



La tabla periódica de los elementos, los isótopos y la ciencia forense

The Periodic Table of Elements, Isotopes, and Forensic Science

Miguel Ángel Martínez Carrillo¹ y Corina Solís Rosales²

Resumen

El uso de isótopos ha cobrado relevancia en ciencias gracias a la aparición de espectrómetros de masas cada vez más compactos y asequibles. Las aplicaciones de los análisis isotópicos se han convertido en una herramienta rutinaria en áreas como ciencias de la tierra, biología y ciencia forense. Por lo que el tema de los isótopos cobra relevancia en el ámbito de la enseñanza de química para estudiantes de todas esas áreas. Toca a los profesionales de la didáctica de la química para no químicos, encontrar las mejores formas de abordar el tema y presentarlo a los alumnos. El reto no es difícil, es un tópico de actualidad, interesante y con aplicaciones fascinantes en forense. Se propone abordar la enseñanza de los isótopos desde la perspectiva histórica dentro del tema de Tabla Periódica, quizá como parte de la solución a uno de los problemas surgido durante la construcción del sistema periódico: los pesos atómicos. En este documento se hace referencia al peso atómico estándar como peso atómico por razones históricas y porque entre las diversas variantes de la noción de peso atómico utilizadas en ciencias, el peso atómico estándar es el más común y práctico. El propósito de este documento es motivar a los profesores e investigadores forenses a explorar el estudio de los isótopos, eliminar el falso concepto de que todos los isótopos son radiactivos y que conozcan algunas de las aplicaciones de las técnicas isotópicas.

Palabras clave

Tabla Periódica, peso atómico estándar, isótopos, ciencia forense.

Abstract

The use of isotopes has gained relevance in science thanks to the appearance of increasingly compact and affordable mass spectrometers. Isotopic analysis applications have become a common tool in earth sciences, biology, and forensic science. Therefore, the isotopes issue becomes relevant in chemistry teaching for students in all these areas. It is up to professionals in chemistry education for non-chemists to find the best ways to approach the subject and present it to students. The challenge is not difficult; it is a current topic, interesting, and with fascinating applications in forensics. It is proposed to address the teaching of isotopes from a historical perspective within the theme of the Periodic Table, perhaps as part of the solution to one of the problems that arose during the construction of the periodic system: atomic weights. The standard atomic weight is referred to in this document as the atomic weight for historical reasons, and because among the various variants of the notion of atomic weight used in science, the standard atomic weight is the most common and practical. This document aims to motivate forensic teachers and researchers to explore the study of isotopes, eliminate the false concept that all isotopes are radioactive, and be aware of some of the applications of isotopic techniques.

Keywords

Periodic Table, standard atomic weight, isotopes, forensic science

¹Facultad de Ciencias UNAM. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CDMX, 04510, México.

²Instituto de Física, Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores, LEMA UNAM. Circuito de la Investigación s/n Ciudad Universitaria, Coyoacán, CDMX, 04510, México.

Introducción

La Tabla Periódica es tema de estudio de los cursos de química general de los estudiantes de ciencias forenses. Y, sin duda, la encontraremos en los laboratorios de investigación forense. Y aunque la Tabla Periódica es útil como referencia de nombres, símbolos y pesos atómicos; vista como un todo, el sistema periódico contiene información sobre tendencias, asociación entre elementos y reactividades en forma simple, concisa y elegante. En una época en la que disponemos de poder de cómputo y visualización de enorme riqueza, como la tecnología de realidad aumentada es lamentable que, en lugar de mantener la riqueza de la Tabla Periódica como conjunto, los alumnos recurran a aplicaciones en las que se aísla la información sobre los elementos. Con las tecnologías actuales sería incluso posible explorar otras propuestas de Tablas Periódicas, algo que sin duda les encantaría a filósofos de la ciencia como Eric Serri (Serri, 2008). Se ha discutido sobre la conveniencia de mantener el tema de Tabla Periódica en los cursos de química general de las ciencias forenses (Sosa, 2019). Pero, a pesar de las dificultades para presentar el tema de tabla periódica de manera significativa, las conclusiones apuntan a la conveniencia de conservarlo. Se considera que no es una conclusión errada.

Los pesos atómicos, fueron los datos de los que se partió en las propuestas de los primeros sistemas periódicos. También son parte de los datos más consultados por alumnos de ciencias forenses (Sosa, 2019). Los pesos atómicos tal y como son reportados en las tablas modernas constituyen un tema interesante para los cursos de química general en ciencias forenses; y son fuente de casos forenses muy interesantes. La razón se encuentra en las diferencias en la distribución isotópica natural de los elementos. El propósito de estas reflexiones en torno a la tabla periódica y las ciencias forenses es presentar un tema que ha permanecido soterrado durante mucho tiempo, pero que la tecnología ha vuelto a poner en las mesas de los investigadores de múltiples disciplinas particularmente en el ámbito forense: los isótopos.

La Tabla Periódica

Una forma accesible de enseñar el tema de los isótopos en ciencia forense es desde una perspectiva histórica; siguiendo la historia de los pesos atómicos, desde su papel -fundamental- en el desarrollo de la Tabla Periódica hasta su descubrimiento y aplicaciones. En esos primeros intentos para construir un sistema periódico, el peso atómico estaba íntimamente unido al concepto de elemento. La medición de los pesos atómicos y el concepto mismo de átomo son resultado de los trabajos previos de la química cuantitativa. Es importante resalta este hecho porque, aunque el concepto de átomo apenas comenzaba a fraguarse sin estar aceptado y mucho menos probado; para 1869 cuando Mendeleiev propone su primera versión de tabla periódica, ya se disponía de los pesos atómicos de los elementos conocidos. Los elementos, es decir, los átomos ya *habían sido pesados*.

Ese logro fue posible gracias a la química cuantitativa. Adhiriéndonos a la propuesta de presentar la historia de la química con propósitos educativos como dividida en cinco revoluciones (Chamizo, 2014; Chamizo, 2019). La determinación de los pesos atómicos de los elementos en esa época fue posible gracias a la primera revolución de la química, cuando se fijaron las bases de la química cuantitativa.

La creación de la Tabla Periódica fue producto del trabajo colectivo de muchos científicos y correspondería a la segunda revolución en la química. En este contexto, los historiadores de la química (Serri, 2018) han señalado que la propuesta de triadas de Döbereiner y la hipótesis de Prout, ambas apoyadas en el uso de pesos atómicos, fueron las claves en la creación del sistema periódico. La primera Tabla Periódica de Mendeléiev también estaba organizada de acuerdo con los pesos atómicos.

Sin embargo, a pesar de identificar al peso atómico como un atributo de su concepto de elemento, Mendeléiev puso en duda *los valores* de los pesos atómicos de varios elementos y la forma en encajaban en el sistema periódico, un acierto que le permitió sortear el pantano que significaban los pesos atómicos, por la existencia de sustancias desconocidas en ese entonces, los isótopos.

Reihen	Gruppo I. — R'O	Gruppo II. — RO	Gruppo III. — R'O ³	Gruppo IV. RH ⁴ RO ⁴	Gruppo V. RH ⁵ R'O ⁵	Gruppo VI. RH ⁶ RO ⁶	Gruppo VII. RH R'O ⁷	Gruppo VIII. — RO ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fo=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=86	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Eu=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Su=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

FIGURA 1. Revisión de la Tabla Periódica de 1871. Mendeléiev hacía revisiones de su Tabla Periódica haciendo ajustes a los datos. Sin embargo, las anomalías con los pesos atómicos seguían apareciendo.

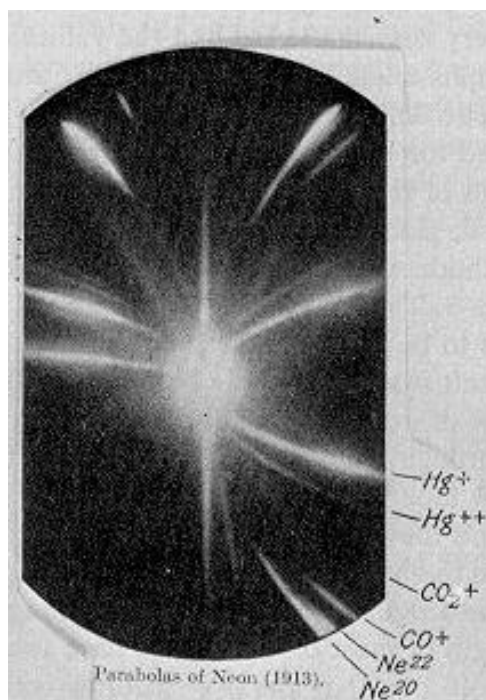


FIGURA 2. Copia de la placa fotográfica de J. J. Thomson en la que están marcados los isótopos del neón ²⁰Ne y ²²Ne

Fue necesario esperar la llegada de la tercera revolución en la química, cuando los experimentos de Henry Moseley relacionaron los rayos X emitidos por cada elemento con su número atómico o número de protones en el núcleo. Moseley probó así la hipótesis de Antonius van den Broek, quien un par de años antes ya había definido al número atómico o número de cada elemento en la Tabla Periódica con la carga del núcleo atómico recién descubierto. El número atómico sustituyó al peso atómico como criterio para ordenar a los elementos secuencialmente y ajustarlos a su comportamiento periódico.

El cambio del peso atómico al número atómico permitió dejar a un lado el problema de las inconsistencias que provocaban en la Tabla Periódica el que algunos elementos con números atómicos altos tuvieran pesos atómicos más

bajos. Pero la solución al problema de las discordancias de los pesos atómicos estaba a la vuelta de la esquina. Casi simultáneamente, en 1913, J. J. Thomson identificó un elemento con diferentes masas atómicas, el neón como ^{20}Ne y ^{22}Ne . El encargado de los análisis en el laboratorio de Thomson fue Francis William Aston, quien perfeccionaría el espectrógrafo de masas y años después descubriría los isótopos estables.

En el mismo año, 1913 Frederick Soddy, descubrió elementos radiactivos con las mismas propiedades químicas pero diferente peso atómico. Soddy propuso el nombre de isótopos, utilizando el término que le fue propuesto por Margaret Todd en una cena.

Las discrepancias de los pesos atómicos de los elementos con su posición en la Tabla eran resultado de estos isótopos, los radiactivos o radioisótopos que son energéticamente inestables y se desintegran con el tiempo a otros isótopos radiactivos u otros elementos acompañados de emisiones radiactivas. Y los isótopos estables, para los que no se detectó desintegración radiactiva alguna.

Aunque el término que predominó es el de isótopo, para Kazmierz Fajans, contrincante académico de Soddy, las pequeñas diferencias en el comportamiento químico y físico de los isótopos los convertía no solamente en entidades distintas, sino en elementos distintos. Fajans había propuesto el nombre de pléyade, para el conjunto de isótopos de cada elemento. Los historiadores de la química han señalado (Francl, 2019), que el término de pléyade encerraba al conjunto de sustancias igualmente importantes relacionadas entre sí. En tanto que el término de isótopo enfatiza la identidad del elemento “normal”.

Los isótopos

La mayoría de los estudiantes de ciencia forense al escuchar la palabra isótopo seguramente la relacionarán con *radiactividad* o con los *radioisótopos*. La reacción es explicable porque desde su descubrimiento, los radioisótopos acaparan la atención y sus propiedades reales o exageradas los hicieron aparecer literalmente, hasta en la sopa. La aplicación más temprana de los radioisótopos (antes de su uso en armas) fue la geocronología, técnica propuesta y aplicada con éxito por el geólogo Arthur Holmes en 1910 para determinar la edad de la Tierra. Además de la geocronología los radioisótopos también son utilizados en la datación de objetos con antigüedades de cientos y hasta miles de millones de años.

En el campo forense, los radioisótopos están involucrados en casos de accidentes y crímenes muy sonados mediáticamente. Entre los más conocidos en México están: la fuente de ^{60}Co que fue vendida como chatarra y fundida para elaborar varillas para la construcción en Chihuahua. La compra de leche en polvo contaminada con ^{90}Sr proveniente de Irlanda por las emisiones al ambiente en la planta nuclear de Chernóbil.

Y el interesante caso del encargado de medicina nuclear en la CDMX quien fue acusado por sus colegas de contaminar el café de la oficina con yodo radiactivo, específicamente ^{131}I . Este es un caso interesante porque el presunto implicado padecía de hipotiroidismo -deficiencia en la absorción de yodo- y supuestamente bebía del mismo café sin temor a sufrir los efectos a la salud provocados por la acumulación del yodo radiactivo -como sí les ocurrió a seis de sus compañeros-. Sin embargo, el caso más famoso a nivel internacional, por sus implicaciones políticas, fue el asesinato del exespía ruso Alexander Litvinenko con ^{210}Po el cual es considerado un crimen casi perfecto. Sin embargo, la investigación de emisiones radiactivas al ambiente, así como de los accidentes y crímenes con radioelementos es competencia de la llamada ciencia forense nuclear.

No todos los radioisótopos naturales tienen su origen en la desintegración radiactiva de otros elementos y tampoco son necesariamente producto de la actividad humana. Los isótopos cosmogénicos, algunos estables y otros radiactivos, se generan continuamente en la Tierra a consecuencia del bombardeo de partículas de muy alta energía provenientes del espacio profundo, los rayos cósmicos. El isótopo cosmogénico más conocido es el radiocarbono o ^{14}C y la técnica de datación con radiocarbono, propuesta por Willard Libby en 1940, permite establecer con muy buena precisión la fecha de muerte de organismos vivos o bien, la fecha aproximada de elaboración de objetos manufacturados con materiales orgánicos hasta los 55,000 años. La técnica radiométrica que mide la desintegración β de los átomos de ^{14}C y transmutar a ^{15}N continúa utilizándose, pero ha sido desplazada por la espectrometría de masas con aceleradores que, *grosso modo* se puede decir que cuenta los átomos de cada isótopo de carbono (^{12}C , ^{13}C y ^{14}C) en las muestras y obtiene las proporciones de estos isótopos. Aunque la datación con radiocarbono parecería más cercana a la arqueología o a la antropología que a las ciencias forenses, el cambio en la concentración natural de radiocarbono en la Tierra ocurrida entre 1950 y 1963 permite aplicar el análisis con ^{14}C a casos forenses modernos.

La marca con radiocarbono de ese periodo, conocida como Pico de la Bomba, aparece en todos los animales, plantas y objetos que vivieron o fueron elaborados entre 1950 y casi hasta nuestra época. En ciencia forense la marca del Pico de la Bomba es utilizada para autenticar documentos, obras de arte y como auxiliar en la identificación de restos de humanos modernos (Solís, 2017, Gil-Chavarría, 2020).

Es por eso por lo que es muy fácil engancharse con los casos forenses en los que están involucrados los radioisótopos y olvidar a los isótopos estables.

No obstante, los isótopos estables han ido cobrando importancia en muchas áreas de la ciencia, también en ciencia forense. El cambio incluso ha llevado a algunos químicos a rescatar la idea de Fajans de que quizá los isótopos podrían ser elementos distintos y daría a la Tabla Periódica una dimensión extra (Francl, 2019). Desde su descubrimiento, los isótopos estables parecían condenados a ser meras curiosidades, peor aún, sin utilidad, porque sus propiedades químicas *eran las mismas* que las del elemento normal y por eso fueron confinados *al mismo lugar*.

El cambio de actitud con respecto al estudio de los isótopos estables comenzó en 1931, cuando Harold Urey descubrió al deuterio ^2H . Urey demostró que el deuterio con el doble de masa del protio o ^1H , poseía propiedades químicas diferentes.

Sin embargo, el cambio ha sido lento y más bien impulsado por las aplicaciones de los isótopos estables en química y geociencias. Con el aumento en la precisión de las medidas de espectrometría de masas, en las siguientes décadas se acumularon evidencias de que, al determinar el peso atómico relativo de muchos de los elementos, el valor dependía de la fuente del material y de su número de isótopos estables. No es una regla para todos los elementos, existen 21 elementos que poseen solamente un isótopo estable por lo que se conocen sus pesos atómicos con una precisión mayor a una parte por millón.

Los isótopos y la medida de sus variaciones isotópicas son herramientas que se utilizan en disciplinas muy diversas en formas que suponen dos comportamientos químicos distintos: 1) suponiendo que son químicamente idénticos al elemento normal, es decir como trazadores y (2) suponiendo que este comportamiento es diferente cuando efectos tales como el isotópico cinético cobran relevancia.

Las mezclas promedio de los isótopos de los elementos en los materiales geológicos que cambian conforme la materia se mueve a través de los diversos sistemas de la Tierra (Thornton y Burdette, 2013). Los análisis de muestras geológicas han develado variaciones temporales y espaciales en las composiciones isotópicas de la Tierra.

Es común que estas anisotropías en la composición de los materiales trasloque a las plantas y animales. Por ejemplo, el agua rica en isótopos pesados ^2H o D y ^{18}O permanece cerca de los mares y se empobrece en los mismos a medida que se penetra en los continentes, pero dependiendo de factores como la climatología y la orografía. Estas variaciones permiten elaborar mapas isotópicos (en inglés se propuso el término *isoscape*, (de *isotope* y *landscape*) para referirse a las predicciones espaciales de los valores isotópicos de algún elemento en un terreno. La proporción isotópica es reportada en partes por mil (‰) expresada como una δ .

Por ejemplo, la $\delta^{13}\text{C}$ se calcula refiriéndola a un estándar de proporciones $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ conocidas y se expresa como:

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{Muestra}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{Estándar}}} - 1 \right) \times 1000 \text{ ‰}$$

Auxiliándonos con el mapa isotópico de la $\delta^{18}\text{O}$ es posible analizar restos óseos y saber si los restos de una persona nos indican si la persona vivía en esa zona o había migrado desde la costa.

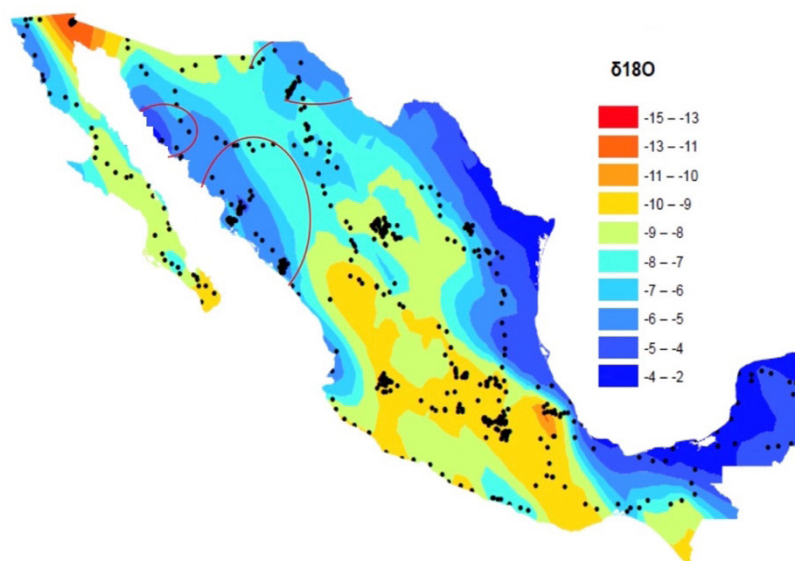


FIGURA 3. Ejemplo del mapa isotópico con las variaciones en las proporciones de ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$) de las aguas naturales en la República Mexicana. (Rebeles, 2017).

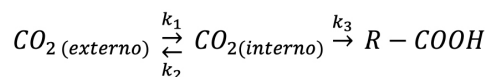
El caso más reciente y detallado del uso de mapas isotópicos es el caso de *Fred*, un mastodonte que vivió hace más de 13,000 años. Gracias a los registros isotópicos acumulados en sus defensas (conocidos como colmillos), las proporciones de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ permitieron reconstruir el mapa de los lugares en que habitó y las migraciones que hizo en el transcurso de su vida. (Millera, 2022).

Las plantas contienen por lo general menos ^{13}C que lo que cabría esperar dadas las cantidades de CO_2 que asimilan, por tanto, la $\delta^{13}\text{C}$ en el tejido de las plantas es más negativa que la del aire. El fraccionamiento isotópico en las plantas tiene lugar durante la fijación de carbono en la segunda etapa de la fotosíntesis, conocida como ciclo de Calvin o reacciones que no dependen de la luz. El 85% de las plantas es de tipo C_3 , llamadas así por el compuesto de 3 carbonos que lleva a cabo la reacción de fijación de carbono, el 3-PGA.

En las plantas C_3 la fotosíntesis y su principal vía competitiva, la fotorrespiración, se llevan a cabo en presencia de luz. La fotorrespiración es considerada una vía derrochadora, porque es responsable de la liberación a la atmósfera de entre el 25 al 50% del CO_2 fijado, provocando gastos de energía, agua y nitrógeno.

Sin embargo, un 3% de las plantas que crecen en ambientes muy cálidos es capaz de reducir la fotorrespiración. En estas plantas las reacciones dependientes de la luz y el ciclo de Calvin están separadas; se conocen como plantas C_4 porque en ellas la fijación del CO_2 ocurre en unas células especializadas en las que se forma un ácido orgánico simple de 4 carbonos (oxoacetato) el cual es transformado en maleato y transportado a otras células en las que se descompone en CO_2 y da inicio al ciclo de Calvin. Finalmente, algunas plantas adaptadas a ambientes muy cálidos y secos utilizan una vía denominada CAM (*crassulacean acid metabolism* o metabolismo ácido de las crasuláceas). Las plantas CAM también reducen al mínimo la fotorrespiración. Pero para ello solamente abren sus estomas de noche, permitiendo la entrada de CO_2 y fijándolo en forma de oxalato que es transformado en maleato, al igual que en las plantas C_4 . La diferencia es que el maleato es almacenado en las vacuolas; al día siguiente, la planta cierra sus estomas y realiza la fotosíntesis, mientras que el maleato es descompuesto a CO_2 fuera de las vacuolas e inicia el ciclo de Calvin.

En las plantas C_3 , como el arroz, el trigo y todos los árboles, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ van de -35 a -22‰; en las plantas tipo C_4 , como el maíz y la caña de azúcar, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ va de -17 a -9‰ y en las plantas CAM, como los agaves, las cactáceas y las piñas, la $\delta^{13}\text{C}$ presenta valores de $\delta^{13}\text{C}$ intermedios que van de -34 a -10‰. La diferencia isotópica de ^{13}C en las plantas es consecuencia de dos mecanismos de reacción diferentes involucrados durante la fijación de carbono. El primero, controlado por los efectos cinéticos derivados de la diferencia de masa entre el ^{12}C y el ^{13}C y el segundo impulsado por reacciones bioquímicas en las que intervienen enzimas que favorecen la fijación de carbono. La expresión para estas reacciones tiene la forma:



En el primer paso de la reacción, la difusión del CO_2 al interior de la planta, es una reacción reversible en el que la k_1 y k_2 son responsables de un fraccionamiento de -4‰. En tanto que la fijación enzimática de carbono es una reacción bioquímica irreversible en la que k_3 da lugar a un fraccionamiento mucho mayor de -17 a -40‰. El fraccionamiento total de la reacción de fijación de carbono dependerá de cuál de los dos pasos es el dominante y controla la velocidad de reacción. Este es un buen ejemplo de cómo los isótopos, en este caso el ^{13}C , tiene un comportamiento químico diferente al del ^{12}C .

En el ámbito forense, las diferencias en la $\delta^{13}\text{C}$ en las plantas permiten distinguir, por ejemplo, el alcohol obtenido de agaves (plantas tipo CAM) del alcohol obtenido de la caña de azúcar que son plantas tipo C_4 . Este es un dato muy útil en la autenticación de, por ejemplo, mezcales y tequilas. Lo mismo ocurre en medicamentos y productos naturales como la testosterona, porque cuando esta hormona es sintética posee un $\delta^{13}\text{C}$ diferente al de la testosterona natural, información útil en casos de dopaje. Estos ejemplos de las variaciones isotópicas nos permiten observar el mundo material de manera diferente. De los 118 elementos en la Tabla Periódica, 80 tienen isótopos estables y 84 tienen un valor de peso atómico estándar basado en el ambiente terrestre; pero existen 3,300 isótopos conocidos, por lo que es posible conformar una nueva imagen del mundo material que nos rodea y que no está limitado al de los materiales terrestres, los materiales extraterrestres poseen sus propias firmas isotópicas.

En 2010 la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) actualizó el peso atómico estándar de diez elementos de la Tabla Periódica. La actualización de los datos en esa tabla incorporó medidas más precisas de los pesos atómicos. Sin embargo, el cambio más significativo en esa actualización fue la manera de expresar los pesos atómicos en algunos elementos: como un conjunto de valores y no como valores únicos estándar (Coplen y Holden, 2010, García, 2011, Thornton y Burdette, 2013). Este peso atómico estándar promedia los valores en el intervalo de pesos atómicos que se podría medir de muchas muestras aleatorias de la Tierra.

Elemento	Formato anterior	Nuevo formato
Hidrógeno	1,00794 (7)	[1,00784; 1,00811]
Litio	6,941 (2)	[6,938; 6,997]
Boro	10,811 (7)	[10,806; 10,821]
Carbón	12,0107 (8)	[12,0096; 12,0116]
Nitrógeno	14,0067 (2)	[14,00643; 14,00728]
Oxígeno	15,9994 (3)	[15,99903; 15,99977]
Silicio	28,0855 (3)	[28,084; 28,086]
Azufre	32,065 (5)	[32,059; 32,076]
Cloro	35,453 (2)	[35,446; 35,457]
Talio	204,3833 (2)	[204,382; 204,385]

TABLA 1. Pesos atómicos estándar de elementos en su formato anterior y en el formato presentado por la IUPAC en 2010 para indicar el intervalo en los valores de los pesos atómicos de estos elementos.

Además de incorporar medidas de pesos atómicos de mayor precisión, la justificación de la IUPAC para estos cambios fue *representar la forma en la que estos elementos se encuentran en la Tierra y eliminar la suposición de que el peso atómico para todos los elementos es una constante.*

Los cambios inducidos no se detuvieron allí; en 2018 la IUPAC fue más allá y presentó en un reporte técnico la Tabla Periódica de los Elementos e Isótopos o TPEI (Holden et al, 2018). El propósito de ese muy completo reporte técnico es:

Familiarizar a los estudiantes, profesores y no profesionales con la existencia e importancia de los isótopos de los elementos. La TPEI se basa en la Tabla Periódica de los Elementos y ha sido pensada para utilizarse como Tabla de pared en los laboratorios y aulas de química. Cada casilla de la TPEI proporciona el nombre, símbolo, número y el peso atómico estándar de un elemento. Además, las gráficas circulares codificados

por colores en cada casilla, muestra los isótopos estables y los radioisótopos con vidas medias relativamente largas con las composiciones isotópicas terrestres características que determinan el peso atómico estándar de cada elemento.

El público objetivo del reporte técnico de IUPAC es el público en general y no únicamente los estudiantes de ciencias. Lo que facilita su inclusión en los temas de química de ciencia forense. A la fecha las expectativas de la IUPAC no se han cumplido.

La Tabla Periódica de los Elementos e Isótopos (TPEI) no ha alcanzado la difusión que se hubiera querido y se ven pocas TPEI de pared en las escuelas. Sin embargo, las modernas técnicas de espectrometría de masas (con aceleradores para isótopos cosmogénicos y convencional para el resto de los isótopos) con equipos cada vez más compactos y económicos están poniendo a los isótopos en la mira de muchas disciplinas, entre ellas la ciencia forense. El reporte técnico de la IUPAC de 2018 presenta la TPEI, indica cómo utilizarla, pero, sobre todo, proporciona muchos ejemplos de aplicaciones de los isótopos, muchos de ellas del ámbito forense. La IUPAC continúa realizando revisiones frecuentes a los valores de los pesos atómicos estándar y las variaciones isotópicas de los elementos (Prohaska et al, 2021). Además de su muy completo reporte técnico de 2018 la IUPAC ha publicado materiales educativos complementarios en línea como la Tabla Periódica de los Elementos e Isótopos interactiva.

Conclusiones

- Los temas de Tabla Periódica e isótopos son significativos en el ámbito forense. Los científicos forenses deben aprender lo suficiente de ellos como para saber qué batería de técnicas analíticas está disponible, que información se obtiene de ellas y a quienes y cómo se solicitarlas e interpretarlas.
- Los isótopos estables nos dan información espacial principalmente, en tanto que los isótopos cosmogénicos, nos dan información temporal.
- La irrupción de los análisis isotópicos en los procesos de investigación forense es parte cotidiana del trabajo profesional de muchos científicos forenses.
- Las aplicaciones potenciales de las variaciones isotópicas de los elementos en ciencia forense estarán limitadas únicamente por la composición elemental de los materiales analizados y los límites de detección de los equipos.

Referencias

- Coplen, T.B, and Holden, N.E. (2010), Atomic Weights: No Longer Constants of Nature *Chem. Int.* 32(1), 12
- Chamizo, J.A. (2014) The role of instruments in three chemicals' revolutions, *Science & Education*, 23, 955–98.
- Chamizo, J.A. (2019) Las sustancias químicas, antes y después de la construcción de la Tabla Periódica, *Educación Química*, 30, 98–107. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.4.70469>
- Francl, M. (2019), Isotopic enrichment. *Nature Chem*, 11, 101–102.

- García Martínez, J., (2011) La tabla periódica de los isótopos. Incertidumbre en la determinación y expresión de los pesos atómicos. *An. Quím.*, 107(2), 185–187.
- Gil-Chavarría I, Solís C, Rodríguez-Ceja M., Chávez, E., Martínez Carrillo M.Á., Mondragón Sosa M.A, Huerta-Pacheco N.S., Quinto-Sanchez M. (2020) Analysis of ^{14}C concentration in teeth to estimate the year of birth in the Mexican population. *J Forensic Leg Med.* 76, 1-6.
- Holden, N.E., Coplen, T.B., Böhlke, J.K., Tarbox, L.V., Benefield, J., de Laeter, J.R., Mahaffy, P.G., O'Connor, G., Roth, E., Tepper, D.H., Walczyk, T., Wieser, M.E. and Yoneda, S. (2018) *IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes (IPTEI) for the Education Community (IUPAC Technical Report)*, *Pure and Applied Chemistry*, 90, (12), 1833-2092.
- Millera, J.H. Fisherb, D.C. Crowleya, B.E. Secorde, R. and Konomig, B.A. (2022), Male mastodon landscape use changed with maturation (late Pleistocene, North America), *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119, 1-10.
- Prohaska, T. Irrgeher, J., Benefield, J., Böhlke, J. K., Chesson, L. A., Coplen, T. B., Ding, T., Dunn, P. J. H., Gröning, M., Holden, N. E., Meijer, H. A. J., Moossen, H., Possolo, A., Takahashi, Y., Vogl, J., Walczyk, T., Wang, J., Wieser, M. E., Yoneda, S., Zhu, X.-K. and Meija, J., (2022), *Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report) Pure and Applied Chemistry*, 94, (5), 573-600.
- Rebeles Martínez, A. G. (2017) Actualización del mapa isotópico ($\delta^{18}\text{O}$ y D) de las aguas naturales de la República Mexicana, Tesis, IPN, CDMX.
- Scerri, E. (2008) El pasado y el futuro de la tabla periódica., *Educación Química*, 19, 234-241. <https://cutt.ly/1Cn6xwc>
- Solís, C. Solís-Meza, E. Morales, M.E. Rodríguez-Ceja, M., Martínez-Carrillo, M.A., García-Calderón, D. Huerta, A. Chávez, E. (2017), AMS- ^{14}C analysis of modern teeth: A comparison between two sample preparation techniques, *Nucl. Instr. Meth. B.* 406, 292-295.
- Sosa, A.M. y Suzuri Hernández, L.J. (2019). ¿Necesita el científico forense comprender la periodicidad? *Educación Química*, 30, 115-124.
- Thornton, B., Burdette, S. (2013), The straight dope on isotopes. *Nature Chem* 5, 979–981.
- Wray K.W. (2018) The atomic number revolution in chemistry: a Kuhnian analysis, *Foundations of Chemistry*, 20, 209-217.