



Universidad de Concepción

USO DE HERRAMIENTAS ISOTÓPICAS PARA ESTUDIOS DE PROBLEMAS HIDROLÓGICO-AMBIENTALES

Pía Urrea Olmedo / Ricardo Oyarzún Lucero
José Luis Arumí / Leopoldo Gutiérrez

Serie Comunicacional CRHIAM

Escasez Hídrica
Huella del Agua Sequía
Servicios Ecosistémicos
Calidad del agua
Agricultura Tecnología
Cambio Climático
Ecosistemas Gestión Sustentable

Agua Minería
Recursos Hídricos
Innovación Investigación
Reutilización de aguas
Aguas Subterráneas

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Uso de herramientas isotópicas para estudios de problemas hidrológico-ambientales.

Pía Urrea Olmedo, Ricardo Oyarzún Lucero,

José Luis Arumí y Leopoldo Gutiérrez.

Marzo 2022

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

USO DE HERRAMIENTAS ISOTÓPICAS PARA ESTUDIOS DE PROBLEMAS HIDROLÓGICO-AMBIENTALES

Pía Urrea Olmedo / Ricardo Oyarzún Lucero
José Luis Arumí / Leopoldo Gutiérrez

USO DE HERRAMIENTAS ISOTÓPICAS PARA ESTUDIOS DE PROBLEMAS HIDROLÓGICO-AMBIENTALES

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Pía Urrea Olmedo
Ingeniera Civil Ambiental
Universidad de La Serena.



Ricardo Oyarzún Lucero
Ingeniero Agrónomo.
PhD en Engineering Science
Washington State University, USA.
Profesor Titular Departamento de Ingeniería de Minas,
Facultad de Ingeniería, Universidad de la Serena.
Investigador Centro de Estudios Avanzados
en Zonas Áridas (CEAZA).
Investigador Asociado CRHIAM.



José Luis Arumí
Ingeniero Civil.
Doctor of Philosophy. Major on Engineering.
Profesor Titular Departamento de Recursos Hídricos,
Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.



Leopoldo Gutiérrez
Ingeniero Civil Metalúrgico.
Doctor of Philosophy in Mineral Processing,
University of British Columbia, Canadá.
Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción Investigador Principal CRHIAM.

RESUMEN

En Chile, dos de las actividades más importantes y con mayores requerimientos hídricos, tanto superficiales como subterráneas, corresponden a la agricultura y minería. Estas juegan un papel fundamental en el desarrollo económico y social de un país. Sin embargo, al mismo tiempo son las principales responsables de los problemas hídricos asociados al (sobre) uso y contaminación de aguas. Un enfoque que se puede considerar para el análisis de diversos problemas hidrológicos – ambientales asociados a actividades como la agricultura y, especialmente la minería, corresponde al uso de herramientas isotópicas. La presente Serie Comunicacional tiene como objetivo mostrar, en forma simplificada, las potencialidades y los aspectos logísticos del uso de isótopos como herramientas para la caracterización de problemas hidrológicos – ambientales, con el fin de disponer de un documento técnico que constituya un punto de partida, para no especialistas, sobre el uso de isótopos en este tipo de problemáticas.



INTRODUCCIÓN

Hoy en día, uno de los principales retos a los que la humanidad se debe enfrentar se relaciona con la seguridad hídrica. El rápido crecimiento de la población, junto con el gran aumento de la demanda para el desarrollo agrícola y minero, han acentuado las exigencias en términos de cantidad y calidad de aguas superficiales y subterráneas (Mook, 2002).

En Chile, dos actividades económicas relevantes, y con importante uso de (o efecto sobre) los recursos hídricos son la agricultura y la minería. Junto con las demandas propias asociadas al uso de agua, las actividades mencionadas pueden generar también problemas significativos de contaminación de los recursos hídricos (Fuentes, 2017).

En este contexto, el disponer de herramientas de análisis y estrategias de gestión de recursos hídricos para asegurar su conservación, calidad y uso racional, adquiere especial relevancia. Unas de las técnicas que permite el estudio de distintos problemas hidrológicos-ambientales asociados a actividades económicas, como la agricultura y especialmente la minería, corresponde a las herramientas isotópicas. En efecto, su uso ha contribuido al estudio y la comprensión de diversos componentes del ciclo del agua, así como también para indagar respecto del origen y fuente de recarga, rastreo del movimiento del agua superficial y/o subterránea, y determinar fuentes de contaminación, entre otros aspectos (OIEA, 2019).

El presente documento se estructura en dos secciones principales. La primera considera una breve presentación general de contexto acerca de la situación de los recursos hídricos y de la actividad minera en Chile. La segunda explica en forma simplificada qué son los isótopos, y presenta una serie de ejemplos de su uso en estudios hidrológico-ambientales, finalizando con fichas resumen con información sistematizada de 13 isótopos de interés. Además, se describen aspectos logísticos relevantes de su uso, así como referencias adicionales que pueden ser consultadas por el lector interesado en profundizar su conocimiento acerca de ellos. Así entonces, se espera que la presente contribución pueda servir como punto de partida para todos aquellos profesionales no especialistas en estos temas, o personas en general, que tengan interés en conocer más acerca de las herramientas isotópicas y sus diferentes aplicaciones en temáticas de recursos hídricos, minería y medio ambiente.

SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LA ACTIVIDAD MINERA EN CHILE

Recursos hídricos

En el contexto mundial, Chile es considerado como uno de los países "privilegiados" en el ámbito de los recursos hídricos. La escorrentía media total es del orden de los 53.000 m³/persona-año, situándose por sobre la media mundial de 6.600 m³/persona-año, y muy superior al valor de 2.000 m³/persona-año considerado internacionalmente como umbral para el desarrollo sostenible (Banco Mundial, 2011). Sin embargo, cuando se analiza este valor regionalmente, surge un fuerte desequilibrio geográfico. Desde la Región Metropolitana hacia el norte, prevalecen condiciones de escasez, donde la escorrentía per cápita promedio está por debajo de los 500 m³/persona-año. En cambio, desde la Región de O'Higgins hacia el sur ésta supera los 7.000 m³/persona-año, llegando a un valor aproximado de 3.000.000 m³/persona-año en la Región de Aysén (DGA, 2015) (Figura 1).

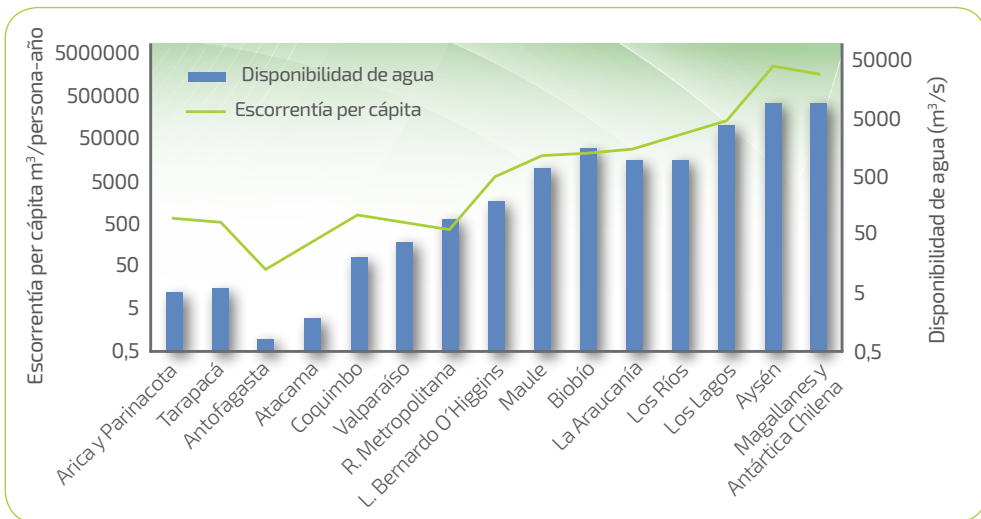


Figura 1.

Disponibilidad de agua v/s escorrentía per cápita de las distintas regiones de Chile.

Fuente: Datos extraídos de Santibáñez, (2016).

Junto con la asimetría descrita, resulta importante señalar que actualmente Chile aparece dentro de los 30 países con mayor riesgo hídrico en el mundo al año 2040, situándose como uno de los países con mayor probabilidad de enfrentar una disminución en la disponibilidad de agua (WRI, 2015). Finalmente, junto con la disponibilidad de los recursos hídricos, resulta siempre importante considerar aspectos referidos a la composición físico-química y biológica de éstos, que también se pueden ver seriamente impactados por el desarrollo de diversas actividades.

Actividad Minera

La minería en Chile se ha basado históricamente en la producción de minerales metálicos, especialmente cobre, molibdeno, hierro, manganeso, plomo, zinc, oro y plata. Además, ciertos minerales no metálicos como yodo, nitratos, y más recientemente litio, han adquirido interés. De estos productos, los de mayor importancia son el cobre y el molibdeno, siendo este último un subproducto de la obtención del primero. De hecho, a nivel mundial, Chile es el primer productor de cobre y yodo, el segundo productor de molibdeno y litio, el tercero de boro y el cuarto de plata (SONAMI, 2017). Por otra parte, se puede estimar que la demanda mundial de cobre hasta el año 2050 seguirá en aumento, debido al uso de transportes eléctricos (COCHILCO, 2019a). Sin embargo, la alta demanda esperada de cobre requiere de movimientos importantes de material y, en consecuencia, para su procesamiento se necesitará mayor disponibilidad de recursos hídricos, principalmente en los procesos de concentración-flotación e hidrometalurgia.

Se debe señalar que la minería nacional no sólo se ha enfocado en el desarrollo de la minería metálica, sino que también en la no metálica, con usos industriales y agrícolas. Estos minerales corresponden al salitre, yodo, yeso, carbonato de litio, potasio, carbonato de calcio, cal, asbesto, arcillas comunes o sulfato de sodio.

Con respecto a la distribución espacial de la actividad minera en el país, actualmente se concentra en la zona norte (entre Arica y Atacama), con importantes yacimientos de cobre como Chuquicamata, Escondida, Collahuasi, Rodomiro Tomic, Quebrada Blanca, entre otros. Es precisamente en esta zona donde existe una alta competencia por los escasos recursos hídricos disponibles, además de numerosos problemas ambientales asociados a la mala calidad del aire por material particulado (MP10) y deterioro de la calidad de las aguas superficiales del territorio (Universidad de Chile, 2019).

Ahora bien, en relación con el futuro de la actividad minera en el país, se destaca actualmente el gran potencial identificado en la zona centro (Regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins), donde "las reservas de cobre alcanzarían un total de 338 Mt" (Toro *et al.*, 2012). En efecto, la zona central del país entre las regiones de Valparaíso y Metropolitana, se identifica como un lugar de gran potencial minero representando un 48% de los recursos, a través de las operaciones de Codelco (División Andina) y Anglo American (El Soldado – Los Bronces). Si bien esta zona, a diferencia de lo que ocurre en el Norte, dispone de una mayor cantidad de recursos hídricos, presenta diversas características complejas en términos del territorio, como la mayor concentración de población (50,8% del total nacional), diversidad de sectores productivos, áreas de alto valor ambiental y uso intensivo del suelo, promoviendo una fuerte competencia por el uso de los recursos naturales en diversos ámbitos (Arenas *et al.*, 2017). Estos factores deben ser tomados en cuenta a la hora de pensar en un futuro desarrollo minero en la zona, y específicamente en lo que se refiere a la necesidad de recursos hídricos y el posible impacto sobre ellos.

Respecto al consumo hídrico, la gran minería del cobre es el responsable del mayor porcentaje del consumo de agua del sector, con un valor anual en torno a 12 m³/s, mientras que la minería de otros metales y la no metálica alcanza un consumo aproximado de 2 m³/s. En el caso de las fundiciones y refinerías chilenas, estas representan una demanda hídrica del orden de 0,5 m³/s (SONAMI, 2018). Ahora bien, en relación a la minería del cobre, la demanda hídrica depende mucho de los procesos que conlleva la producción de cátodos de cobre o concentrado. Se debe indicar que el cobre está presente en los depósitos mineros de dos formas, como sulfuros de cobre y como óxidos de cobre. El tratamiento tradicional que se les da a los sulfuros de cobre es el de flotación – concentración, y para el caso de los minerales oxidados se utiliza el proceso de lixiviación e hidrometalurgia (COCHILCO, 2017). El consumo unitario de agua (de origen continental) por tonelada de mineral procesado/tratado en el proceso de flotación – concentración es de 0,36 m³/t, mientras que en el caso del proceso hidrometalúrgico es de 0,11 m³/t (COCHILCO, 2019b).

En cuanto a los problemas hidrológicos – ambientales que posee la minería, se debe tener en cuenta que los episodios de contaminación, tales como las filtraciones de aguas residuales a cursos de aguas, generación de drenaje ácido, infiltración de napas subterráneas y presencia de metales pesados en aguas superficiales y/o subterráneas, generan un conflicto entre las empresas mineras, las comunidades locales, y las autoridades ambientales (Fig. 2).



Figura 2.

Ejemplo de proceso de generación de drenaje ácido en una faena minera en etapa de cierre.

Fuente: Fotografía proporcionada por Ricardo Oyarzún.

En este contexto, el país enfrentará en los próximos años una serie de desafíos importantes en términos de recursos hídricos, tanto en calidad como cantidad, especialmente si se produce un aumento de producción asociado a la explotación de los yacimientos de la zona central. En ese sentido, es fundamental disponer de mayor y mejor información asociada a la gestión de los recursos hídricos. En dicho contexto, las herramientas isotópicas se presentan como una forma de caracterizar aspectos como fuentes de agua, procesos de contaminación, origen de las recargas, etc., por lo que adquieren un interés particular en el marco de la gestión ambiental de proyectos asociados a la minería y a los recursos hídricos.

ISÓTOPOS Y SUS APLICACIONES EN ESTUDIOS HIDROLÓGICO-AMBIENTALES

Resulta básico indicar, en primer lugar, que los isótopos son átomos de un mismo elemento que presentan una diferente cantidad de neutrones en su núcleo. Por ello, siendo el mismo elemento (que se determina por el número atómico o la cantidad de protones en el núcleo), los isótopos (de un elemento dado) presentan diferente masa. En términos de notación, los isótopos se representan con un número que antecede (como superíndice) al símbolo del elemento, número que representa la masa (suma de neutrones y protones), seguido por el símbolo del elemento propiamente tal. Así, por ejemplo, ^{32}S y ^{34}S son dos isótopos de azufre (S), presentando el segundo dos neutrones más que el primero (lo que determina que las masas sean respectivamente 32 y 34).

Finalmente, más que la presencia o abundancia de un isótopo en particular, resulta útil conocer la proporción entre los isótopos que existen en una muestra con respecto a un patrón o estándar, lo que se conoce como notación delta o δ . Así por ejemplo $\delta^{18}\text{O}$ corresponde a la relación entre ^{18}O y ^{16}O que existe en una muestra de agua, comparada con el patrón (en este caso conocido como VSMOW). Sólo por un tema de comodidad, los valores se suelen expresar en partes por mil (‰).

Dada la amplia distribución de los isótopos ambientales en la naturaleza, estos se han aplicado en hidrología e hidrogeología a nivel mundial durante más de 50 años, formando parte de una herramienta útil para la investigación y solución de problemas relacionados con el medio ambiente y en especial con la minería (Wolkendorfer *et al.*, 2020). A continuación, se describen diferentes isótopos presentes en la naturaleza:

Hidrógeno y Oxígeno:

Son los constituyentes de la molécula del agua, y sus isótopos se ven afectados por procesos meteorológicos que impregnan una huella característica de su origen. Esta huella es fundamental para identificar las diferentes fuentes de recarga de agua subterránea (Clark & Fritz, 1997). En general, son considerados como trazadores ideales puesto que, como se indicó, forman parte de la molécula del agua, y no reaccionan como otros elementos disueltos en el agua (Dickinson *et al.*, 2006).

El hidrógeno presenta dos isótopos estables, el protio (^1H) y el deuterio (^2H), y uno radiactivo, el tritio (^3H), mientras que, para el oxígeno, se presentan tres isótopos estables, aunque solo dos tienen importancia práctica (^{16}O , ^{18}O).

Uso de herramientas isotópicas para estudios de problemas hidrológico-ambientales

(Valenzuela *et al.*, 2013). A nivel mundial, existe una relación entre ^2H y ^{18}O en las aguas de la precipitación, relación conocida como línea meteórica global (GMWL): $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰}$. A nivel local, resulta de interés conocer la señal isotópica de la precipitación en un sitio particular, lo que se puede realizar en forma sencilla instalando colectores de lluvia en el área de interés que permitan obtener muestras de precipitación para su posterior análisis (Fig. 3).



Figura 3.

Ejemplo de colector de lluvia.

Fuente: Fotografía proporcionada por Ricardo Oyarzún.

Respecto a aplicaciones de estos isótopos, Wolkendorfer *et al.* (2020) mencionan el caso de una mina brasileña de uranio en donde se utilizaron para caracterizar la hidrogeología del área y así establecer una correlación entre el manejo de desechos y la contaminación de las aguas subterráneas. Por otro lado, en un estudio descrito por Valenzuela *et al.*, (2013), se analizó la composición isotópica del agua subterránea en un acuífero del Valle de San Luis Río Colorado (México), junto con la concentración de cloruros presentes en el agua para determinar su origen y establecer las causas del aumento de la salinidad en el agua de riego. Dentro de la investigación, los resultados de la composición isotópica en el acuífero mostraron que existía una mezcla entre aguas antiguas del Río Colorado y aguas recientes formadas después de la construcción de un sistema de presas y que estaban sometidas a procesos de evaporación.

Por otra parte, el tritio (^3H) es un isótopo radiactivo del hidrógeno con una vida media de 12,3 años (Planas, 2015). Se produce en la atmósfera cuando los rayos cósmicos chocan con las moléculas de aire. Además de su origen natural, las pruebas de armas nucleares asociadas a la Guerra Fría introdujeron importantes cantidades de ^3H a la atmósfera. El tritio ha sido usado como una herramienta de datación directa de aguas subterráneas. Por ejemplo, Morgenstern *et al.*, (2010) describen su uso para datar el agua proveniente del río que drena la cuenca de Toenepi (Nueva Zelanda). Los resultados permitieron identificar tiempos de tránsito medios de 2 a 5 años durante el invierno. Igualmente, en un estudio de Moran *et al.*, (2019), se presenta el uso de ^3H para revelar la influencia que posee el agua fósil en los sistemas de agua subterránea en zonas áridas, específicamente, en la cuenca del Salar de Atacama (Chile).

Estroncio:

El estroncio posee cuatro isótopos naturales estables: ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr y ^{88}Sr , estando presente en cantidades del orden del 0,56%, 9,86%, 7,02%, 82,56%, respectivamente. Las proporciones de Sr en las aguas están controladas en gran parte por las interacciones roca – agua. El origen de Sr en aguas subterráneas y superficiales está dado principalmente por la disolución de minerales e intervención antropogénica (emisiones de material particulado, incendios forestales, actividad volcánica, fertilizantes, etc.). La relación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, se puede emplear, por ejemplo, para la obtención de información sobre el origen del agua, determinar relaciones de mezcla dentro de los cuerpos de agua, identificación de fuentes de nutrientes y/o contaminación, entre otros usos.

Por ejemplo, Soler *et al.*, (2004) utilizan la relación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para trazar los orígenes de la contaminación del río Cardener, cuenca del río Llobregat (España). El área de estudio era una zona con importante actividad minera, responsable de la salinización de las aguas superficiales y subterráneas debido a la producción de potasio. En otro ejemplo, Petelet-Giraud *et al.*, (2009) utilizaron isótopos de Sr con la finalidad de identificar las distintas fuentes de contaminación que influían en las aguas superficiales y subterráneas del río Dommel, en Holanda. Se determinó que la calidad de las aguas de la cuenca estaba fuertemente influenciada por la descarga de contaminantes asociados a industrias y aguas residuales urbanas y agrícolas.

Carbono:

Sus compuestos se encuentran distribuidos ampliamente en la naturaleza, constituyendo aproximadamente un 0,032% de la corteza terrestre. Está presente en la atmósfera en un 0,03% por volumen como CO₂, en varios minerales (caliza, dolomita, yeso y mármol), en todas las plantas y animales, y en los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y gas natural. Posee dos isótopos estables (¹²C – ¹³C) y un isótopo radioactivo (¹⁴C), los cuales están presentes de forma natural en cantidades del orden del 98,9%, 1,1% para los isótopos estables respectivamente, y valores menores a 10⁻¹⁰% para el ¹⁴C.

La química y los isótopos de las especies de carbono proporcionan información relevante sobre la evolución de los carbonatos y el ciclo del carbono en las aguas subterráneas. Esto permite establecer aspectos asociados a la calidad del agua subterránea, el destino de los contaminantes y estimaciones de las edades de las aguas. Por ejemplo, en Brunet *et al.*, (2011) se describe el uso de la señal isotópica del carbono inorgánico disuelto ($\delta^{13}\text{C DIC}$) en aguas superficiales para evidenciar el impacto que provocaban los fertilizantes nitrogenados en una pequeña cuenca agrícola (Mountoussé, Francia). Por otro lado, en un estudio de Herrera *et al.*, (2018), se utilizó la relación entre ¹³C y ¹⁴C para estimar el tiempo promedio de residencia de las aguas subterráneas en la Cordillera de la Costa, específicamente en la zona del desierto de Atacama del norte de Chile.

Plomo:

Presenta cuatro isótopos, ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb y ²⁰⁸Pb, con abundancias de 1,4%, 24,1%, 22,1% y 52,3% (Universidad Complutense, s.f). En la naturaleza este elemento se encuentra en la corteza terrestre como sulfuro de plomo, mineral conocido como galena. Es también normal encontrar el plomo en forma de fosfatos (piromorfita), carbonatos (cerusita), sulfatos (anglesita) y numerosos óxidos (Raffino, 2020). Por otra parte, el plomo es un potente contaminante, representando un riesgo grave para la salud del ser humano, principalmente cuando este es inhalado como vapor o bien, como polvo en suspensión (material particulado).

En Félix *et al.*, (2015) se muestra el uso de isótopos de plomo para determinar el origen de contaminación por material particulado (MP) en dos sitios en Arizona: Hayden y Winkelman. Los resultados obtenidos permitieron identificar que, en la zona de Hayden, existían dos fuentes de plomo diferentes; una asociada con el MP fino originado por la condensación de vapores de alta temperatura emitidos desde una zona de fundición, y otra relacionada con el MP grueso a causa de una fuente común de la región, posiblemente

plomo heredado por el uso de combustibles. Igualmente, un estudio de Cuvier *et al.*, (2016), evaluó la contaminación aguas abajo de una antigua mina de uranio, en Francia. Los suelos no contaminados presentaban razones de $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de 2,06 y de $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ de 1,20. Sin embargo, en los suelos contaminados las proporciones alcanzaban 1,62 y 1,52 respectivamente.

Nitrógeno:

Presenta dos isótopos estables, ^{14}N y ^{15}N , los cuales poseen una abundancia del orden de 99,6% y 0,4%, respectivamente. Igualmente se conocen isótopos radioactivos (^{12}N , ^{13}N , ^{16}N y ^{17}N) que son originados a partir de varias reacciones nucleares (SNE, s.f).

La contaminación por nitratos en las aguas superficiales y subterráneas se ha convertido en un problema ambiental de interés mundial. Una forma de estudiar y enfrentar este problema es a través de la identificación de fuentes de contaminación y el destino de los contaminantes mediante el uso de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$. En un estudio de Zhang *et al.*, (2019) se describe la utilidad de considerar en forma simultánea $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$ (también parte de la molécula de nitrato) con el fin de reducir la incertidumbre en lo referido a la identificación de fuentes de contaminación por nitratos en cuerpos de agua.

Azufre:

Es un no metal abundante, de color amarillo característico. Este elemento se encuentra principalmente en forma nativa en regiones volcánicas y en sus formas reducidas, formando sulfuros y sulfosales, o bien, en sus formas oxidadas como sulfatos. El azufre posee cuatro isótopos estables, ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S y ^{36}S , con abundancias del orden de 95,02%, 0,75%, 4,21% y 0,02%, respectivamente. Dado lo anterior, en general se utiliza la relación isotópica de $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$.

La composición isotópica del azufre y oxígeno del sulfato en aguas subterráneas es especialmente útil en estudios del origen de la salinidad, permitiendo poner de manifiesto la influencia de las actividades agrícolas e industriales en la contaminación de aguas subterráneas y superficiales. Asimismo, el $\delta^{18}\text{O}$ del sulfato es una importante herramienta para trazar el ciclo del azufre, ayudando a comprender las condiciones redox de las aguas subterráneas (Otero *et al.*, 2001). Por ejemplo, Fuentes (2017) utilizó ^{34}S , ^2H y ^{18}O para caracterizar el origen de los iones de sulfatos disueltos presentes en las aguas subterráneas y superficiales en la cuenca del río Cuncumén (centro-norte de Chile) y, además, determinar los procesos hidrogeoquímicos que afectaban a la misma área. En otro estudio desarrollado por Hsu y Maynard (1999), citado por Wolkersdorfer *et al.*, (2020), se describe el uso de isótopos

de azufre para monitorear la eficacia de humedales artificiales en el control del drenaje ácido de minas en faenas subterráneas de carbón abandonadas en la cuenca del río Muskingum, Ohio, EE. UU.

Cobre:

En Chile, este metal se obtiene en su mayoría de minerales sulfurados como calcopirita, enargita, bornita, tennantita, tetraedrita y calcosina. Sin embargo, en menor medida, también se puede encontrar en minerales oxidados como atacamita, crisocola, malaquita y brocantita. Presenta dos isótopos naturales estables: ^{63}Cu (69,1%) y ^{65}Cu (30,9%).

El Cu, en cierta medida, se relaciona con los procesos de drenaje ácido. En el caso de Chile, la mayoría de los sulfuros son ricos en cobre, y, por tanto, al generarse drenaje ácido, el Cu es uno de los elementos que queda en solución en las aguas. En este contexto, existen diversos estudios que utilizan como herramientas los isótopos de cobre para revelar las fuentes y vías de transporte de contaminantes en un contexto de DAM. Por ejemplo, Viers *et al.*, (2018) estudiaron los isótopos de Cu para rastrear fuentes y procesos de metales en un escenario de fuerte contaminación por DAM en el río Cobica y río Chorrito, ubicado en la Faja Ibérica de España. Los resultados mostraron que la composición isotópica de Cu se volvía progresivamente más pesada, aumentando el valor de $\delta^{65}\text{Cu}$ de 0,15 a 0,36‰ y de 0,67 a 1,75‰ en los ríos Cobica y Chorrito, respectivamente. En otro estudio de Kusonwiriawong *et al.*, (2017) se utilizaron isótopos de Cu para caracterizar el comportamiento del cobre en un régimen hidrológico cambiante. Se pudo establecer que los valores de $\delta^{65}\text{Cu}$ tendían a disminuir desde el horizonte más superficial al más profundo, debido al uso de fertilizantes y lodos en suelos agrícolas. Además, un bajo valor de señal isotópica cercana a la zona de drenaje indicaba la presencia de meteorización oxidativa y lixiviación de isótopos pesados de Cu anteriormente almacenados.

Zinc:

El zinc posee cinco isótopos estables naturales, ^{64}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn y ^{70}Zn , y sus abundancias en la naturaleza son del orden de 48,89%, 27,81%, 4,11%, 18,56%, y 0,62%, respectivamente, siendo las relaciones $^{68}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ y $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ las más utilizadas en los estudios isotópicos.

Este elemento está presente en forma natural en el aire, agua y suelo, pero las concentraciones están aumentando por causas antrópicas. La mayoría del zinc es adicionado durante actividades industriales, como la minería, el uso de combustibles fósiles como el carbón y la industria del acero. Dado

lo anterior, existen diversos estudios que utilizan isótopos de zinc como herramienta para identificar y cuantificar las contribuciones de las distintas fuentes de contaminación, permitiendo una mejor comprensión del ciclo biogeoquímico del zinc en la naturaleza.

Por ejemplo, Schleicher *et al.*, (2020) analizaron las asociaciones que presentan las composiciones isotópicas observadas en los aerosoles urbanos (emisiones de combustibles fósiles, procesos industriales, calefacción, fuentes móviles debido al uso de vehículos, y quema de biomasa) v/s los reservorios de origen natural (suelo, partículas de polvo mineral, polvo y gas volcánico) y antropogénicos. En general, se identificó que la señal isotópica de Zn resultó ser un excelente trazador de fuentes de combustión, pudiendo desempeñar una importante contribución a las evaluaciones de calidad de aire. Dentro de la misma línea investigativa, Sivry *et al.*, (2008) utilizaron isótopos de Zn para rastrear fuentes antropogénicas en la cuenca del Lot (Francia), donde un pequeño río, Riou Mort, drenaba una explotación industrial de minerales de zinc.

Cadmio:

Este elemento posee siete isótopos estables: ^{106}Cd (1,22%), ^{108}Cd (0,88%), ^{110}Cd (12,39%), ^{111}Cd (12,75%), ^{112}Cd (24,07%), ^{114}Cd (28,86%) y ^{116}Cd (7,58%) (Lenntech, 2018a), los que pueden ser utilizados para caracterizar la distribución cuantitativa de diferentes fuentes de contaminación por Cd (Wiederhold, 2015). Por ejemplo, en Yang *et al.* (2019) se determinó la composición isotópica y la concentración de Cd en ríos y sedimentos afectados por DAM en la localidad de Guangdong en el sur de China. En otro estudio de Zhong *et al.* (2020) se presenta una sistematización del uso de isótopos de Cd como herramienta útil para trazar orígenes de contaminación de fuentes naturales y antrópicas. Por ejemplo, para el caso del agua, cercano a zonas de relaves, se encontraban señales fuertemente enriquecidas en isótopos pesados, exhibiendo valores de 0,64 a 1,03‰ y con valores altos en concentraciones de Cd (181,1 – 304,2 µg/g), indicando una gran influencia de la meteorización de minerales que contienen Cd en los relaves.

Molibdeno:

Es empleado en aleaciones de alta resistencia, usadas en construcción, piezas de aviones y automóviles. El molibdeno se obtiene en la industria minera a partir de sus minerales, como la molibdenita (MoS_2), y como subproducto de la minería del cobre, siendo este último, el principal modo de explotación comercial (Lenntech, 2018b). Presenta siete isótopos estables (^{92}Mo , ^{94}Mo , ^{95}Mo , ^{96}Mo , ^{97}Mo , ^{98}Mo y ^{100}Mo), siendo el ^{98}Mo el más abundante, represen-

tando un 24,4% del total de molibdeno. Las relaciones isotópicas frecuentemente utilizadas, de acuerdo con la literatura, corresponden a $\delta^{97/95}\text{Mo}$ y $\delta^{98/95}\text{Mo}$.

En un estudio de Skierszkan *et al.* (2017) se describe el uso de los isótopos estables para evaluar los controles de movilidad del molibdeno en dos instalaciones de almacenamiento de desecho mineral, diferenciadas por drenajes ácidos y alcalinos, proveniente de la mina Thompson Creek, en Idaho, EE. UU. De igual manera, Skierszkan *et al.* (2016) utilizaron isótopos estables de Mo y Zn para caracterizar procesos de atenuación de metales en un drenaje de mina, en el yacimiento Antamina, Perú.

Hierro:

Se encuentra formando parte de numerosos minerales, tales como, magnetita (FeO_3), limonita (FeO), pirita (FeS_2), siderita (FeCO_3), entre otros. Uno de los aspectos relevantes del hierro es la relación que posee con los minerales sulfurados. La oxidación de estos minerales, como la pirita (FeS_2), es un agente principal de la generación de DAM, así como drenaje ácido de rocas (DAR), una fuente importante de contaminación de aguas superficiales y subterráneas a nivel mundial.

El hierro posee cuatro isótopos estables naturales, ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{57}Fe y ^{58}Fe , y sus abundancias en la naturaleza son del orden de 5,8%, 91,7%, 2,2% y 0,3%, respectivamente, siendo la relación $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ la más utilizada en los estudios isotópicos. Por ejemplo, Roebbert *et al.* (2018) utilizaron isótopos de hierro y cobre para comprender los procesos de movilización de los metales en los relaves mineros de la mina de la Bahía de Chañaral, Chile. Por otro lado, Pérez-Rodríguez *et al.* (2013) también utilizaron isótopos de cobre y hierro para entender la composición mineralógica, envejecimiento y otras variables de los depósitos de relaves mineros de las minas Laver y Kristineberg, al norte de Suecia.

USOS DE ISÓTOPOS Y ASPECTOS LOGÍSTICOS A CONSIDERAR

A continuación, se presenta en formato de fichas, una sistematización con información de los diferentes isótopos presentados. Junto con los ámbitos de aplicación y mayores referencias bibliográficas, se incluyen también aspectos logísticos (laboratorios de análisis, costos, requerimiento de muestras, etc.) asociados al uso de los diferentes isótopos (información al 2021).

Deuterio y Oxígeno-18

Nombre Isótopo:
Deuterio y Oxígeno-18 (^{18}O y ^2H)

Ámbito de aplicación:
Identificar fuentes de recarga de agua subterránea –
Determinar orígenes de aguas superficiales.

Información General

La molécula de agua está formada por dos elementos: hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno se presenta en la naturaleza bajo la forma de dos isótopos estables (^1H - ^2H) y uno inestable (^3H), mientras que el oxígeno, posee tres isótopos estables (^{16}O , ^{17}O , ^{18}O).

A nivel mundial existe una relación entre ^{18}O y ^2H en las precipitaciones, en lo que se conoce como "línea meteórica mundial", descrita como $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ SMOW. Esta relación, no obstante, puede cambiar localmente, por lo que, de ser posible, siempre es recomendable determinar la línea meteórica local de un sitio de interés.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
Servicio Nacional de Geología y Minería – Laboratorio de Isótopos Estables (Chile)	Sin información	UF 1,5	Sin información	https://www.sernageomin.cl/laboratorio-isotopos-estables/
Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) (Chile)	50 ml	*Tarifa acorde a las necesidades de la investigación	10 días hábiles	https://negocios.cchen.cl/portalcompras/home.aspx
University of Waterloo – Environmental Isotope Laboratory (Canadá)	2 ml	\$30 CAD (~ \$USD 24)	4 semanas	https://uwaterloo.ca/environmental-isotope-laboratory/
GNS Science – Stable Isotope Laboratory (Nueva Zelanda)	5 ml muestras limpias, por ejemplo, hielo, nieve, precipitación o agua filtrada	\$NZ 45 (~ \$USD 32) (mínimo 30 muestras)	3-4 semanas	https://www.gns.cri.nz/Home/Services/Laboratories-Facilities/Stable-Isotope-Laboratory
	5ml muestras de tipo geotérmica, agua subterránea, alta salinidad o total de sólidos disueltos (TDS) filtrada	- \$NZ 120 (~ \$USD 85)		

*Poseen la capacidad para realizar este tipo de análisis, pero no lo ofrecen como parte de los servicios habituales dentro del sitio web. Por lo tanto, se requiere de una evaluación especial en caso de hacer efectivo el análisis en CCHEN.

Aspectos Logísticos

Se recomienda que el material de las botellas sea de plástico tipo PVC o HDPE. Las botellas deben ser llenadas hasta el tope y deben ser herméticas para evitar la evaporación, proceso que puede alterar las muestras.

En el caso de las muestras tomadas desde un colector de precipitaciones, se recomienda obtenerlas justo después del evento de precipitación para así minimizar el riesgo de ocurrencia de evaporación. En algunos casos, se utiliza vaselina líquida para evitar el riesgo de evaporación, sin embargo, existen estudios que plantean ciertos problemas en las muestras debido a la decantación del aceite en el agua.

Para saber más

- Fuentes, M. 2017. Origen y procesos hidrogeoquímicos de los recursos hídricos en la cuenca del río Cuncumén. Universidad de Chile, Santiago. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148168>
- Valenzuela, L., Ramírez-Hernández, J., Palomares, R.B. 2013. Composición isotópica del agua subterránea y su relación con la salinidad en el Valle de San Luis Río Colorado en Sonora, México. *Información Tecnológica*, 24(2), 57–66
- Wolkersdorfer, C., Nordstrom, D., Beckie, R., Cicerone, D., Elliot, T., Edraki, M., Valente, T., Alves, S., Kumar, P., Oyarzún, R., Soler, A. 2020. Guidance for the integrated use of hydrological, geochemical, and isotopic tools in mining operations. *Mine Water and the Environment* 39(2), 204–228. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-020-00666-x>

Uso de herramientas isotópicas para estudios de problemas hidrológico-ambientales

Tritio

Nombre Isótopo:
Tritio (^3H)

Ámbito de aplicación:
Datación directa de aguas subterráneas.

Información General

El tritio es un isótopo radiactivo del hidrógeno con una vida media de 12,3 años. En la naturaleza, el tritio, se origina en la atmósfera cuando los rayos cósmicos chocan con las moléculas de aire. Por otra parte, el tritio también se ha originado de forma antrópica. Las pruebas nucleares durante la Guerra Fría introdujeron importantes cantidades de ^3H a la atmósfera, liberándose gran parte en el hemisferio norte.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
University of Waterloo – Environmental Isotope Laboratory EIL (Canadá)	30ml Tritio, directo (± 6 TU)	\$50 CAD (~ \$USD 40)	5 semanas	https://uwaterloo.ca/environmental-isotope-laboratory/
	600ml Tritio, enriquecido ($\pm 0,8$ TU)	\$175 CAD (~ \$USD 140)	10 semanas	
	2000 ml Tritio, nivel ultra bajo ($\pm 0,1$ TU)	\$500 CAD (~ \$USD 400)	12 semanas	
University of Arizona – Environmental Isotope Laboratory (EE. UU)	Sin información	\$USD 190	12 a 15 semanas	https://www.geo.arizona.edu/EIL

*Lo que se encuentra () en la sección de volumen de la muestra significa la resolución analítica que posee el laboratorio.

Aspectos Logísticos

Se sugiere utilizar botellas de plástico tipo HDPE o bien, cualquier botella del mismo material que selle de buena forma. Todas las botellas deben llenarse a tope y deben ser herméticas para evitar la evaporación (proceso que altera las muestras). Por otra parte, en el exterior de las botellas se recomienda incluir un etiquetado que indique la conductividad de campo y el pH.

Para saber más

- Moran, B. J., Boutt, D. F., & Munk, L. A. 2019. Stable and radioisotope systematics reveal fossil water as fundamental characteristic of arid orogenic scale groundwater systems. *Water Resources Research*, 55(12), 11295–11315. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2019wr026386>
- Morgenstern, U., Stewart, M. K., & Stenger, R. 2010. Dating of streamwater using tritium in a post nuclear bomb pulse world: continuous variation of mean transit time with streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(11), 2289–2301. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/hess-14-2289-2010>
- Moser, H., Wolf, M., Fritz, P., Fontes, J-Ch., Florkowski, T., & Payne, B. R. 1989. Deuterium, oxygen-18, and tritium in Stripa groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(8), 1757–1763. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90296-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90296-2)

Estroncio

Nombre Isótopo: Estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	Ámbito de aplicación: Utilizado para trazar orígenes de contaminación asociado a las actividades antrópicas (minería y agricultura) – Trazador alternativo para caracterizar los efectos de lixiviado de vertederos en aguas subterráneas.
---	--

Información General

El estroncio posee cuatro isótopos: ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr y ^{88}Sr , estando presente en cantidades del orden del 0,56%, 9,86%, 7,02%, 82,56%, respectivamente. De estos, el único isótopo radiogénico es el ^{87}Sr , que se forma a partir de la desintegración de ^{87}Rb . Por último, dada la variación relativa del Sr, generalmente, se expresa utilizando la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Los isótopos de Sr no se fraccionan de forma mensurable mediante los procesos geológicos y pueden ser utilizados como trazador de fuentes de contaminación.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
University of Waterloo – Environmental Isotope Laboratory EIL (Canadá)	> 10 µg	\$300 CAD (~ \$USD 240)	8 semanas	https://uwaterloo.ca/environmental-isotope-laboratory/pricing-turnaround-time-and-sample-submission
Centro de Instrumentación Científica, Universidad de Granada (España)	> 10 µg	167 EUR (~ \$USD 198)	Sin información	https://cic.ugr.es/tarifas-por-servicio.php?codServicio=4
University of Georgia – Center for Applied Isotope Studies (EE. UU)	Sin información	\$USD 200	2 a 4 semanas	https://cais.uga.edu/service/lead-isotope-analysis/

Aspectos Logísticos

Se sugiere el uso de botellas de polietileno de alta densidad (HDPE). No se identifica alguna práctica especial de conservación ni preparación de las muestras en terreno.

Para saber más

- Soler, A., Canals, A., Goldstein, S.L., Otero, N., Antich, N., Spangenberg, J. 2001. Sulfur and strontium isotope composition of the Llobregat river: tracer of natural and anthropogenic chemicals in stream waters. Departamento de cristalografía, mineralogía y depósito de minerales. Universidad de Barcelona. *Water, Air, and Soil Pollution*, 136(1/4), 207–224 Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1015231810548>
- Soler, A., Canals, A., Antich, N. 2004. La relación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ una nueva herramienta medioambiental para trazar el origen de la contaminación: el ejemplo del Río Cardener, Cuenca del Río Llobregats. Departamento de cristalografía, mineralogía y depósito de minerales. Universidad de Barcelona. Disponible en: http://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_1_089.pdf
- Vilomet, J. D., Angeletti, B., Moustier, S., Ambrosi, J. P., Wiesner, M., Bottero, J. Y., & Chatelet-Snidaro, L. 2001. Application of strontium isotopes for tracing landfill leachate plumes in groundwater. *Environmental Science & Technology*, 35(23), 4675–4679. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es000169c>

Carbono

Nombre Isótopo:
Carbono ($^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$)

Ámbito de aplicación:
En el caso de ^{13}C , identificación de fuentes de contaminación y orígenes de agua subterránea y superficiales.
En el caso de ^{14}C , datación de aguas subterráneas.

Información General

El carbono posee dos isótopos estables (^{12}C – ^{13}C) y un isótopo radioactivo (^{14}C) con abundancias del orden de 98,9%, 1,1% para los isótopos estables respectivamente.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
Servicio Nacional de Geología y Minería – Laboratorio de Isótopos Estables (Chile)	^{13}C y ^{18}O en muestras de carbonatos: 100 μg por triplicado	2 UF	Sin información	https://www.sernageomin.cl/laboratorio-isotopos-estables/
GNS Science – Stable Isotope Laboratory – Rafter Radiocarbon Laboratory (Nueva Zelanda)	^{13}C : 1 mg de HCO_3 (CID – bicarbonato agua)	\$NZ 50 (~ \$USD 36)	3 a 4 semanas	https://www.gns.cri.nz/Home/Services/Laboratories-Facilities/Stable-Isotope-Laboratory
	^{13}C : 800 μg (material orgánico sedimentos)	\$NZ 80 (~ \$USD 57)		
	^{14}C : *250 ml (muestras de agua subterránea)	\$NZ 900 (~ \$USD 644)	1 a 5 semanas	https://www.gns.cri.nz/Home/Services/Laboratories-Facilities/Rafter-Radiocarbon-Laboratory
Beta Analytic – Testing Laboratory (EE. UU)	250 ml a 1 L (AMS Standard ^{14}C)	Tarifa acorde a las necesidades de la investigación	14 días hábiles	https://www.radiocarbon.com/espanol/aguas-subterranas-carbono-dacion-muestreo.htm

* Para muchas muestras de agua, una botella de 250 ml es suficiente. Sin embargo, cuando las muestras en terreno presentan un contenido bajo de carbonatos o pH, entonces se necesitará un volumen mayor de hasta 1 L.

Aspectos Logísticos

Para muestras acuosas de ^{13}C , se sugiere el uso de botellas de PVC o HDPE herméticas. En el caso de ^{14}C , en muestras sedimentarias se debe evitar la actividad bacteriana por lo que se indica cubrir las muestras con papel de aluminio ligeramente perforado y secarlas a una temperatura de al menos 40 °C. En muestras acuosas, se debe llenar la botella hasta el tope minimizando el contacto con el aire. Además, se debe tomar en cuenta el tiempo que transcurre entre la toma de muestra en terreno y el análisis en el laboratorio. Si este es corto, entonces no será necesario utilizar algún componente que suprima la actividad bacteriana. De lo contrario, si el tiempo es largo, se recomienda añadir 1 a 2 mg de cloruro de mercurio antes de tomar las muestras, disminuyendo la actividad bacteriana, y, en consecuencia, evitando alterar el contenido de ^{14}C .

Para saber más

- Brunet, F., Potot, C., Probst, A., & Probst, J.L. 2011. Stable carbon isotope evidence for nitrogenous fertilizer impact on carbonate weathering in a small agricultural watershed. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25(19), 2682–2690. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/rcm.5050>
- Herrera, C., Gamboa, C., Custodio, E., Jordan, T., Godfrey, L., Jódar, J., Luque, J. A., Vargas, J., & Sáez, A. 2018. Groundwater origin and recharge in the hyperarid Cordillera de la Costa, Atacama Desert, northern Chile. *Science of the Total Environment*, 624, 114–132. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.134>
- Stewart, M. 2012. A 40-year record of carbon-14 and tritium in the Christchurch groundwater system, New Zealand: Dating of young samples with carbon-14. *Journal of Hydrology*, 430-431, 50–68. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.046>

Plomo

Nombre Isótopo: Plomo (²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb y ²⁰⁸ Pb)	Ámbito de aplicación: Permite determinar el nivel de contaminación, movilidad y disponibilidad de las aguas superficiales asociado al ámbito de la minería de Uranio, así como la distribución de fuentes de contaminación por material particulado (MP) en áreas de fundición de cobre e instalaciones de relaves.
---	---

Información General

El plomo en su estado común es un metal sólido, pesado, denso y de color gris azulado. Este elemento posee cuatro isótopos, de masas de 204, 206, 207 y 208, de los cuales sólo el ²⁰⁴Pb es estable, mientras que los otros tres son el resultado final de la desintegración radioactiva del ²³⁸U, ²³⁵U y ²³²Th, respectivamente.

El plomo es un importante contaminante, puesto que las altas concentraciones que se liberan al medio producto de la actividad antropogénica generan un riesgo grave para la salud del ser humano, principalmente cuando este elemento es inhalado como vapor o bien, como polvo en suspensión (material particulado). Sin embargo, es difícil discriminar entre fuentes de plomo y otros contaminantes si sólo se conoce su concentración. Por esta razón, el análisis isotópico de Pb se ha introducido como una técnica de apoyo dirigido a estudios hidrológicos – mineros y a modelos de dispersión de contaminantes por material particulado.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
Geochron Laboratory (EE. UU)	Sin información	*\$USD 300 - 375	Sin información	http://www.geochronlabs.com/solid.html#pb
ALS Laboratory Group S. L (Escandinavia)	1 ng	*145 EUR (~ \$USD 172)	5 días hábiles	https://www.alsglobal.se/en/isotope-analysis/analytical-packages
	250 ng	*295 – 365 EUR (~ \$USD 350 - 434)	10 días hábiles	
University of Georgia – Center for Applied Isotope Studies (EE. UU)	Sin información	\$USD 150	2 a 4 semanas	https://cais.uga.edu/service/lead-isotope-analysis/

* El precio dependerá de las características de la muestra a analizar y lo que necesite el investigador.

Aspectos Logísticos

Para muestras líquidas, los tres laboratorios sugieren el uso de botellas de plástico resistentes y herméticas. Además, se advierte que las botellas se deben sellar con una bolsa de plástico, con una toalla de papel o un algodón evitando posibles fugas.

Para saber más

- Cuvier, A., Pourcelot, L., Probst, A., Prunier, J., & Le Roux, G. 2016. Trace elements and Pb isotopes in soils and sediments impacted by uranium mining. *Science of the Total Environment*, 566-567, 238–249. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.213>
- Félix, O. I., Csavina, J., Field, J., Rine, K. P., Sáez, A. E., & Betterton, E. A. 2015. Use of lead isotopes to identify sources of metal and metalloid contaminants in atmospheric aerosol from mining operations. *Chemosphere*, 0, 219–226. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.057>
- Lepitre, M. E., Allen, D. M., Mortensen, J. K., & Gabites, J. E. 2003. Differentiating sources of dissolved lead in mine waters using lead isotope techniques, Sullivan Mine, British Columbia. *Water Resources Research*, 39(1), HWC 1-1-HWC 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2001wr000606>

Uso de herramientas isotópicas para estudios de problemas hidrológico-ambientales

Nitrógeno

Nombre Isótopo:
Nitrógeno (^{15}N)

Ámbito de aplicación:
Identificación de fuentes de contaminación y destino de contaminantes en aguas superficiales y subterráneas.

Información General

El nitrógeno consta de dos isótopos de origen natural, ^{14}N y ^{15}N , los cuales poseen en la naturaleza una abundancia del orden de 99,6% y 0,4%, respectivamente. Sin embargo, igualmente se conocen isótopos radioactivos (^{12}N , ^{13}N , ^{16}N y ^{17}N) y que son originados a partir de varias reacciones nucleares.

En las aguas superficiales el nitrógeno puede llegar por escurrimiento, como resultado del uso de fertilizantes originados de forma antrópica, provocando una potencial contaminación de los recursos hídricos. Dado lo anterior, una de las formas de enfrentar este tipo de problemática para la identificación de fuentes de contaminación y destino de los contaminantes es a través del uso de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Tamaño de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web	
Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) (Chile)	50 mg/L	\$167.025	2 meses	https://negocios.cchen.cl/portalcompras/home.aspx	
University of Waterloo – Environmental Isotope Laboratory (Canadá)	^{15}N : 5 mg	\$100 CAD (~ \$USD 79)	8 semanas	https://uwaterloo.ca/environmental-isotope-laboratory/pricing-laboratory/pricing- turnaround-time-and-sample-submission	
	$^{15}\text{N} + ^{18}\text{O}$: 30 ml		10 semanas		
Organismo Internacional de Energía Atómica IAEA (Austria)	^{15}N : 0,5 g	*150 EUR (~ \$USD 178)	3 semanas o más	https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx	
	$^{15}\text{N} + ^{18}\text{O}$: 0,5 g				
GNS Science – Stable Isotope Laboratory (Nueva Zelanda)	Muestras sedimentarias	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$: 100 μg material orgánico	\$NZ 50 (~ \$USD 36)	4 a 8 semanas	https://www.gns.cri.nz/Home/Services/Laboratories-Facilities/Stable-Isotope-Laboratory/Prices-Analytical-methods/Nitrogen
	Muestras líquidas	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$: 2 mg	\$NZ 250 (~ \$USD 178)		

* El precio incluye el costo de envío.

Aspectos Logísticos

Se requiere el uso de botellas de plástico resistentes y herméticas. Además, las muestras deben mantenerse frías en una nevera con bolsas de hielo al interior (no se debe usar hielo seco o suelto) limitando la actividad biológica que potencialmente puede causar los procesos de nitrificación o desnitrificación.

Para saber más

- Böhlke, J. K., Ericksen, G. E., & Revesz, K. 1997. Stable isotope evidence for an atmospheric origin of desert nitrate deposits in northern Chile and southern California, U.S.A. *Chemical Geology*, 136(1), 135–152. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00124-6)
- Seiler, R. L. 2005. Combined use of ^{15}N and ^{18}O of nitrate and ^{11}B to evaluate nitrate contamination in groundwater. *Applied Geochemistry*, 20(9), 1626–1636. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.04.007>
- Zhang, Y., Shi, P., Song, J., & Li, Q. 2019. Application of Nitrogen and Oxygen Isotopes for Source and Fate Identification of Nitrate Pollution in Surface Water: A Review. *Applied Sciences*, 9(1), 18. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app9010018>

Azufre

Nombre Isótopo:
Azufre (^{34}S)

Ámbito de aplicación:
Caracterizar orígenes de los procesos hidrogeoquímicos de aguas superficiales y subterráneas – Discriminar entre fuentes de sulfato naturales y antrópicas.

Información General

El azufre, se encuentra principalmente en forma nativa en regiones volcánicas y en sus formas reducidas formando sulfuros y sulfosales, o bien, en sus formas oxidadas como sulfatos. El azufre posee cuatro isótopos estables, ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S y ^{36}S , con abundancias del orden de 95,02%, 0,75%, 4,21% y 0,02%, respectivamente. Si bien, la relación $^{36}\text{S}/^{32}\text{S}$ dispone de mayor diferencia de masa, por convención se prefiere utilizar la relación isotópica de $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, puesto que el ^{34}S es el isótopo más abundante entre los tres de menor abundancia relativa.

La composición isotópica del S y O del sulfato en aguas subterráneas es especialmente útil en estudios del origen de la salinidad, permitiendo identificar la influencia de las actividades agrícolas e industriales en la contaminación de aguas subterráneas y superficiales.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web	
Servicio Nacional de Geología y Minería - Laboratorio de Isótopos Estables (Chile)	Sin información	*1,4 UF para muestras de sulfato en agua	Sin información	https://www.sernageomin.cl/laboratorio-isotopos-estables/	
University of Waterloo – Environmental Isotope Laboratory (Canadá)	^{34}S : en muestras acuosas dependerá de la concentración de SO_4	Sin información	8 semanas	https://uwaterloo.ca/environmental-isotope-laboratory/pricing-turnaround-time-and-sample-submission	
	^{34}S : 10 a 100 mg de S (muestras sedimentarias)	\$40 CAD (~ \$USD 32)			
	$^{34}\text{S} + ^{18}\text{O}$: 1 mg en sulfato disuelto	\$135 CAD (~ \$USD 107)	12 semanas		
GNS Science – Stable Isotope Laboratory (Nueva Zelanda)	Muestras sedimentarias	^{34}S : 50 mg	\$NZ 140 (~ \$USD 100)	4 - 8 semanas	https://www.gns.cri.nz/Home/Services/Laboratories-Facilities/Stable-Isotope-Laboratory/Prices-Analytical-methods/Sulphur
		$^{34}\text{S} + ^{18}\text{O}$: 50 mg	\$NZ 250 (~ \$USD 178)		
	Muestras líquidas	^{34}S : 20 mg	\$NZ 250 (~ \$USD 178)		
		$^{34}\text{S} + ^{18}\text{O}$: 50 mg	\$NZ 350 (~ \$USD 249)		

*Para mayor detalle se debe solicitar cotización.

Aspectos Logísticos

Para muestras acuosas, se debe conocer la concentración de sulfato para saber cuánta muestra se necesitará para el análisis isotópico y para determinar el método de esta misma. Por ejemplo, para una concentración de 2 mg/L de SO_4 , se necesitará un volumen de 2500 ml de H_2O . En cambio, para una concentración mayor a 500 mg/L se necesitarán 10 ml de H_2O . Además, se requiere de concentraciones de cloruro cuando la concentración de sulfato es baja y la muestra debe pasar a través de una columna de resina absorbente para concentrar el sulfato. Las muestras deben ser enviadas en recipientes de plásticos resistentes o de vidrio y deben conservarse a una temperatura de aproximadamente 4°C o bien, en solución de HCl a un pH de 4.

Para saber más

- Fuentes, M. 2017. Origen y procesos hidrogeoquímicos de los recursos hídricos en la cuenca del río Cuncumén. Universidad de Chile, Santiago. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148168>.
- Lefticariu, L., Behum, P., Bender, K., & Lefticariu, M. 2017. Sulfur Isotope Fractionation as an indicator of biogeochemical processes in an AMD passive bioremediation system. *Minerals*, 7(3), 41. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min7030041>
- Wolkersdorfer, C., Nordstrom, D., Beckie, R., Cicerone, D., Elliot, T., Edraki, M., Valente, T., Alves, S., Kumar, P., Oyarzún, R., Soler, A. 2020. Guidance for the integrated use of hydrological, geochemical, and isotopic tools in mining operations. *Mine Water and the Environment* 39, 204 - 228. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-020-00666-x>

Cobre

Nombre Isótopo:
Cobre (^{63}Cu y ^{65}Cu)

Ámbito de aplicación:
Determinar fuentes y vías de transporte de contaminación en aguas subterráneas y superficiales en un contexto de AMD.

Información General

Existen dos isótopos naturales estables: ^{63}Cu (69,1%) y ^{65}Cu (30,9%). El Cu, en cierta medida, se relaciona con los procesos de drenaje ácido. En el caso de Chile, la mayoría de los sulfuros son ricos en cobre, y, por tanto, al generarse drenaje ácido, el Cu es uno de los elementos que queda en solución en las aguas. Es por ello, que el uso de herramientas isotópicas de Cu en estudios ambientales – mineros ha adquirido especial interés, puesto que son muy útiles para determinar las fuentes y vías de transporte de contaminación generadas por drenaje ácido de mina (DAM), o bien, para determinar el impacto que generan las industrias mineras en suelos agrícolas aledaños.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Tamaño de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
ALS Laboratory Group S. L (Scandinavia)	3 µg	412 EUR (~ \$USD 487)	15 días	https://www.alsglobal.se/en/isotope-analysis/analytical-packages
Laboratory for Isotopes and Metals in the Environment (LIME) (EE. UU)	Sin información	*\$USD 234	Sin información	https://lime.psu.edu/

* El precio varía según la cantidad total de tiempo del personal y el tiempo de uso de los instrumentos necesarios para los análisis químicos e isotópicos, variando según la cantidad de muestras presentadas.

Aspectos Logísticos

En muestras acuosas, estas se deben filtrar (filtro de celulosa de 0,2 µm) al menos tres veces antes de ser almacenadas en botellas de plástico de tipo HDPE herméticas. Cabe destacar que, antes de utilizar las botellas, estas deben ser higienizadas con HCl 1 N y agua purificada (35 g de HCl con 1 litro de agua purificada). Por último, una vez que se envíen las muestras a analizar, deben mantenerse refrigeradas a una temperatura de aproximadamente 4°C.

Para saber más

- Kimball, B. E., Mathur, R., Dohnalkova, A. C., Wall, A. J., Runkel, R. L., & Brantley, S. L. 2009. Copper isotope fractionation in acid mine drainage. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(5), 1247–1263. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.035>
- Kříbek, B., Šípková, A., Ettler, V., Mihaljevič, M., Majer, V., Knésl, I., Mapani, B., Penížek, V., Vaněk, A., & Sracek, O. 2018. Variability of the copper isotopic composition in soil and grass affected by mining and smelting in Tsu-meb, Namibia. *Chemical Geology*, 493, 121–135. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.035>
- Viers, J., Grande, J. A., Zouiten, C., Freydier, R., Masbou, J., Valente, T., Torre, M.-L., Destrigneville, C., & Pokrovsky, O. S. 2018. Are Cu isotopes a useful tool to trace metal sources and processes in acid mine drainage (AMD) context? *Chemosphere* 193, 1071 – 1079. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.133>

Zinc

Nombre Isótopo:

Zinc (^{66}Zn)

Ámbito de aplicación:

Permite identificar y cuantificar las contribuciones de las distintas fuentes de contaminación en la atmósfera (aerosoles) y en aguas superficiales.

Información General

El zinc posee cinco isótopos estables naturales, ^{64}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn y ^{70}Zn , y sus abundancias en la naturaleza son del orden de 48,89%, 27,81%, 4,11%, 18,56%, y 0,62%, respectivamente.

Este elemento, en el medio ambiente, está presente en el aire, agua y suelo, y sus concentraciones están aumentando debido a causas antrópicas. La mayoría del zinc es adicionado por actividades industriales, como la minería, la combustión de combustibles fósiles como el carbón y la industria del acero, convirtiéndolo en un potencial contaminante. Dado lo anterior, es que existen diversos estudios que utilizan los isótopos de Zn como herramientas para identificar y cuantificar las contribuciones que posee cada una de las distintas fuentes de contaminación, permitiendo una mejor comprensión del ciclo biogeoquímico del zinc en la naturaleza.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
ALS Laboratory Group S. L (España)	5 µg	344 EUR (~ \$USD 406)	15 días	https://www.alsglobal.es/analisis-isotopicos/pacotes-analiticos
Cambridge Isotope Laboratories, Inc. (Reino Unido)	5 µg	Sin información	Sin información	https://www.isotope.com/index.cfm

Aspectos Logísticos

Se requiere que las muestras líquidas sean filtradas (membrana de 0,22 µm de acetato de celulosa) y acidificadas con HNO_3 (ácido nítrico) antes de ser almacenadas en botellas de plástico (PP) herméticas. Cabe destacar que, antes de utilizar las botellas, estas deben ser higienizadas con HCl 1 N y agua purificada.

Para saber más

- Borrok, D. M., Nimick, D. A., Wanty, R. B., & Ridley, W. I. 2008. Isotopic variations of dissolved copper and zinc in stream waters affected by historical mining. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(2), 329–344. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.11.014>
- Schleicher, N. J., Dong, S., Packman, H., Little, S. H., Ochoa Gonzalez, R., Najorka, J., Sun, Y., & Weiss, D. J. 2020. A Global Assessment of Copper, Zinc, and Lead Isotopes in Mineral Dust Sources and Aerosols. *Frontiers in Earth Science*, 8. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00167>
- Sivry, Y., Riotte, J., Sonke, J. E., Audry, S., Schäfer, J., Viers, J., Blanc, G., Freydier, R., & Dupré, B. 2008. Zn isotopes as tracers of anthropogenic pollution from Zn-ore smelters The Riou Mort–Lot River system. *Chemical Geology* 255 (3–4), 295–304. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.038>

Uso de herramientas isotópicas para estudios de problemas hidrológico-ambientales

Cadmio

Nombre Isótopo:
Cadmio (^{114}Cd)

Ámbito de aplicación:
Trazador de fuentes de contaminación antrópicas y naturales.

Información General

ELCd se puede emitir al medio ambiente a través de actividades industriales como la minería y la galvanoplastia, y también a través de baterías, revestimientos aeroespaciales, conservantes, pigmentos, fertilizantes de fósforo mineral y absorbentes de neutrones en centrales nucleares.

Este elemento posee siete isótopos estables: ^{106}Cd (1,22%), ^{108}Cd (0,88%), ^{110}Cd (12,39%), ^{111}Cd (12,75%), ^{112}Cd (24,07%), ^{114}Cd (28,86%) y ^{116}Cd (7,58%). Por otra parte, el Cd es un elemento muy tóxico. Dado lo anterior, es que existen diversos estudios que utilizan los isótopos de Cd como herramientas para caracterizar la distribución cuantitativa de diferentes fuentes de contaminación por Cd asociado a problemas minero-ambientales.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
ALS Laboratory Group S. L. (España)	100 ng	344 EUR (~ \$USD 406)	15 días	https://www.alsglobal.es/analisis-isotopicos/pacotes-analiticos
Cambridge Isotope Laboratories, Inc. (Reino Unido)	Sin información	Sin información	Sin información	https://www.isotope.com/index.cfm

Aspectos Logísticos

En cuanto a las características generales que deben presentar las muestras, todos los laboratorios indican que, en el caso de ser muestras líquidas, estas se deben acidificar con HNO_3 hasta un pH < 2 y luego ser almacenadas en botellas de plástico (PP) de 1 L herméticas. Cabe destacar que, antes de utilizar las botellas, estas se deben higienizar con HCl 1 N y ser enjuagadas con agua purificada al menos 3 veces. Posteriormente, en el etiquetado dispuesto en las botellas debe ir incluidos el pH, la conductividad eléctrica, el potencial redox y la temperatura (parámetros que son obtenidos en el momento de la toma de muestra en terreno).

Para saber más

- Křibek, B., Šípková, A., Ettl, V., Mihaljevič, M., Majer, V., Kněsl, I., Mapani, B., Penížek, V., Vaněk, A., & Sracek, O. 2018. Variability of the copper isotopic composition in soil and grass affected by mining and smelting in Tsumeb, Namibia. *Chemical Geology*, 493, 121–135.
- Viers, J., Grande, J. A., Zouiten, C., Freydier, R., Masbou, J., Valente, T., Torre, M.-L. de la, Destrigneville, C., & Pokrovsky, O. S. 2018. Are Cu isotopes a useful tool to trace metal sources and processes in acid mine drainage (AMD) context? *Chemosphere* 193, 1071 – 1079. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.133>
- Yang, W.J., Ding, K.B., Zhang, P., Qiu, H., Cloquet, C., Wen, H.D., Morel, J.L., Qiu, R.L. & Tang, Y.T. 2019. Cadmium stable isotope variation in a mountain area impacted by acid mine drainage. *Science of The Total Environment*, 646 (1), 696–703.

Molibdeno

Nombre Isótopo:
Molibdeno (⁹⁸Mo)

Ámbito de aplicación:
Trazador de fuentes de contaminación asociado a problemas hidrológicos – mineros.

Información General

Este elemento presenta siete isótopos estables (⁹²Mo, ⁹⁴Mo, ⁹⁵Mo, ⁹⁶Mo, ⁹⁷Mo, ⁹⁸Mo y ¹⁰⁰Mo), siendo el ⁹⁸Mo el más abundante, representando un 24,14% del total de molibdeno. Existen diversos estudios que utilizan los isótopos de Mo con el objetivo de comprender el transporte y destino de estos metales en aguas subterráneas y superficiales, empleándose como trazadores de fuentes de contaminación asociado a drenaje ácido en zonas mineras.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
ALS Laboratory Group S. L. (España)	10 µg	493 EUR (~ \$USD 583)	15 días	https://www.alsglobal.es/analisis-isotopicos/pacotes-analiticos
W.M. Keck Isotope Laboratory (EE. UU)	Sin información	*\$USD 304	Sin información	https://kecklab.sites.ucsc.edu/

*Valor sujeto a si los análisis se realizan con o sin asistencia profesional. El valor dispuesto es con asistencia.

Aspectos Logísticos

En cuanto a las características generales que deben presentar las muestras, todos los laboratorios indican que, en el caso de ser muestras de agua subterránea (poco profundas) o superficiales, estas deben ser recogidas utilizando una bomba peristáltica conectada a tubos de HDPE para luego ser filtradas y recolectadas en botellas (PP o HDPE) herméticas. Ahora bien, si el agua subterránea es muy profunda, se debe utilizar un actuador que expulse el agua hacia la superficie. Cabe destacar que, antes de tomar las muestras subterráneas, se deben controlar los parámetros químicos del agua, garantizando una captación de agua más representativa en terreno.

Para saber más

- Montero-Serrano, J. C., Martínez-Santana, M., Tribouillard, N., Riboulleau, A., & Garbán, G. 2009. Comportamiento geoquímico del molibdeno y sus isótopos en el ambiente sedimentario: Un resumen bibliográfico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(2), 263–275. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0718-19572009000200001>
- Skierszkan, E. K., Mayer, K. U., Weis, D., & Beckie, R. D. 2016. Molybdenum and zinc stable isotope variation in mining waste rock drainage and waste rock at the Antamina mine, Peru. *Science of the Total Environment*, 550, 103–113. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.053>
- Skierszkan, E. K., Stockwell, J. S., Dockrey, J. W., Weis, D., Beckie, R. D., & Mayer, K. U. 2017. Molybdenum (Mo) stable isotopic variations as indicators of Mo attenuation in mine waste-rock drainage. *Applied Geochemistry* 87, 71–83. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.008>

Hierro

Nombre Isótopo:
Hierro (^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{57}Fe y ^{58}Fe)

Ámbito de aplicación:
Identificar procesos de movilidad de metales pesados en depósitos de relaves en minería.

Información General

El hierro posee cuatro isótopos estables naturales, ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{57}Fe y ^{58}Fe , y sus abundancias en la naturaleza son del orden de 5,8%, 91,7%, 2,2% y 0,3%, respectivamente.

Uno de los aspectos relevantes del hierro es la relación que posee con los minerales sulfurados. La oxidación de estos minerales, como la pirita (FeS_2), provocan lo que se conoce como drenaje ácido. El drenaje ácido de mina o de roca (DAM o DAR, respectivamente), es una de las principales fuentes de contaminación de aguas superficiales y subterráneas en el mundo. En este contexto, se pueden utilizar los isótopos de Fe como trazadores para identificar los procesos de movilidad de los metales pesados, específicamente, en los depósitos de relaves en minería.

Lugares en los que se puede realizar su determinación

Laboratorio	Volumen de la muestra	Costo	Tiempo del análisis	Página web
ALS Laboratory Group S. L (España)	10 μg	344 EUR (~ \$USD 406)	15 días	https://www.alsglobal.es/analisis-isotopicos/pacotes-analiticos
Laboratory for Isotopes and Metals in the Environment (LIME)	Sin información	*\$USD 234	Sin información	https://lime.psu.edu/

* El precio varía según la cantidad total de tiempo del personal y el tiempo de uso de los instrumentos necesarios para los análisis químicos e isotópicos, variando según la cantidad de muestras presentadas.

Aspectos Logísticos

En cuanto a las características generales que deben presentar las muestras, todos los laboratorios indican que, en el caso de ser sedimentarias, estas deben ser recogidas de forma manual con herramientas no metálicas y ser almacenadas en bolsas de plástico impermeables. Para las muestras acuosas, se debe utilizar frascos de plástico resistentes y herméticos. Una vez que se envíen las muestras a analizar, estas deben mantenerse refrigeradas a una temperatura de aproximadamente 4°C.

Para saber más

- Herbert Jr., R. B., & Schippers, A. 2008. Iron isotope fractionation by biogeochemical processes in mine tailings. *Environmental Science & Technology*, 42(4), 1117–1122. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es071616s>
- Pérez-Rodríguez, N., Engström, E., Rodushkin, I., Nason, P., Alakangas, L., & Öhlander, B. 2013. Copper and iron isotope fractionation in mine tailings at the Laver and Kristineberg mines, northern Sweden. *Applied Geochemistry*, 32, 204–215. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.012>
- Roebbert, Y., Rabe, K., Lazarov, M., Schuth, S., Schippers, A., Dold, B., & Weyer, S. 2018. Fractionation of Fe and Cu isotopes in acid mine tailings: Modification and application of a sequential extraction method. *Chemical Geology*, 493, 67–79. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.026>

CONCLUSIÓN

En un contexto en que se visualiza una demanda importante por los recursos minerales, especialmente el cobre (Cu), junto con una disminución en la disponibilidad de recursos hídricos, esto último tanto a nivel global como nacional, el contar con herramientas prácticas para el estudio del ciclo hidrológico y los efectos ambientales de las actividades económicas como la minería resulta de especial interés. Un ejemplo de tales herramientas corresponde a los isótopos ambientales.

Ahora bien, como toda herramienta, se debe ser consciente acerca de sus reales aplicaciones, así como los requerimientos logísticos que implica su uso. Con esto en mente, el presente documento técnico se presenta como una guía rápida de orientación inicial para todos aquellos profesionales interesados en conocer más acerca de los isótopos, sus aplicaciones en estudios hidrológico-ambientales, y los requerimientos asociados. Por ello, se presentaron (en forma resumida) casos de estudio y aplicaciones para la caracterización de procesos hidrológicos y/o de contaminación (con especial énfasis en recursos hídricos). Adicionalmente, se presentaron fichas individuales en las que se sistematizaron aspectos logísticos y prácticos asociados a la toma de muestra y análisis en laboratorio de los diferentes isótopos considerados.

Se espera que la información entregada sirva como una orientación inicial para la profundización en estos temas, tanto los isótopos considerados como otros no cubiertos en este documento, a partir de la bibliografía presentada.



REFERENCIAS

- Arenas, G., Hübner, G., Aninat, C., Reyes, M. 2017. Los desafíos para el desarrollo futuro de la minería en la zona central. Informe Técnico Diálogo Zona Central de Alianza Valor Minero, Santiago de Chile.
- Banco Mundial. 2011. CHILE – Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Disponible en: https://dga.mop.gob.cl/eventos/Diagnostico%20gestion%20de%20recursos%20hidricos%20en%20Chile_Banco%20Mundial.pdf
- Böhlke, J. K., Ericksen, G. E. & Revesz, K. 1997. Stable isotope evidence for an atmospheric origin of desert nitrate deposits in northern Chile and southern California, U.S.A. *Chemical Geology*. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00124-6)
- Borrok, D. M., Nimick, D. A., Wanty, R. B., & Ridley, W. I. 2008. Isotopic variations of dissolved copper and zinc in stream waters affected by historical mining. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(2), 329–344. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.11.014>
- Brunet, F., Potot, C., Probst, A. & Probst, J.L. 2011. Stable carbon isotope evidence for nitrogenous fertilizer impact on carbonate weathering in a small agricultural watershed. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/rcm.5050>
- Clark, I., & Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/201996750_Environmental_Isotopes_in_Hydrology
- COCHILCO. 2017. Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades. Disponible en: https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/sulfuros%20primarios_desaf%3%ADos%20y%20oportunidades.pdf
- COCHILCO. 2019a. Comisión Chilena del Cobre. Catastro de empresas exploradoras 2019. Ministerio de Minería. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Catastro%20de%20empresas%20exploradoras%202019.pdf>

- COCHILCO. 2019b. Comisión Chilena del Cobre. Consumo de agua en la minería del cobre al 2018. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Santiago de Chile. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202018%20-%20Version%20Final.pdf>
- Cuvier, A., Pourcelot, L., Probst, A., Prunier, J., & Le Roux, G. 2016. Trace elements and Pb isotopes in soils and sediments impacted by uranium mining. *Science of the Total Environment*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.213>
- DGA. 2015. Atlas del agua - Chile 2016. Parte I. Ministerio de Obras Públicas. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Atlas-2016parte1-17marzo2016b.pdf>
- Dickinson J.E, Land M, Faunt C.C, Leake S.A, Reichard E.G, Fleming J.B & Pool D.R 2006. Hydrologic framework refinement, ground-water flow and storage, water-chemistry analyses, and water-budget components of the Yuma area, Southwestern Arizona and Southeastern California. Scientific Investigation Report. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/sir/2006/5135/>
- Félix, O. I., Csavina, J., Field, J., Rine, K. P., Sáez, A. E. & Betterton, E. A. 2015. Use of Lead Isotopes to Identify Sources of Metal and Metalloid Contaminants in Atmospheric Aerosol from Mining Operations. *Chemosphere*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.057>
- Fuentes, M. 2017. Origen y procesos hidrogeoquímicos de los recursos hídricos en la cuenca del río Cuncumén. Universidad de Chile, Santiago. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148168>
- Herbert Jr., R. B., & Schippers, A. 2008. Iron isotope fractionation by biogeochemical processes in mine tailings. *Environmental Science & Technology*, 42(4), 1117–1122. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es071616s>
- Herrera, C., Gamboa, C., Custodio, E., Jordan, T., Godfrey, L., Jódar, J., Luque, J. A., Vargas, J. & Sáez, A. 2018. Groundwater origin and recharge in the hyperarid Cordillera de la Costa, Atacama Desert, northern Chile. *Science of the Total Environment* 624, 114-132.
- Kimball, B. E., Mathur, R., Dohnalkova, A. C., Wall, A. J., Runkel, R. L. & Brantley, S. L. 2009. Copper isotope fractionation in acid mine drainage. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(5), 1247–1263. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.035>

- Křibek, B., Šípková, A., Ettler, V., Mihaljevič, M., Majer, V., Knésl, I., Mapani, B., Penížek, V., Vaněk, A., & Sracek, O. 2018. Variability of the copper isotopic composition in soil and grass affected by mining and smelting in Tsumeb, Namibia. *Chemical Geology*, 493, 121–135. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.035>
- Kusonwiriawong, C., Bigalke, M. B., Cornu, S., Montagne, D., Fekiacova, Z., Lazarov, M. & Wilcke, W. 2017. *Response of copper concentrations and stable isotope ratios to artificial drainage in a French Retisol*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.003>
- Lefticariu, L., Behum, P., Bender, K., & Lefticariu, M. 2017. Sulfur Isotope Fractionation as an indicator of biogeochemical processes in an AMD passive bioremediation system. *Minerals*, 7(3), 41. Disponible en <https://doi.org/10.3390/min7030041>
- Lenntech. 2018a. Cadmio (Cd) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. Disponible en <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>
- Lenntech. 2018b. Molibdeno (Mo) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/mo.htm>
- Lepitre, M.E., Allen, D.M., Mortensen, J.K. & Gabites, J.E. 2003. Differentiating sources of dissolved lead in mine waters using lead isotope techniques, Sullivan Mine, British Columbia. *Water Resources Research*, 39(1), HWC 1-1-HWC 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2001wr000606>
- Montero-Serrano, J. C., Martínez-Santana, M., Tribovillard, N., Riboulleau, A. & Garbán, G. 2009. Comportamiento geoquímico del molibdeno y sus isótopos en el ambiente sedimentario: Un resumen bibliográfico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/50718-19572009000200001>
- Mook W.G 2002. *Environmental isotopes in the hydrological cycle*. Principles and applications. Programa Hidrológico Internacional (PHI). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/363558762/Isotopos-ambientales-en-el-ciclo-hidrologico-principios-y-apli-pdf>
- Morán, B. J., Boutt, D. F., & Munk, L. A. 2019. *Stable and Radioisotope Systematics Reveal Fossil Water as Fundamental Characteristic of Arid Orogenic Scale Groundwater Systems*. *Water Resources Research*, 55(12), 11295–11315. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2019wr026386>

- Morgenstern, U., Stewart, M. K. & Stenger, R. 2010. Dating of streamwater using tritium in a post nuclear bomb pulse world: continuous variation of mean transit time with streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(11), 2289–2301. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/hess-14-2289-2010>
- Moser, H., Wolf, M., Fritz, P., Fontes, J.-Ch., Florkowski, T., & Payne, B. R. 1989. "Deuterium, oxygen-18, and tritium in Stripa groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(8), 1757–1763. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90296-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90296-2)
- OIEA. 2019. Organismo Internacional de Energía Atómica. Panorama de la hidrología isotópica. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/panorama-de-la-hidrologia-isotopica>
- Otero, N., Soler, A. 2001. Los isótopos de azufre como trazadores de la influencia de la minería potásica y la salinización de las aguas subterráneas de la cuenca del Llobregat (NE España). En Medina A., Carrera J., Vives L. (eds): *Las caras del Agua Subterránea*. Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeológica y Aguas Subterráneas.
- Petelet-Giraud, E., Klaver, G. & Negrel, P. 2009. Natural versus anthropogenic sources in the surface- and groundwater dissolved load of the Dommel river (Meuse basin): Constraints by boron and strontium isotopes and gadolinium anomaly. *Journal of Hydrology* 369, 336–349. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.029>
- Pérez-Rodríguez, N., Engström, E., Rodushkin, I., Nason, P., Alakangas, L. & Öhlander, B. 2013. Copper and iron isotope fractionation in mine tailings at the Laver and Kristineberg mines, northern Sweden. *Applied Geochemistry*, 32, 204–215. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.012>
- Planas, O. 2015. Tritio, un isótopo de hidrógeno, Combustible nuclear. *Energía Nuclear*. Disponible en: <https://energia-nuclear.net/funcionamiento-central-nuclear/combustible-nuclear/tritio>
- Raffino, M. 2020. Plomo. Argentina. Disponible en: <https://concepto.de/plomo/>
- Roebbert, Y., Rabe, K., Lazarov, M., Schuth, S., Schippers, A., Dold, B. & Weyer, S. 2018. Fractionation of Fe and Cu isotopes in acid mine tailings: Modification and application of a sequential extraction method. *Chemical Geology* 493, 67–79. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.026>

Uso de herramientas isotópicas para estudios de problemas hidrológico-ambientales

- Santibáñez, F. 2016. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. Ministerio de Agricultura, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. ODEPA, Santiago. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2016/12/RecursosHidricosCambioClimatico.pdf>
- Schleicher, N. J., Dong, S., Packman, H., Little, S. H., Ochoa Gonzalez, R., Najorka, J., Sun, Y. & Weiss, D. J. 2020. A Global Assessment of Copper, Zinc, and Lead Isotopes in Mineral Dust Sources and Aerosols. *Frontiers in Earth Science* 8, 1-20. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00167>
- Seiler, R. L. 2005. Combined use of ^{15}N and ^{18}O of nitrate and ^{11}B to evaluate nitrate contamination in groundwater. *Applied Geochemistry*, 20(9), 1626–1636. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.04.007>
- Sivry, Y., Riotte, J., Sonke, J. E., Audry, S., Schäfer, J., Viers, J., Blanc, G., Freydier, R. & Dupré, B. 2008. Zn isotopes as tracers of anthropogenic pollution from Zn-ore smelters The Riou Mort–Lot River system. *Chemical Geology* 255, 295-304. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.038>
- Skierszkan, E. K., Mayer, K. U., Weis, D. & Beckie, R. D. 2016. Molybdenum and zinc stable isotope variation in mining waste rock drainage and waste rock at the Antamina mine, Peru. *Science of the Total Environment* 550, 103-113. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.053>
- Skierszkan, E. K., Stockwell, J. S., Dockrey, J. W., Weis, D., Beckie, R. D. & Mayer, K. U. 2017. Molybdenum (Mo) stable isotopic variations as indicators of Mo attenuation in mine waste-rock drainage. *Applied Geochemistry* 87, 71-83. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.008>
- SNE. s.f. Nitrógeno. Sociedad Nuclear Española. Disponible en <https://www.sne.es/diccionario-nuclear/nitrogeno/>
- Soler, A., Canals, A., Goldstein, S.L., Otero, N., Antich, N., Spangenberg, J. 2001. Sulfur and strontium isotope composition of the Llobregat river: tracer of natural and anthropogenic chemicals in stream waters. Departamento de cristalografía, mineralogía y depósito de minerales. Universidad de Barcelona.
- Soler, A., Canals, A. & Antich, N. 2004. La relación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ una nueva herramienta medioambiental para trazar el origen de la contaminación: el ejemplo del Río Cardener, Cuenca del Río Llobregat. Departamento de cristalografía, mineralogía y depósito de minerales. Universidad de Barcelona.

- SONAMI. 2017. Sociedad Nacional de Minería. Fundamentos y Desafíos para el Desarrollo Minero. Disponible en: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2017/06/Fundamentos-y-Desaf%C3%ADos-para-el-Desarrollo-Minero-2017.pdf>
- SONAMI. 2018. Sociedad Nacional de Minería. *Informe consumo de agua en minería 2018*. Disponible en: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2020/06/informe-de-agua-2018.pdf>
- Stewart M. 2012. A 40-year record of carbon-14 and tritium in the Christchurch groundwater system, New Zealand: Dating of young samples with carbon-14. *Journal of Hydrology* 430–431, 50–68. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.046>
- Toro J. C., Ortúzar J, Zamorano J, Cuadra P, Hermosilla J, Sprohnlé C. 2012. Protracted Magmatic-Hydrothermal History of the Río Blanco-Los Bronces District, Central Chile: Development of World's Greatest Known Concentration of Copper. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/292259440_Protracted_magmatic_hydrothermal_history_of_the_Rio_Blanco_Los_Bronces_district_Central_Chile_development_of_world's_greatest_known_concentration_of_copper
- Universidad de Chile. 2019. Informe país – Estado del medio ambiente en Chile 2018. Instituto de asuntos públicos. Centro de análisis de políticas públicas. Disponible en: <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/12/Informe-pais-estado-del-medio-ambiente-en-chile-2018.pdf>
- Universidad Complutense. s.f. Plomo – Fundamentos y campos de aplicación de la sistemática. UCM-Geocronología y geoquímica isotópica. Disponible en <https://www.ucm.es/geocronologia/plomo>
- Valenzuela, L., Ramírez-Hernández, J., & Palomares, R.B. 2013. Composición Isotópica del Agua Subterránea y su Relación con la Salinidad en el Valle de San Luis Río Colorado en Sonora, México. *Información Tecnológica*, 24(2), 57–66. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/s0718-07642013000200008>
- Viers, J., Grande, J. A., Zouiten, C., Freydier, R., Masbou, J., Valente, T., Torre, M.-L. de la, Destrigneville, C. & Pokrovsky, O. S. 2018. Are Cu isotopes a useful tool to trace metal sources and processes in acid mine drainage (AMD) context? Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.133>

- Vilomet, J. D., Angeletti, B., Moustier, S., Ambrosi, J. P., Wiesner, M., Bottero, J. Y., & Chatelet-Snidaro, L. 2001. Application of Strontium Isotopes for Tracing Landfill Leachate Plumes in Groundwater. *Environmental Science & Technology*, 35(23), 4675–4679. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es000169c>
- Wiederhold, J. G. 2015. Metal Stable Isotope Signatures as Tracers in Environmental Geochemistry. *Environmental Science and Technology*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/271709805_Metal_Stable_Isotope_Signatures_as_Tracers_in_Environmental_Geochemistry
- Wolkersdorfer, C., Nordstrom, D., Beckie, R., Cicerone, D., Elliot, T., Edraki, M., Valente, T., Alves, S., Kumar, P., Oyarzún, R., Soler, A. 2020. Guidance for the Integrated Use of Hydrological, Geochemical, and Isotopic Tools in Mining Operations. *Mine Water the Enviromenta* 39, pages204–228. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-020-00666-x>
- WRI. 2020. Domestic Water Use Grew 600% Over the Past 50 Years. World Resources Institute. Washington DC, USA. Disponible en: <https://www.wri.org/our-work/topics/water>
- Yang, W.J., Ding, K.B., Zhang, P., Qiu, H., Cloquet, C., Wen, H.D., Morel, J.L., Qiu, R.L. & Tang, Y.T. 2019. Cadmium stable isotope variation in a mountain area impacted by acid mine drainage. *Science of The Total Environment*, 646 (1), 696–703.
- Zhong, Q., Zhou, Y., Tsang, D. C. W., Liu, J., Yang, X., Yin, M., Wu, S., Wang, J., Xiao, T. & Zhang, Z. 2020. Cadmium isotopes as tracers in environmental studies: A review. *Science of the Total Environment*, 736, 139585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139585>



Universidad de Concepción

USO DE HERRAMIENTAS ISOTÓPICAS PARA ESTUDIOS DE PROBLEMAS HIDROLÓGICO-AMBIENTALES

Pía Urrea Olmedo / Ricardo Oyarzún Lucero
José Luis Arumí / Leopoldo Gutiérrez

Serie Comunicacional CRHIAM

