previamente definidas. Essa definição pode se dar por questões políticas, práticas ou por viés de amostragem e nem sempre representar a variação isotópica intrínseca de um determinado elemento na natureza. Grupos de amostras podem apresentar semelhanças entre si e a atribuição ocorrer por similaridade com essas amostras. Exemplos mostram diferentes regiões com diferentes razões isotópicas a que é possível atribuir amostras de origem desconhecida (CERLING *et al.*, 2006; SHIBUYA *et al.*, 2007). O grau de similaridade, quando se trabalha com dados discretos, entre a amostra e a localidade, ou entre uma amostra e grupos de amostras, é medido a partir de funções de verossimilhança (“likelihood function”), em geral, realizadas através de análises discriminantes.

A avaliação dos modelos de atribuição elaborados a partir de amostras de origem conhecida é feita estimando-se a razão de chance (“odds ratio”) entre a máxima probabilidade estimada após a atribuição isotópica e a probabilidade resultante no pixel referente às coordenadas geográficas de origem da amostra, o que mede a robustez do modelo independente de limites de confiança estatística (WUNDER, 2012). Pode-se testar o modelo, excluindo-se a cada rodada, uma amostra de origem conhecida. A distância da atribuição estimada para essa amostra, a partir da localidade de máxima probabilidade, é medida até sua origem real. Um melhor modelo apresenta uma maior porcentagem de atribuições, dentro de uma área máxima estipulada como limite, representando o nível de assertividade do modelo.

5.1. POTENCIAL DE USO DOS MODELOS DE ATRIBUIÇÃO ISOTÓPICA NO CONTEXTO FORENSE

Espera-se no contexto forense, atribuir as amostras individuais às suas reais áreas de origem, ou diferenciar entre duas ou mais regiões de origem, certificar se vieram de uma determinada região de interesse, ou por exclusão de áreas de menor probabilidade de origem. Em qualquer uma das hipóteses, o resultado da atribuição será fornecido na forma de probabilidades e a robustez da predição vai depender dos testes do modelo realizados com amostras conhecidas.

O resultado dos laudos periciais em forma de probabilidades é comum para análise de DNA na área forense (EVETT; WEIR, 1998) e tem sido sugerido para outras áreas, como a grafoscopia (HOLLER; VILLELA, 2005). Mesmo que não haja um resultado taxativo, ou enfático, o resultado pericial em probabilidades pode subsidiar a investigação policial, indicando as regiões mais prováveis para busca de elementos provatórios, e também poderá ser apreciado pela autoridade julgadora e ser auxiliar para fundamentar a sentença.

Para tornar os modelos de atribuição mais assertivos para aplicação forense, o ideal seria a formação de bancos de dados isotópicos, uma vez que os valores isotópicos são comparáveis entre laboratórios por seguirem um padrão único. Um banco de dados mundial reduziria

consideravelmente a necessidade de duplicação de esforços individuais (GENTILE *et al.*, 2015). Dessa maneira, bancos de dados isotópicos podem ser construídos de maneira colaborativa com fins forenses, que poderiam ter abrangência tanto nacional como internacional. Quanto mais amostras de origem conhecida adicionadas ao banco, mais robusta a predição de similaridade das amostras questionadas. Pauli *et al.*, (2017), sugerem a criação de um repositório de dados centralizado e de uso amplo, reunindo diversas aplicações isotópicas, iniciativa que denominam de Isobank.

O resultado probabilístico de atribuição pode ainda ser complementado por outras informações contextuais. Há estudos que mostram exclusão de áreas baseados em diversos critérios, como históricos (FONT *et al.*, 2015) e biológicos (ROYLE; RUBENSTEIN, 2004). No caso de Saltair Sally, por exemplo, a atribuição isotópica foi útil por resultar em áreas de origem fora da jurisdição inicialmente investigada. Ao ampliar a área provável, a queixa por pessoa desaparecida dada pela família foi localizada, e foi possível fazer a identificação do corpo (EHLERINGER *et al.*, 2015). No caso de aves migratórias, a distribuição natural das aves, ou abundância nas regiões de origem, pode ser utilizada como informação complementar.

A junção dessas informações contextuais em termos numéricos, é feita por meio de estatística Bayesiana. Na ausência de dados isotópicos, existindo, por exemplo, dados sobre a maior abundância natural de indivíduos de uma mesma espécie em uma região (1) versus em outra região (2), é razoável pensar que o indivíduo alvo teria uma chance maior de ter vindo da região 1. Os dados de abundância serão utilizados à priori, de acordo com as regras Bayesianas: $P(B | A) = P(A | B) * P(B) / P(A)$, onde, $P(B | A)$ é a probabilidade posterior de um evento B, dado o evento A, $P(A | B)$ é a probabilidade dos dados observados dados os parâmetros do modelo (por exemplo, os resultados da função de probabilidade normal citada acima), $P(B)$ é a probabilidade, a priori, para B e $P(A)$ é uma probabilidade marginal que serve como uma constante de normalização (WUNDER; NORRIS, 2008).

5.2. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ATRIBUIÇÃO

Para exemplificar o uso da metodologia descrita anteriormente, foram utilizados os dados de Nardoto *et al.*, 2014, para produzir um modelo de atribuição baseado em $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ para folhas de árvores da Amazônia brasileira. Para subsidiar a montagem destas isoscapes foliares foram utilizadas como base as isoscapes de $\delta^{13}\text{C}$ de folhas (POWELL; YOO; STILL, 2012) e $\delta^{15}\text{N}$ do solo (NARDOTO *et al.*, 2019) e variáveis ambientais (precipitação nos três meses mais quentes do ano, precipitação nos meses mais úmidos, temperatura mínima nos meses mais frios e meses em que a precipitação esteve abaixo de 100 mm) obtidas no site WorldClim (HIJMANS *et al.*, 2005). Para utilização da isoscape de $\delta^{13}\text{C}$ de folhas, foram selecionados somente os valores inferiores a -20‰, já que o interesse era somente por árvores (plantas C_3).

O teste de atribuição foi realizado utilizando a distribuição normal bivariada de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, com resultados para indivíduos da espécie matamatá (*Eschweilera coriacea*) publicados em Nardoto, 2005, e Martinelli *et al.*, 2007. A espécie possui potencial madeireiro, ocorre em praticamente toda a região de terra-firme na Amazônia brasileira.

Foi adotado o seguinte procedimento: (1) plotagem dos valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ foliar de árvores das parcelas amostradas; (2) aplicação do modelo de regressão linear múltipla entre $\delta^{13}\text{C}$ foliar e $\delta^{15}\text{N}$ foliar e as variáveis ambientais citadas acima; (3) extrapolação a partir da equação do modelo utilizando operação de raster e gerando a isoscape foliar de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ da Amazônia brasileira (calibração, Figura 1 a e b); e (4) teste de atribuição utilizando função da distribuição normal bivariada (Figura 2).

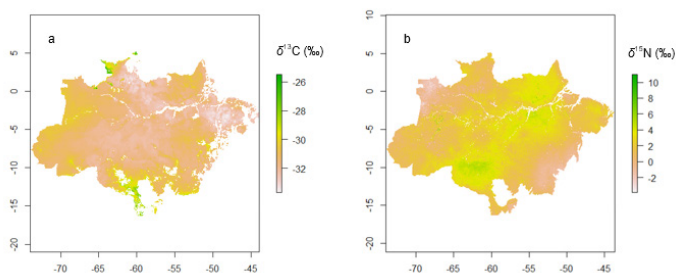


Figura 1 – Isoscapes de $\delta^{13}\text{C}$ (a) e $\delta^{15}\text{N}$ (b) de folhas de árvores da Amazônia brasileira. Eixos: x – longitude em graus decimais, eixo y – latitude em graus decimais.

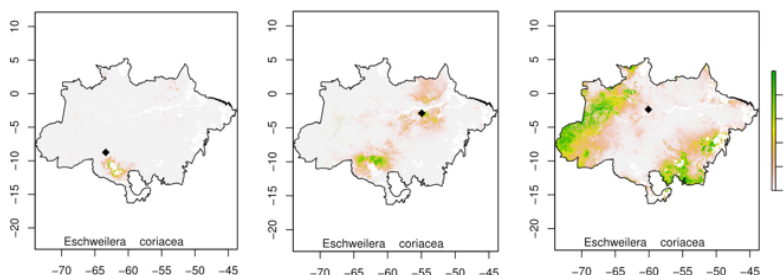


Figura 2 – Resultados dos testes de atribuição para três indivíduos da espécie matamatá (*Eschweilera coriacea*). Escala colorida em probabilidade de origem, normalizada. Eixos: x – longitude em graus decimais, eixo y – latitude em graus decimais. O ponto preto representa a localização geográfica conhecida da amostra em teste

6. APLICAÇÕES DA ATRIBUIÇÃO ISOTÓPICA

6.1 ORIGEM DE ANIMAIS

Os impactos diretos do tráfico de animais silvestres continuam a ameaçar a biodiversidade no Brasil. Há ainda um grande número de animais vivos e produtos de origem animal sendo confiscados todos os anos em atividades ilegais (ALVES; DE FARIAS LIMA; ARAUJO, 2012; DESTRO *et al.*, 2012; REGUEIRA; BERNARD, 2012). O transporte causado pelo tráfico de animais pode ser comparado à migração natural de aves, devido ao deslocamento de animais em escala continental (COSTA *et al.*, 2018; DESTRO *et al.*, 2012).

A atribuição de animais migratórios aos seus locais de origem utilizando marcadores isotópicos tem sido realizada amplamente na literatura internacional, sobretudo para aves, havendo inclusive um livro tratando do assunto (HOBSON; WASSENAAR, 2018). Outros estudos abordam diversos grupos animais, como por exemplo mamíferos (CERLING *et al.*, 2006; CRYAN; STRICKER; WUNDER, 2014), répteis (SEMINOFF *et al.*, 2012), peixes (HANSON *et al.*, 2013; TORNIAINEN *et al.*, 2017), e invertebrados (WASSENAAR; HOBSON, 1998).

A relação entre a variação isotópica da água precipitada e tecidos de aves é conhecida para diversas espécies na América do Norte, o que facilita a utilização de modelos isotópicos mais específicos (HOBSON, *et al.*, 2012). Algumas limitações de seu uso também são conhecidas (FARMER; CADE; TORRES-DOWDALL, 2008). Os estudos visam sobretudo estabelecer a conectividade entre suas origens e destinos, estabelecendo rotas migratórias a fim de subsidiar programas de conservação e monitoramento das áreas mais suscetíveis a ameaças.

Modelos de atribuição de aves migratórias já foram feitos para a América do Sul (GARCIA-PEREZ *et al.*, 2013; GARCÍA-PÉREZ; HOBSON, 2014; HOBSON; KARDYNAL, 2016). E no Brasil, associando a isoscape de $\delta^2\text{H}$ da precipitação com a isoscape de $\delta^{13}\text{C}$ com base nos tipos de vegetação (POWELL; YOO; STILL, 2012), foi possível distinguir três amplas regiões de origem destas aves migratórias (GARCÍA-PÉREZ; HOBSON, 2014).

O potencial de atribuir animais traficados às suas regiões de origem no Brasil depende do refinamento das isoscapes ambientais atualmente existentes para o Brasil (NARDOTO *et al.*, 2019) com a obtenção de mais pontos amostrados tanto espacialmente como temporalmente. A isoscape de $\delta^{13}\text{C}$ foliar que foi construída com dados de sensoriamento remoto, não considera por exemplo, a variação local da vegetação do Cerrado em mosaico, região em que o erro do modelo é o maior entre as regiões brasileiras (POWELL; YOO; STILL, 2012).

6.2 ORIGEM DE VESTÍGIOS HUMANOS

A identificação de vítimas de assassinatos, reconstrução da história individual, o combate ao tráfico humano e imigração ilegal são alguns exemplos de contexto em que a atribuição isotópica tem sido utilizada (EHLERINGER *et al.*, 2015; EHLERINGER; MATHE-SON JR., 2010).

Existem exemplos que utilizam isoscapes ambientais em modelos estatísticos de atribuição e outros baseiam-se em exclusão de áreas com valores isotópicos bastante diferentes ou fazem inferências lógicas diretas a partir da análise de conjunto de dados contextuais. Laffoon *et al.*, 2017, utilizam duas metodologias para atribuição humana na região caribenha, uma delas utilizando modelos estatísticos de atribuição e a outra utilizando abordagem de localização direta no mapa.

Assim como para as aves, o $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ da água são importantes indicadores da posição geográfica para o ser humano, como podem ser vistos na relação existente entre as isoscapes de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para o cabelo humano e da água da torneira ao longo dos Estados Unidos (EHLERINGER *et al.*, 2008).

O $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ são normalmente usados em associação, fornecendo informações sobre alimentação, que podem depender da nacionalidade, de hábitos alimentares ou da região (NARDOTO *et al.*, 2006; NARDOTO *et al.*, 2011; VALENZUELA *et al.*, 2011). A construção da isoscape “fonte-consumidor”, entre o carbono e nitrogênio da unha de populações rurais e urbanas brasileiras e o $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das fontes alimentares, como demonstrado por Nardoto *et al.*, 2019, foi utilizada como uma ferramenta para traçar os padrões alimentares humanos no Brasil. Esse padrão pode ser usado no contexto da antropologia forense para rastreamento da origem de restos humanos, assim como em estudos de movimentação humana por diferentes regiões geográficas.

A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, por sua vez, tem sido utilizada para atribuição, sobretudo em combinação com $\delta^{18}\text{O}$ (LAFFOON *et al.*, 2017), mas depende de informações prévias da isoscape ambiental, ainda não disponível para todas as regiões do mundo.

Diferentes hábitos alimentares e culturais devem ser levados em consideração em estudos envolvendo seres humanos. A preferência por alimentação onívora ou vegetariana, o hábito de cozinhar alimentos e de ferver a água, por exemplo são alguns fatores que podem interferir nos resultados isotópicos. Por isso, para aplicações com seres humanos deve-se trabalhar com isoscapes específicas.

Para aplicação no Brasil, seria importante um maior detalhamento a partir da utilização de dados de tecido humano para criação de uma isoscape tecidual de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, a exemplo do que foi feito nos Estados Unidos. Os dados de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de Nardoto *et al.*, 2019, podem ser complementados para todo o país, produzindo informações sobre hábitos alimentares de modo mais detalhado. Além destas, isoscapes da razão $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ podem ser produzidas a partir de dados geológicos existentes utilizando a modelagem proposta por Bataille e Bowen. (2012)

6.3 ORIGEM DE MADEIRA ILEGAL

A extração ilegal de madeira no Brasil é um grande problema, principalmente na Amazônia, com coletas de espécies selecionadas a partir da prática de fraudes nos mecanismos de controle, como o sistema de documento de origem florestal (DOF-IBAMA). Frequentemente são observadas transferências indevidas de créditos no sistema, utilizadas para comercialização ilegal (BRANCALION *et al.*, 2018).

Gori, Stradiotti e Camin (2018) apresentaram um modelo de aplicação isotópica para a detecção da origem geográfica da madeira na Itália, em uma escala regional, utilizando $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$. Os autores produziram uma isoscape de madeira utilizando amostras coletadas sistematicamente na região estudada. O modelo mostrou-se útil para atribuição de madeira de origem ilegal. A variação espacial desses isótopos ocorreu sobretudo em razão da altitude, relação já conhecida entre esses isótopos da água precipitada. No entanto, os autores alertam que a utilização de isoscapes de precipitação não evidencia a tendência espacial relacionada à latitude na região, sugerindo que o uso dessas isoscapes como covariáveis para madeira deve ser feita com cautela.

Gori *et al.*, 2013, não obtiveram sucesso em utilizar $\delta^{13}\text{C}$ para atribuição de madeira, sugerindo que o insucesso se deva à menor escala da área estudada ou aos diferentes materiais vegetais amostrados. No entanto, Kagawa e Leavitt, 2010, compararam métodos de dendro-procedência, que utilizam comparações com anéis da madeira com amostras de origem conhecida, com $\delta^{13}\text{C}$, chegando à conclusão que o uso da metodologia isotópica se mostrou efetiva.

Os trabalhos citados acima estudam poucas espécies arbóreas, o que torna mais fácil a padronização e interpretação dos resultados encontrados. No Brasil, a diversidade de espécies de árvores que produzem madeira de valor comercial é bem maior e variações específicas de metabolismo vegetal (como plantas capazes de associações simbióticas e diferenças na eficiência no uso da água) podem alterar as razões isotópicas.

Contudo, as isoscapes foliares de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de árvores da Amazônia demonstradas acima, neste artigo, apresentam-se promissoras. Observa-se uma ampla variação espacial isotópica ao longo da Amazônia, com padrões específicos para $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$. Esses modelos podem ser refinados com melhor amostragem espacial, comparando diferentes tecidos vegetais e espécies madeireiras e estabelecendo métricas de assertividade e de avaliação dos modelos.

6.4 ORIGEM DE DROGAS ILÍCITAS

As drogas de abuso mais consumidas no Brasil são a maconha (*Cannabis sativa*) e a cocaína (*Erytroxylum coca*) (VELHO *et al.*, 2012). As duas drogas são traficadas mundialmente. O tráfico de maconha ocorre regionalmente, sendo em geral consumida no mesmo país em que é produzida, enquanto a cocaína é transportada dos países andinos da América Latina para os mercados da Europa (UNITED NATIONS, 2018).

Estudos para determinar a origem geográfica da maconha apreendida têm se baseado na variação de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nas plantas em função das condições climáticas e de solo. No caso do Brasil, um estudo diferenciando a razão isotópica de C e N de algumas áreas produtoras de maconha já foi realizado (SHIBUYA *et al.*, 2006). A metodologia de-

monstrou-se útil para identificar possíveis regiões de origem de maconha apreendida no estado de São Paulo, demonstrando que poucas amostras dentre as analisadas eram oriundas do sertão nordestino, ao contrário do que era suposto pelas autoridades (SHIBUYA *et al.*, 2007).

A situação do mercado de maconha atual deve ser diferente da época do estudo de Shibuya *et al.*, 2007, já que os criminosos tendem a migrar para áreas menos fiscalizadas e a usar diferentes tecnologias para plantações (UNITED NATIONS, 2018). Assim, o rastreamento destas áreas usando as diferenças regionais na razão isotópica pode ser usado para auxiliar no entendimento do tráfico de drogas, rotas e principais áreas fontes e para se priorizar ações de repressão ou prevenção, mas precisam produzir resultados atualizados. A aplicação continuada da metodologia nos casos de apreensão de drogas poderia alimentar banco de dados e fornecer informações importantes para a inteligência policial, a exemplo do que já ocorre em países como os Estados Unidos.

O uso de isótopos estáveis para determinar a origem de cocaína tem sido alvo de numerosos estudos internacionais (EHLERINGER *et al.*, 2000; MALLETTE *et al.*, 2016). Mallette *et al.*, 2016, por exemplo, utilizaram estatística multivariada para elaborar isoscapes regionais e a partir da análise de amostras apreendidas puderam acessar as principais origens da cocaína traficada para os Estados Unidos.

Nos EUA, há um programa da Agência de Repressão a Drogas (DEA), no sentido de criar uma base de dados com assinaturas das drogas (CHESSON *et al.*, 2018). No Brasil, uma iniciativa semelhante da Polícia Federal, destinada a estudar o perfil químico das drogas visando “*estabelecer origens geográficas e rotas do tráfico de drogas de abuso comercializadas no Brasil e contribuir com dados e estatísticas que consigam apontar as tendências deste mercado ilícito*” (MALDANER *et al.*, 2009) poderia contemplar análises isotópicas para se fazer testes de atribuição isotópica.

6.5 ORIGEM DE ALIMENTOS

Os países importadores precisam certificar-se da nacionalidade de origem do produto e detectar informações errôneas nos rótulos dos

alimentos importados. Na Europa o controle da qualidade e origem de alimentos está em um estágio bastante avançado (CAMIN *et al.*, 2016). Há uma legislação específica sobre rastreabilidade (178/2002/EC) de alimentos. Há ainda a obrigação de constar no rótulo de carnes informações sobre o país de origem e do abate do animal e alimentos com proteções especiais, dotados de propriedades organolépticas e culinárias únicas. Produtos oriundos de determinadas regiões geográficas possuem uma marca, como os queijos franceses e italianos. Alimentos de alta qualidade (como vinhos, queijos, embutidos e azeites) e de origem geográfica conhecida acabam sendo mais valorizados pelos consumidores e alcançam preços maiores no mercado, tornando-se alvos de falsificações.

A metodologia de isótopos estáveis para saber a origem de alimentos tem sido aplicada para diversos itens alimentares, de origem vegetal, como vinhos, café, suco-de-laranja, azeite de oliva, ou animal, como leite, queijo, carne e cera de abelha (CERLING *et al.*, 2016). Análises de vinho, suco de frutas, queijos e azeite de oliva já possuem métodos estabelecidos reconhecidos oficialmente (“standard methods”) (CAMIN *et al.*, 2016). Nos Estados Unidos há estudos que demonstram a relação de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de alimentos, como leite, carnes e bebidas, com o $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação (CHESSON *et al.*, 2010, 2011).

Em relação ao modo de produção e alimentação dos animais domésticos, o bife oriundo do Brasil, por exemplo, destaca-se por apresentar um $\delta^{13}\text{C}$ elevado, uma vez que predomina no país o forrageamento usando gramíneas exóticas africanas do tipo C_4 para a alimentação do gado, sendo facilmente diferenciado do originado em outros países, em que predomina uma dieta com base em plantas C_3 ou mistura de C_3 x C_4 (HEATON *et al.*, 2008; MARTINELLI *et al.*, 2011). Outros tipos de alimentação animal, como silagens, diferentes tipos de concentrados, rações e pastagens, podem diferenciar regiões de origem. Animais estabulados ou em pastejo extensivo são diferenciados pelo $\delta^{15}\text{N}$, dependendo da fonte nitrogenada utilizada nas forragens. O $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ diferenciam países ou regiões de diferentes altitudes e latitudes (CAMIN *et al.*, 2016). Trânsito ilegal de animais representa um grande risco sanitário para os rebanhos, como o de disseminação da doença de febre aftosa (CARVALHO; MELO; HADDAD, 2012). Informações sobre a origem da carne em abatedouros, poderiam ser de auxílio nesse controle oficial.

A análise da autenticidade da origem geográfica pode ser realizada por meio de comparações com amostras padrões de bancos de dados. Na Europa, esses bancos de dados estão bastante avançados, havendo alguns governamentais, outros gerenciados por associações produtoras e comerciais (geralmente de uso restrito) e alguns destinados a gerenciar a autenticidade de determinado produto (como sucos) ou detectar determinadas fraudes (como de caviar). Há ainda critérios para inclusão de amostras padrão e limites de aceitação para amostras examinadas. A União Européia possui um banco de dados de vinhos atualizado anualmente, utilizado para controle oficial, que pode rejeitar lotes em caso de não conformidade isotópica (CAMIN *et al.*, 2016).

No Brasil, há um estudo na região sul do país, diferenciando regiões produtoras de vinho em uma pequena escala geográfica. Neste estudo foi possível diferenciar regiões e diferentes safras com base em $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ (ADAMI *et al.*, 2010). Barbosa *et al.* (2014), utilizaram uma abordagem integrada para auxiliar na diferenciação de variedades de cafés de alta qualidade oriundos da Serra da Mantiqueira, em Minas Gerais. Estes artigos publicados no Brasil mostram o potencial da metodologia isotópica para o controle de origem de alimentos de alta qualidade, no entanto, a sua aplicação ainda é incipiente. Os resultados de análises isotópicas realizadas de maneira rotineira com alimentos de origem conhecida, poderiam ser adicionados a bancos de dados para subsidiar os testes de atribuição isotópica e com isso auxiliar o controle governamental e comercial.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Internacionalmente, a metodologia isotópica vem sendo usada amplamente em casos forenses relacionados à determinação da origem geográfica. Existe um arcabouço científico bem embasado, tornando a aplicação possível nas mais diversas áreas. Os modelos globais existentes podem ser aplicados no Brasil, e já seriam úteis para esclarecer algumas questões geograficamente mais abrangentes. No entanto, para que haja respostas de atribuição de vestígios ao seu local de origem, alguns refinamentos devem ser feitos. Os modelos globais não são capazes de mostrar as variações regionais no Brasil, o que pode sub-dimensionar a

variabilidade regional existente. Assim, estudos capazes de ressaltar as variações ambientais regionais seriam os mais indicados.

Seria importante ampliar os estudos sobre como as razões isotópicas variam espacialmente nos tecidos vegetais e animais e de acordo com as condições ambientais regionais, produzindo ou refinando isoscapes teciduais específicas e temporalmente compatíveis com os casos forenses em questão. Pode-se priorizar algumas espécies-chave, que forneceriam informações mais abrangentes ou mais relacionadas aos casos forenses. Para que esses avanços sejam feitos, pode-se utilizar as variáveis ambientais em associações com os dados isotópicos já existentes construindo isoscapes regionais específicas. Com a disponibilização desses dados, a metodologia de atribuição isotópica explicada neste artigo pode ser amplamente explorada e resultar em modelos espaciais possíveis de serem aplicados na prática especificamente no contexto brasileiro.

O banco de dados gerado para a construção destas isoscapes regionais brasileiras poderão fazer parte do banco de dados isotópico mundial em construção (Isobank) (PAULI *et al.*, 2017) (<https://github.com/BrianHayden/IsoBank>).

Em casos mais específicos como a determinação de origem de alimentos, a exemplo do que ocorre na Europa, a iniciativa privada pode utilizar esta metodologia para certificar a origem de produtos de alta qualidade. Essas informações privadas podem ser compartilhadas com os órgãos periciais, policiais e fiscalizadores, favorecendo a aplicação da ferramenta isotópica para controle de fraudes. Já no caso do tráfico de drogas, a análise isotópica de rotina em drogas apreendidas poderia compor um banco de dados de uso exclusivo das forças policiais, gerando informações de inteligência com relação à origem e rotas de tráfico, o que pode orientar ações de repressão, prevenção e combate ao narcotráfico. Nestes casos, os dados isotópicos obtidos poderiam ser incorporados neste banco de dados centralizado para todo o país, podendo auxiliar no refinamento das isoscapes para usos múltiplos.

FÁBIO JOSÉ VIANA COSTA

POLÍCIA FEDERAL, INSTITUTO NACIONAL DE
CRIMINALÍSTICA

PERITO CRIMINAL FEDERAL, DOUTORANDO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS, MESTRE EM BIOLOGIA ANIMAL - UNB

JOÃO PAULO SENA-SOUZA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS, FACULDADE UNB DE PLANALTINA

DOUTORANDO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS, MESTRE EM
GEOGRAFIA - UNB

GABRIELA BIELEFELD NARDOTO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, INSTITUTO DE CIÊNCIAS
BIOLÓGICAS - DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA

PROFESSORA ADJUNTA, DOUTORA EM ECOLOGIA APLICADA
- USP

DETERMINING THE GEOGRAPHICAL ORIGIN OF EVIDENCE USING STABLE ISOTOPES: SCIENTIFIC BASIS AND POTENTIAL USE IN BRAZIL

ABSTRACT

Forensic sciences are based on tracing evidence using technical-scientific analysis. The use of stable isotopes to determine the geographical origin (assignment) of evidence has been widely spread in different parts of the world and in different forensic contexts. In this paper, isotopic biogeochemical principles and isotopic assignment methodologies are presented. Its applicability in the forensic context in Brazil is discussed in the following traces: trafficked animals, human remains, illegal wood, seized drugs, and fraudulent food. The existing global models can be applied in Brazil, being useful to clarify some broader questions. For more specific questions, it is recommended the associations between selected environmental variables and existing isotopic data to construct specific regional isoscapes. With the availability of these isoscapes, the isotopic attribution methodology described herein can be extensively explored resulting in spatial models that can be applied specifically in the Brazilian forensic context.

KEYWORDS: multi-isotopic analysis. forensic science. criminal expertise. spatial analysis. isotopic assignment. animal trafficking. illegal logging. missing persons. drug trafficking. adulterated foods

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN GEOGRÁFICO DE VESTIGIOS UTILIZANDO ISÓTOPOS ESTABLES: BASE CIENTÍFICA Y POTENCIAL DE USO EN BRASIL

RESUMEN

Las ciencias forenses se basan en análisis técnico-científico de los vestigios de crímenes. La utilización de isótopos estables para determinar el origen geográfico de vestigios (atribución) ya se hace en diversas partes del mundo y en variados contextos forenses. En el presente artículo se presentan los principios biogeoquímicos y las metodologías utilizadas para asignar muestras desconocidas a su origen geográfico utilizando isótopos estables. La aplicabilidad de la herramienta en el contexto forense en Brasil es discutida en los siguientes vestigios: animales traficados, remanentes humanos, madera ilegal, drogas incautadas y alimentos defraudados. Los modelos globales existentes pueden ser aplicados en Brasil, siendo útiles para aclarar algunas cuestiones más amplias. Para cuestiones más específicas se recomienda utilizar las variables ambientales en asociaciones con los datos isotópicos ya existentes construyendo isoscapes regionales específicas. Con la disponibilidad de estas isoscapes, la metodología de asignación isotópica explicada en este artículo podrá ser ampliamente explotada y resultar en modelos espaciales posibles de ser aplicados específicamente en el contexto brasileño a medio plazo.

PALABRAS CLAVES: análisis multi-isotópica. ciencias forenses. pericia criminal. análisis espacial. asignación isotópica. tráfico de animales. deforestación ilegal. personas desaparecidas, tráfico de drogas. alimentos de calidad

REFERÊNCIAS

- ADAMI, L. *et al.* Geographic origin of southern Brazilian wines by carbon and oxygen isotope analyses. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, v. 24, n. 20, p. 2943–2948, 2010.
- ALQAHTANI, S. J.; HECTOR, M. P.; LIVERSIDGE, H. M. Brief communication: The London atlas of human tooth development and eruption. *American Journal of Physical Anthropology*, v. 142, n. 3, p. 481–490, 2010.
- ALVES, R. R. N.; DE FARIAS LIMA, J. R.; ARAUJO, H. F. P. The live bird trade in Brazil and its conservation implications: an overview. *Bird Conservation International*, v. 23, n. 1, p. 1–13, 2012.

- AMUNDSON, R. *et al.* Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 17, n. 1, p. 1031-1041, 2003.
- ANCHUKAITIS, K. J. *et al.* Stable isotope chronology and climate signal calibration in neotropical montane cloud forest trees. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, p. 3030, 2008.
- BAISDEN, W. T. *et al.* Precipitation isoscapes for New Zealand: enhanced temporal detail using precipitation-weighted daily climatology. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, v. 52, n. 4-5, p. 343-352, 2016.
- BARBOSA, J. *et al.* Discrimination of Production Environments of Specialty Coffees by Means of Stable Isotopes and Discriminant Model. *Journal of Agricultural Science*, v. 6, n. 5, 2014.
- BATAILLE, C. P. *et al.* A geostatistical framework for predicting variability in strontium concentrations and isotope ratios in Alaskan rivers. *Chemical Geology*, v. 389, p. 1-15, 2014.
- BATAILLE, C. P.; BOWEN, G. J. Mapping $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ variations in bedrock and water for large scale provenance studies. *Chemical Geology*, v. 304-305, p. 39-52, 2012.
- BATAILLE, C. P.; LAFFOON, J.; BOWEN, G. J. Mapping multiple source effects on the strontium isotopic signatures of ecosystems from the circum-Caribbean region. *Ecosphere*, v. 3, n. 12, p. art118, 2012.
- BATEMAN, A. S.; KELLY, S. D. Fertilizer nitrogen isotope signatures. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, v. 43, n. 3, p. 237-247, 2007.
- BEARHOP, S. *et al.* Factors that influence assimilation rates and fractionation of nitrogen and carbon stable isotopes in avian blood and feathers. *Physiological and biochemical zoology*, v. 75, n. 5, p. 451-458, 2002.
- BENTLEY, R. A. Strontium Isotopes from the Earth to the Archaeological Skeleton: A Review. *Journal of Archaeological Method and Theory*, v. 13, n. 3, 2006.
- BOWEN, G. J. *et al.* Geographic assignment with stable isotopes

- in IsoMAP. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 5, n. 3, p. 201–206, 2014.
- BOWEN, G. J. Isoscapes: Spatial Pattern in Isotopic Biogeochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 38, n. 1, p. 161–187, abr. 2010.
- BOWEN, G. J.; REVENAUGH, J. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources Research*, v. 39, n. 10, p. 1-13, 2003.
- BOWEN, G. J.; WASSENAAR, L. I.; HOBSON, K. A. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics. *Oecologia*, v. 143, n. 3, p. 337-348, 2005.
- BOWEN, G. J.; WILKINSON, B. Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in meteoric precipitation. *Geology*, v. 30, n. 4, p. 315-318, 2002.
- BRANCALION, P. H. S. *et al.* Fake legal logging in the Brazilian Amazon. *Science Advance*, v. 4, p. eaat1192, 2018.
- CAMIN, F. *et al.* Stable Isotope Ratio Analysis for Assessing the Authenticity of Food of Animal Origin. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. v. 15, n. 5, p. 868–877, 2016.
- CARVALHO, L. F. R.; MELO, C. B. DE; HADDAD, J. P. A. Cadastro Da Exploração Pecuária E O Controle Do Trânsito De Bovídeos Considerando a Saúde Animal No Brasil. Uma Breve Revisão. *Revista Brasileira de Medicina Veterinária*, v. 34, n. 1, p. 19–26, 2012.
- CERLING, T. E. *et al.* Forensic Stable Isotope Biogeochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 44, n. 1, p. 175–206, 2016.
- CERLING, T. E. *et al.* Stable isotopes in elephant hair document migration patterns and diet changes. *Proceedings of National Academy of Science of the United States of America*, v. 103, n. 2, p. 371–373, 2006.
- CHABOT, A. A. *et al.* Advances in linking wintering migrant birds to their breeding-ground origins using combined analyses of genetic and stable isotope markers. *PLoS ONE*, v. 7, n. 8, 2012.

- CHESSON, L. A. *et al.* Applying the principles of isotope analysis in plant and animal ecology to forensic science in the Americas. *Oecologia*, v. 187, n. 4, p. 1077–1094, 2018.
- CHESSON, L. A. *et al.* Consistent predictable patterns in the hydrogen and oxygen stable isotope ratios of animal proteins consumed by modern humans in the USA. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, v. 25, n. 24, p. 3713–3722, 2011.
- CHESSON, L. A. *et al.* Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Ratios of Milk in the United States. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 58, n. 4, p. 2358–2363, 2010.
- CHESSON, L. A. *et al.* The potential for application of ink stable isotope analysis in questioned document examination. *Science and Justice*, v. 55, n. 1, p. 27–33, 2015.
- COSTA, F. J. V. *et al.* Espécies de Aves Traficadas no Brasil: Uma Meta-Análise com Ênfase nas Espécies Ameaçadas. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, v. 7, n. 2, p. 324–346, 2018.
- CRAINE, J. M. *et al.* Convergence of soil nitrogen isotopes across global climate gradients. *Scientific Reports*, v. 5, p. 8280, 2015.
- CRYAN, P. M.; STRICKER, C. A.; WUNDER, M. B. Continental-scale, seasonal movements of a heterothermic migratory tree bat. *Ecological Applications*, v. 24, n. 4, p. 602–616, 2014.
- DESTRO, G. F. G. *et al.* Efforts to Combat Wild Animals Trafficking in Brazil. *Biodiversity Enrichment in a Diverse World*, v. 1542, n. 9, p. 33–36, 2012.
- EHLERINGER, J. R. *et al.* Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 105, n. 8, p. 2788–2793, 2008.
- EHLERINGER, J. R. *et al.* Stable isotopes trace the truth: From adulterated foods to crime scenes. *Elements*, v. 11, n. 4, p. 259–264, 2015.
- EHLERINGER, J. R. *et al.* Tracing the geographical origin of

- cocaine: Cocaine carries a chemical fingerprint from the region where the coca was grown. *Nature*, v. 408, n. 6810, p. 311–312, 2000.
- EHLERINGER, J. R.; MATHESON JR., S. M. Stable isotopes and courts. *Utah Law Review*, v. 2010, n. 2, p. 385–442, 2010.
- EVETT, I. W.; WEIR, B. S. *Interpreting DNA Evidence: Statistical Genetics for Forensic Scientists*. Sunderland: Sinaur Associates Inc, 1998.
- FARMER, A.; CADE, B. S.; TORRES-DOWDALL, J. Fundamental limits to the accuracy of deuterium isotopes for identifying the spatial origin of migratory animals. *Oecologia*, v. 158, n. 2, p. 183–192, 2008.
- FARQUHAR, G. D. *et al.* Vegetation effects on the isotope composition of oxygen in atmospheric CO₂. *Nature*, v. 363, p. 439–443, 1993.
- FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon Isotope Discrimination and Photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 40, n. 1, p. 503–537, 1989.
- FONT, L. *et al.* Provenancing of unidentified World War II casualties: Application of strontium and oxygen isotope analysis in tooth enamel. *Science and Justice*, v. 55, n. 1, p. 10–17, 2015.
- FRY, B. *Stable Isotope Ecology*. New York: Springer, 2006. v. XII.
- FUNG, I. *et al.* Carbon 13 exchanges between the atmosphere and biosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 11, n. 4, p. 507–533, 1997.
- GARCIA-PEREZ, B. *et al.* Switching Hemispheres: A New Migration Strategy for the Disjunct Argentinean Breeding Population of Barn Swallow (*Hirundo rustica*). *PLoS ONE*, v. 8, n. 1, p. e55654, 31 jan. 2013.
- GARCÍA-PÉREZ, B.; HOBSON, K. A. A multi-isotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) approach to establishing migratory connectivity of Barn Swallow (*Hirundo rustica*). *Ecosphere*, v. 5, n. 2, p. 1–12, 2014.

- GENTILE, N. *et al.* Isotope ratio mass spectrometry as a tool for source inference in forensic science: A critical review. *Forensic Science International*, v. 251, p. 139–158, 2015.
- GORI, Y. *et al.* Carbon, hydrogen and oxygen stable isotope ratios of whole wood, cellulose and lignin methoxyl groups of *Picea abies* as climate proxies. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, v. 27, n. 1, p. 265–275, 2013.
- GORI, Y.; STRADIOTTI, A.; CAMIN, F. Timber isoscapes. A case study in a mountain area in the Italian Alps. *PLoS ONE*, v. 13, n. 2, 2018.
- HANSON, N. N. *et al.* Reconstructing marine life-history strategies of wild Atlantic salmon from the stable isotope composition of otoliths. *Marine Ecology Progress Series*, v. 475, p. 249–266, 2013.
- HEATON, K. *et al.* Verifying the geographical origin of beef: The application of multi-element isotope and trace element analysis. *Food Chemistry*, v. 107, n. 1, p. 506–515, 2008.
- HIJMANS, R. J. *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 25, p. 1965–1978, 2005.
- HOBSON, K. A. *et al.* A feather hydrogen isoscape for Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 102, n. 3, p. 167–174, 2009.
- HOBSON, K. A. *et al.* Linking hydrogen ($\delta^2\text{H}$) isotopes in feathers and precipitation: Sources of variance and consequences for assignment to isoscapes. *PLoS ONE*, v. 7, n. 4, p. e35137, 2012.
- HOBSON, K. A.; CLARK, R. G. Assessing Avian Diets Using Stable Isotopes I: Turnover of ^{13}C in Tissues. *The Condor*, v. 94, n. 1, p. 181–188, fev. 1992.
- HOBSON, K. A.; KARDYNAL, K. J. An isotope ($\delta^{34}\text{S}$) filter and geolocator results constrain a dual feather isoscape ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$) to identify the wintering grounds of North American Barn Swallows. *The Auk*, v. 133, n. 1, p. 86–98, 2016.

- HOBSON, K. A.; WASSENAAR, L. I. Linking breeding and wintering grounds of neotropical migrant songbirds using stable hydrogen isotopic analysis of feathers. *Oecologia*, v. 109, n. 1, p. 142–148, 7 jan. 1997.
- HOBSON, K. A.; WASSENAAR, L. I. *Tracking Animal Migration with Stable Isotopes*. 2ª ed. Academic Press, 2018.
- HOLLER, M.G.; VILLELA, C.A.X. A utilização de escalas de probabilidade nos exames grafoscópicos e sua margem de erro. *Perícia Federal*, v.22, p. 14-19, 2005.
- HURLEY, J. M.; WEST, J. B.; EHLERINGER, J. R. Tracing retail cannabis in the United States: Geographic origin and cultivation patterns. *International Journal of Drug Policy*, v. 21, n. 3, p. 222–228, 2010.
- INMAN, K.; RUDIN, N. The origin of evidence. *Forensic Science International*, v. 126, n. 1, p. 11–16, 2002.
- JACOBY, G. C. Overview of tree-ring analysis in tropical regions. *IAWA Bulletin*, v. 10, n. 2, p. 99–108, 1989.
- KAGAWA, A.; LEAVITT, S. W. Stable carbon isotopes of tree rings as a tool to pinpoint the geographic origin of timber. *Journal of Wood Science*, v. 56, n. 3, p. 175–183, 2010.
- KAPLAN, J. O.; PRENTICE, I. C.; BUCHMANN, N. The stable carbon isotope composition of the terrestrial biosphere: Modeling at scales from the leaf to the globe. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 16, n. 4, p. 1-8, 2002.
- KWAN, Q.Y. *Inference of identity of source*, PhD Thesis, University of California, 1977.
- LAFFOON, J. E. *et al.* Investigating human geographic origins using dual-isotope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{18}\text{O}$) assignment approaches. *PLoS ONE*, v. 12, n. 2, p. e0172562, 2017.
- LLOYD, J.; FARQUHAR, G. D. ^{13}C discrimination during CO_2 assimilation by the terrestrial biosphere. *Oecologia*, v. 99, p. 201-215, 1994.
- MALDANER, A. O. *et al.* Gerenciamento de ações voltadas para obtenção de Perfis Químicos de Drogas – Projeto PeQui da

- Polícia Federal. Resumos da 34ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, p. 275, 2009.
- MALLETTE, J. R. *et al.* Geographically Sourcing Cocaine's Origin – Delineation of the Nineteen Major Coca Growing Regions in South America. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 23520, 2016.
- MARTINELLI, L. A. *et al.* Worldwide stable carbon and nitrogen isotopes of Big Mac® patties: An example of a truly “glocal” food. *Food Chemistry*, v. 127, n. 4, p. 1712–1718, 2011.
- MARTINELLI, L. A. *et al.* The Use of Carbon and Nitrogen Stable Isotopes to Track Effects of Land-Use Changes in the Brazilian Amazon Region. In: DAWSON, T. E.; SIEGWOLF, R. T. W. (Org.). *Stable Isotopes as Indicators of Ecological Change*. 1. ed. St. Louis: Elsevier, 2007. v. 1. p. 301–318.
- MEIER-AUGENSTEIN, W. *Stable isotope forensics : an introduction to the forensic application of stable isotope analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- NARDOTO, G. B. Abundância natural de $\delta^{15}\text{N}$ na Amazônia e Cerrado – implicações para a ciclagem de nitrogênio. Universidade de São Paulo: Tese de Doutorado. 99 f., 2005.
- NARDOTO, G. B. *et al.* Basin-wide variations in Amazon forest nitrogen-cycling characteristics as inferred from plant and soil ^{15}N : ^{14}N measurements. *Plant Ecology & Diversity*, v. 7, n. 1–2, p. 173–187, 2014.
- NARDOTO, G. B. *et al.* Frozen chicken for wild fish: Nutritional transition in the Brazilian Amazon region determined by carbon and nitrogen stable isotope ratios in fingernails. *American Journal of Human Biology*, v. 23, n. 5, p. 642–650, 2011.
- NARDOTO, G. B. *et al.* Tracking geographic patterns of contemporary human diet in Brazil using stable isotopes of nail keratin. In: PARRA, R. *et al.*, *Forensic Science and Humanitarian Action: Interacting with the dead and the living*. New Jersey: Wiley & Sons, 2019. No prelo.
- NARDOTO, G. B. *et al.* Geographical patterns of human diet derived from stable-isotope analysis of fingernails. *American*

- Journal of Physical Anthropology, v. 131, n. 1, p. 137–146, 2006.
- NEWSOME, S. D. *et al.* A Niche for Isotope Ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 5, n. 8, p. 429–436, 2007.
- PAULI, J. N. *et al.* Opinion: Why we need a centralized repository for isotopic data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 114, n. 12, p. 2997–3001, 2017.
- PEARSON, S. F. *et al.* Effects of elemental composition on the incorporation of dietary nitrogen and carbon isotopic signatures in an omnivorous songbird. *Oecologia*, v. 135, n. 4, p. 516–523, 2003.
- PODLESAK, D. W. *et al.* Turnover of oxygen and hydrogen isotopes in the body water, CO₂, hair, and enamel of a small mammal. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 72, n. 1, p. 19–35, 2008.
- POUILLY, M. *et al.* Geographical Origin of Amazonian Freshwater Fishes Fingerprinted by ⁸⁷Sr/ ⁸⁶Sr Ratios on Fish Otoliths and Scales. *Environmental Science and Technology*, v. 48, p. 8987, 2014.
- POWELL, R. L.; YOO, E.-H.; STILL, C. J. Vegetation and soil carbon-13 isoscapes for South America: integrating remote sensing and ecosystem isotope measurements. *Ecosphere*, v. 3, n. 11, p. art109, 2012.
- PYLE, P.; JONES, S. L.; RUTH, J. M. Molt and aging criteria for four North American grassland passerines. *Biological Technical Publication*, n. BTP-R6011-2008, p. 19, 2008.
- QUILLFELDT, P. *et al.* Differences in stable isotopes in blood and feathers of seabirds are consistent across species, age and latitude: Implications for food web studies. *Marine Biology*, v. 155, n. 6, p. 593–598, 2008.
- REGUEIRA, R. F. S.; BERNARD, E. Wildlife sinks: Quantifying the impact of illegal bird trade in street markets in Brazil. *Biological Conservation*, v. 149, n. 1, p. 16–22, 2012.
- ROYLE, J. A.; RUBENSTEIN, D. R. The role of species abundance in determining breeding origins of migratory birds with stable

- isotopes. *Ecological Applications*, v. 14, n. 6, p. 1780–1788, 2004.
- RUNDEL, C. W. *et al.* Novel statistical methods for integrating genetic and stable isotope data to infer individual-level migratory connectivity. *Molecular Ecology*, v. 22, n. 16, p. 4163–4176, 2013.
- SEMINOFF, J. A. *et al.* Stable Isotope Tracking of Endangered Sea Turtles: Validation with Satellite Telemetry and $\delta^{15}\text{N}$ Analysis of Amino Acids. *PLoS ONE*, v. 7, n. 5, p. e37403, 2012.
- SENA-SOUZA, J. P.; COSTA, F.J.V.C.; NARDOTO, G.B. Background and the use of isoscapes in the Brazilian context: essential tool for isotope data interpretation and natural resources managing. *Ambiente & Água*, v.14, n. 2, 2019.
- SHIBUYA, E. K. *et al.* Carbon and nitrogen stable isotopes as indicative of geographical origin of marijuana samples seized in the city of São Paulo (Brazil). *Forensic science international*, v. 167, n. 1, p. 8–15, 2007.
- SHIBUYA, E. K. *et al.* Sourcing Brazilian marijuana by applying IRMS analysis to seized samples. *Forensic Science International*, v. 160, n. 1, p. 35–43, 2006.
- SUITS, N. S. *et al.* Simulation of carbon isotope discrimination of the terrestrial biosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 19, n. 1, p. 1-15, 2005.
- TERZER, S. *et al.* Global isoscapes for δH in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models. *Hydrology Earth System Science*, v. 17, p. 4713–4728, 2013.
- TIESZEN, L.L.; BOUTTON, T.W.; TESDAHL, K.G.; SLADE, N.A. Fractionation and turnover of stable carbon isotopes in animal tissues: implications for $\delta^{13}\text{C}$ analysis of diet. *Oecologia*, v.57, p.32-37, 1983.
- TIPPLE, B. J. *et al.* Isolation of strontium pools and isotope ratios in modern human hair. *Analytica Chimica Acta*, v. 798, p. 64–73, 2013.
- TORNIAINEN, J. *et al.* Oxygen and carbon isoscapes for the Baltic

- Sea: Testing their applicability in fish migration studies. *Ecology and Evolution*, v. 7, n. 7, p. 2255–2267, 2017.
- UNITED NATIONS. World Drug Report. Analysis of drug markets. 2018. Disponível em: <<https://www.unodc.org/wdr2018>>. Acesso em: 17 dez. 2018.
- VALENZUELA, L. O. *et al.* Spatial distributions of carbon, nitrogen and sulfur isotope ratios in human hair across the central United States. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, v. 25, n. 7, p. 861–868, 2011.
- VAN DER VEER, G. *et al.* Spatial interpolation of the deuterium and oxygen-18 composition of global precipitation using temperature as ancillary variable. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 101, n. 2, p. 175-184, 2009.
- VELHO, J. A.; BRUNI, A. T.; CAMARGO, M. A.; OLIVEIRA, M. F. Química forense. In: VELHO, J. A. (Org.); GEISER, G. C. (Org.); ESPINDULA, A. (Org.). *Ciências Forenses - Uma introdução às principais áreas da Criminalística Moderna*. 2ª ed. Campinas: Millennium, 2012, p.165-189.
- VELHO, J. A.; GEISER, G. C.; ESPINDULA, A. Introdução às ciências forenses. In: VELHO, J. A. (Org.); GEISER, G. C. (Org.); ESPINDULA, A. (Org.). *Ciências Forenses - Uma introdução às principais áreas da Criminalística Moderna*. 2ª ed. Campinas: Millennium, 2012, p.1-18.
- WASSENAAR, L. I.; HOBSON, K. A. Natal origins of migratory monarch butterflies at wintering colonies in Mexico: New isotopic evidence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 95, n. 26, p. 15436–15439, 1998.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. *Geostatistics for Environmental Scientists*. England: Wiley, 2007.
- WEST, A. G.; FEBRUARY, E. C.; BOWEN, G. J. Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes (“isoscapes”) in ground water and tap water across South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 145, p. 213–222, 2014.
- WEST, J. B.; SOBEK, A.; EHLERINGER, J. R. A simplified GIS

approach to modeling global leaf water isoscapes. PLoS ONE, v. 3, n. 6, p. 1-8, 2008.

WUNDER, M. B. Determining geographic patterns of migration and dispersal using stable isotopes in keratins. *Journal of Mammalogy*, v. 93, n. 2, p. 360–367, 2012.

WUNDER, M. B. Using Isoscapes to Model Probability Surfaces for Determining Geographic Origins. In: WEST, J. B. *et al.* (Org.). *Isoscapes: Understanding Movement, Pattern, and Process on Earth Through Isotope Mapping*. 1. ed. Amsterdam: Springer Netherlands, 2010. p. 251–270.

WUNDER, M. B.; NORRIS, D. R. Analysis and Design for Isotope-Based Studies of Migratory Animals. *Terrestrial Ecology*. *Terrestrial Ecology*, v.2, n. 7, p. 107-128, 2008.

