

Aplicación del análisis de isótopos de estroncio en la identificación humana en Colombia

Application of strontium isotope analysis for human identification in Colombia

Aplicação da análise de isótopos de estrôncio para identificação humana na Colômbia

Fecha de recepción: 2021/04/30 | Fecha de evaluación: 2021/09/20 | Fecha de aprobación: 2021/10/05

Diego Chavarro

Maestro en Antropología-Línea Forense
Investigador, Grupo en Arqueología Transdisciplinar, Bioarqueología y Antropología Forense (GIABAF)
Facultad de Humanidades, Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
diegochavarroat@unimagdalena.edu.co

Daniel Castellanos

Ph. D. en Antropología
Profesor de cátedra e investigador, Grupo en Arqueología Transdisciplinar, Bioarqueología y Antropología Forense (GIABAF)
Facultad de Humanidades, Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
dcastellanos@unimagdalena.edu.co

Edixon Quiñones

Ph. D. en Evolución Humana y Antropología Forense
Profesor y director, Grupo de Investigación en Arqueología Transdisciplinar, Bioarqueología y Antropología Forense (GIABAF)
Facultad de Humanidades, Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
equinones@unimagdalena.edu.co

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Chavarro, D., Castellanos, D., & Quiñones, E. (2022). Aplicación del análisis de isótopos de estroncio en la identificación humana en Colombia. *Revista Criminalidad*, 64(1), 193-205. <https://doi.org/10.47741/17943108.339>

Resumen

El artículo presenta una revisión de las investigaciones realizadas a la fecha en Colombia relacionadas con la aplicación de los análisis de isótopos en la identificación humana. En especial, hace énfasis en la utilidad de las relaciones isotópicas de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) para rastrear el lugar de origen de un cuerpo en condición no identificada (CNI). Dentro de la revisión se resalta la importancia de la variabilidad geológica colombiana, la cual puede incidir en la diversidad del estroncio biodisponible, en un espacio y un periodo determinados. Esta diversidad del estroncio biodisponible puede verse

reflejada en la distribución espacial de la composición isotópica de estroncio en diferentes tejidos humanos (dientes, huesos, cabello y uñas) de los pobladores del territorio colombiano. Esto es debido a la transferencia de la señal isotópica del estroncio biodisponible a los tejidos humanos. Dentro de las conclusiones de la revisión bibliográfica realizada se menciona la importancia del uso del estroncio (Sr) en la identificación humana en el contexto colombiano, su aplicación forense y sus posibles limitantes respecto al uso de esta metodología en el país.

Palabras clave

Identificación de víctima (fuente: Tesoro Criminológico - Instituto de Investigación Interregional de Crimen y Justicia de las Naciones Unidas - UNICRI). Isótopos, estroncio (Sr), identificación humana, geología colombiana, estroncio biodisponible, revisión (fuente: autor).

Abstract

The article encompasses a review of the up-to-date research related to the application of isotope analysis for human identification in Colombia. In particular, it emphasises the utility of strontium isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) to track the place of origin of an unidentified body. The review emphasises the importance of the Colombian geological variability which could affect the diversity of the bioavailable strontium, in a given space and time. This diversity of the bioavailable strontium, can be reflected in the spatial

distribution of the strontium isotopic composition in different human tissues (teeth, bones, hair and nails) of the inhabitants of Colombia. This is caused by the transfer of the isotopic signal from the bioavailable strontium to human tissues. Among the conclusions of the literature review is a mention of the importance of the use of strontium (Sr) isotopes in human identification in the Colombian context as well as its forensic application, and its possible limitations regarding the use of this methodology in the country.

Keywords

Victim identification (source: Criminological Thesaurus - United Nations Interregional Crime and Justice Research Institute - UNICRI). Isotopes, strontium (Sr), human identification, Colombian geology, bioavailable strontium, review (source: authors).

Resumo

O artigo apresenta uma revisão da investigação realizada até a data na Colômbia relacionada com a aplicação da análise isotópica na identificação humana. Em particular, enfatiza a utilidade dos raios de isótopos de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) para rastrear o local de origem de um corpo em estado não identificado (CNI). A revisão sublinha a importância da variabilidade geológica colombiana que pode influenciar a diversidade do estrôncio biodisponível num determinado espaço e tempo. Esta diversidade de estrôncio biodisponível pode refletir-se na distribuição espacial da composição

isotópica do estrôncio em diferentes tecidos humanos (dentes, ossos, cabelo e unhas) dos habitantes do território colombiano. Isto deve-se à transferência do sinal isotópico do estrôncio biodisponível para os tecidos humanos. Entre as conclusões da revisão bibliográfica, são mencionadas a importância do uso do estrôncio (Sr) na identificação humana no contexto colombiano, a sua aplicação forense e as suas possíveis limitações no que diz respeito ao uso desta metodologia no país.

Palabras-clave

Identificación da vítima (fonte: Thesaurus Criminológico - Instituto Inter-regional de Pesquisa em Crime e Justiça das Nações Unidas - UNICRI). Isótopos, estrôncio (Sr), identificação humana, geologia colombiana, estrôncio biodisponível, revisão (fonte: autores).

Introducción

Un aspecto esencial dentro del abordaje de casos forenses es la identificación de fallecidos desaparecidos o personas en condición no identificada (CNI) (Komar & Buikstra, 2008). La identificación de estos cuerpos y la emisión del certificado de defunción permitirá dar solución a cuestiones legales de los familiares, como ejecución de testamentos, entre otros (Komar & Buikstra, 2008). A su vez, en el caso de los desaparecidos fallecidos, la identificación de los restos permitirá que sean retornados a sus familias y así ellos puedan dar resolución al destino de su ser querido.

Existen y se utilizan diferentes métodos para establecer la identificación de un individuo. Entre ellos

están la comparación de registros médicos o dentales (Wilson *et al.*, 2011), las comparaciones radiográficas (Christensen, 2005; Stephan *et al.*, 2014, D'Alonzo *et al.*, 2017), los perfiles genéticos y las huellas dactilares (Komar & Buikstra, 2008), al igual que el cotejo de la información *post mortem* con los datos ante mortem que aportan familiares para llegar a una identificación positiva (Christensen *et al.*, 2019; De Luca, 2011). En el caso de la antropología forense, refiriéndose a la aplicación de métodos y técnicas de la antropología biológica y la arqueología en contextos jurídico-legales (Burns, 2007; Krenzer, 2006; Quiñones, 2019), utiliza ciertos métodos para establecer el perfil biológico, los cuales incluyen el sexo, la estimación de la edad al momento de la muerte, afinidad poblacional (Spradley, 2021) y la estimación de la estatura (Rodríguez, 1994). Estos métodos son útiles para reducir el universo de

posibles coincidencias y aportan información en el proceso de identificación. En el caso de Colombia, la práctica forense ha permitido el desarrollo del documento guía *Estándares forenses mínimos para la búsqueda de personas desaparecidas, y la recuperación e identificación de cadáveres* (2017), que sirve de base para los investigadores que trabajan con la identificación de restos humanos.

Dependiendo de cada caso, de la información *ante mortem* disponible y la preservación del cuerpo los diferentes métodos pueden ser utilizados. Sin embargo, en los casos donde no existen datos *ante mortem*, o el material recuperado es escaso o se encuentra altamente deteriorado, es necesario recurrir al uso de nuevas herramientas que asistan al investigador para obtener nuevos elementos que reduzcan el universo de búsqueda (Bruckner & Reyes, 2005), tales como los análisis de isótopos. Con respecto al uso de perfiles genéticos para la identificación, la ausencia de datos *ante mortem* se convierte en una dificultad. Por ejemplo, se puede carecer de muestras de referencia de los familiares para realizar la comparación de los perfiles genéticos de los restos humanos recuperados y los perfiles genéticos de familiares (Baraybar, 2008). En el contexto colombiano, la ausencia de datos *ante mortem* y la limitación del uso de muchos métodos posiblemente se pueden ver reflejadas en el número de casos de personas CNI exhumadas que aún permanecen sin identificar. El Grupo Interno de Trabajo de Búsqueda, Identificación y Entrega de Personas Desaparecidas (GRUBE, 2021)¹ menciona que a la fecha se han recuperado 7.732 cuerpos en el país, de los cuales 1.740 permanecen en condición de no identificados (CNI), los cuales provienen de las zonas norte, oriente, occidente y sur del país.

La aplicación del análisis de los isótopos (tanto estables como radiogénicos) constituye una herramienta que aporta elementos para la identificación humana, puede ser útil para orientar los procesos de identificación y de búsqueda de personas desaparecidas, ya que genera información de inclusión o exclusión, lo cual permite reducir el universo de posibles coincidencias (Bartelink, 2018; Bartelink & Chesson, 2019; Bartelink et al., 2014, 2016, 2018, 2020; Chesson et al., 2014, 2018; Eck et al., 2019; Ehleringer et al., 2010; Juárez, 2008; Kamenov & Curtis, 2017; Kramer et al., 2020; McLean et al., 2013, 2014; Meier-Augenstein, 2010; Meier-Augenstein & Fraser, 2008; Philp, 2007; Rauch et al., 2007).

Algunas investigaciones en tejido humano moderno (Bartelink & Chesson, 2019; Goad, 2018;

Herrmann, 2013; Juárez, 2008; Kamenov & Curtis, 2017; Kamenov et al., 2014; Kramer et al., 2020) muestran que por medio de los análisis de isótopos es posible reconstruir las preferencias alimentarias, el origen geográfico o los últimos movimientos geográficos de un individuo. De esta manera, en un contexto forense, la información que este análisis provee, junto con el perfil biológico u otra información de la persona, puede dar nuevos indicios del posible origen geográfico donde una persona vivió y viajó recientemente. Al determinar un posible lugar de origen, los investigadores pueden concentrar esfuerzos en un área determinada y, así, recopilar nueva información *ante mortem* o examinar de nuevo los datos existentes y localizar potenciales familiares para orientar la identificación y los métodos que se han de utilizar.

Esta herramienta ha demostrado ser útil en investigaciones forenses. Por ejemplo, ha sido útil en el rastreo de procedencia de víctimas no identificadas de la Segunda Guerra Mundial (Font et al., 2015); en la identificación del posible lugar de origen de víctimas de homicidio (Kamenov et al., 2014; Rauch et al., 2007); y en la creación de bases isotópicas de referencia para rastrear el lugar de origen de aquellos fallecidos sin identificar en la frontera México-Estados Unidos (Juárez, 2008; Kramer et al., 2020).

Dentro del análisis de isótopos, el uso de geoelementos como el estroncio permite vincular de manera directa valores isotópicos de estroncio en restos humanos sin procedencia a una base de datos de referencia ambientales de estroncio previamente generada o a modelos de isoscapes² (Chesson et al., 2018).

Objetivos

El objetivo general del presente artículo es realizar una revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas a la fecha en Colombia referente a los análisis de isótopos, en especial el uso de las relaciones isotópicas de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), para el rastreo del lugar de origen de un cuerpo en condición no identificada (CNI). A su vez, resaltar la importancia de la variabilidad geológica colombiana, la utilidad del (Sr) dentro de los análisis de isótopos para la identificación humana y mencionar los posibles limitantes de esta metodología.

¹ Grupo interno de trabajo de búsqueda, identificación y entrega de personas desaparecidas (GRUBE) de la Fiscalía General de la Nación en Colombia, en Reporte-estadístico 2021-03-31.

² El vocablo en inglés *isocape* es derivado de los vocablos *isotope* *landscape*, y hace referencia a un mapa que representa y predice la distribución espacial de los valores isotópicos de un elemento de un sustrato en un área determinada.

Metodología

Con el método de investigación bibliográfica (Gómez-Luna *et al.*, 2014), se realizó una revisión exhaustiva de publicaciones (trabajos de grado, artículos de revistas indexadas y homologadas, entre otros) que den cuenta de la aplicación de los análisis de isótopos, en especial la aplicación de los isótopos de estroncio, en los procesos de búsqueda e identificación de personas.

Los textos se organizaron en una matriz, donde se tuvieron en cuenta las temáticas específicas, elementos teóricos, metodológicos y resultados. Esto constituyó los insumos para el desarrollo de los puntos abordados en este artículo.

Resultados

Tras la revisión bibliográfica, a continuación, se presenta una breve descripción de los isótopos de estroncio, estroncio biodisponible y la relación con los tejidos humanos, aplicación de los isótopos de estroncio en la identificación humana, variación del estroncio biodisponible, estudios de los isótopos de estroncio en Colombia y geografía colombiana.

Isótopos estables y radiogénicos, isótopos de estroncio

Los isótopos son átomos del mismo elemento que tienen el mismo número de protones en el núcleo, pero diferente número de neutrones (Misra, 2012). Esto significa que tienen el mismo número atómico, pero varían en su número de masa atómica. Existen dos tipos específicos de isótopos: estables e inestables. Los isótopos estables no están involucrados en la desintegración radiactiva, pero algunos de ellos son radiogénicos, es decir que son el producto de la desintegración radiactiva de nucleidos parentales inestables (Misra, 2012). Por ejemplo, el isótopo de estroncio (^{87}Sr) se produce a partir de la desintegración del rubidio (^{87}Rb) (Bartelink *et al.*, 2014). Hay aproximadamente 300 isótopos estables de origen natural conocidos y más de 1200 isótopos inestables (Bartelink *et al.*, 2014).

Las bases y aplicaciones de los isótopos estables en geociencias se establecieron durante 1940 y 1950, en parte por el trabajo de Harold Urey (1947) (van Geldern & Barth, 2016). Desde entonces hasta ahora, la investigación de isótopos estables y radiogénicos en geoquímica se ha expandido a numerosas disciplinas

científicas, como la ecología, la oceanografía y la antropología (especialmente en arqueología) y las ciencias forenses (Eck *et al.*, 2019; Meier-Augenstein, 2007). Las relaciones isotópicas normalmente se informan como valores delta (δ) en unidades de partes por mil o por mil (‰) en relación con los estándares apropiados (Minsra, 2012). Para cualquier muestra, su valor delta (δ) se define como:

$$\delta X_{\text{muestra}} (\text{‰}) = [(R_{\text{muestra}} - R_{\text{estandar}}) / R_{\text{estandar}}] \times 10^3$$

Donde R es la relación atómica y siempre se escribe como la relación del isótopo pesado (menos abundante) al isótopo ligero (más abundante) (por ejemplo, $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$, o $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$) (Misra, 2012). Para las relaciones isotópicas de carbono y oxígeno, los valores se informan en valores δ , utilizando el estándar Vienna-Pee Dee Belemnite (VPDB) para carbono y en ocasiones para oxígeno, y el estándar Vienna-Standard Mean Ocean Water (VSMOW) para hidrógeno y oxígeno. Para las proporciones de isótopos de estroncio y plomo, los valores son informados en relación atómica (R), utilizando proporciones de isótopos pesados a ligeros (p. ej., $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ y $^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$).

Isótopos de estroncio

El estroncio es un elemento químico, con símbolo Sr (número atómico 38); es el menos abundante de los metales alcalinotérreos como elemento traza, está presente en concentraciones $\mu\text{g/g}$ en suelos, plantas, así como en rocas ígneo, metamórficas y sedimentarias (Faure & Powell, 1972; Schaaf *et al.*, 2012). Presenta cuatro isótopos naturales, tres de ellos son estables con abundancia aproximada para: ^{84}Sr (0,56%), ^{86}Sr (9,87%) y ^{88}Sr (82,53%) (Bentley, 2006; Burton, 2017; Capo *et al.*, 1998; Goad, 2018), y el cuarto es un isótopo radiogénico ^{87}Sr (7,04%), (Bentley, 2006; Schaaf *et al.*, 2012).

La forma en que los isótopos de estroncio se distribuyen geográficamente en la biosfera está determinada en gran medida por las relaciones isotópicas de estroncio en el lecho rocoso, las cuales varían a lo largo del paisaje. Esto en parte debido a que la composición isotópica de estroncio de las rocas depende de su contenido inicial de ^{87}Rb , la proporción de Rb/Sr y su edad desde su formación (Bentley, 2006; Capo *et al.*, 1998; DeNiro & Epstein, 1981; Edmond, 1992; Faure, 1986). De modo que, las rocas más antiguas con mayor Rb/Sr tendrán

relaciones isotópicas de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) más altas que las rocas más jóvenes (Chesson *et al.*, 2018).

El estroncio se mueve a la biosfera a través de la erosión de las rocas, primero a los suelos y luego a la vegetación y los animales. Por consiguiente, la composición de estroncio de un área determinada variará respecto a otras debido a la diferente combinación de fuentes, que incluyen la composición de estroncio del lecho rocoso subyacente, los suelos, las adiciones atmosféricas y las aguas subterráneas y corrientes (Bentley, 2006). Por lo tanto, los datos de composición isotópica de estroncio biológicamente disponible que se alimentan de estos diferentes sustratos deben usarse como referencia base al comparar las relaciones isotópicas de estroncio medidas en un tejido biológico (Degryse *et al.*, 2012).

Isótopos de estroncio en tejido humano

La composición isotópica de estroncio de los tejidos humanos está relacionada con la composición isotópica del lecho rocoso y el estroncio biodisponible en una región determinada (Eckardt *et al.*, 2009; Chesson *et al.*, 2018). Los tejidos humanos como, por ejemplo, el cabello, huesos y dientes contienen altos niveles de carbono e hidrógeno, y niveles bajos de elementos como el estroncio y el plomo. Estos tejidos se convierten en repositorios de información respecto a donde una persona vivió y el tipo de comidas que consumió (Chesson *et al.*, 2020).

El estroncio se transporta desde la erosión de los materiales geológicos a través de los suelos y la cadena alimentaria hasta el tejido humano. Por lo tanto, este es introducido al cuerpo a través de la dieta y el agua ingerida. Este elemento es comúnmente medido en la biapatita (hidroxiapatita) de huesos o dientes. En la biapatita, el estroncio puede sustituir al calcio (Ca) (Bentley, 2006) porque es un metal de comportamiento químico y radio iónico muy similar a este, cualitativamente pero no cuantitativamente (Bentley, 2006; Eerkens *et al.*, 2014; Odum, 1951; Tommasini *et al.*, 2018).

Al analizar elementos como el estroncio en un tejido humano, un perfil isotópico puede ser relacionado con un lugar geográfico (Meier-Augenstein & Fraser, 2008; Holobinko, 2012; Degryse *et al.* 2012; Bartelink & Chesson, 2019). Sin embargo, dependiendo del tejido analizado se puede obtener información que se remonta a meses (cabello, uñas) o años (hueso, esmalte dental), debido a las diferencias en la formación de tejidos y su ritmo de remodelación (Chesson *et al.*, 2020).

En el diente, el esmalte es el tejido más mineralizado del cuerpo humano, está compuesto casi exclusivamente por hidroxiapatita 96%, 3% de agua y un 1% de materia orgánica (Negrete, 2016). Este tejido tiene la particularidad de que no se remodela y es menos propenso a incorporar nuevos materiales externos después de su formación (Hedges *et al.*, 2007; Row, 2013; Juárez, 2008; Negrete, 2016). Por lo tanto, la señal isotópica de estroncio del esmalte dental refleja los valores isotópicos de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) incorporados en la infancia (con excepción del tercer molar), mientras que, en tejido óseo, refleja los valores isotópicos de estroncio incorporados aproximadamente, durante los últimos diez años de vida, (Tommasini *et al.*, 2018). El cabello proporciona información sobre la dieta y la exposición ambiental en escalas de tiempo que van desde unos pocos días hasta algunos años (Pye, 2004). El cabello está compuesto mayormente por la proteína queratina, que incorpora los diferentes elementos que la componen del agua y la dieta y, en menor medida, de la humedad inhalada o del contacto superficial (Pye, 2004). Algunos autores han mencionado que la queratina es susceptible a incorporar elementos del agua al bañarse o del polvo (Tipple, 2015).

Los isótopos de estroncio en tejidos humanos (cabello, uñas, hueso y dientes) pueden medirse por espectrometría de masas de ionización térmica (TIMS) o espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente de múltiples colectores (MC-ICP-MS) (Bartelink & Chesson, 2019; Katzenberg, 2008; Latkoczy *et al.*, 2001). Sin embargo, últimamente se ha optado por utilizar el MC-ICP-MS, ya que permite medir las proporciones isotópicas de más elementos a menor costo y con mejor precisión (Bartelink & Chesson, 2019). Sin embargo, antes de la medición de las muestras de tejido, estas deben pasar por un tratamiento para aislar el estroncio de otros elementos. Este procedimiento debe hacerse en un laboratorio adecuado (*class 100 clean laboratory* o sala limpia ISO 5) para evitar la contaminación de metales.

Aplicación de los isótopos de estroncio en la identificación humana

Relativamente reciente y en rápida expansión, el análisis de isótopos (estables y radiogénicos) está siendo utilizado en el contexto forense para establecer o rastrear la procedencia humana de personas no identificadas (Bartelink & Chesson, 2019). Su aplicación en la identificación humana se caracteriza por la

habilidad de asignar un lugar geográfico de origen a una persona no identificada (Juárez, 2008; Kamenov & Curtis, 2017; Bartelink & Chesson, 2019), el rastreo de los últimos movimientos geográficos de una persona (Bartelink & Chesson, 2019; Hu *et al.*, 2020; Ammer *et al.*, 2020a; Ammer *et al.*, 2020b), o la identificación de preferencias alimentarias de un individuo, las cuales tienen un potencial de ser utilizadas para establecer un lugar geográfico de origen, debido a las diferencias en dieta existentes entre poblaciones como resultado de prácticas culturales en la producción y consumo de los alimentos (Valenzuela *et al.*, 2011, 2012; Ehleringer *et al.*, 2020; Bataille *et al.*, 2020).

La asignación geográfica se realiza al comparar el valor de las relaciones isotópicas de diferentes elementos químicos en un tejido humano de interés (p. ej., composición isotópica de oxígeno en cabello), con una base de referencia o modelos isoscapes en una región específica (Bowen *et al.*, 2007; West *et al.*, 2014; Keller *et al.*, 2016; Bataille *et al.*, 2020; Ammer *et al.*, 2020a). Dentro de este proceso se ha vinculado la aplicación de los isótopos a responder algunas preguntas de tipo forense tales como ¿Era este individuo un residente de la región donde fue encontrado? ¿Cuál era su región de residencia durante la infancia? ¿Se desplazó de lugar de residencia antes de fallecer? ¿Es su dieta inusual de alguna manera? (Ehleringer *et al.*, 2010).

En el caso de los isótopos de estroncio, diferentes autores han mencionado que existen algunos patrones de distribución de las relaciones isotópicas de estroncio en diferentes tejidos humanos y que pueden ser útiles para la determinación del lugar de origen de un fallecido no identificado (Ammer *et al.*, 2020b; Juárez, 2008; Kamenov & Curtis, 2017). Los investigadores trabajan bajo el supuesto de que la composición isotópica de estroncio de los huesos y dientes de humanos es la misma que la de las plantas y animales en su dieta, y que también refleja los valores isotópicos de estroncio de la roca fuente. Esto se debe a que no hay fraccionamiento biológico de las proporciones de isótopos de estroncio (Schoeninger, 1995). La fotosíntesis o la síntesis de minerales óseos no cambian el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, proveniente de la fuente (Schoeninger, 1995). Por lo tanto, las proporciones de isótopos de estroncio del esqueleto humano están directamente relacionadas con la proporción de estroncio biodisponible en el área donde se produce el alimento o se consume el agua (Eckardt *et al.*, 2009).

Juárez (2008), en un estudio preliminar, analizó la composición isotópica de estroncio de 19 dientes humanos modernos de cuatro estados en México. Los resultados mostraron que de acuerdo con los isótopos de estroncio se podía identificar tres regiones significativas y distintas (Jalisco-Guanajuato, Michoacán y Distrito Federal). Por lo tanto, mencionó que las bases de datos isotópicas de estroncio de mexicanos modernos tenían un gran potencial para ser utilizadas en la determinación de región de origen de mexicanos indocumentados fallecidos en los cruces fronterizos con Estados Unidos (Juárez, 2008).

Ammer y colaboradores analizaron la distribución espacial de los isótopos de estroncio en cabello humano ($n=101$) y agua de la llave o de acueducto ($n=151$) en 32 lugares distintos de México (2020b). Los resultados mostraron una fuerte correlación entre los valores isotópicos de estroncio en cabello y los valores isotópicos de estroncio en agua, a su vez, revelaron un patrón en la distribución espacial de estroncio tanto para cabello como para el agua (Ammer *et al.*, 2020b). De acuerdo con los resultados, los autores señalan el potencial uso de los isótopos de estroncio para el rastreo del país de origen de aquellos fallecidos en la frontera entre México y Estados Unidos. Estas dos investigaciones entre otras (Kramer *et al.*, 2020) corresponden a estudios realizados con el fin de reducir el universo de país de origen de aquellos que fallecen en contextos fronterizos. Es importante resaltar que los análisis de isótopos de estroncio no son un método de identificación, pero sí un método que asiste el proceso de identificación reduciendo el universo de coincidencias posibles, ya que permite dirigir un caso a una región geográfica en específico. Sin embargo, diferentes autores han mencionado una disminución en las relaciones isotópicas de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) entre poblaciones (Keller *et al.*, 2016; Kamenov & Curtis, 2017), lo cual dificulta su capacidad para discriminar entre regiones. Esto se debe en parte a la globalización de los suministros de la red alimentaria y a los viajes humanos más frecuentes. Varios autores han mencionado este problema (p. ej., Juárez 2008; Keller *et al.* 2016), pero otros afirman que los alimentos regionales locales pueden tener un efecto en el contenido isotópico de los tejidos humanos, por lo que las señales dietéticas y ambientales aún se pueden identificar en los tejidos humanos (Valenzuela *et al.*, 2012).

Variación del estroncio biodisponible

Los isótopos de estroncio son un trazador del ecosistema, se expresan mejor como un sistema de mezcla de entradas y salidas, incluyendo entradas de la atmósfera y meteorización del lecho rocoso, la biosfera y el suelo son salidas a través de corrientes y aguas subterráneas y reservorios intermedios (Bentley, 2006), el estroncio en las rocas se libera por la intemperie, se cicla a través de la vegetación y los animales y finalmente ingresa a los océanos, principalmente a través de los ríos. Una pequeña cantidad de estroncio se transfiere directamente desde los océanos a la atmósfera y es transferida a los continentes en forma de precipitación (Capo et al., 1998). Las firmas isotópicas locales están presentes tanto en la flora como en la fauna desde el suelo, el agua y el aire, a través de la cadena alimentaria (McLain et al., 2013). Debido a que no se produce fraccionamiento (Kramer, 2018), los valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ reflejan los mismos valores que las fuentes de estroncio biodisponibles (Capo et al., 1998).

La vegetación absorbe el estroncio disponible en el complejo de intercambio del suelo y en la solución del suelo, que luego se puede reponer mediante meteorización mineral o entrada atmosférica biodisponibles (Capo et al., 1998); los árboles absorben al estroncio principalmente en los horizontes superiores, por lo que la influencia del lecho rocoso subyacente es limitada, la composición isotópica del estroncio biodisponible aumenta con la profundidad del suelo (Poszwa et al., 2009).

En los océanos el volumen de estroncio que entra es derivado de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas que sufrieron intemperismo químico en los continentes; la concentración media del estroncio en los océanos es cerca de 8 ppm/litro, siendo este uno de los elementos traza más abundantes (Romero-Ordóñez et al., 2000). La variación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el agua de mar a través del Fanerozoico se ha determinado a partir del análisis de fósiles de carbonato y fosfato; esta relación ha variado a lo largo del tiempo geológico entre 0,707 y 0,709 (Bentley, 2006; Rosero et al., 2014). Los ríos transportan la mayoría de los productos meteorológicos de los continentes a los océanos (otro material es transportado por vientos y glaciares), principalmente como carga suspendida, pero una fracción del estroncio en los ríos está en forma disuelta (Bentley, 2006).

Bataille y colaboradores (2020) han desarrollado un modelo isoscape global del estroncio biodisponible que se basa en una regresión multivariada de bosque aleatorio e integra datos empíricos, covariables

geoambientales y modelos litológicos. Este isoscape podría ser utilizado y probado para aplicaciones de proveniencia humana de forma independiente o en conjunto con otros sistemas isotópicos (multi-isotópicos, por ejemplo, combinado con H, O y C) (Bataille et al., 2020). Los autores refieren que este modelo puede ser recalibrado para regiones específicas utilizando su modelo global e incorporando datos locales de estroncio de diferentes sustratos (plantas, animales, tejidos humanos, entre otros). Por lo tanto, es una herramienta para el desarrollo de un isoscape de estroncio biodisponible para Colombia.

Estudios de los isótopos de estroncio en Colombia

En Colombia se han realizado esfuerzos iniciales para evaluar la aplicabilidad del análisis de isótopos en la identificación humana. En particular, se ha evaluado la distribución espacial del contenido isotópico de carbono (C), oxígeno (O), estroncio (Sr) y plomo (Pb) en la bioapatita del esmalte dental para determinar el lugar de origen de un individuo (Row, 2013; Goad, 2018; Eck et al., 2019; Castellanos, 2020).

Eck y colaboradores (2019) reportan valores isotópicos de estroncio y oxígeno en esmalte dental para 61 individuos de la colección osteológica moderna de Antioquia, la cual en su mayoría corresponde a individuos del departamento de Antioquia, pero incluye algunos individuos de los departamentos de Atlántico, Boyacá, Caldas, Chocó, Cundinamarca y Quindío.

Dentro de sus resultados indican una gran variabilidad intradepartamental en los valores de isotópicos de estroncio, pero poca variación interdepartamental debido en gran parte al número reducido de la muestra para otros departamentos (tabla 1). Por lo tanto, sugieren que es indispensable recolectar datos isotópicos de estroncio y oxígeno para otras regiones con diferencias geográficas.

La tesis doctoral de Castellanos (2020), incluyó los datos de Eck et al., (2019) y generó nuevos datos isotópicos en esmalte dental para Colombia (C-O-Sr-Pb) a partir de una muestra moderna de esmalte dental en 97 individuos de las ciudades de Bogotá, Cali, Neiva y Cartagena. En este estudio se evaluó la aplicabilidad de un modelo multi-isotópico con fines de identificación de desaparecidos en el país; así mismo, dentro de los resultados se relaciona a los isótopos de estroncio como útiles para diferenciar entre regiones montañosas, entre los pobladores de las cordilleras. Sin embargo, se necesitan más datos

isotópicos de estroncio para corroborar esta hipótesis (comunicación personal, Daniel Castellanos).

Por último, desde agosto de 2020, los autores de este artículo han venido desarrollando una investigación³ a partir de 30 muestras dentales donadas de tratamientos odontológicos del departamento del Magdalena cuyo origen es conocido, que busca crear una base de referencia de isótopos de estroncio para ese departamento, analizar su utilidad en la determinación de región de origen y contribuir a la búsqueda e identificación de las personas desaparecidas en esta región.

Tabla 1
Valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del esmalte dental moderno, relacionado a número de individuos por departamento

Valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del esmalte dental de dientes modernos colombianos		
Departamento	Número de individuos	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Antioquia	53	0.7072
Atlántico	1	0.7071
Boyacá	1	0.7067
Caldas	1	0.7069
Chocó	2	0.7066
Cundinamarca	1	0.7080
Quindío	1	0.7063
Risaralda	1	0.7070

Fuente: Adaptado de Eck et al. 2019.

Geografía colombiana

La geografía en Colombia es muy variada, el sistema montañoso de los Andes se divide en tres grandes cordilleras que se extienden en dirección nortesur y se conocen como la cordillera Oriental, la cordillera Central y la cordillera Occidental (Bell, 2012). Al igual que la geografía, la roca madre tiene una geología diversa⁴. Según, Bürgl (1961), Colombia se divide en dos regiones rocosas: primero, los llanos orientales, en los cuales un basamento muy antiguo (precambriano) está cubierto por capas marinas y terrestres mesozoicas y cenozoicas, relativamente planas y delgadas. Segundo, la región geosinclinal Andina, la cual desde el Cambriano estuvo por largos períodos bajo el nivel del mar y donde se acumulan

sedimentos marinos, continentales y volcánicos de muchos miles de metros de potencia.

Los límites geopolíticos (departamentos) establecidos en el país no reflejan la geología subyacente (Row, 2013). Por lo tanto, las personas que viven en diferentes ciudades o departamentos pueden vivir en una misma área geológica. A continuación, se mencionan algunos estudios que se han realizado de valores de estroncio para la geología del país:

- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{134\text{Ma}}$ de las rocas del Macizo de Santander entre 0,71055 y 0,73196, los valores de las relaciones isotópicas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) de la roca de esta región deben estar representando una fuente de estroncio mixta: continental y marina (Mantilla et al., 2006).
- El segmento estudiado de la Formación Toluviejo (Eoceno- Oligoceno) presenta una composición isotópica del estroncio entre 0,707444 - 0.707598, valores bajos con respecto a sucesiones globales para dicha temporalidad, valor $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de las formaciones Ciénaga de Oro y Porquera 0,708231 - 0,708423 y 0.708352 - 0,708474 (Rosero et al., 2014).
- Zona volcánica Norte de los Andes de Colombia presenta valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,704090 - 0,704770$ (Tamayo & Soto, 2015).
- El domo Tapias es una expresión volcánica que se encuentra ubicada 13 km al oeste de la ciudad de Ibagué en el flanco oriental de la cordillera Central, con valores $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,70491$ (García Moreno & Ortiz Talero, 2019).

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha desarrollado un mapa de la geología colombiana (Tapias et al., 2015), el cual puede ser útil para alimentar los datos locales y utilizar el modelo global de Bataille y colaboradores (2020), y generar un isoscape de estroncio para Colombia.

Discusión

La revisión de la literatura nos permite reconocer el potencial uso y aplicabilidad de los isótopos de estroncio en el contexto colombiano. En Colombia el Sistema de Información Red de Desaparecidos y Cadáveres (SIRDEC) del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de Colombia

3 Para más información sobre el proyecto en curso: <https://investigacion.unimagdalena.edu.co/proyecto/8278>.

4 Véase *La geología de Colombia*, de Lobo-Guerrero (1987), pp. 2-8.

registra para septiembre del presente año 111.388 personas desaparecidas (INMLCF, 2021); diferentes instituciones contribuyen a la búsqueda de estas personas y a la identificación de aquellas que se encuentran fallecidas (Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, Cuerpo Técnico de Investigación, Policía Nacional, Unidad de Búsqueda de Personas Dadas por Desaparecidas). Por lo tanto, herramientas que ayuden a reducir el universo de potenciales coincidencias pueden ser útiles para asistir los esfuerzos realizados por aquellos encargados de la identificación. Esta revisión sugiere que los análisis de isótopos de estroncio podrían ser utilizados en el contexto colombiano.

No obstante, se deben tener en cuenta algunas de las limitaciones del uso de esta herramienta. Primero, en el país existe un gran vacío investigativo en cuanto a su aplicabilidad forense, además de la ausencia de datos isotópicos de referencia para el estroncio de diferentes tejidos humanos y ambientales. Datos que nos permiten relacionar los datos isotópicos de un tejido de un individuo desconocido a un lugar geográfico del país. Además de generar bases de datos, es importante explorar si la globalización de los suministros de la red alimentaria global y del país tiene una implicancia en la distribución espacial del contenido isotópico de estroncio en tejidos humanos. Alimentos importados de otros países y el acceso a grandes supermercados con productos nacionales e importados podrían influir en la disminución en la variabilidad isotópica de estroncio en tejidos humanos a lo largo del territorio colombiano.

Segundo, existen limitantes logísticas, lo cual dificulta en gran medida la investigación y su uso forense dentro del país. Debido a que su análisis requiere un tratamiento de la muestra en sala limpia ISO 5, para evitar la contaminación de metales es necesario contar con un laboratorio adecuado, además de contar con la tecnología TIMS o MC-ICP-MS. Por lo tanto, es necesaria la colaboración de instituciones o universidades que puedan contar con alguno de estos requerimientos o de lo contrario las muestras deben ser enviadas para análisis en laboratorios internacionales especializados.

En el marco de la presente investigación han sido recolectadas 40 muestras dentales, que fueron remitidas para análisis de isótopos de estroncio. Se esperan tener resultados del contenido isotópico de estroncio en el esmalte dental para el departamento del Magdalena, y así contribuir con la construcción de datos nacionales de estroncio en esmalte dental. Invitamos a investigadores forenses y de las ciencias de

la tierra a recolectar datos de isótopos de estroncio en los distintos sustratos para construir bases de datos que serán útiles en el desarrollo y la aplicación de esta herramienta forense vital en la identificación y búsqueda de personas desaparecidas en Colombia.

Referencias

- Ammer, S., Bartelink, E., Vollner, J., Anderson, B., & Cunha, E. (2020a). Spatial distributions of oxygen stable isotope ratios in tap water from Mexico for region of origin predictions of unidentified border crossers. *Journal of Forensic Sciences*, 65(4), 1049-1055. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.14283>.
- Ammer, S., Kootker, L., Bartelink, E., Anderson, B., Cunha, E., & Davies, G. (2020b). Comparison of strontium isotope ratios in Mexican human hair and tap water as provenance indicators. *Forensic Science International*, 314, 110422. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110422>.
- Baraybar, J. (2008). When DNA is not available, can we still identify people? Recommendations for best practice. *Journal of Forensic Sciences*, 53(3), 533-540. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2008.00709.x>.
- Bartelink, E. (2018). Identifying difference: Forensic methods and the uneven playing field of repatriation. In *Sociopolitics of Migrant Death and Repatriation* (pp. 129-141). Springer, Cham.
- Bartelink, E., & Chesson, L. (2019). Recent applications of isotope analysis to forensic anthropology. *Forensic Sciences Research*, 4(1), 29-44. <https://doi.org/10.1080/20961790.2018.1549527>.
- Bartelink, E., Berg, G., Beasley, M., & Chesson, L. (2014). Application of stable isotope forensics for predicting region of origin of human remains from past wars and conflicts. *Annals of Anthropological Practice*, 38(1), 124-136. <https://doi.org/10.1111/napa.12047>.
- Bartelink, E., Berg, G., Chesson, L., Tipple, B., Beasley, M., Prince-Buitenhuys, J., & Latham, K. (2018). Applications of stable isotope forensics for geolocating unidentified human remains from past conflict situations and large-scale humanitarian efforts. In *New Perspectives in Forensic Human Skeletal Identification* (pp. 175-184). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805429-1.00015-6>.
- Bartelink, E., Chesson, L., Tipple, B., Hall, S., & Kramer, R. (2020). Multi isotope approaches for region of origin predictions of undocumented

- border crossers from the US-Mexico border: Biocultural perspectives on diet and travel history. *Forensic Science and Humanitarian Action: Interacting with the Dead and the Living*, 369-384.
- Bartelink, E., Mackinnon, A., Prince-Buitenhuys, J., Tipple, B., & Chesson, L. (2016). Stable isotope forensics as an investigative tool in missing persons investigations. In *Handbook of Missing Persons* (pp. 443-462). Springer, Cham.
- Bataille, C., Crowley, B., Wooller, M., & Bowen, G. (2020). Advances in global bioavailable strontium isoscapes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 555, 109849. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109849>.
- Bentley, R. (2006) Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: a review. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 13 (3), 135-187. <https://doi.org/10.1007/s10816-006-9009-x>.
- Bell, P. (2012). Colombia: manual comercial e industrial. Banco de la República de Colombia, capítulo I, Geografía topografía y clima pp. 37-50. <https://www.banrep.gov.co/es/node/25509>.
- Bowen, G., Ehleringer, J., Chesson, L., Stange, E., & Cerling, T. (2007). Stable isotope ratios of tap water in the contiguous United States. *Water Resources Research*, 43(3). <https://doi.org/10.1029/2006WR005186>.
- Bruckner, J., & Reyes, S. (2005). *Métodos científicos de identificación de cadáveres* (tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana). <https://repository.javeriana.edu.co/>
- Bürgl, H. (1961). Historia geológica de Colombia. Ed. Voluntad. https://www.accefyn.com/revista/Volumen_11/43/137-191.pdf.
- Burns, K. (2007) Forensic anthropology Training Manual New Jersey: United States: Prentice Hall Publishing.
- Burton, J. (2017) Strontium isotopes, pp. 916-919, in: Gilbert, A. S., Goldberg, P., Holliday, V. T., Mandel, R. D., & Sternberg, R. S. (Eds.). (2017). *Encyclopedia of Geoarchaeology*. Springer Netherlands.
- Capo, R., Stewart, B., & Chadwick, O. (1998). Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma* 82, 197-225.
- Castellanos, D., DiGangi, E., & Bethard, J. (2020). Applicability of stable isotope analysis to the Colombian human identification crisis. *Forensic Science and Humanitarian Action: Interacting with the Dead and the Living*, 411-424. <https://doi.org/10.1002/9781119482062.ch26>.
- Chesson, L., Meier Augenstein, W., Berg, G., Bataille, C., Bartelink, E., & Richards, M. (2020). Basic principles of stable isotope analysis in humanitarian forensic science. *Forensic Science and Humanitarian Action: Interacting with the Dead and the Living*, 285-310. <https://doi.org/10.1002/9781119482062.ch20>.
- Chesson, L., Tipple, B., Ehleringer, J., Park, T., & Bartelink, E. (2018). Forensic applications of isotope landscapes ("isoscapes"): A tool for predicting region-of-origin in forensic anthropology cases. In: Boyd Jr., C. C., and D.C. Boyd (eds.), *Forensic Anthropology: Theoretical Framework and Scientific Basis*. John Wiley & Sons, pp. 127-148. <https://doi.org/10.1002/9781119226529.ch8>.
- Chesson, L., Tipple, B., Howa, J., Bowen, G., Barnette, J., Cerling, T., & Ehleringer, J. (2014). Stable isotopes in forensics applications. In: Cerling, T.E. (Ed.), *Treatise on Geochemistry*, second ed. Elsevier, New York, pp. 285-317.
- Christensen, A.M. (2005). Testing the Reliability of Frontal Sinuses in Positive Identification. *Journal of Forensic Sciences*, 50(1) 1-5.
- Christensen, A., Passalacqua, N., & Bartelink, E. (2019). *Forensic Anthropology: Current Methods and Practice*. Academic Press.
- D'Alonzo, S., Guyomarc'h P, Byrd J. E., & Stephan C. N. (2017). A Large-Sample Test of a Semi-Automated Clavicle Search Engine to Assist Skeletal Identification by Radiograph Comparison. *Journal of Forensic Sciences*, 62(1) 181-185. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13221>.
- De Luca, S. (2011). *Identificación humana en antropología forense: aportaciones para la estimación de sexo y edad* (tesis doctoral, Universidad de Granada). <https://digibug.ugr.es/>
- DeNiro, M., & Epstein, S. (1981). Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45, 341-351. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(81\)90244-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(81)90244-1).
- Degryse, P., De Muynck, D., Delporte, S., Boyen, S., Jadoul, L., De Winne, J., & Vanhaecke, F. (2012). Strontium isotopic analysis as an experimental auxiliary technique in forensic identification of human remains. *Analytical Methods*, 4(9), 2674-2679. <https://doi.org/10.1039/C2AY25035G>.
- Eck, C., DiGangi, E., & Bethard, J. (2019). Assessing the efficacy of isotopic provenancing of human remains in Colombia. *Forensic Science*

- International*, 302, 109919. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.109919>.
- Eckardt, H., Chenery, C., Booth, P., Evans, J. A., Lamb, A., & Müldner, G. (2009). Oxygen and strontium isotope evidence for mobility in Roman Winchester. *Journal of Archaeological Science*, 36(12), 2816-2825. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.09.010>.
- Edmond, J. (1992). Himalayan tectonics, weathering processes, and the strontium isotopic record in marine limestones. *Science* 258, 1594-1597. <https://doi.org/10.1126/science.258.5088.1594>.
- Eerkens, J., Barfod, G., Jorgenson, G., & Peske, C. (2014). Tracing the mobility of individuals using stable isotope signatures in biological tissues: "locals" and "non-locals" in an ancient case of violent death from Central California. *Journal of Archaeological Science*, 41, 474-481. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.09.014>.
- Ehleringer, J., Avalos, S., Tipple, B., Valenzuela, L., & Cerling, T. (2020). Stable isotopes in hair reveal dietary protein sources with links to socioeconomic status and health. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 20044-20051. <https://doi.org/10.1073/pnas.1914087117>.
- Ehleringer, J., Thompson, A., Podlesak, D., Bowen, G., Chesson, L., Cerling, T., & Schwarcz, H. (2010). A framework for the incorporation of isotopes and isoscapes in geospatial forensic investigations. In *Isoscapes* (pp. 357-387). Springer, Dordrecht.
- Faure, G. (1986). *Principles of Isotope Geology*. 2nd rev. ed. Wiley, New York.
- Faure, G., & Powell, J. L. (1972). *Strontium Isotope Geology* (5). Berlin: Springer-Verlag.
- Font, L., Van Der Peijl, G., Van Leuwen, C., Van Wetten, I., & Davies, G. R. (2015). Identification of the geographical place of origin of an unidentified individual by multi-isotope analysis. *Science & Justice*, 55(1), 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2014.06.011>.
- García Moreno, J., & Ortiz Talero, J. (2019). *Caracterización composicional y genética del Domo Tapias, y su relación con el volcán Cerro Machín, Colombia* (tesis de pregrado, Universidad de Caldas). <https://repositorio.ucaldas.edu.co/>
- Goad, G. (2018). *High-Precision Lead Isotope Analysis on Modern Populations to Determine Geolocation Reliability* (tesis de maestría, University of South Florida). <https://digitalcommons.usf.edu/>
- Gómez-Luna, E., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G., & Betancourt-Buitrago, L. A. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *Dyna*, 81(184), 158-163. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37066>.
- Hedges, R., Clement, J., Thomas, D., & Connell, T. (2007) Collagen Turnover in the Adult Femoral Mid-Shaft: Modeled from Anthropogenic Radiocarbon Tracer Measurements. *American Journal of Physical Anthropology* 133: 783-895. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20598>.
- Herrmann, N., Li, Z., Warner, M., Weinand, D., & Soto, M. (2013). Isotopic and Elemental Analysis of the William Bass Donated Skeletal Collection and Other Modern Donated Collections. Department of Justice Report, 248669.
- Holobinko, A. (2012). Forensic human identification in the United States and Canada: A review of the law, admissible techniques, and the legal implications of their application in forensic cases. *Forensic Science International*, 222(1-3), 394-e1. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2012.06.001>
- Hu, L., Ghartrand, M. M. G, St-Jean G., Lops M., & Bataille., C. (2020). Assessing the Reliability of Mobility Interpretation from a Multi-Isotope Hair Profile on a Traveling Individual. *Front. Ecol. Evol.* 8:568943. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.568943>.
- Juárez, C. (2008). Strontium and geolocation, the pathway to identification for deceased undocumented Mexican border crossers: A preliminary report. *Journal of Forensic Sciences*, 53(1), 46-49. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2007.00610.x>.
- Kamenov, G., & Curtis, J. (2017). Using carbon, oxygen, strontium, and lead isotopes in modern human teeth for forensic investigations: a critical overview based on data from Bulgaria. *Journal of Forensic Sciences*, 62(6), 1452-1459. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13462>.
- Kamenov, G., Kimmerle, E., Curtis, J., & Norris, D. (2014). Georeferencing a cold case victim with lead, strontium, carbon, and oxygen isotopes. *Annals of Anthropological Practice*, 38(1), 137-154. <https://doi.org/10.1111/napa.12048>.
- Katzenberg, M. (2008). Stable isotope analysis: A tool for studying past diet, demography, and life history. *Biological Anthropology of the Human Skeleton*, 2, 413-441. <https://doi.org/10.1002/9780470245842.ch13>.
- Keller, A., Regan, L., Lundstrom, C., & Bower, N. (2016). Evaluation of the efficacy of spatiotemporal Pb isoscapes for

- provenancing of human remains. *Forensic Science International*, 261, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.02.006>.
- Komar, D., & Buikstra, J. (2008). *Forensic Anthropology: Contemporary Theory and Practice*. Oxford University Press, USA.
- Kramer, R. (2018). Application of Stable Isotopes and Geostatistics to Predict Region of Geographic Origin for Deceased Migrants Recovered in Southern Texas. (Master of Arts Thesis). In: digital.library.txstate.edu.
- Kramer, R., Bartelink, E., Herrmann, N., Bataille, C., & Spradley, K. (2020). Application of stable isotopes and geostatistics to infer region of geographical origin for deceased undocumented Latin American migrants. *Forensic Science and Humanitarian Action: Interacting with the Dead and the Living*, 425-440. <https://doi.org/10.1002/9781119482062.ch27>.
- Krenzer, U. (2006). Compendio de métodos antropológico-forenses para la reconstrucción del perfil osteo-biológico. Serie de Antropología Forense. Guatemala: Centro de Análisis Forense y Ciencias Aplicadas (CAFCA).
- Latkoczy, C., Prohaska, T., Watkins, M., Teschler-Nicola, M., & Stingeder G. (2001). Strontium isotope ratio determination in soil and bone samples after on-line matrix separation by coupling ion chromatography (HPIC) to an inductively coupled plasma sector field mass spectrometer (ICP-SFMS). *J Anal Atomic Spectrom*, 16: 806-811. <https://doi.org/10.1039/b102797m>.
- Mantilla, F., Tassinari, C., & Mancini, L. (2006). Estudio de isótopos de C, O, Sr y de elementos de tierras raras (REE) en rocas sedimentarias cretácicas de la cordillera Oriental (Dpto. de Santander, Colombia): implicaciones paleohidrogeológicas. *Boletín de Geología*, 28(1), 61-80. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3317>.
- McLean, S., Ikegaya, H., Saukko, P., Zheng, H., Akutsu, T., Miyamori, D., & Sakurada, K. (2013). A trial of the utilization of stable isotope analysis for the estimation of the geographic origins of unidentified cadavers. *Forensic Science International*, 232(1-3), 237-e1. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.07.019>.
- McLean, S., Ikegaya, H., Saukko, P., Zheng, H., Itoh, K., & Fushiki, S. (2014). The utilization of stable isotope analysis for the estimation of the geographic origins of unidentified cadavers. *Forensic Science International*, 245, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.10.011>.
- Meier-Augenstein, W. (2007). Stable isotope fingerprinting—Chemical element “DNA”. *Forensic Human Identification: An Introduction*, 29-53.
- Meier-Augenstein, W. (2010). *Stable Isotope Forensics: An Introduction to the Forensic Applications of Stable Isotope Analysis*. Wiley, Chichester.
- Meier-Augenstein, W., & Fraser, I. (2008). Forensic isotope analysis leads to identification of a mutilated murder victim. *Science & Justice*, 48(3), 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2007.10.010>.
- Misra, K. (2012). *Introduction to Geochemistry, Principles and Applications*. Wiley-Blackwell.
- Negrete, S. (2016). "Somos lo que comemos": relaciones identitarias en un grupo de habitantes de Chinikihá, Chiapas, a través del análisis de la alimentación. Clásico tardío". (Tesis de Maestría, Escuela Nacional de Antropología e Historia). <https://mediateca.inah.gob.mx/>
- Odum, H. (1951). The stability of the world strontium cycle: *Science*, v. 114, p. 407-411. <https://doi.org/10.1126/science.114.2964.407>.
- Poszwa, A., Ferry, B., Pollie, B., Grimaldi, C., Charles-Dominique, P., Loubet, M., & Dambrine, E. (2009). Variations of plant and soil ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr along the slope of a tropical inselberg. *Annals of forest Science*, 66(5), 1-13. <https://doi.org/10.1051/forest/2009036>.
- Quiñones, E. (2019). Antropología forense en Timor Oriental. En *Aportes de la antropología forense en la investigación de crímenes de lesa humanidad en Timor Oriental*. Santa Marta, Colombia: Editorial Unimagdalena. <https://editorial.unimagdalena.edu.co/Editorial/Publicacion/4125>.
- Philp, R. (2007). The emergence of stable isotopes in environmental and forensic geochemistry studies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 5(2), 57-66. <https://doi.org/10.1007/s10311-006-0081-y>.
- Pye, K. (2004). Isotope and trace element analysis of human teeth and bones for forensic purposes. In: Pye, K. and D.J. Croft (eds.), *Forensic Geoscience: Principles, Techniques and Applications*. The Geological Society London, pp. 215-236. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.232.01.20>.
- Rauch, E., Rummel, S., Lehn, C., & Büttner, A. (2007). Origin assignment of unidentified corpses by use of stable isotope ratios of

- light (bio-) and heavy (geo-) elements—a case report. *Forensic Science International*, 168(2-3), 215-218. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.02.011>.
- Rodríguez, J. (1994). *Introducción a la antropología forense: análisis e interpretación de restos óseos humanos*. Anaconda.
- Romero-Ordóñez, F., Schultz-Güttler, R., & Kogi, K. (2000). Geoquímica del rubidio-estroncio y edad de las esmeraldas colombianas. *Geología Colombiana*, 25, 221-239. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/31551>.
- Rosero, S., Silva, J., Sial, A., Borrero, C., & Pardo, A. (2014). Quimioestratigrafía de isótopos de estroncio de algunas sucesiones del eoceno-mioceno del cinturón de San Jacinto y el Valle Inferior del Magdalena. *Boletín de Geología*, 36(1), 15-27. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/4067/5267>.
- Row, K. (2013). *Strontium Isotopes and Geolocation: The Pathway for Identification of Victims in Medellín, Colombia* (tesis de maestría, Boston University). <https://open.bu.edu/>
- Schaaf, P., Solís, G., Manzanilla, L. R., Hernández, T., Lailson, B., & Horn, P. (2012). Isótopos de estroncio aplicados a estudios de migración humana en el centro de barrio de Teopanazco, Teotihuacán. *Estudios arqueométricos del centro de barrio de Teopanazco en Teotihuacan*. México: UNAM, 425-448. http://www.iaa.unam.mx/directorio/archivos/MANL510125/2012_Manzanilla_LibroEstudiosArqueometricos.pdf.
- Schoeninger, M. (1995). Stable isotope studies in human evolution. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 4(3), 83-98. <https://doi.org/10.1002/evan.1360040305>.
- Spradley, M. (2021). Use of craniometric data to facilitate migrant identifications at the United States/Mexico border. *American Journal of Physical Anthropology*, 175(2), 486-496. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24241>.
- Stephan, C. N., Amidan, B., Trease, H., Guyomarc'h, P., Pulsipher T., & Byrd, J. (2014). Morphometric Comparison of Clavicle Outlines from 3D Bone Scans and 2D Chest Radiographs: A Shortlisting Tool to Assist Radiographic Identification of Human Skeletons. *Forensic Sci*, Vol. 59, No. 2, pp. 307-313. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12324>.
- Tamayo, A., & Soto, E. (2015). Consideraciones geoquímicas y petrogenéticas para establecer la evolución magmática del Complejo Volcánico Nevado del Huila. *Boletín Geológico*, (43), 53-62. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.43.2015.29>.
- Tapias, J., Ramírez, N., Meléndez, M., Gutiérrez, F., Montoya, C., & Diederix, H. (2015). Geological Map of Colombia 2015. *Episodes* 2017; 40: 201-212. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2017/v40i3/017023>.
- Tipple, B. (2015). Isotope Analysis of Hair as a Trace Evidence Tool to Reconstruct Human Movements: Combining Strontium Isotope with Hydrogen/Oxygen Isotope Data. (Technical Report). Retrieved from Department of Justice. (2011-DN-BX-K544).
- Tommasini, S., Marchionni, S., Tescione, I., Casalini, M., Braschi, E., Avanzinelli, R., & Conticelli, S. (2018). Strontium isotopes in biological material: A key tool for the geographic traceability of foods and human beings. In *Behaviour of Strontium in Plants and the Environment* (pp. 145-166). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66574-0_10.
- Valenzuela, L., Chesson, L., Bowen, G., Cerling, T., & Ehleringer, J. (2012). Dietary heterogeneity among western industrialized countries reflected in the stable isotope ratios of human hair. *Plos One*, 7(3), e34234. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034234>.
- Valenzuela, L., Chesson, L., O'Grady, S., Cerling, T., & Ehleringer, J. (2011). Spatial distributions of carbon, nitrogen and sulfur isotope ratios in human hair across the central United States. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25(7), 861-868. <https://doi.org/10.1002/rcm.4934>.
- van Geldern, R., & Barth, J. A. (2016). Oxygen and hydrogen stable isotopes in Earth's hydrologic cycle. *Isotopic Landscapes in Bioarchaeology*, 173-187.
- West, A., February, E., & Bowen, G. (2014). Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes ("isoscares") in ground water and tap water across South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 145, 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.06.009>.
- Wilson, R. J., Bethard, J. D., & DiGangi, E. A. (2011). The Use of Orthopedic Surgical Devices for Forensic Identification. *Forensic Science International*, 56(2), 460-469. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2010.01639.x>.