

Composición isotópica de las aguas meteóricas. Una mirada a los fundamentos teóricos y las experiencias de Cuba en su caracterización

 Alejandro García Moya¹,  Carlos Manuel Alonso Hernández²,  Oscar Díaz Rizo³,
 Minerva Sánchez Llull¹

¹ Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350 Cienfuegos, Cuba.

² Marine Environment Laboratories, Department of Nuclear Science and Application, International Atomic Energy Agency. 4 Quai Antoine 1er, 98000 Monaco, Mónaco.

³ Universidad de La Habana, Instituto Superior de Ciencias Técnicas Aplicadas (UH-InSTEC). La Habana, Cuba
garciamoya90@gmail.com

Resumen

El agua es un recurso esencial para la vida en la Tierra. Aunque el agua atmosférica representa solo una pequeña fracción del balance global, desempeña un papel crucial en el ciclo hidrológico, la regulación climática y los fenómenos meteorológicos. Los isótopos estables del agua meteórica contienen una valiosa información sobre los procesos de fraccionamiento y mezcla desde su origen hasta su precipitación.

Este trabajo ofrece una visión general de los fundamentos teóricos que sustentan el estudio de la composición isotópica de las precipitaciones, con una mirada particular en su determinación analítica, y los principales factores que determinan su variabilidad descritos en la literatura. Se ofrece además un breve análisis de los estudios publicados en el país hasta la fecha, identificando los principales vacíos que limitan su aplicación como herramientas de la hidrología isotópica.

Palabras clave: *isótopos estables, agua meteórica, fundamentos teóricos, estudios publicados, hidrología isotópica.*

Isotopic composition of meteoric waters. A look at the theoretical foundations and experiences of Cuba in its characterization

Abstract

Water stands as a critical resource for life on Earth. While atmospheric water comprises a minor portion of the global water balance, it plays a pivotal role in the hydrological cycle, climate regulation, and meteorological phenomena. The stable isotopes composition of meteoric water contains significant information on fractionation and mixing processes from its origine to its precipitation.

This paper provides a comprehensive overview of the theoretical framework supporting the study of the isotope composition of precipitation. A particular reference on the methods of analytical determination and the key factors influencing its variability as outlined in the existing literature. Furthermore, a concise assessment of the previous research published for the country is presented, pinpointing the primary gaps that hinder the application of isotope hydrology tools.

Key words: *stable isotope composition, meteoric water, theoretical framework, research published, isotope hydrology.*

Introducción

El agua es uno de los recursos más preciados, pues es fuente y sustento de la vida en La Tierra. El 97.5 % es salada, y se almacena fundamentalmente en los océanos, quedando solo un 2,5 % de agua dulce en el balance global del agua. El 68.6 % de esta agua dulce se encuentra en los polos, un 30.1% en las aguas subterráneas y sólo un 1 % corresponde al agua superficial y atmosférica. Aunque el agua atmosférica representa solo un 0.0009 % del agua total del planeta, tiene una importancia vital en el ciclo del agua, pues interviene en procesos como la recarga natural de sistemas hidrológicos, la regulación del clima, el movimiento de masas de agua a escala global, la ocurrencia de desastres naturales y fenómenos meteorológicos extremos [1, 2].

El ciclo del agua es un proceso complejo que incluye varias etapas como la evapotranspiración, condensación, transporte de vapor, precipitación, escorrentía, percolación, recarga, descarga y un sin número de actividades antropogénicas asociadas a su explotación. El estudio del agua y los mecanismos que intervienen en su ciclo es de vital importancia para aprovechar mejor este recurso, especialmente en zonas donde es escaso o vulnerable a riesgos ambientales, como es el caso de los pequeños estados insulares del trópico, donde la lluvia es la única fuente natural de agua dulce.

La hidrología isotópica es un campo de investigación que utiliza isótopos estables y radiactivos, tanto naturales como artificiales, para caracterizar el comportamiento del agua durante su ciclo hidrológico, o en aquellos procesos de la ingeniería en los cuales se le utiliza. Los isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno que forman la molécula del agua, son portadores de una huella distintiva determinada por los procesos de fraccionamiento y mezcla isotópica que ocurren durante el movimiento del agua a través de su ciclo. Esta huella puede utilizarse para investigar disímiles procesos relacionados con la cantidad y calidad de los recursos hídricos: balance hidrológico, origen de recarga de acuíferos, mezcla de aguas, tiempos de residencia, interconexión entre aguas subterráneas y superficiales, impacto antropogénico, vulnerabilidad y saneamiento de sistemas hídricos e hidráulicos [1, 3].

La creación en 1960 de la Red Global de Isótopos en Precipitaciones (GNIP, por sus siglas en inglés) como resultado del esfuerzo coordinado del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Mundial de Meteorología (OMM), potenció significativamente el empleo de los isótopos estables en las precipitaciones a nivel global [4]. Los primeros estudios basados en la abundancia natural del oxígeno-18 (^{18}O) y deuterio (^2H) relacionados con el clima, fueron llevados a cabo por Craig en 1961 [5] y Dansgaard en 1964 [6]. En estos estudios se describió por primera vez la correlación de los isótopos en el agua meteórica, su variabilidad y relación con parámetros climáticos. Estos resultados dieron paso a numerosos estudios que le ha sucedido, así como la aplicación de estos trazadores en diversas disciplinas

como hidrología, climatología, geología, ecología y ciencias forenses, entre otras [8 -10].

En Cuba, los estudios de hidrología isotópica se han concentrado en zonas y aplicaciones muy específicas, fundamentalmente relacionados con la hidrogeología. Con lo cual, aun persiste escaso conocimiento sobre la composición isotópica de los recursos hídricos, particularmente de las precipitaciones, a escala nacional. Esto limita considerablemente las aplicaciones de estos trazadores, sobre todo ante la necesidad de información científica válida y confiable sobre los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos nacionales, de manera que esta pueda contribuir a su gestión eficiente y sostenible.

En este trabajo se pretende ofrecer una panorámica general sintetizada sobre los fundamentos teóricos que sustentan el estudio de la composición isotópica de las precipitaciones, con una mirada particular a las técnicas analíticas para su determinación, los principales efectos descritos por la literatura y que guardan relación con su variabilidad, así como al conocimiento que existe en el país a partir de los estudios publicados y disponibles hasta la fecha.

2. Descripción general de los sustentos teóricos de la aplicación de isótopos estables en aguas meteóricas

2.1. Principios básicos de los isótopos estables

La palabra isótopo proviene del griego *iso* (igual o mismo) y *topo* (lugar), o sea “mismo lugar” [17]. Y se utiliza para definir las diferentes formas isotópicas de un mismo elemento químico, definido por su número atómico ($A=Z+N$), pero con diferente número de neutrones en su núcleo (p.ej. ^1H y ^2H del hidrógeno). Estas diferentes formas isotópicas tienen igual número de electrones orbitales, ocupan el “mismo lugar” en la tabla periódica, mantienen las mismas propiedades químicas, pero se distinguen entre sí por su masa atómica. Como característica distintiva los isótopos estables persisten en la misma forma durante eones luego de su formación. El resto, son formas isotópicas radioactivas que emiten radiaciones y se transforman para convertirse en otros elementos [17-20].

Otro elemento fundamental para entender sus aplicaciones es que, según su masa atómica, para un mismo elemento químico existen isótopos estables pesados y ligeros. Al tener masas atómicas diferentes, tienen comportamientos diferentes al romperse los enlaces moleculares, p.ej. durante un cambio de estado físico a otro. Esto es lo que origina el “fraccionamiento isotópico” y a partir de ello las huellas que isotópicas que los distinguen durante sus ciclos en la naturaleza [1, 17, 18]. Estas diferencias se expresan utilizando la notación delta “ δ ”, en per mil (‰), a través de la cual se cuantifica composición isotópica de una sustancia, ecuación 1.

Ecuación 1. Cálculo de la composición isotópica de una muestra utilizando la notación delta “ δ ”:

$$\delta^y X(\text{‰}) = \left[\frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} - 1 \right] * 1000$$

dónde:

y : se refiere al número atómico del isótopo más pesado (menos abundante) del elemento de interés

X : se refiere al elemento químico de interés para el que se desea determinar la composición isotópica en la muestra

R : se refiere a la relación entre los isótopos pesado (menos abundante) y el ligero (más abundante), que para el agua serían $^2\text{H}/^1\text{H}$; $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$; o $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

estándar : se refiere estándar internacional definido como referencia para el cálculo de la composición isotópica. Para el caso del agua del agua es el VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*)

2.2. Isótopos estables del agua

Las moléculas de agua están formadas por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (H_2O). Ambos elementos tienen isótopos estables pesados y ligeros, con lo cual existen 9 combinaciones diferentes de estos isótopos en la molécula del agua, tabla 1. A estas diferentes combinaciones se les reconoce como isotopólogos, pues mantiene la exactamente la misma fórmula, disposición de los enlaces, y propiedades químicas; pero se diferencian en su masa molecular, composición isotópica, cinética de reacción y abundancia natural [17, 20, 21].

Tabla 1. Isotopólogos del agua y sus abundancias naturales

Masa Molecular	Isotopólogo	Abundancia natural
18	$^1\text{H}_2^{16}\text{O}$	0.99731
19	$^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$	3.146×10^{-4}
19	$^1\text{H}_2^{17}\text{O}$	3.789×10^{-4}
20	$^1\text{H}^2\text{H}^{17}\text{O}$	1.122×10^{-7}
20	$^2\text{H}_2^{16}\text{O}$	2.245×10^{-8}
20	$^1\text{H}_2^{18}\text{O}$	2.000×10^{-3}
21	$^2\text{H}_2^{17}\text{O}$	insignificante
21	$^1\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$	6.116×10^{-7}
22	$^2\text{H}_2^{18}\text{O}$	insignificante

En el agua los isotopólogos más abundantes son $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$, $^1\text{H}_2^{17}\text{O}$, $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, en ese orden. Su distribución en la naturaleza y en cada una de las fases del ciclo del agua directamente relacionada con los procesos físicos, químicos y biológicos que influyen en el fraccionamiento y mezcla de los mismos. Por lo tanto el estudio de la composición isotópica del agua puede ofrecer valiosa información sobre el origen del agua y los procesos hidrológicos que intervienen en su ciclo, a diferentes escalas espaciales y temporales [4, 22].

2.2.1. Determinación analítica

En la actualidad, existen varias técnicas para la determinación analítica de la composición isotópica de una muestra de agua. Estas técnicas se agrupan en dos líneas de desarrollo tecnológico fundamentales: 1) la Espectrometría de Masas de Relaciones Isotópicas

(IRMS, en inglés), y 2) la Espectroscopía de Absorción Laser (LAS, en inglés). A pesar de que sus respectivos principios analíticos son bien diferentes, ambas técnicas han sido ampliamente distribuidas y reconocidas por su eficiencia, precisión y veracidad.

2.2.1.1. Espectrometría de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS)

La espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS, en inglés) se basa en el análisis de la composición isotópica de un gas (p. ej. H_2 , o CO_2) a partir de su ionización y deflexión ante un campo magnético. El grado de deflexión dependerá de la masa de los diferentes isotopólogos ionizados, lo cual permite separar moléculas con composiciones isotópicas diferentes. Los haces de iones separados se reciben en un ensamble colector formado por copas de Faraday independientes que cuantifican su intensidad, la cual se amplifica y se utiliza para el cálculo de la abundancia relativa de cada uno de los isótopos en el gas analizado [20, 23].

La composición isotópica del agua se realiza mediante el equilibrio gas-agua: $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ para la determinación de $\delta^{18}\text{O}$ [5, 24], y $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ para la determinación de $\delta^2\text{H}$ [25, 26]. El principio se basa en el equilibrio termodinámico de la señal isotópica entre el gas inyectado y el agua de la muestra, en un contenedor hermético con condiciones de temperatura y presión constantes durante un periodo de tiempo determinado. Para el caso específico del $\delta^2\text{H}$, se requiere la presencia de un catalizador de Pt [25, 26]. Adicionalmente, para la determinación del $\delta^2\text{H}$ existe el método de combustión catalítica y reducción del H_2O a H_2 con cromato, pero estos son menos comunes [27].

La principal ventaja de la IRMS es que permite realizar el análisis de la composición isotópica del agua en muestras líquidas, ya sea de aguas con altos contenidos de sales u otras sustancias disueltas o suspendidas, así como del vino [28], la orina [29], etc. Entre las principales desventajas están los costos de implementación del equipamiento de laboratorio (actualmente entre 200 y 500 kEUR); el requerimiento de gases de referencia, así como el gas portador (helio), todos con alto grado de pureza; además de tener rangos de incertidumbre superiores a la espectroscopía laser, fundamentalmente para $\delta^2\text{H}$ en sistemas de Flujo Continuo, lo cual reduce su aplicabilidad en estudios que requieran de una alta precisión analítica [30].

2.2.1.2. Espectroscopía de Absorción Laser (LAS)

Durante los últimos 15 años, la espectroscopía de absorción láser se ha desarrollado grandemente para su uso en el análisis de isótopos estables. Este método analítico se basa en la absorción de la radiación electromagnética generada por un láser en la frecuencia específica para cada uno de los isotopólogos de interés en una sustancia en estado gaseoso (analito). Según la ley de Beer-Lambert, la absorción está directamente relacionada con la concentración, por lo que utilizando láseres ajustables es posible escanear las bandas de

absorción de los diferentes isotopólogos de interés y cuantificar su abundancia en el analito [20, 23].

Actualmente existen varios sistemas comercialmente disponibles, que utilizan láseres de diodo ajustables y de bajo costo para la determinación de la composición isotópica ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$ y $\delta^{18}\text{O}$) del agua, con una elevada precisión [20]. Los dos métodos espectroscópicos más utilizados son: 1) La Espectroscopía de Salida Integrada en Cavidad Fuera de Eje (OA-ICOS, en inglés) y 2) la Espectroscopía de Absorción Láser de Decaimiento en Anillo (CRDS, en inglés [23, 31].

Entre las principales ventajas de las técnicas de LAS para el análisis de la composición isotópica de las aguas naturales se incluyen: costo de inversión en equipamiento considerablemente más bajo (actualmente alrededor de los 80 kEUR), que no requiere de sistemas de preparación adicionales para la conversión de H_2O en H_2 puro o equilibrio gas-agua; en dimensiones el equipamiento es de menor tamaño, incluso adaptable a su uso portátil en campo; pocos accesorios adicionales que requieren de mantenimiento regular; realiza el análisis integrado de los diferentes isotopos de interés ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$ y $\delta^{18}\text{O}$) durante la misma corrida analítica; y no requiere de gases de referencia o portador, con lo cual se reducen los costos operativos diarios. Estas ventajas reducen tanto los costos generales de implementación y mantenimiento, como el tiempo y rendimiento de los análisis de por cada muestra. Adicionalmente se pueden alcanzar niveles de precisión mucho mayores, sobre todo para el análisis de $\delta^2\text{H}$ [23, 31].

La principal desventaja de los analizadores basados en LAS en comparación con IRMS, es que tienen una menor flexibilidad analítica porque estos instrumentos generalmente están dedicados a una sola especie isotópica de gas de interés (p.ej. H_2O , CO_2 , N_2O , o CH_4). Además, actualmente no se dispone de mediciones con láser óptico para otras especies de gases de gran interés en estudios isotópicos como son O_2 , SO_2 , CO , N_2 , [30 - 33].

2.3. Fraccionamiento Isotópico en el ciclo del agua

Como se mencionó anteriormente, la diferencia en la masa atómica entre los distintos isótopos de un mismo elemento determina su comportamiento cinético ante un estímulo energético. Así ocurre entre diferentes isotopólogos de una molécula, los cuales poseen diferentes propiedades (movilidad, rotación, frecuencia vibracional, etc.). Las moléculas con isótopos más ligeros requieren de una menor energía para romper sus enlaces intermoleculares, respecto a aquellas con isótopos más pesados, por tanto, reaccionan con una velocidad mayor. Como resultado la composición isotópica del material resultante es diferente al compuesto inicial. Este fenómeno se conoce como “fraccionamiento isotópico”, y se define como el cambio en la composición isotópica de un compuesto durante el curso de una reacción o el cambio de estado físico a otro [1, 19, 22, 34], ver figura 1.

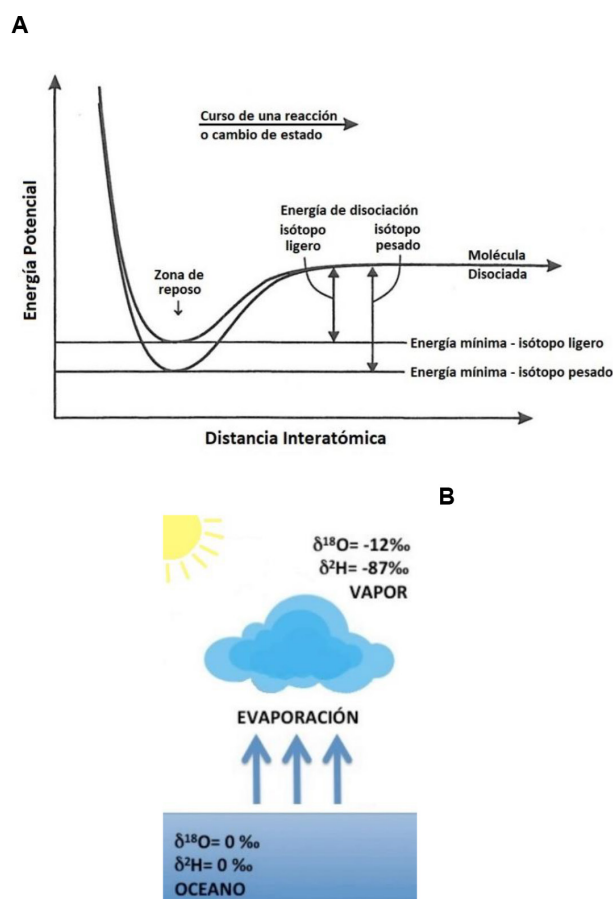


Figura 1. Fraccionamiento isotópico. **A)** Representación esquemática de la relación entre la distancia interatómica y la energía potencial durante la transición de un compuesto a otro (reacción o cambio de estado). Notar las diferencias en el requerimiento energético entre diferentes formas isotópicas de un mismo elemento. **B)** Modelo conceptual del fraccionamiento isotópico durante la evaporación del agua en el océano (cambio de estado líquido a vapor).

De acuerdo con su dependencia de la masa atómica el fraccionamiento isotópico puede ser 1) “dependiente de la masa”, que es aquel en el que diferencia cuantitativa en las velocidades o extensión del fraccionamiento isotópico depende directamente de la diferencia de masa entre los átomos o moléculas involucradas. Este tipo de fraccionamiento es el más común en la naturaleza, y específicamente en el agua durante su ciclo. O bien, 2) “independiente de la masa”, que a diferencia del anterior no depende de la masa atómica. Es menos común y ocurre principalmente en procesos de formación y reacción del ozono, en el que los isotopólogos intermedios del oxígeno ($^{17}\text{O}^{16}\text{O}$) se ven afectados por las colisiones de los gases atmosféricos con partículas cósmicas y las reacciones fotoquímicas en la atmósfera superior [34].

En el ciclo del agua, el fraccionamiento es fundamentalmente dependiente de la masa. Este fraccionamiento incluye los fraccionamientos “termodinámico” o “en equilibrio” [2, 22], “cinético” [17] y “de transporte” o “difusivo”, respectivamente [34].

2.4. Mezcla isotópico

Además del fraccionamiento isotópico existe otro proceso que determina la distribución de las abundan-

cias naturales de los isótopos, así como la composición isotópica de cualquier sustancia en la naturaleza. La “mezcla isotópico” (*isotope mixing*, en inglés), se define como la combinación de sustancias con diferente composición isotópica, para formar una mezcla con una composición isotópica resultante de la combinación de estas en proporción a sus masas, ver representación esquemática en la figura 2. Ambos procesos, fraccionamiento y mezcla, actúan conjuntamente, se oponen y se complementan [17]. Este proceso se evidencia en todas las etapas del ciclo del agua en las que tributan masas

de agua con composiciones isotópicas diferentes a una mezclan homogénea, dígame reservorios de agua dulce (cuencas, lagos, embalses, y acuíferos), masas de vapor de agua (ríos atmosféricos), el océano, entre otros.

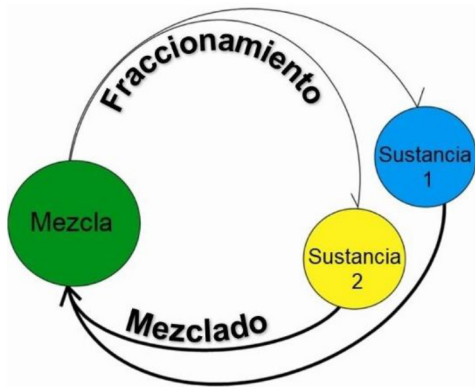


Figura 2. Modelo conceptual del movimiento de los isótopos en la naturaleza, se representan los procesos de fraccionamiento y mezclado isotópico (modificado a partir de Fry, 2006). **Nota:** los colores de los diferentes materiales representados refieren la relación entre las composiciones isotópicas teóricas correspondientes a cada una de las sustancias representadas.

2.5. Líneas Meteóricas

La relación lineal entre los isótopos del agua descrita inicialmente por Harmon Craig en 1961 [5], se conoce actualmente como Línea Meteórica Mundial o Línea Global de las Aguas Meteóricas (GMWL, en inglés), figura 3 A. Esta relación fue posteriormente recalculada por Kazimierz Rozanski y colaboradores en 1993 [7], figura 3 B. Este estudio se basó en la data propiciada por 219 estaciones de la GNIP, alguna de ellas con más de 30 años de datos en aquel entonces. Aquí se comprobó que el valor del intercepto de la GMWL está controlado por los procesos evaporativos que originan estas precipitaciones, y que los factores que determinan estos procesos son la temperatura de la superficie del mar, la humedad del aire y la velocidad del viento [7]. Otro elemento importante en su interpretación y aplicación práctica, es que la pendiente de esta recta está controlada fundamentalmente por la relación de enriquecimiento que se produce durante el fraccionamiento del deuterio y oxígeno-18, respectivamente, desde que se evapora el agua hasta su precipitación [7].

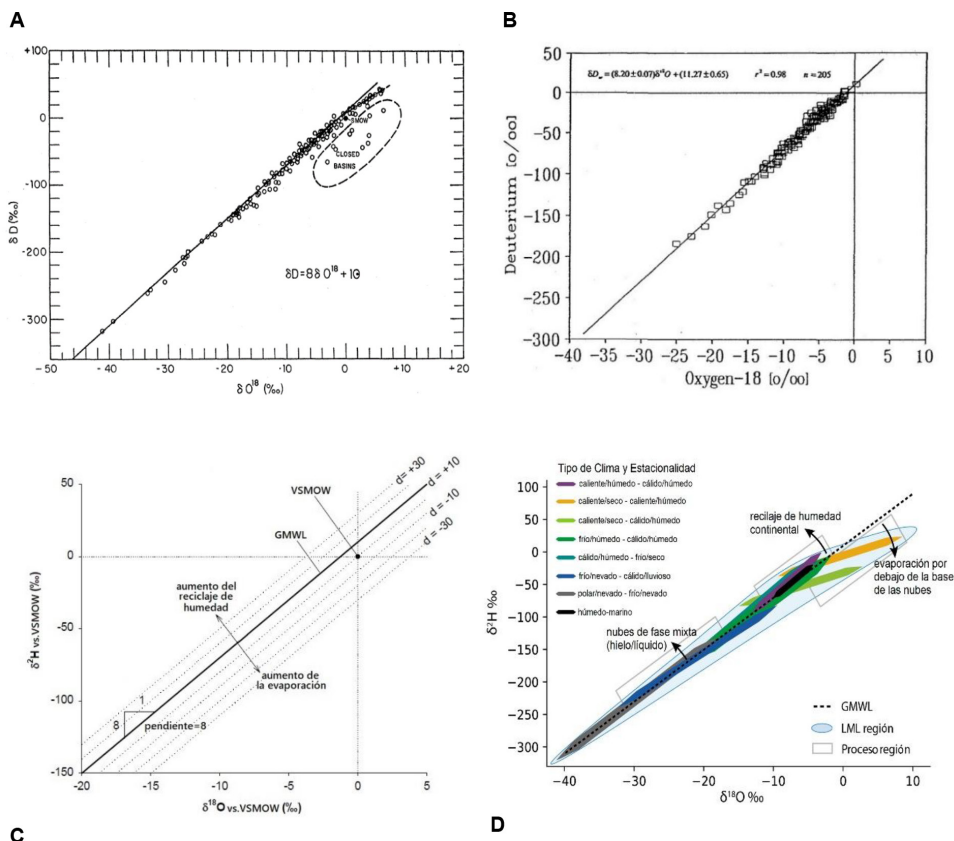


Figura 3. Relación de la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$) en las aguas meteóricas mundiales (GMWL) **A)** Relación descrita por Craig H. en 1961 ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$), (tomado de Craig H., 1961). **B)** Relación descrita por Rozanski K., *et al.* en 1993 ($\delta^2\text{H} = 8.20(\pm 0.07) * \delta^{18}\text{O} + 11.27(\pm 0.6)$), (tomado de Rozanski K., *et al.*, 1993) **C)** Proyecciones del exceso de deuterio (representado como d) respecto a la GMWL considerando los efectos de la evaporación o el reciclaje de humedad (modificado a partir de Froehlich K., *et al.*, 2002). **D)** Elipses bayesianas estimadas para una compilación de diferentes líneas meteóricas locales a escala global, regionalizadas según sus características climáticas. (tomado de Putman A.L., *et al.*, 2019).

Las desviaciones de esta relación a nivel local, o sea a escalas geográficas menores como pueden ser regiones, países, o incluso cuencas, se conocen como Líneas Meteóricas Locales (LML). Estas LML representan la covarianza de la composición isotópica ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) del agua meteórica a largo plazo, en un sitio o zona específica de estudio. Esta información es esencial como línea base de referencia para evaluar procesos hidroclimáticos e hidrológicos, utilizando isótopos estables del agua en estas regiones [35].

La apropiada descripción de la LML para la precipitación local, es un elemento esencial en la aplicación del $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ y el exceso de deuterio (d-exceso) como trazadores del ciclo del agua, pues contiene la información sobre la procedencia de la masa de vapor de agua y procesos que han tenido lugar durante su recorrido [6]. Trabajos recientes han refinado el cálculo de esta relación y sus aplicaciones en áreas más específicas, como son la hidrología e hidrogeología en la que la cantidad de lluvia es un factor determinante [36], o la hidroclimatología donde los eventos individuales e incluso intraindividuales de lluvia, tienen efectos relevantes para identificar la huella isotópica de los fenómenos que se describen [37- 39].

Los estudios realizados por Putman, et. al. en 2019, a partir de los datos globales generados por la GNIP, lograron identificar otros tres procesos que controlan que influyen en las LML a nivel global: 1) la evaporación de las gotas de lluvia por debajo de la base de las nubes durante el proceso de precipitación (en regiones áridas), 2) el reciclaje de humedad continental (en regiones tropicales húmedas), y 3) las condiciones de formación de nieve (en regiones templadas y polares) [35].

2.5.1. Exceso de deuterio (d-exceso)

El d-exceso, es una medida de las proporciones relativas de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el agua, y se grafica como la desviación de la línea de agua meteórica global, figura 3 C. Fue definido por Willi Dansgaard en 1964, como un índice de condiciones de fraccionamiento isotópico fuera de equilibrio, calculado a partir de la ecuación 2 [6].

Ecuación 2. Cálculo del exceso de deuterio
 $d\text{-exceso} (\text{‰}) = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$

Físicamente, el exceso de deuterio refleja el movimiento más lento del isotópico de $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ durante la difusión, lo que conduce a un enriquecimiento relativo de las moléculas de $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ en la fase gaseosa de la evaporación del agua. Este fenómeno conduce a diferencias mensurables en el d-exceso siempre que las dos fases no lleguen a equilibrarse isotópicamente. Durante la evaporación, estas condiciones de desequilibrio son causadas por un fuerte gradiente de humedad relativa sobre la superficie del agua, generado por el desplazamiento de las masas de vapor por acción del viento antes de que se puedan alcanzar condiciones de equilibrio entre las fases [40]. Es por ello, que los factores determinantes en la variación del d-exceso son la temperatura y la humedad relativa en la zona superficial del cuerpo

de agua sujeto a evaporación [40]. Adicionalmente las condiciones de humedad y temperatura por debajo de la base de las nubes, pueden influir en el d-exceso, a partir de la ocurrencia de evaporación parcial durante la caída de las gotas de lluvia [41].

Los procesos dentro de las nubes en general no modifican significativamente el valor de exceso de deuterio (d-exceso) del vapor [7], con lo cual se utiliza en estudios climáticos como trazador del origen de las masas de vapor y su mezcla durante el transporte atmosférico de la precipitación, incluso para calibrar modelos climáticos de circulación global [41].

2.6. Efectos que influyen en la composición isotópica del agua atmosférica

Desde los estudios de Dansgaard (1964), Yurtsever y Gat, (1981) Gonfiantini (1982), Gonfiantini (1985), Rozanski (1993) y los que le han sucedido hasta la actualidad, se han evaluado y evidenciado relaciones empíricas entre la distribución observada de la composición isotópica de las precipitaciones, con una serie de parámetros ambientales o factores físico-geográficos y del clima, llamados “efectos” (p. ej. latitud, altitud, distancia a la costa, cantidad de precipitación, temperatura del aire, estacionalidad, entre otros [6, 7, 9, 42].

Al establecer estas relaciones empíricas es muy común que se solape el efecto combinado o covariante de más de uno de ellos, ya que estos efectos no se producen de forma aislada, sino que más de uno influye al unísono y en mayor o menor medida sobre la composición isotópica de la precipitación. Con lo cual, es fundamental evaluar estas relaciones de forma integral, para lograr definir los factores determinantes en cada caso de estudio.

2.6.1. Latitud

Los patrones de circulación global transportan las masas de humedad desde zonas cálidas, ecuatoriales en los trópicos, hacia zonas más frías, meridionales en los polos. Durante el transporte, la temperatura va descendiendo, produciéndose condensación y precipitación progresiva de las masas de vapor que interactúan en diferentes condiciones atmosféricas durante este ascenso latitudinal. Consecuentemente la composición isotópica de estas masas de vapor durante su movimiento se empobrecen en los isótopos más pesados [2]. Este efecto guarda una relación directa con la disponibilidad de agua precipitable en la atmósfera al momento que se produce la condensación y precipitación. Así mismo puede estar influenciado por la ocurrencia de otros efectos como anomalías regionales de la temperatura, contribuciones sustanciales de fuentes locales de vapor de agua, efectos de cantidad significativos, gradientes altitudinales pronunciados, u otros [7], los cuales se describen seguidamente.

2.6.2. Continentalidad / Reciclaje de Humedad

El efecto “continentalidad” guarda una estrecha relación con el movimiento de las masas de agua tierra adentro, desde la fuente de humedad o vapor de agua

oceánica. Este efecto describe el empobrecimiento progresivo de la composición isotópica de las aguas atmosféricas en la medida que estas se mueven en dirección opuesta a la línea de costa, y debido a las interacciones orográficas se pierden preferentemente los isótopos más pesados durante la condensación [2, 6, 7, 43].

En regiones continentales con alta cobertura vegetal y reservas importantes de aguas superficiales expuestas, el efecto continentalidad puede ser atenuado por flujos de humedad continental hacia a la atmósfera, efecto conocido como “reciclaje de humedad” (*moisture recycling*, en inglés). Este efecto es la expresión de los cambios en la composición isotópica de las precipitaciones producidos por la influencia de dos procesos 1) la evaporación y 2) la transpiración. La evaporación desde la superficie de cuerpos de agua abiertos (p.ej. cuencas y embalses), el suelo, y las partes aéreas de las plantas, provoca la incorporación de isótopos pesados al flujo de vapor atmosférico continental. En el caso particular de la transpiración de las plantas es también una fuente de flujo de vapor atmosférico continental importante, sobre todo en zonas de alta densidad boscosa. Durante la transpiración no se produce fraccionamiento isotópico, sino que se incorpora a la atmósfera el agua previamente precipitada, retenida en el suelo y absorbida por las plantas, con su correspondiente composición isotópica [44, 45]. El resultado neto de la evapotranspiración es una disminución del gradiente isotópico entre la fuente oceánica y las regiones continentales más alejadas, atenuando el efecto de la continentalidad [45-47].

2.6.3. Altitud

La orografía tiene una estrecha relación con la ocurrencia de la precipitación, y consecuentemente también se ha establecido una relación empírica entre la elevación del terreno y en la composición isotópica de las aguas atmosféricas. Por lo general, a mayor altitud la composición isotópica de la precipitación es más empobrecida como resultado de la condensación isobárica del vapor de agua a medida que ascienden en altitud dadas las condiciones de temperatura y presión atmosférica en gradiente negativo a medida que aumenta la elevación del terreno. Adicionalmente, con el aumento de la elevación disminuye la distancia entre la base de las nubes y la superficie del terreno, con lo cual se reduce la evaporación de las gotas de lluvia en su trayectoria de precipitación [2, 43].

En la literatura reciente se ha descrito un efecto o relación empírica con la composición isotópica de las aguas meteóricas, opuesto al efecto clásico de la altitud. Este efecto se conoce como “Efecto Inverso de la Altitud” (IAE, en inglés), y fue registrado por Luo P., et. al. en 2011, en la zona alpina de las montañas Tianshan de China [48], aunque también ha sido registrado en otras regiones montañosas del planeta [49].

2.6.4. Estacionalidad

Las variaciones estacionales de las precipitaciones mensuales son comunes en latitudes medias y altas, con solo cambios menores en los trópicos. Son más

evidentes en zonas continentales interiores, con efectos poco perceptibles en islas tropicales [7, 34]. Por lo general, dichas variaciones se manifiestan con composiciones isotópicamente empobrecidas durante el invierno y enriquecida en verano, debido a: 1) cambios estacionales de la temperatura media del aire, lo cual induce cambios en el contenido de agua precipitable en las masa de aire que se mueven desde los trópicos; 2) cambios estacionales en los flujos atmosféricos de evapotranspiración continental; 3) cambios en las condiciones climáticas que modulan el reciclaje de humedad y los efectos evaporativos por debajo de la base de las nubes durante la precipitación; 4) cambios estacionales en la circulación climática y por tanto el origen de las masas de vapor [7, 9, 34].

Las fluctuaciones estacionales reportadas en estaciones de islas tropicales, se explican a partir de la correlación con la cantidad de precipitación. Esta relación empírica se conoce como el efecto “Cantidad de lluvia”, en el cual se observan precipitaciones isotópicamente empobrecidas durante el período lluvioso [7].

2.6.5. Cantidad de lluvia

La correlación entre la cantidad de lluvia y el empobrecimiento de la composición isotópica de la precipitación mensual fue observada por primera vez por Dansgaard en 1964, y la denominó efecto de “cantidad” [6]. A partir de los resultados reportados por Rozanski (1993), en estaciones marinas tropicales de la GNIP, este efecto se reafirmó como una fuerte relación inversa entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ promedio mensuales o anuales de las aguas meteóricas y la cantidad de precipitación mensual. No obstante, la correlación de la composición isotópica mensual de las lluvias y las temperaturas del aire promedios para igual período, apenas existe [7].

Los procesos físicos que subyacen a este llamado efecto de cantidad aún no se comprenden ni cuantifican bien. Un trabajo publicado por Yapp en 1982, evaluó la ocurrencia de este efecto en tormentas convectivas, en donde la velocidad vertical de las masas de aire ascendentes regula la intensidad de la precipitación. A partir de la composición isotópica de las precipitaciones observadas en este estudio, el efecto cantidad se relacionó con la duración e intensidad del proceso de precipitación de las nubes convectivas profundas, e incluso se presenta un modelo predictivo de la composición isotópica media mensual de las precipitaciones como una función de la intensidad de la lluvia [7, 50].

Dansgaard en 1964, señaló que durante los meses con escasas precipitaciones el enriquecimiento por evaporación parcial de las gotas de lluvia por debajo de la base de las nubes puede desempeñar un papel importante, lo cual no ocurre en ambientes con una alta humedad relativa [6]. Por otro lado, las lluvias intensas tienden a modificar el contenido de isótopos pesados de la humedad atmosférica debajo de la nube hacia un valor más negativo por intercambio isotópico entre las gotas de lluvia y el vapor de agua circundante [7]. Estudios recientes proponen como procesos determinantes 1) la reevaporación de las gotas de lluvia durante

su trayecto de precipitación y los intercambios difusos con el vapor circundante; y 2) el reciclaje del vapor de la capa por debajo de la base de las nubes que alimenta el sistema convectivo mediante flujos ascendentes de vapor [51, 52].

2.7. Estudios sobre la composición isotópica de las aguas meteóricas de Cuba

Por su condición insular, en Cuba, la lluvia es la principal fuente natural de recarga de los sistemas hídricos. Su estudio es fundamental para asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos y conocer las dinámicas de su ciclo hidrológico. Aún más en el contexto actual del cambio climático y sus efectos (aumento del nivel medio del mar, aumento de la temperatura, cambio en el patrón de precipitaciones, y descenso de la lámina media anual de precipitaciones); a esto se le añaden otros factores de riesgo como el crecimiento urbano desordenado, la contaminación y eutrofización de sistemas hídricos [53].

Los estudios de hidrología isotópica realizados en Cuba, hasta la fecha, se han concentrado en áreas geográficas y casos de estudios específicos, localizados en la región occidental del país. Estos estudios han sido enfocados fundamentalmente a la evaluación de procesos hidrogeológicos específicos como la salinización de aguas subterráneas o la incorporación de residuos petrolizados. Ejemplo de ello son los estudios realizados por Arellano, et. al. [12] y González Báez, et. al. [13], ambos en 1989; Molerio León en 1992 [11]; Boschetti, et. al. en 2015 [15]; y Peralta Vital, et. al. en 2015 [14], Sánchez Murillo, et. al. 2019 [39], Molerio León en 2021 [16], todos ellos ubicados en la zona centro-occidental (ver figura 4), aproximadamente un 30 % del territorio nacional de Cuba.

De forma general, la composición isotópica de las aguas meteóricas que se describe en estos estudios se caracteriza por ser local (zonas de estudio específicas), con limitada representatividad temporal (series temporales fraccionadas, de eventos puntuales, o períodos de monitoreo de 1 año), además de haber sido realizados

en condiciones de muestreo heterogéneas en cuanto a frecuencia y métodos de colecta. De los referidos anteriormente, se reportan líneas meteóricas locales en los estudios de Arellano, et. al. [12] y González Báez, et. al. [13] de 1989, Molerio León [11, 16], y Boschetti, et. al. [15]. Estos estudios muestran discrepancias entre las LML reportadas, lo cual pudiera deberse a la fragmentación de las series temporales de datos utilizadas, y/o su limitada representatividad espacial y temporal [15].

Conclusiones

La composición isotópica de las aguas meteóricas es una huella distintiva, que conserva la información relacionada con los procesos de fraccionamiento y mezcla que tienen lugar desde su formación, movimiento a través de las masas de aire, y las condiciones en las que se produce la precipitación. Las principales técnicas para la determinación analítica de esta huella son: la espectrometría de masas de relaciones isotópicas, y la espectroscopía de absorción láser. Cada una tiene ventajas y desventajas, que deben considerarse dependiendo de los fines con que se pretende hacer uso del resultado analítico, entre otras consideraciones. Existen múltiples factores físico-geográficos y climáticos que pueden relacionarse con la variabilidad de la composición isotópica de las precipitaciones, a escala espacial y temporal, los cuales deben considerarse a la hora de interpretar dicha señal, para poder hacer un uso correcto de los isótopos estables del agua como trazadores ambientales. A pesar de las múltiples experiencias y estudios realizados hasta la fecha en el país, la variabilidad espacial y temporal de la composición isotópica de las precipitaciones en Cuba tiene aún grandes vacíos de conocimiento. Esto pudiera limitar la aplicación de estas herramientas de investigación desde la hidrología isotópica aplicada, y su correspondiente contribución al manejo eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

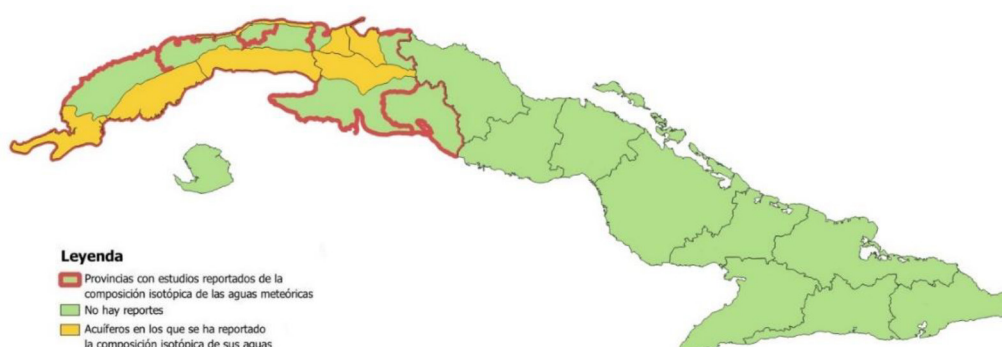


Figura 4. Localización geográfica de los estudios que reportan valores de la composición isotópica de aguas naturales para Cuba, según la literatura científica publicada en la web hasta junio 2024. (compilación de los estudios referenciados en el acápite 2.7). Notar que los reportes referidos corresponden solamente a aguas meteóricas y subterráneas.

Referencias Bibliográficas

- [1]. MOOK WG. Introduction: theory, methods, review. In: Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications. Technical documents in hydrology. International Atomic Energy Agency (IAEA) and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. IAEA, 2000. Vol. I.
- [2]. SOSA TRUJILLO E. Estudio de la composición isotópica de la precipitación y del vapor de agua en la región subtropical, Canarias [tesis de doctorado]. Universidad de La Laguna: Canarias, España, 2015.
- [3]. AGGARWAL PK, FROELICH K, GONFIANTINI R. Contributions of the International Atomic Energy Agency to the development and practice of isotope hydrology. *Hydrogeol J.* 2011; 19: 5-8. doi:10.1007/s10040-010-0648-3.
- [4]. BOWEN GJ, CAI Z, FIORELLA RP, PUTMAN AL. Isotopes in the water cycle: regional- to global-scale patterns and applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.* 2019; 47: 453-479. doi:10.1146/annurev-earth-053018-060220.
- [5]. CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science, New Series* 1961; 133, 1702-1703.
- [6]. DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus.* 1964; 16: 436-468. doi:10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.
- [7]. ROZANSKI K, ARAGUÁS ARAGUÁS L, GONFIANTINI R. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: *Climate Change in Continental Isotopic Records.* Geophysical Monograph Series. Vol. 78. American Geophysical Union, Washington DC. 1-36. doi:10.1029/GM078p0001.
- [8]. WEI H, WANG J, LI M, WEN M, LU Y. Assessing the applicability of mainstream global isoscapes for predicting $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and d-excess in precipitation across China. *Water.* 2023; 15: 3181, doi:10.3390/w15183181.
- [9]. GAT JR. Atmospheric Water balance-the isotopic perspective. *Hydrological Processes.* 2000; 14: 1357-1369.
- [10]. KENDALL C & MCDONNELL JJ. *Isotope tracers in catchment hydrology.* Elsevier: Amsterdam -New York, 1998. ISBN 978-0-444-81546-0.
- [11]. MOLERO LEÓN LF. Composición química e isotópica de las aguas de lluvia de Cuba. Viñales, Pinar del Río, Cuba, 1992.
- [12]. ARELLANO DM, FEITOO R, SEILER KP, et. al. Isotopic study of the southern plain in the Pinar Del Rio province, Cuba. In: *Estudios de hidrología isotópica en América Latina.* IAEA-TECDOC-502. Vienna: IAEA, 1989. pp. 229-243.
- [13]. GONZÁLEZ BÁEZ AE, SEILER KP, et. al. Estudio mediante isótopos ambientales del origen de las aguas subterráneas y de la intrusión salina en la parte central de la cuenca sur de Matanzas, Cuba. In: *Estudios de hidrología isotópica en América Latina.* IAEA-TECDOC- 502. Vienna: IAEA, 1989.. pp. 245-258.
- [14]. PERALTA VITAL JL, GIL CASTILLO R, DAPEÑA DAPEÑA C, et. al. hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible del recurso hídrico. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental.* 2015; XXXVI: 57-52.
- [15]. BOSCHETTI T, GONZÁLEZ HERNÁNDEZ P, HERNÁNDEZ DÍAZ R, et. al. Seawater Intrusion in the Guanahacabibes Peninsula (Pinar Del Rio Province, Western Cuba): Effects on Karst Development and Water Isotope Composition. *Environ Earth Sci.* 2015, 73: 5703-5719. doi:10.1007/s12665-014-3825-1.
- [16]. MOLERO LEÓN L. Miembros Geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba (III). Composición e interpretación isotópica de las aguas de lluvia. Gota a Gota. 2020; (22): 70-82.
- [17]. FRY B. *Stable isotope ecology.* Springer Science-Business Media: Los Angeles, EUA, 2006;
- [18]. DE GROOT PA. *Handbook of stable isotope analytical techniques.* Elsevier, 2005. Vol. 2.
- [19]. REYES CAMACHO E. Geoquímica de isótopos estables: fundamentos, técnicas y aplicaciones. In: *Geoquímica Isotópica Aplicada al Medioambiente.* Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía. 2004; 1: 1-19.
- [20]. SHARP Z. *Principles of Stable Isotope Geochemistry.* 2nd Edition. 2017, <https://doi.org/10.25844/h9q1-0p82>.
- [21]. DE GROOT PA. *Handbook of stable isotope analytical techniques.* Elsevier, 2009. Vol. II.
- [22]. GATJR. *Isotope hydrology: a study of the water cycle.* World Scientific, 2010. ISBN 978-1-84816-474-1.
- [23]. SHARP ZD. Stable isotope techniques for gas source mass spectrometry. In: *treatise on geochemistry.* 2nd Edition. Elsevier, 2014. pp. 291-307.
- [24]. WERNER RA, BRAND WA. Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry.* 2001; 15: 501-519, doi:10.1002/rcm.258.
- [25]. HORITA J. Hydrogen isotope analysis of natural waters using an H₂-water equilibration method: a special implication to brines. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section* 1988; 72(1): 89-94. doi:10.1016/0168-9622(88)90040-1.
- [26]. COPLEN TB, WILDMAN JD, CHEN, JULIE. Improvements in the gaseous hydrogen-water equilibration technique for hydrogen isotope-ratio analysis. *Anal. Chem.* 1991; 63(9): 910-912. doi:10.1021/ac00009a014.
- [27]. KELLY SD, HEATON KD, BRERETON P. Deuterium/Hydrogen Isotope Ratio Measurement of Water and Organic Samples by Continuous-Flow Isotope Ratio Mass Spectrometry Using Chromium as the Reducing Agent in an Elemental Analyser. *Rapid Commun Mass Spectrom.* 2001; 15(15): 1283-1286. doi:10.1002/rcm.303.
- [28]. AKAMATSU F, SHIMIZU H, KAMADA A. et. al. Increase in the oxygen stable isotopic composition of water in wine with low ethanol yield. *Sci Rep.* 2019; 9(11039). doi:10.1038/s41598-019-47331-0.
- [29]. WONG WW & CLARKE LL. A Hydrogen Gas-Water Equilibration Method Produces Accurate and Precise Stable Hydrogen Isotope Ratio Measurements in Nutrition Studies_{1,2}. *J Nutr.* 2012; 142(11): 2057-2062. doi:10.3945/jn.112.167957.
- [30]. LIS G, WASSENAAR LI, HENDRY MJ. High-precision laser spectroscopy d/h and 18o/16o measurements of microliter natural water samples. *Anal. Chem.* 2008; 80, 287-293. doi:10.1021/ac701716q.
- [31]. PIERCHALA A, ROZANSKI K, DULINSKI M, et. al. High-precision measurements of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{17}\text{O}$ in water with the aid of cavity ring-down laser spectroscopy. isotopes in environmental and health studies. 2019; 55(3): 290-307. doi:10.1080/10256016.2019.1609959.
- [32]. HARRIS SJ, LIISBERG J, XIA LL, et. al. N₂O isotopocule measurements using laser spectroscopy: analyzer characterization and intercomparison. *Atmospheric Measurement Techniques.* 2020; 13(5): 2797-2831.
- [33]. International Atomic Energy Agency (IAEA). *Laser spectroscopic analysis of liquid water samples for stable hydrogen and oxygen isotopes.* IAEA-TCS-35 Vienna: IAEA, 2009.
- [34]. GAT JR, MOOK WG, MEIJER HAJ. *Atmospheric Water.* In: environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications. Technical documents in hydrology. Vol. II. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) and International Atomic Energy Agency (IAEA). Paris/Vienna, 2000.
- [35]. PUTMAN AL, FIORELLA RP, BOWEN GJ CAI Z. A global perspective on local meteoric water lines: meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints. *Water Resources Research.* 2019; 55: (8): 6896-6910. doi:10.1029/2019WR025181.
- [36]. HUGHES CE, CRAWFORD J. A new precipitation weighted method for determining the meteoric water line for hydrological applications demonstrated using australian and global gnip data. *Journal of Hydrology.* 2012; 464-465: 344-351. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.07.029.
- [37]. AGGARWAL PK, ROMATSCHKE U, ARAGUAS ARAGUAS L, et. al. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. *Nature Geosci.* 2016; 9: 624-629. doi:10.1038/ngeo2739.
- [38]. BAISDEN WT, KELLER ED, VAN HALE R, et. al. Precipitation isoscapes for new zealand: enhanced temporal detail using precipitation-weighted daily climatology †. *Isotopes in Environmental and Health Studies.* 2016; 52: 343-352, doi:10.1080/10256016.2016.1153472.
- [39]. SÁNCHEZ MURILLO, R.; DURÁN QUESADA AM, ESQUIVEL HERNÁNDEZ G, et. al. Deciphering key processes controlling rainfall isotopic variability during extreme tropical cyclones. *Nat Commun.* 2019; 10: 4321. doi:10.1038/s41467-019-12062-3.
- [40]. PFAHL S, SODEMANN H. What controls deuterium excess in global precipitation? *Climate of the Past.* 2014; 10: 771-781. doi:10.5194/cp-10-771-2014.
- [41]. FROELICH K, GIBSON J, AGGARWAL P. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. 2002. Available

- in: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CSP-13-P_web.pdf/
- [42]. AGGARWAL PK, GAT JR, FROELICH KFO. *Isotopes in the water cycle. past, present and future of a developing science*; Springer Dordrecht, 2007. ISBN 978-1-4020-3010-9.
- [43]. GAT JR, MOOK WG, MEIJER HAJ. *Environmental isotopes in the hydrological cycle - principles and applications*. International Hydrological Programme (IHP-V). Technical Documents in Hydrology. 2000.
- [44]. EHLERINGER JR, DAWSON TE. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*. 1992; 15: 1073-1082. doi:10.1111/j.1365-3040.1992.tb01657.x.
- [45]. AMPUERO GRÁNDEZ A. Evaluación de los indicadores isotópicos en las precipitaciones de la Cuenca del Alto Mayo para su aplicación en la hidrología [tesis en opción del grado de Ingeniero Agrícola]. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ingeniería Agrícola. Lima, Perú, 2016.
- [46]. AMPUERO A, STRÍKIS NM, APAÉSTEGUI J, et. al. the forest effects on the isotopic composition of rainfall in the northwestern Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020; 125. e2019JD031445, doi:10.1029/2019JD031445.
- [47]. ZHANG F, HUANG T, MAN W, et. al. Contribution of recycled moisture to precipitation: a modified d-excess-based model. *Geophysical Research Letters*. 2021; 48: e2021GL095909. doi:10.1029/2021GL095909.
- [48]. LUO P, PENG P, GLEIXNER G, et. al. Empirical relationship between leaf wax n-alkane δd and altitude in the wuyi, shennongjia and tianshan mountains, china: implications for paleoaltimetry. *Earth and Planetary Science Letters*. 2011; 301: 285-296. doi:10.1016/j.epsl.2010.11.012.
- [49]. JING Z., YU W, LEWIS S, et. al. Inverse altitude effect disputes the theoretical foundation of stable isotope paleoaltimetry. *Nat Commun*. 2022; 13: 4371. doi:10.1038/s41467-022-32172-9.
- [50]. YAPP CJ. A Model for the relationships between precipitation d/h ratios and precipitation intensity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1982; 87: 9614-9620. doi:10.1029/JC087iC12p09614.
- [51]. BONY S, RISI C, VIMEUX F. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}O$ and δd) of precipitation and water vapor in the tropics: 1. radiative-convective equilibrium and tropical ocean-global atmosphere-coupled ocean-atmosphere response experiment (TOGA-COARE) simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008; 113. doi:10.1029/2008JD009942.
- [52]. RISI C, BONY S, VIMEUX F. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}O$ and δd) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. physical interpretation of the amount effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2008; 113. doi:10.1029/2008JD009943.
- [53]. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). *Política Nacional del Agua en Cuba*. 2012.

Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

Credit / Conceptualización: Alejandro García Moya, Oscar Díaz Rizo. **Software:** Alejandro García Moya, Minerva Sánchez Llull. **Análisis formal:** Alejandro García Moya, Minerva Sánchez Llull. **Supervisión:** Carlos Manuel Alonso Hernández, Oscar Díaz Rizo. **Visualización:** Alejandro García Moya, Minerva Sánchez Llull. **Metodología:** Alejandro García Moya, Minerva Sánchez Llull. **Administración de proyecto:** Alejandro García Moya. **Escritura – borrador original:** Alejandro García Moya. **Redacción – revisión y edición:** Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Oscar Díaz Rizo, Minerva Sánchez Llull.