



# IAEA BULLETIN

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

La publicación emblemática del OIEA | Abril de 2019

En línea en  
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)



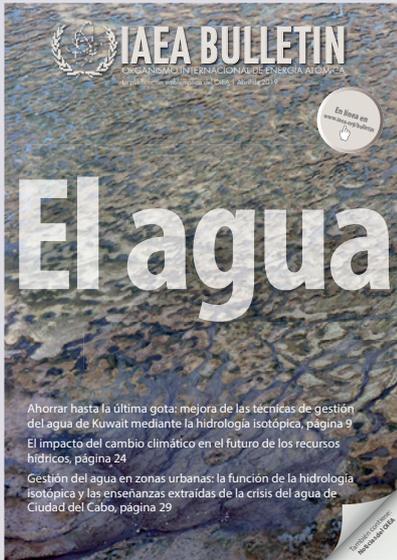
# El agua

Ahorrar hasta la última gota: mejora de las técnicas de gestión del agua de Kuwait mediante la hidrología isotópica, página 9

El impacto del cambio climático en el futuro de los recursos hídricos, página 24

Gestión del agua en zonas urbanas: la función de la hidrología isotópica y las enseñanzas extraídas de la crisis del agua de Ciudad del Cabo, página 29

También contiene:  
Noticias del OIEA



### EL BOLETÍN DEL OIEA

es una publicación de la

Oficina de Información al Público  
y Comunicación (OPIC)

Organismo Internacional de Energía Atómica  
Vienna International Centre  
PO Box 100, 1400 Viena, Austria  
Teléfono: (43 1) 2600-0  
iaeabulletin@iaea.org

Directora editorial: Laura Gil

Editor: Miklos Gaspar

Editor colaborador: Nicole Jawerth

Diseño y producción: Ritu Kenn

El BOLETÍN DEL OIEA puede consultarse en línea en  
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Podrá reproducirse libremente parte del material del OIEA contenido en el *Boletín del OIEA* siempre que se cite su fuente. En caso de que el material que quiera volverse a publicar no sea de la autoría de un miembro del personal del OIEA, deberá solicitarse permiso al autor o a la organización que lo haya redactado, salvo cuando se trate de una reseña.

Las opiniones expresadas en los artículos firmados que figuran en el *Boletín del OIEA* no representan necesariamente las del Organismo Internacional de Energía Atómica y este declina toda responsabilidad al respecto.

Fotografía de la portada:

Costa durante la marea baja, Golfo Pérsico (Kuwait)  
(Fotografía: D. Calma/OIEA)

Síguenos en:



La misión del Organismo Internacional de Energía Atómica es evitar la proliferación de las armas nucleares y ayudar a todos los países, especialmente del mundo en desarrollo, a sacar provecho de los usos de la ciencia y la tecnología nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física.

El OIEA, creado en 1957 como organismo independiente de las Naciones Unidas, es la única organización del sistema de las Naciones Unidas especializada en tecnología nuclear. Por medio de sus laboratorios especializados, únicos en su clase, transfiere conocimientos y competencias técnicas a sus Estados Miembros en esferas como la salud humana, la alimentación, el agua, la industria y el medio ambiente.

El OIEA, que, además, proporciona una plataforma mundial para la mejora de la seguridad física nuclear, ha creado la *Colección de Seguridad Física Nuclear*, cuyas publicaciones ofrecen orientaciones a ese respecto que gozan del consenso internacional. La labor del OIEA se centra igualmente en ayudar a reducir al mínimo el riesgo de que los materiales nucleares y otros materiales radiactivos caigan en manos de terroristas y criminales o de que las instalaciones nucleares sean objeto de actos dolosos.

Las normas de seguridad del OIEA proporcionan un sistema de principios fundamentales de seguridad y reflejan un consenso internacional sobre lo que constituye un alto grado de seguridad para proteger a la población y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante. Esas normas han sido elaboradas pensando en que sean aplicables a cualquier tipo de instalación o actividad nuclear destinada a fines pacíficos, así como a las medidas protectoras encaminadas a reducir los riesgos radiológicos existentes.

Mediante su sistema de inspecciones, el OIEA también verifica que los Estados Miembros utilicen los materiales e instalaciones nucleares exclusivamente con fines pacíficos, conforme a los compromisos contraídos en virtud del Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares y otros acuerdos de no proliferación.

La labor del OIEA es polifacética y se lleva adelante, con participación de muy diversos asociados, a escala nacional, regional e internacional. Los programas y presupuestos del OIEA se establecen mediante decisiones de sus órganos rectores: la Junta de Gobernadores, compuesta por 35 miembros, y la Conferencia General, que reúne a todos los Estados Miembros.

El OIEA tiene su Sede en el Centro Internacional de Viena y cuenta con oficinas sobre el terreno y de enlace en Ginebra, Nueva York, Tokio y Toronto. Además, tiene laboratorios científicos en Mónaco, Seibersdorf y Viena, y proporciona apoyo y financiación al Centro Internacional de Física Teórica "Abdus Salam", en Trieste (Italia).

# Entender los recursos hídricos del mundo

Yukiya Amano, Director General del OIEA

El agua es un recurso muy valioso del que depende la vida en la Tierra. Aun así, sabemos muy poco acerca de cuánta agua tenemos, dónde se encuentra exactamente y cuánto tiempo durarán los suministros. De toda el agua dulce del planeta, el 98 % se encuentra escondida bajo tierra. A fin de protegerla de amenazas como la extracción excesiva y la contaminación, y poder gestionarla de manera sostenible para las generaciones futuras, debemos estudiar muy bien nuestra agua subterránea.

El OIEA apoya a expertos nacionales en esa misión fomentando el uso de técnicas isotópicas y transfiriendo conocimientos científicos. Los datos que se reúnen mediante esas técnicas ayudan a mejorar las políticas de gestión del agua.

Apoyar a los Estados Miembros en la gestión y protección de sus suministros de agua es parte de nuestro mandato, “Átomos para la paz y el desarrollo”. Alentamos a los países a que aprovechen plenamente las técnicas nucleares con el fin de mejorar todos los aspectos de la vida de su población y cuidar del medio ambiente. Para ello, la conservación de los recursos hídricos es un elemento esencial.

En este número del *Boletín del OIEA* se abarca el uso de técnicas nucleares en el campo de la hidrología isotópica y la labor que realizamos en el OIEA para poner esas técnicas a disposición de nuestros Estados Miembros. Se ofrece un panorama general de la ciencia (página 4) y se presentan países en los que nuestros esfuerzos conjuntos están marcando la diferencia. Por ejemplo, en la página 6 describimos cómo hidrólogos isotópicos de la Argentina han estado recopilando datos para que los encargados de formular políticas puedan diseñar modelos mejorados de gestión del agua en todo el país.

Las autoridades de Kuwait resaltan sus planes de utilizar el agua de manera más sostenible con el apoyo del OIEA (página 9), mientras que investigadores de Filipinas explican cómo confirmaron que el agua subterránea del norte de su país era potable (página 12). En la página 14 rastreamos el origen de

agua contaminada en Mauricio, y en la página 16 descubrimos ricas masas de agua que se encontraban ocultas bajo tierra en la región semiárida del Sahel.

Este número del *Boletín del OIEA* también incluye una sección sobre tecnología, en la que se muestran métodos de hidrología isotópica que el OIEA ha desarrollado para los Estados Miembros. Algunos de esos métodos son la técnica de datación con tritio-helio 3 (página 20), empleada para determinar la edad precisa del agua joven, y el modelo del balance hídrico mediante isótopos (página 24), que puede ayudar a los científicos a predecir los efectos del cambio climático en los recursos hídricos.

El lector encontrará información acerca de la función de la hidrología isotópica en la protección del medio ambiente durante la fracturación (página 22) y sobre cómo el OIEA comprueba la capacidad de que disponen los laboratorios de todo el mundo para analizar agua (página 26), mientras que en la página 18 se presenta la red mundial de monitorización de isótopos que el OIEA ha establecido en cooperación con la Organización Meteorológica Mundial.

Este año se celebra la 15ª edición del Simposio Internacional sobre Hidrología Isotópica, que reúne a destacados especialistas en recursos hídricos y medio ambiente de todo el mundo con el objetivo de promover una mejor comprensión de los inmensos beneficios que la hidrología isotópica puede aportar para ayudar al mundo a responder a un entorno global en rápida transformación.

Espero que esta edición del *Boletín del OIEA* permita al lector hacerse una idea de esta amplia y fascinante aplicación de la tecnología nuclear.



(Fotografía: L. Potterton/OIEA)



(Fotografía: Escuela Superior Politécnica del Litoral/EPSON, Ecuador)



(Fotografía: L. Gil/OIEA)

## Prefacio

### **1 Entender los recursos hídricos del mundo**

### **4 Panorama de la hidrología isotópica**

## Historias destacadas



### **6 La Argentina aplica técnicas isotópicas al agua**



### **9 Ahorrar hasta la última gota: mejora de las técnicas de gestión del agua de Kuwait mediante la hidrología isotópica**



### **12 Un estudio concluye que el agua de Tacloban, en Filipinas, es apta para el consumo**



### **14 Los isótopos ayudan a rastrear el origen de la contaminación del agua en las zonas urbanas de Mauricio**



### **16 La utilización de técnicas isotópicas para trazar mapas y analizar los recursos de aguas subterráneas en el Sahel**

## Tecnología



### **18 La Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación**



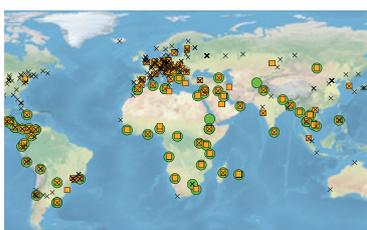
## 20 Gestión del balance hidrológico mediante la técnica del tritio/helio 3



## 22 Fracturación hidráulica: cómo la hidrología isotópica puede apoyar las evaluaciones ambientales para proteger las aguas subterráneas



## 24 El impacto del cambio climático en el futuro de los recursos hídricos



## 26 Pasar la prueba

El OIEA evalúa la calidad de los análisis de agua realizados por los laboratorios

### Panorama mundial

## 29 Gestión del agua en zonas urbanas: la función de la hidrología isotópica y las enseñanzas extraídas de la crisis del agua de Ciudad del Cabo

— Jodie Miller

## 31 La contaminación y la renovación del agua subterránea a través de la representación gráfica de los isótopos

— Joel Podgorski, Michael Berg y Rolf Kipfer

### Noticias del OIEA

## 33 Un nuevo dispositivo de salvaguardias refuerza las prácticas de verificación por el OIEA del combustible nuclear gastado

## 33 El OIEA celebra un taller en Uzbekistán sobre la selección y la evaluación de emplazamientos para centrales nucleares

## 34 El papel de las técnicas nucleares en la producción de alimentos en China

# Panorama de la hidrología isotópica

Lucía Ortega y Laura Gil



Las técnicas isotópicas permiten a los científicos comprender los componentes del ciclo del agua, lo que les ayuda a evaluar mejor la cantidad, la calidad y la sostenibilidad del agua.

El agua subterránea es el componente más desconocido del ciclo del agua. Los científicos emplean isótopos naturales como trazadores para averiguar si hay recarga del agua subterránea, de dónde procede, cómo se desplaza por debajo de la superficie terrestre y si es vulnerable a la contaminación y a los cambios de las condiciones climáticas.

El agua procedente de distintos lugares tiene una firma isotópica distinta o una “huella” única. Los científicos se sirven de estas “huellas” para rastrear el movimiento del agua por todo el ciclo del agua, desde la evaporación, la precipitación y la infiltración hasta la escorrentía y la evapotranspiración, así como el posterior regreso al océano o la atmósfera y la repetición del ciclo.

## ¿Qué son los isótopos?

Un elemento químico, como el hidrógeno, está formado únicamente por un tipo de átomo que, a su vez, presenta distintas variedades. Esas variedades de átomos reciben el nombre de isótopos. Todos ellos tienen las mismas características químicas y el mismo número de protones y electrones. Lo único que los diferencia es el número de neutrones. Esta distinción hace que difiera el peso de cada isótopo, lo que resulta esencial para los estudios hidrológicos.

La hidrología isotópica utiliza tanto isótopos estables como inestables. Los isótopos estables no son radiactivos, es decir, no emiten radiación. Los isótopos inestables o radioisótopos experimentan decaimiento radiactivo y, por tanto, son radiactivos.

A continuación, se ofrece una visión general sobre el funcionamiento de la hidrología isotópica.

## El origen y el transporte del agua en el ciclo hidrológico

Cada molécula de agua ( $H_2O$ ) está formada por dos átomos de hidrógeno (H) y uno de oxígeno (O). No obstante, estos átomos no siempre son iguales: unos isótopos son más ligeros y otros más pesados. Los científicos utilizan equipos analíticos de gran precisión para medir estas minúsculas diferencias de peso en las muestras de agua. ¿Por qué?

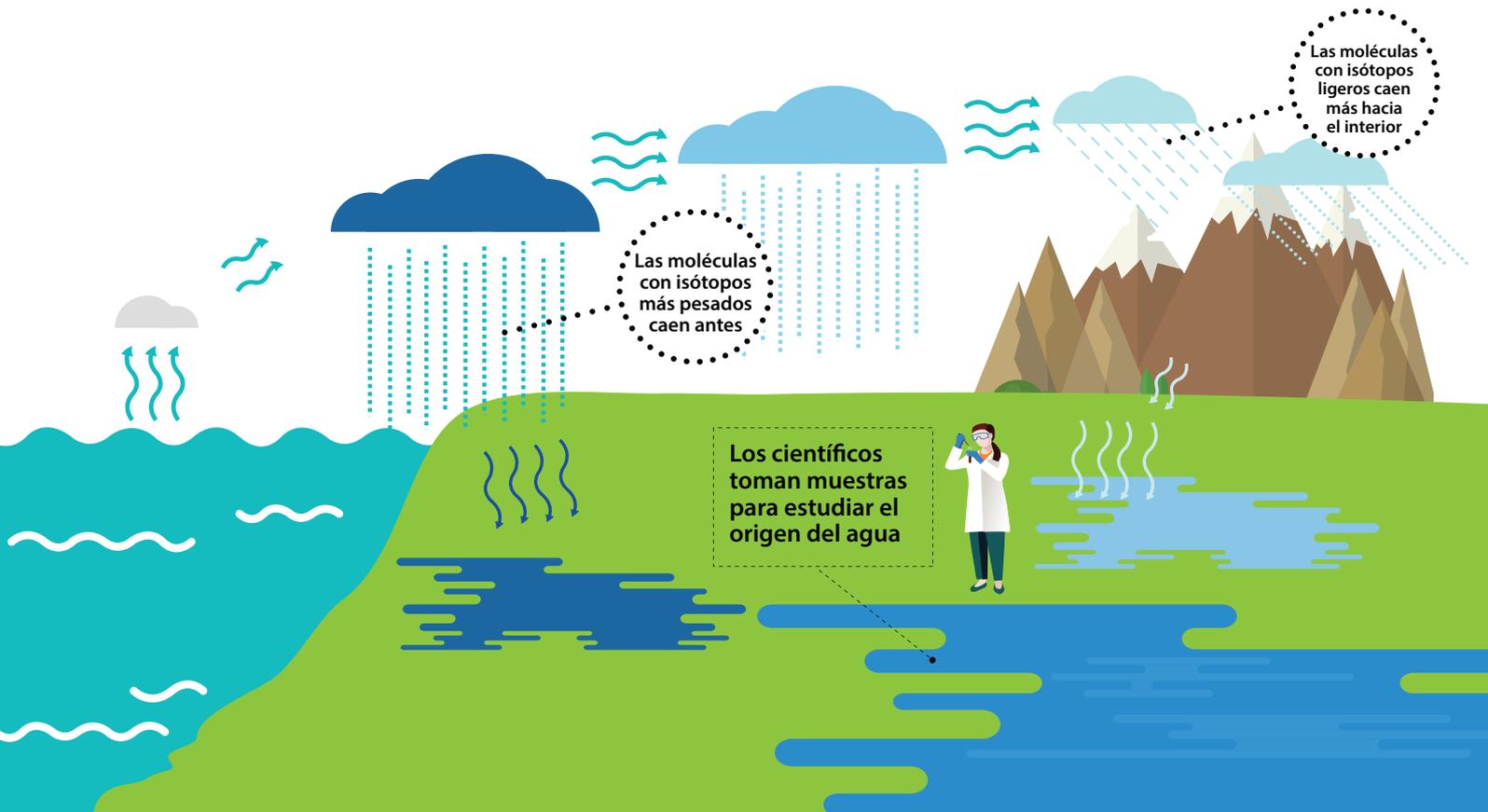
Cuando el agua de mar se evapora, las moléculas que contienen isótopos más ligeros suelen ser las primeras en ascender y formar nubes con firmas isotópicas específicas. Estas nubes contienen una mezcla de moléculas de agua que caen en forma de lluvia. Las moléculas de agua con isótopos más pesados caen en primer lugar. Una vez que las nubes pierden estos isótopos y viajan hacia el interior, los más ligeros caen en mayor proporción.

Cuando el agua cae en la tierra, llena lagos, ríos y acuíferos. Al medir las relaciones entre los isótopos pesados y los ligeros en estas masas de agua, los científicos pueden descifrar el origen y el movimiento del agua.

## La edad del agua subterránea

Los isótopos son el instrumento más eficaz y poderoso disponible para estimar la edad, la vulnerabilidad y la sostenibilidad de los recursos hídricos. Cuando el agua subterránea de un acuífero es “antigua”, el flujo del agua es lento y el acuífero puede tardar mucho tiempo en recargarse. En cambio, las aguas subterráneas jóvenes se renuevan fácil y rápidamente por medio del agua de lluvia, a pesar de ser muy susceptibles a la contaminación y a los cambios de las condiciones climáticas. El conocimiento de la edad del agua da a los científicos y los Gobiernos una idea clara de la rapidez con la que los acuíferos se recargan.

En hidrología, se utilizan algunos radioisótopos naturales presentes en el agua, tales como el tritio ( $^3H$ ), el carbono 14 ( $^{14}C$ ) y radioisótopos de gases nobles, para estimar la edad del agua subterránea, que puede ir de unos pocos meses hasta millones de años.



Dado que estos isótopos decaen con el paso del tiempo, su abundancia disminuye a medida que pasan los años. Cuanto más altos son los niveles, más joven es el agua, y cuanto más bajos, más antigua. Por ejemplo, el agua subterránea con cantidades detectables de tritio puede llegar hasta los 60 años aproximadamente, mientras que si no contiene este isótopo ha de ser más antigua. Mientras el tritio se emplea para datar el agua subterránea que acaba de recargarse, es decir, que no supera los 60 años de edad, el carbono 14 se utiliza para aguas de hasta 40 000 años de antigüedad y el kriptón 81, para aquellas que pueden alcanzar un millón de años (véase la página 21).

### La calidad del agua

Los contaminantes en las aguas superficiales y subterráneas proceden de diversas fuentes, tales como la agricultura, la industria o los excrementos humanos, o pueden estar presentes de forma natural debido a procesos geoquímicos que se dan en los acuíferos. La agricultura, la industria y los hogares producen distintos tipos de contaminantes. Mediante el estudio de la composición química e isotópica del contaminante, los científicos pueden determinar su origen.

Por ejemplo, el ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), compuesto de nitrógeno y oxígeno, es un contaminante común. El nitrógeno tiene dos isótopos estables de distinto peso. Esta diferencia de peso no es la misma en los excrementos humanos y en los fertilizantes. Estos últimos utilizan el nitrógeno del aire, mientras que las

personas y los animales llevan a cabo un proceso biológico que transforma el nitrógeno en formas distintas. Por lo tanto, es posible identificar los contaminantes derivados de distintas fuentes sobre la base de esas diferencias de peso entre isótopos.

El primer paso para combatir los problemas de la calidad del agua es conocer el origen de los contaminantes. Los datos recabados por los especialistas en hidrología isotópica ayudan a los responsables de formular políticas en la planificación estratégica y la gestión de los recursos hídricos.

El OIEA presta apoyo a científicos de todo el mundo mediante el fomento de técnicas isotópicas y la transferencia del conocimiento científico a profesionales de la hidrología locales. Si desea saber más al respecto, lo invitamos a seguir leyendo.



# La Argentina aplica técnicas isotópicas al agua

Laura Gil

En la Argentina, como en muchas partes del mundo, existe el riesgo de sobreexplotación y contaminación del agua. A fin de protegerla, los científicos estudian hasta los más mínimos detalles con ayuda de la tecnología nuclear y el apoyo del OIEA.

“La Argentina tiene la suerte de disponer de una gran cantidad de agua por habitante, aunque esta se distribuye de forma muy desigual por todo el país”, declara Daniel Cicerone, Gerente de Gestión Ambiental de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de la Argentina. “En algunas regiones, saber si el agua que utilizamos a diario se recarga periódicamente, si se está agotando o si existe riesgo de contaminación puede marcar la diferencia entre la pobreza y la prosperidad.”

La ciencia que estudia estas cuestiones se denomina hidrología isotópica, una disciplina que, según Douglas Kip Solomon, Profesor de Geología y Geofísica en la Universidad de Utah (Estados Unidos), “es uno de los recursos más eficaces y fiables que existen para evaluar de manera exhaustiva el agua subterránea.”

“La mayor parte del agua dulce y utilizable del mundo se encuentra a nivel del suelo, pero casi todo el agua que está a nuestro alcance es agua superficial”, apunta el Sr. Solomon, que ayuda a los expertos de la Argentina a cartografiar sus aguas con ayuda del OIEA. “Es muy importante que conozcamos las interacciones entre las aguas superficiales y las subterráneas para saber cómo gestionar adecuadamente estos recursos y protegerlos.”



**“La Argentina tiene la suerte de disponer de una gran cantidad de agua por habitante, aunque esta se distribuye de forma muy desigual por todo el país. En algunas regiones, saber si el agua que utilizamos a diario se recarga periódicamente, si se está agotando o si existe riesgo de contaminación puede marcar la diferencia entre la pobreza y la prosperidad.”**

— Daniel Cicerone, Gerente de Gestión Ambiental, Comisión Nacional de Energía Atómica (Argentina)

## Reservas ocultas

Desde principios de 2016, los especialistas argentinos en hidrología isotópica recopilan e interpretan los datos de dos regiones estratégicas con ayuda del OIEA. La idea es que los responsables de la formulación de políticas empleen esta información y diseñen modelos mejorados de gestión del agua (modelos hidrológicos) para ambas regiones.

Estas dos regiones se eligieron por distintas razones. Una de las dos es el árido valle de Mendoza, al oeste de la Argentina, donde la población depende del agua dulce subterránea de los acuíferos Uspallata y Yalguaraz, así como de otros acuíferos de menor tamaño. Las autoridades tienen mucho interés por saber si esta agua se está extrayendo de forma sostenible y si los acuíferos tienen capacidad suficiente para favorecer una mayor utilización del agua.

“Necesitamos el agua para todo. Es el pan nuestro de cada día”, afirma Sergio Cirauqui, empleado en un negocio de aventura situado en la cima de una montaña en Uspallata que realiza excursiones en kayak y descenso de ríos. “Somos muy conscientes de que el agua es un recurso finito y de que tenemos que cuidarlo. Y como recurso finito que es, su uso debería ser casi sagrado”.

Especialistas argentinos en hidrología isotópica y expertos internacionales y del OIEA llevan más de un año recorriendo las montañas y las llanuras de Mendoza, recogiendo agua de pozos, lagos y ríos. Una vez en los laboratorios, interpretan los resultados para tener una imagen más clara de los recursos disponibles.

**En la región argentina de Mendoza los científicos recurren a la hidrología isotópica para estudiar las aguas subterráneas.**

(Fotografía: L. Gil/OIEA)





### Especialistas en hidrología isotópica recogen muestras de agua en Mendoza, al oeste de la Argentina.

(Fotografía: L. Gil/OIEA)

“Intentamos descubrir exactamente cómo se mueve el agua por el interior de los acuíferos, cómo interactúa con los ríos y cuánta queda”, explica Sandra Ibáñez, especialista en hidrología isotópica en la Universidad de Cuyo, en Mendoza, que participa en un proyecto de cooperación técnica del OIEA en el país.

Si tienen en cuenta esos datos, los encargados de formular políticas están en mejores condiciones para establecer normas de utilización del agua destinada al consumo, la agricultura y la industria. El conocimiento de que el agua superficial está infiltrándose en las aguas subterráneas, por ejemplo, puede dar lugar a normativas más estrictas sobre niveles de contaminación aceptables.

“Una vez que tengamos los resultados, podremos decidir qué actividades comerciales promover en Mendoza”, apunta Juan Andrés Pina, Subdirector de la División de Aguas Subterráneas del Departamento General de Irrigación de Mendoza.

La segunda región objeto de estudio es el cauce de Los Gigantes, en Córdoba, un antiguo complejo de extracción de uranio situado a unos 700 km al oeste de Buenos Aires en el que se llevan a cabo actividades de rehabilitación ambiental y donde los especialistas en hidrología isotópica

trabajan para tener más información de la calidad del agua subterránea y su posible vulnerabilidad a la contaminación.

Por conducto del proyecto del OIEA, los científicos han controlado la salubridad y la calidad del agua que recargaba el embalse del lago San Roque, que es una fuente de agua para el consumo humano en la ciudad de Córdoba.

“Este estudio interdisciplinario e interinstitucional ayudará a las autoridades a mejorar el modelo conceptual y los conocimientos hidrológicos de la zona y mejorará la rehabilitación del lugar”, afirma Daniel Martínez, Geólogo e Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Los proyectos de cooperación técnica del OIEA han sido fundamentales para transferir conocimientos y tecnología a instituciones nacionales y locales, señala Raúl Ramírez García, Jefe de Sección del Departamento de Cooperación Técnica del OIEA.

“La información nueva obtenida mediante técnicas isotópicas ayudará a controlar los recursos hídricos y respaldará el tipo de toma de decisiones que culminará en beneficios sociales y económicos para la población de esas regiones”, concluye el Sr. Ramírez García.

# Ahorrar hasta la última gota: mejora de las técnicas de gestión del agua de Kuwait mediante la hidrología isotópica

Aabha Dixit

Los países áridos como Kuwait dan cada vez más prioridad a las técnicas que utilizan isótopos estables a fin de evaluar sus recursos de aguas subterráneas y hacer frente a la dificultad de gestionarlos de forma sostenible para sus poblaciones en aumento.

“En Kuwait no hay ríos ni lagos permanentes y el agua subterránea es el único recurso de agua natural que tenemos. La media de precipitaciones es de tan solo 115 milímetros anuales y no hay corrientes de agua dulce”, expone Muhamad Al Rashed, Director Ejecutivo del Centro de Investigación

Científica del KISR prepara en una estufa de incubación de cultivos las muestras de agua que someterá a un análisis de bacterias. Las técnicas isotópicas son clave para estudiar la calidad del agua. (Fotografía: D. Calma/OIEA)



---

**“Tenemos que considerar todas las opciones de agua potable disponibles y ahí es donde la tecnología isotópica contribuye a las investigaciones, ya que tiene en cuenta la utilización óptima de todos los recursos hídricos necesarios para el desarrollo sostenible.”**

*— Khaled Hadi, Director  
de la División de Operaciones,  
Centro de Investigación del Agua,  
Instituto de Investigación  
Científica de Kuwait*

---

del Agua del Instituto de Investigación Científica de Kuwait (KISR). De ahí la importancia de contar con políticas eficaces de gestión del agua para garantizar la calidad y la cantidad del agua disponible y satisfacer la demanda de los más de cuatro millones de habitantes del país.

Las reservas de aguas subterráneas de Kuwait se encuentran principalmente en el norte del país y su recarga es limitada, ya que únicamente un pequeño porcentaje del agua pluvial llega a esos acuíferos.

Las técnicas de hidrología isotópica son uno de los principales métodos científicos empleados por los expertos en Kuwait para seguir el movimiento del agua dulce y evaluar la edad de las aguas subterráneas disponibles. Los diversos isótopos presentes en el agua funcionan como “marcadores”, que pueden utilizarse para determinar el origen, la edad, el movimiento y las interacciones del agua tanto en la superficie como debajo de ella (véase la página 4 para saber más). Los datos obtenidos y visualizados en forma de mapas hidrológicos permiten a los expertos tomar decisiones fundamentadas sobre la gestión sostenible de los recursos. El Sr. Al-Rashed y sus colegas han llevado a cabo varios estudios de hidrología isotópica sobre la gestión de las aguas subterráneas en Kuwait.

Con un consumo por cabeza de más de 400 litros diarios, Kuwait es uno de los países del mundo que más agua utiliza. Su tasa de extracción de agua subterránea es de 255 millones de metros cúbicos anuales. En cambio, el flujo de entrada natural a los acuíferos se estima en 67 millones de metros cúbicos al año. Debido a los escasos recursos de agua dulce que posee, Kuwait depende en gran medida de la desalación de agua de mar, que es un proceso costoso.

“Tenemos que considerar todas las opciones de agua potable disponibles y ahí es donde la tecnología isotópica contribuye a las investigaciones, ya que tiene en cuenta la utilización óptima de todos los recursos hídricos necesarios para el desarrollo sostenible”, indica Khaled Hadi, Director de la División de Operaciones del Centro de Investigación del Agua en el KISR.

Como aclara Nader Al-Awadí, Comisionado Ejecutivo para la Cooperación Internacional del KISR, las iniciativas nacionales se centran en investigar los recursos de agua subterránea combinando el uso de la hidrología isotópica con los métodos fisicoquímicos, evaluar la recarga pluvial, determinar una estrategia óptima de producción de agua y evaluar la viabilidad de la recarga artificial de los acuíferos.

## Estudios relacionados con el agua y apoyo a los laboratorios

El OIEA ha prestado apoyo a Kuwait desde el año 2000 a través de diversos proyectos de cooperación técnica, lo que ha culminado en el conocimiento de los recursos de aguas subterráneas disponibles y las medidas correctoras necesarias para mejorar las políticas de gestión hídrica.

Por ejemplo, el proyecto de cooperación técnica respaldado por el OIEA sobre investigaciones isotópicas para evaluar la hidrología de las aguas subterráneas en Kuwait se centró en la obtención de datos isotópicos sobre las aguas subterráneas que se combinaron posteriormente con datos obtenidos de estudios anteriores sobre la cartografía isotópica de ese tipo de aguas a escala nacional. La aplicación de técnicas isotópicas ayudó a interpretar el origen, la edad y el movimiento de las aguas subterráneas, lo que es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Otro proyecto se ocupó de la evaluación de posibles fuentes de contaminación por nitratos y sulfatos de los yacimientos de aguas subterráneas de Kuwait mediante la caracterización isotópica. Entre otras cosas, se estudiaron los niveles de materiales radiactivos naturales en el agua subterránea. Los investigadores descubrieron que la principal fuente de sulfatos y nitratos en el agua subterránea es natural y no fruto de la actividad humana.

Algunas de las muestras de agua se envían al Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA, sito en Viena (Austria), para ser evaluadas.

El OIEA ha contribuido también a crear el Laboratorio de Hidrología Isotópica de Kuwait proporcionando instrumentos de última generación por conducto de sus proyectos de cooperación técnica. Entre otros ámbitos de asistencia para la creación de capacidad cabe mencionar la capacitación de científicos y la realización de investigaciones en diversos temas relacionados con el agua subterránea.

“El Gobierno de Kuwait valora mucho el papel decisivo que ha desempeñado el OIEA a través de sus actividades y su apoyo a los Estados Miembros para fomentar en todo el mundo la creación de capacidad, el establecimiento de contactos, el intercambio de conocimientos y el desarrollo de alianzas en diversos aspectos de los usos pacíficos de la ciencia y la tecnología nucleares”, concluye Samira A. S. Omar, Directora General del KISR.



# Un estudio concluye que el agua de Tacloban, en Filipinas, es apta para el consumo

Miklos Gaspar



**Las técnicas isotópicas han confirmado que el agua de la ciudad, almacenada en los depósitos que se ven en segundo plano en la imagen, y en los nuevos barrios de Tacloban es apta para el consumo.**

(Fotografía: M. Gaspar/OIEA)

El agua de bebida de la ciudad filipina de Tacloban, de 250 000 habitantes, es apta para el consumo, se recarga periódicamente y no se ve afectada por el mar. Aunque parezca una conclusión sencilla, para obtenerla han hecho falta años de investigaciones, el análisis de miles de muestras de agua y la utilización, con ayuda del OIEA y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), de técnicas isotópicas por los investigadores del Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares (PNRI).

Después de que la marejada ciclónica provocada por el tifón Haiyan, una de las tormentas tropicales de más intensidad jamás registrada, devastara buena parte de la ciudad y se cobrara la vida de miles de personas en 2013, las autoridades locales tuvieron que hacer frente a la abrumadora tarea de reconstrucción, que consistía, entre otras cosas, en trasladar a la población de las zonas más proclives a las inundaciones. Quedaba por saber si las olas que se habían llevado por delante a edificios y personas habían llegado al embalse de la ciudad.

Era de temer que la marejada ciclónica pudiera haber contaminado el acuífero, una capa subterránea de roca permeable con agua subterránea, que es la principal fuente de agua de la ciudad. Existía la posibilidad de que el agua hubiera dejado de ser apta para el consumo debido a la sal y otras sustancias contaminantes transmitidas por la inundación, como la materia orgánica de cadáveres humanos y animales. El PNRI recurrió al programa de cooperación técnica del OIEA en busca de ayuda para utilizar técnicas isotópicas a fin de caracterizar el acuífero.

## No todas las moléculas de agua son iguales

Aunque todas las moléculas de agua están compuestas por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, un pequeño porcentaje de esos átomos tienen neutrones de más en su núcleo. La proporción exacta depende de la antigüedad y el origen del agua. De ahí que los investigadores realicen análisis de la composición isotópica del agua subterránea para saber si el acuífero se está recargando, es decir, si recibe agua “nueva” procedente de las precipitaciones de forma periódica.

Los científicos instalaron 32 observatorios de aguas subterráneas y utilizaron técnicas convencionales y nucleares para caracterizar el agua. Hallaron bajos niveles de sodio y cloro, y concluyeron que el agua del mar no había llegado al acuífero. Como explica Raymond Sugang, investigador superior del PNRI al frente del proyecto, también observaron que la composición isotópica del agua del acuífero se asemeja a la del agua pluvial en la actualidad, lo que significa que el suministro de agua de la ciudad no corría peligro de extinguirse. “Tacloban es una ciudad en crecimiento con una economía floreciente, así que tranquiliza saber que sus aguas subterráneas se recargan con la lluvia”.

La concentración de nitrógeno y materia orgánica en el agua es muy baja, lo que indica que no hubo contaminación biológica. “Es probable que esos contaminantes en potencia decayeran antes de poder llegar al agua subterránea”, explica el Sr. Sugang.

El próximo paso en el proyecto es que el PNRI determine la tasa exacta de recarga del agua y que, partiendo de esos datos, formule recomendaciones de políticas al gobierno local para proteger el suministro de agua de la ciudad. “Me alegra saber que no hay peligro inminente, pero sigue siendo necesario contar con una política de consumo sostenible de agua”, añade.



## En busca de agua potable subterránea

En los últimos años, se ha desarrollado en la parte norte de Tacloban un nuevo distrito que aloja a muchas de las personas que perdieron sus hogares a consecuencia del tifón de 2013. La disponibilidad de agua en la zona, en la que residen 10 000 personas, es un problema y las investigaciones realizadas por el PNRI han demostrado que el agua subterránea de esta nueva zona habitada está contaminada con plomo y arsénico, por lo que no es apta para el consumo humano. La contaminación procede probablemente del vertedero no regulado que se encuentra en la frontera de la circunscripción, apunta el Sr. Sugcang.

Para Eddie Rasonabe, dirigente comunitario que reside de la zona, esta noticia fue un mazazo. “Ya sabemos que no

podemos utilizar los pozos y que, por ahora, tendremos que pagar por el agua”. Las bombas de mano construidas en un primer momento con la ayuda de organismos de ayuda internacionales explotan únicamente un acuífero poco profundo, y el agua emite un olor nauseabundo, explica el Sr. Rasonabe. Como consecuencia, tiene que comprar agua mineral para beber y cocinar, lo que es un gasto considerable para este padre de siete hijos y para muchos de sus vecinos. No obstante, hay una solución a la vista: el gobierno local ha contratado a empresas privadas para que traigan agua potable del acuífero no contaminado de la ciudad, y el PNRI utiliza isótopos para vigilar que el bombeo de agua subterránea de estos pozos de producción profundos cumpla los requisitos de calidad y para garantizar que el ritmo de extracción sea sostenible.

Según un estudio del PNRI, el agua del pozo de Eddie Rasonabe no es potable debido a un elevado contenido en plomo y arsénico. El vecindario se creó para alojar a las personas que habían perdido sus hogares a consecuencia del tifón Haiyan en 2013.

(Fotografía: M. Gaspar/OIEA)



# Los isótopos ayudan a rastrear el origen de la contaminación de las aguas urbanas de Mauricio

Luciana Viegas

Las actividades agrícolas, la eliminación ilegal de aguas residuales y la cría de animales podrían ser algunas de las fuentes de contaminación por nitrógeno de las vías fluviales urbanas de Port Louis, la capital de Mauricio, según las conclusiones preliminares de un estudio respaldado por el OIEA en que se utilizan técnicas isotópicas. A niveles excesivos, algunos compuestos de nitrógeno, como el nitrato, pueden acabar en las vías fluviales urbanas y representar un peligro para las personas y el medio ambiente.

“La contaminación por nitratos es un problema importante en el país”, afirma Yannick Fanny, Funcionario Científico del Laboratorio Nacional para el Medio Ambiente de Port Louis, la ciudad más grande y el centro económico de la isla, que tiene unos 200 000 habitantes. “El estudio fue un gran avance y las conclusiones preliminares indican que es muy probable que la contaminación por nitratos proceda del estiércol y los desechos de fosas sépticas, así como de la materia orgánica disuelta en el suelo”.

El nitrógeno es un fertilizante clave, muy utilizado desde mediados del siglo XX. Cuando se aplica en exceso, puede llegar a los ríos y las aguas subterráneas a través de la escorrentía agrícola, pero también a través del alcantarillado, los corrales de engorde y las actividades industriales.

El nitrato es un compuesto de nitrógeno y un nutriente esencial para las plantas. En cantidades excesivas, plantea un problema de salud pública, ya que puede afectar la capacidad de la sangre de transportar oxígeno por el cuerpo. Puede también provocar floraciones de algas en lagos y ríos, y reducir la biodiversidad y la capacidad de los ecosistemas acuáticos de apoyar valiosos servicios, como el turismo y la pesca comercial.

En 2016, después de que las autoridades hubieran detectado contaminación por nitratos alrededor de Port Louis, los científicos comenzaron a colaborar con el OIEA para utilizar técnicas isotópicas a fin de evaluar la procedencia de la contaminación por nitratos. Se hallaron contaminantes en arroyos y ríos, lo que ponía en peligro zonas protegidas, como la reserva ornitológica Rivulet Terre Rouge Estuary Bird Sanctuary. Las floraciones de algas tóxicas en el océano provocaron la muerte de peces y esto suscitó las quejas de los pescadores locales.

Las fuentes de tal contaminación pueden haber sido variadas: hogares con sistemas inadecuados de eliminación de aguas residuales, fosas sépticas en mal estado, vertidos industriales, actividades de cría de animales y actividades

agrícolas. A fin de adoptar con conocimiento de causa medidas para proteger los ríos y las aguas subterráneas, puede resultar útil a los encargados de formular políticas saber quién o qué causa la contaminación por nitratos.

Descifrar la procedencia de los nitratos presentes en las vías fluviales puede ser difícil. Como explica Ioannis Matiatos, especialista en hidrología isotópica del OIEA, “con la química tradicional puede saberse cuanta contaminación por nitrógeno existe en un río, pero no de dónde procede [...] Este tipo de información puede obtenerse analizando los isótopos del nitrato”.

Los científicos del Laboratorio Nacional para el Medio Ambiente recopilaron, con ayuda técnica, datos químicos e isotópicos en 14 estaciones fluviales y 15 pozos de sondeo de la ciudad, y determinaron los mecanismos que influyen en la calidad del agua de la zona. Con ayuda del programa de cooperación técnica del OIEA en forma de visitas de expertos, capacitación y equipo, tomaron muestras y analizaron los compuestos de nitrógeno en las vías fluviales de Port Louis. El método que emplearon consistió en analizar la particular marca isotópica del nitrato presente en las moléculas de agua examinando la composición isotópica de esas moléculas (encontrará más información al respecto en la página 5).

## Adopción de medidas

Los resultados del proyecto de cooperación técnica del OIEA constituirán la base de un completo informe con conclusiones y recomendaciones destinado a los funcionarios gubernamentales y las comunidades locales. En palabras del Sr. Fanny, “la adopción de medidas específicas por todas las partes interesadas podría contribuir a remediar o mejorar la situación rápidamente en esos entornos urbanos”.

La cooperación también puso en marcha mayores actividades de vigilancia del agua en Mauricio. Los científicos del Laboratorio Nacional para el Medio Ambiente han comenzado a elaborar mapas de las zonas que más contribuyen a la contaminación por nitrógeno en las vías fluviales y están recogiendo muestras de fuentes primarias para crear un inventario de firmas isotópicas con el fin de catalogar los contaminantes.

“En el futuro, cuando haya incidentes, las autoridades podrán emparejar rápidamente las muestras de agua con las fuentes de contaminación y saber de forma inmediata qué tipo de actividad puede ser la causante”, concluye el Sr. Matiatos.



Una especialista en hidrología isotópica toma muestras de agua en un lugar de Port Louis donde se ha detectado contaminación.

(Fotografía: J. Matiatos, OIEA)



# Técnicas isotópicas para cartografiar y analizar los recursos de aguas subterráneas del Sahel

Nathalie Mikhailova

A pesar de las sequías y la constante escasez de precipitaciones que han afectado al Sahel durante los últimos decenios, esta región alberga masas de aguas subterráneas ricas.

El aumento de la demanda de agua debido al crecimiento demográfico y la incertidumbre que afecta a los recursos hídricos como consecuencia de los efectos del cambio climático y del uso de la tierra llevan a plantearse cómo garantizar la inocuidad de este recurso y si existe en cantidades suficientes para atender el consumo, la producción alimentaria y la higiene. En el caso de una región semiárida como el Sahel, disponer de los instrumentos científicos adecuados para obtener más información sobre las reservas de agua subterránea puede significar contar con agua limpia a largo plazo.

Por medio de un proyecto de cooperación técnica del OIEA que se inició en 2012, científicos de Argelia, Benin, Burkina Faso, el Camerún, el Chad, Ghana, Malí, Mauritania, el Níger, Nigeria, la República Centroafricana, el Senegal y el Togo recibieron capacitación en materia de recogida de muestras de agua para la realización de análisis isotópicos a fin de llevar a cabo un estudio detallado de las reservas de agua subterránea. El proyecto abarcó tramos de cinco importantes sistemas acuíferos transfronterizos: el sistema acuífero de Iullemeden, el sistema de Liptako-Gourma-cuenca superior del Volta, la cuenca senegalomauritana, la Cuenca del Lago Chad y la cuenca Taoudeni.

A lo largo de cuatro años, se recolectaron más de 2000 muestras de agua de distintos acuíferos, tanto durante las estaciones secas como durante las húmedas.

“Utilizando trazadores isotópicos y químicos, los científicos pudieron recopilar información importante sobre el origen, los patrones de flujo, el tiempo de residencia y la tasa de renovación de las aguas subterráneas”, afirma Kamel Zouari, Profesor y Jefe de Laboratorio de la Escuela Nacional de Ingeniería de Sfax (Túnez), quien participó en el proyecto. “Además, determinaron las interacciones hidráulicas entre los acuíferos someros y los profundos, así como entre los acuíferos y el agua superficial. Esta información se ha incluido en una base de datos específica para cada cuenca.” Si desea obtener más información sobre las técnicas empleadas, consulte la página 4.

Esas actividades de investigación llevaron a la creación del primer gran panorama general de las aguas subterráneas del Sahel, que abarca una superficie de cinco millones de kilómetros cuadrados. “En general, los sistemas acuíferos situados en las distintas cuencas compartidas constituyen una considerable reserva de agua de buena calidad que puede cubrir la mayoría de las necesidades humanas”, declara el Sr. Zouari.

## Uso de la información para formular prácticas de gestión del agua

Científicos de cada uno de los países participantes elaboraron informes nacionales que pueden consultar sus respectivas autoridades hidrológicas para utilizarlos como base en la toma de decisiones. Por ejemplo, en el norte de Ghana, la monitorización rutinaria de la composición química e isotópica de las aguas subterráneas reveló la existencia de mecanismos de recarga y de fuentes de contaminación que hasta la fecha se habían pasado por alto.

“Utilizando isótopos estables del agua (oxígeno 18 e hidrógeno 2), descubrimos que las aguas subterráneas son meteóricas, es decir, que proceden de las precipitaciones locales”, afirma Enoch Asare, jefe de la División de Aguas Subterráneas de la Comisión de Recursos Hídricos de Ghana, que también señala que los análisis de tritio pusieron de manifiesto que las aguas subterráneas han recargado el acuífero durante los últimos 50 años. “Se utilizó nitrógeno 15 para determinar las fuentes de contaminación por nitratos en tramos de la cuenca del río Volta Blanco, y se observó que la contaminación provenía principalmente de excrementos humanos y animales.” Identificar la fuente de la contaminación puede ayudar a las autoridades a proteger el agua, ya que permite conocer cómo se recargan las aguas subterráneas, lo que es esencial para garantizar su sostenibilidad.

De la cantidad, la calidad y la tasa de recarga de las aguas subterráneas depende que puedan atender las necesidades humanas. La información sobre la fuente y la edad de las aguas subterráneas es necesaria para evaluar adecuadamente la sostenibilidad del recurso, especialmente en vista de las actividades de extracción en curso o previstas.

“Se espera que las actividades del proyecto puedan seguir mejorando la capacidad de las partes interesadas de comprender mejor el sistema hidrogeológico de Ghana y, así, formular políticas que salvaguarden la explotación de los recursos de aguas subterráneas, lo que garantizará la disponibilidad de agua en todo momento”, señala el Sr. Asare.

En 2018 dio inicio un proyecto de seguimiento para continuar integrando la gestión de los recursos de aguas subterráneas en el Sahel. El proyecto, liderado por Benin, el Camerún, Ghana, el Níger y Nigeria y que seguirá la metodología del Proyecto del OIEA sobre el Aumento de la Disponibilidad de Agua (I-WAVE), tendrá como objetivo identificar deficiencias en la información hidrológica nacional y elaborar planes adecuados de creación de capacidad.



La metodología del IWAVE consiste en efectuar un análisis de las deficiencias, celebrar consultas con las partes interesadas, formular una estrategia óptima para la gestión de las aguas subterráneas e identificar las capacidades técnicas fundamentales en las que se debe invertir.

La red existente de instituciones nacionales contribuirá a caracterizar, gestionar y monitorizar mejor los recursos de aguas subterráneas por medio de la hidrología isotópica y de técnicas convencionales.

**Investigadores de la Universidad de Bangui toman muestras de agua de un pozo en la República Centroafricana.**

(Fotografía: L. Gil/OIEA)





# La Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación

Desde 1961, el OIEA y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se encargan conjuntamente de la vigilancia a escala mundial de los isótopos del hidrógeno ( $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ) y del oxígeno ( $^{18}\text{O}$ ) en las precipitaciones.

El objetivo inicial de la red de monitorización de isótopos, conocida como Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación, o RMIP, era recopilar sistemáticamente información básica sobre el contenido isotópico de las precipitaciones a escala mundial para determinar variaciones temporales y espaciales de los isótopos ambientales en la precipitación. Con esta información, los científicos podían dictaminar el origen, el movimiento y la historia del agua. En apoyo de esta labor, el OIEA estableció el Laboratorio de Hidrología Isotópica.

Esta estructura, permitió empezar a acceder a información básica sobre los isótopos para la realización de investigaciones hidrológicas. Desde la década de los noventa, investigadores y profesionales de todo el mundo pueden consultar en línea estos datos, que actualmente se utilizan para estudiar los recursos hídricos y para interpretar material antiguo relacionado con el clima, así como las migraciones de los animales.

Hoy en día, la RMIP está integrada por más de 350 emplazamientos de muestreo activos en más de 90 países y territorios. Si bien el Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA sigue teniendo un papel esencial en el análisis de las muestras de precipitación obtenidas por medio de la RMIP, más de 60 laboratorios, varios de los cuales son el resultado de proyectos de cooperación técnica del OIEA, contribuyen a abordar este desafío analítico.

El OIEA gestiona la base de datos central de la RMIP, que cuenta con más de 130 000 registros isotópicos sobre la precipitación procedentes de más de mil emplazamientos. Asimismo, participa activamente en actividades de investigación y desarrollo con el objetivo de ayudar a los científicos a recoger muestras de precipitación. Por ejemplo, creó un dispositivo que permite tomar muestras de agua de lluvia sin riesgo de que estas se vean afectadas por los efectos de la evaporación y que es, además, fiable, de fácil utilización y requiere menos tratamiento preliminar en el laboratorio.

Tanto la información histórica como la actual de la base de datos de la RMIP se utiliza para validar y seguir mejorando los modelos de predicción del clima (véase la página 24), así como para otras aplicaciones.

Si desea más información sobre este tema, consulte el siguiente enlace: [h2o.iaea.org](http://h2o.iaea.org)



# La RMIP

en cifras

Más de 60  
laboratorios  
de análisis

Más de 90 Estados Miembros

Más de 350 emplazamientos  
de muestreo activos

Más de 1100 emplazamientos  
de monitorización

Más de 130 000  
registros isotópicos  
mensuales

# Gestión del balance hidrológico mediante la técnica del tritio/helio 3

Nicole Jawerth

Gestionar el agua es como administrar el dinero que tenemos en el banco: hay que saber exactamente cuánto ingresaremos, cuánto podemos gastar y qué podría provocar un cambio en la situación. Un error de cálculo podría tener consecuencias graves y potencialmente duraderas. En el ámbito del agua, esto podría traducirse en una escasez de agua o en la contaminación de los recursos hídricos y la imposibilidad de utilizarlos.

Uno de los factores clave para establecer un balance hidrológico fiable es conocer la edad exacta del agua. En el caso del agua joven, que es más susceptible de verse afectada por las condiciones climáticas actuales y la contaminación, los científicos utilizan la técnica del tritio/helio 3. Empleando esta y otras técnicas, científicos de 23 países están colaborando con el OIEA para recopilar información sobre los recursos hídricos.

“La edad del agua proporciona información sobre su procedencia más probable, su velocidad de recarga y la probabilidad de que esté contaminada”, señala Hamid Marah, Director Científico del Centro Nacional de Energía, Ciencias y Tecnologías Nucleares (CNESTEN) de Marruecos. “La técnica del tritio/helio 3 nos permite determinar si el agua tiene 1, 5 o 25 años de edad en lugar de decir únicamente si es joven, vieja o ambas cosas.”



**Científicos utilizan técnicas isotópicas para estudiar la edad y la procedencia del agua de manantiales del norte de Marruecos.**

(Fotografía: CNESTEN)

El agua puede tener entre unos pocos meses y millones de años de edad. Si tiene un año de edad, por ejemplo, tardará un año en recargarse y la probabilidad de que le afecten las condiciones climáticas actuales y los contaminantes es mucho mayor. Si tiene 50 000 años de edad, tardará 50 000 años en recargarse y la probabilidad de que se contamine y de que le afecten los cambios en las condiciones climáticas actuales es menor.

Prácticamente todas las reservas disponibles de agua dulce del mundo se encuentran en acuíferos, es decir, en las capas porosas de roca permeable que yacen bajo la superficie de la tierra. El agua que albergan se conoce como agua subterránea. A medida que esta se va recargando, acaba desembocando en el mar o brota naturalmente de la superficie de la tierra en forma de ríos, manantiales y lagos.

Según el Sr. Marah, “la creciente demanda de agua subterránea, sumada a los efectos de la agricultura, el cambio climático y las actividades humanas, hacen que la sostenibilidad cobre mayor importancia. Si extraemos demasiada agua de un acuífero, su nivel de agua disminuye, lo que puede ser catastrófico, y no solo durante los próximos 10 o 20 años, sino durante generaciones.”

La técnica del tritio/helio 3 es una de las más comunes para estudiar el agua joven, es decir, el agua de menos de 60 años de edad (véase el recuadro “Base científica”). La información recopilada gracias a estos estudios puede ayudar a los responsables de la toma de decisiones a formular estrategias y políticas de gestión de los recursos hídricos mejor orientadas y más sostenibles.

“Utilizar técnicas nucleares para efectuar estudios sobre los recursos hídricos está rompiendo paradigmas y cambiando nuestra visión clásica de los principales factores que controlan los procesos hidrológicos”, afirma Ricardo Sánchez-Murillo, hidrólogo isotópico y Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Costa Rica. “En Costa Rica, por ejemplo, los resultados del empleo de técnicas isotópicas están sirviendo para elaborar planes de gestión del agua y tomar decisiones, lo que contribuirá a que, para 2030, el país cumpla el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 de las Naciones Unidas, relacionado con el agua.”

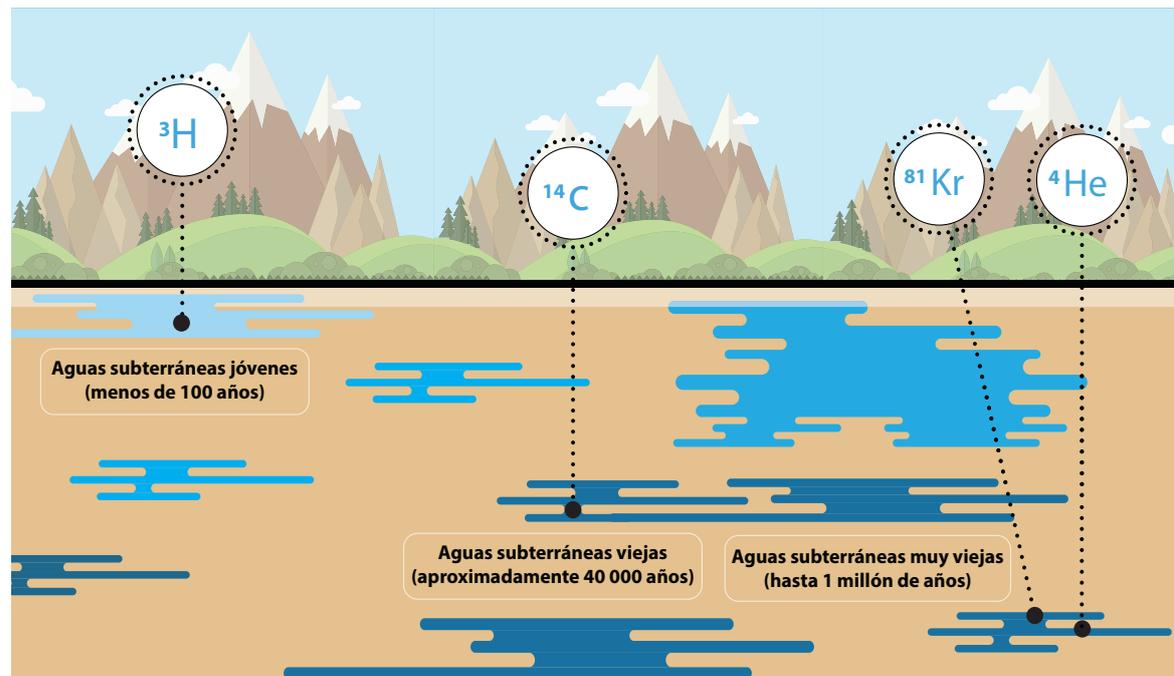
## Un balance mucho más preciso

La técnica del tritio/helio 3 ha ido cobrando cada vez más importancia durante el último decenio, ya que los antiguos métodos que usaban únicamente tritio están perdiendo utilidad.

“El tritio puede indicarnos la edad del agua subterránea y si se está recargando, una información muy importante; sin embargo, por sí solo, el tritio no puede darnos el nivel de detalle que necesitamos. Los responsables de la toma de

Los isótopos radiactivos naturales presentes en el agua, como el tritio ( $^3\text{H}$ ) y el carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ), y los isótopos de los gases nobles disueltos en el agua, como el kriptón 81 ( $^{81}\text{Kr}$ ), pueden utilizarse para estimar la edad de las aguas subterráneas.

(Imagen: OIEA)



decisiones necesitan saber más, por ejemplo: ¿qué significa que el agua sea joven? ¿Qué se entiende por joven?”, indica el Sr. Merah. Debido a los ensayos atmosféricos de dispositivos termonucleares durante los años cincuenta, los niveles de tritio en la atmósfera aumentaron considerablemente durante los años sesenta y, han disminuido paulatinamente desde entonces. “El tritio fue un buen trazador entre los años sesenta y los años noventa, pero hoy hay menos tritio en la atmósfera porque ha ido decayendo para transformarse en helio 3, de modo que ahora nos centramos más en la razón entre el tritio y el helio 3, que es mucho más precisa.”

El helio es un gas noble, lo que significa que es estable y que no reacciona químicamente ante otros elementos presentes en las rocas o el agua. Esto lo convierte en un punto de referencia consistente y fiable. Los científicos pueden determinar la edad exacta del agua joven si conocen la concentración de helio procedente del tritio — el helio 3— respecto de la cantidad total de helio en el agua, así como la concentración de otros gases nobles.

“La utilización de gases nobles en los estudios sobre el agua va en aumento porque los dispositivos analíticos actuales son suficientemente sensibles para detectar las cantidades muy pequeñas en las que estos gases se presentan”, comenta Takuya Matsumoto, un analista isotópico del OIEA. “Sin embargo, para muchos países no es económico ni factible establecer sus propios laboratorios para llevar a cabo estos análisis. El Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA pone este servicio a disposición de los países para que puedan beneficiarse de esta sofisticada técnica.”

El Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA es uno de los pocos laboratorios del mundo capaces de realizar este tipo de análisis. Desde 2010, un equipo de expertos del OIEA y de diez países pasó seis años configurando, calibrando y probando el espectrómetro de masas del OIEA y el modelo matemático para analizar los resultados. También elaboraron directrices para utilizar la técnica del tritio/helio 3. Desde entonces, el laboratorio ha trabajado ininterrumpidamente y cada año procesa entre 300 y 400 muestras procedentes de países de todo el mundo.

## BASE CIENTÍFICA

El tritio es uno de los tres isótopos del hidrógeno. En su calidad de isótopo radiactivo, el tritio decae durante un determinado período de tiempo y se convierte en helio 3, un isótopo estable, que no decae. Los científicos saben que se necesitan aproximadamente 12 años para que la mitad de los átomos de tritio presentes en el agua decaigan y se conviertan en helio 3.

Los científicos utilizan una máquina especial, llamada espectrómetro de masas, para ordenar los isótopos según su peso y determinar sus respectivas concentraciones. Una vez conocen esas concentraciones y el tiempo que tarda el tritio en convertirse en helio 3, los científicos pueden rastrear los isótopos y determinar la edad del agua y la frecuencia con la que se recarga.



# Fracturación hidráulica: cómo la hidrología isotópica puede apoyar las evaluaciones ambientales para proteger las aguas subterráneas

Miklos Gaspar

Cualquier actividad industrial cerca de una reserva de agua podría, en principio, causar contaminación. La hidrología isotópica ofrece una combinación incomparable de métodos para vigilar la calidad del agua y determinar la fuente de contaminación si esta se detecta. Los países utilizan cada vez más esta tecnología para proteger las aguas superficiales y subterráneas cercanas a emplazamientos en los que se llevan a cabo actividades de extracción de petróleo por medio de una técnica denominada fracturación hidráulica.

La fracturación hidráulica, o hidrofracturación, ha puesto al alcance, con fines de producción, recursos de petróleo y gas natural que antes eran inaccesibles. Representa casi la mitad de la producción total de petróleo de los Estados Unidos, y muchos países en desarrollo están considerando la posibilidad de utilizarla por primera vez.

Se trata de una técnica de estimulación de pozos en que la roca se fractura inyectando líquido, compuesto de agua, arena y otros aditivos químicos, a alta presión. Cuando se lleva a cabo en un pozo, se producen grietas en las formaciones rocosas profundas a través de las cuales el gas natural y el petróleo pueden emanar más fácilmente. Este método permite acceder al petróleo y el gas que están atrapados en formaciones compactas y que no son accesibles mediante métodos tradicionales de perforación y bombeo.

Puede darse contaminación de las aguas superficiales por derrames durante la fracturación hidráulica o emisiones accidentales procedentes de la escombrera en que se recupera el líquido de fracturación tras la extracción, o de las aguas subterráneas por escapes de líquidos, por ejemplo, en pozos abandonados o agrietados, así como del agua potable si se producen fugas de gas natural en acuíferos poco profundos.

En muchos casos de presunta contaminación es difícil determinar la fuente y el grado de contaminación debido a la falta de datos de referencia, explica Jennifer McIntosh, Profesora de Hidrología y Ciencias Atmosféricas en la Universidad de Arizona (Estados Unidos). “La comunidad científica tiene la oportunidad de proporcionar orientación sobre los mejores métodos analíticos para evaluar las emisiones fugitivas de gas y líquido de fracturación, o la contaminación de las aguas subterráneas”, refiere la Sra. McIntosh.

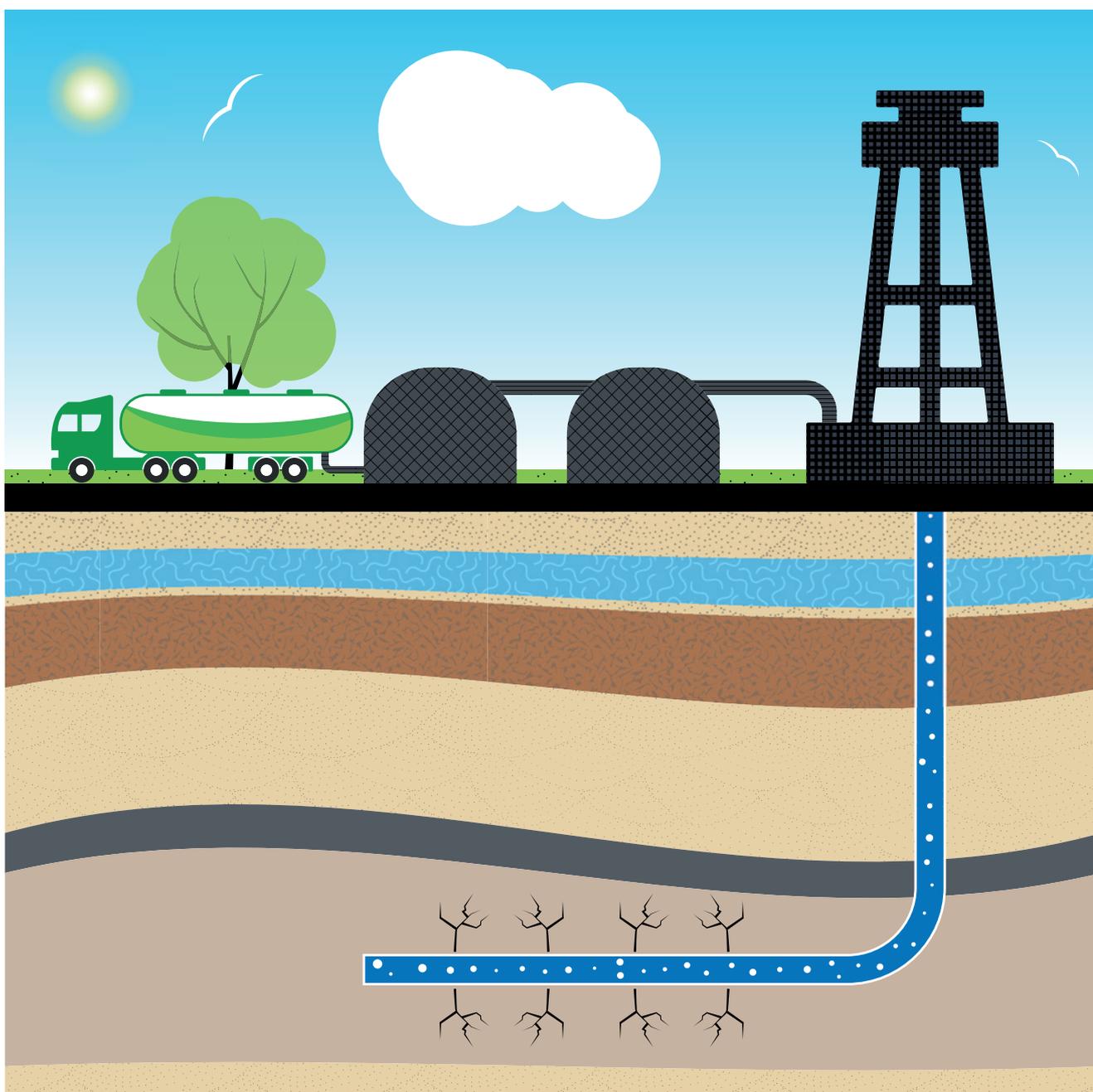
## ¿Qué puede hacer la hidrología isotópica?

En un artículo reciente de la Sra. McIntosh y otros 14 autores de destacadas universidades de todo el mundo se explica cómo pueden utilizarse diversas técnicas de hidrología isotópica para vigilar el efecto de la fracturación hidráulica en las aguas subterráneas y superficiales. También se proporcionan recomendaciones sobre qué método utilizar en distintas circunstancias y condiciones ambientales. Las ideas iniciales del artículo, titulado “A Critical Review of State-of-the-Art and Emerging Approaches to Identify Fracking-Derived Gases and Associated Contaminants in Aquifers” y que apareció en la revista *Environmental Science and Technology* en diciembre de 2018, se desarrollaron en una reunión técnica del OIEA celebrada dos años antes.

Los recientes avances analíticos en relación con los embalses que utilizan trazadores isotópicos naturales en hidrocarburos, conjuntos de datos de alta resolución de gases naturales y líquidos afines de la superficie, y la incorporación de la geoquímica de gases nobles y la microbiología a enfoques hidrogeológicos y geoquímicos más tradicionales, ofrecen eficaces instrumentos analíticos con que determinar las fuentes de líquidos contaminados.

Algunas sustancias como el material radiactivo natural o las sales pueden darse de forma natural en el agua subterránea, aunque su presencia también puede deberse a la contaminación. Con la hidrología isotópica es posible distinguir de qué caso se trata. La composición isotópica de una fuente depende de su origen: la medición de la concentración de los oligoelementos, los isótopos estables del agua y los compuestos disueltos, y los isótopos radiogénicos del yodo, el radón y el estroncio pueden proporcionar datos sobre los orígenes del agua y sus compuestos disueltos. Esto, junto con el análisis químico tradicional de los iones, puede revelar el origen del agua y si las sustancias que contiene provienen de la fracturación hidráulica o de otras actividades humanas, o si están presentes de manera natural en el medio ambiente.

Como explica la Sra. McIntosh, lo ideal es que antes de emprender la fracturación hidráulica se lleve a cabo un estudio isotópico de antecedentes de las aguas superficiales y subterráneas de la zona para realizar una caracterización del agua del lugar previa a la perforación. A continuación, si existen sospechas de contaminación debido a actividades de fracturación hidráulica, pueden realizarse pruebas isotópicas para comprobar los valores de referencia.



**La fracturación hidráulica, o hidrofracturación, es una técnica de estimulación de pozos en que la roca se fractura inyectando líquido a alta presión para acceder al petróleo y al gas. Los especialistas en hidrología isotópica pueden vigilar la calidad del agua y determinar la fuente de contaminación si esta se detecta.**

Un novedoso y complejo enfoque isotópico, que utiliza “isótopos aglutinados” de gas metano, permite a los científicos investigar la posición molecular de los isótopos de hidrógeno en el gas metano en relación con su único átomo de carbono, lo que ofrece información diagnóstica nueva sobre los depósitos de gas de donde podrían proceder los presuntos gases fugados, o distinguir si el metano proviene de fuentes termogénicas profundas, si las bacterias del suelo lo produjeron de manera natural en los acuíferos o si es una combinación de lo anterior. “Los nuevos radiotrazadores de la edad del agua subterránea como el criptón 81 y los isótopos de argón pueden ayudar a determinar el tiempo que los contaminantes relacionados con la fracturación hidráulica y la producción de petróleo y gas pueden permanecer en los acuíferos de agua potable”, afirma la Sra. McIntosh.

La última parte del artículo proporciona orientaciones relativas a un programa gradual para detectar la contaminación y ofrece un plan de trabajo estratégico que permitirá a los funcionarios de reglamentación elegir el mejor método de hidrología isotópica dependiendo del emplazamiento.

Algunos de los enfoques elaborados para detectar contaminación en la fracturación hidráulica tienen aplicaciones más amplias, como el almacenamiento subterráneo de dióxido de carbono y la disposición final de desechos nucleares, agrega la Sra. McIntosh.



# El impacto del cambio climático en el futuro de los recursos hídricos

Nicole Jawerth

¿Cómo afectará el cambio climático a las reservas de agua dentro de cien años? Para responder a preguntas como esta, los hidrólogos utilizan modelos científicos, como el modelo del balance hidrológico mediante isótopos del OIEA, que puede ayudar a los expertos a predecir de manera exacta y fiable el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en un futuro lejano. La información recopilada puede ayudar a los responsables de la toma de decisiones a formular políticas sobre el uso sostenible del agua para generaciones venideras.

Los modelos se basan en la información existente y se utilizan para estudiar y entender ideas, objetos y procesos difíciles de observar de forma directa. Esto incluye la realización de predicciones, como pronosticar qué tiempo hará la próxima semana o estimar la tasa de desempleo durante los próximos cinco años. Aunque los modelos presentan una versión del mundo real más general y simplificada, cada uno de los aspectos de un modelo se calibra para obtener un reflejo exacto del funcionamiento del mundo real.

Los modelos de balance hidrológico describen el ciclo del agua en términos de precipitaciones, evapotranspiración, descarga fluvial y cambios en el almacenamiento del agua. A diferencia de muchos modelos tradicionales de balance hidrológico, el del OIEA utiliza isótopos para calibrar el modelo y verificar su exactitud, dado que los isótopos tienen un comportamiento particular y uniforme (véase la página 4). Un modelo de balance hidrológico correctamente calibrado y verificado permite a los científicos obtener estimaciones exactas de lo que puede suceder en el futuro, como el impacto del cambio climático en los recursos hídricos dentro de cien años o más.

## Predicciones certeras a largo plazo

La precisión en estos estudios a largo plazo sobre el agua es importante para cualquier país y tipo de clima, ya que sobrestimar o minusvalorar las futuras reservas de agua puede tener efectos perjudiciales, sostiene Dessie Nedaw Habtemariam, Profesor Asociado de la Universidad de Addis Abeba, en Etiopía.

“Si estimamos erróneamente la rapidez con la que se recarga el agua, por ejemplo, y nuestros cálculos son demasiado optimistas y trasladamos estos resultados a los responsables de la toma de decisiones, estos podrían implementar políticas que provoquen que la velocidad a la que se extrae el agua subterránea sea mayor que la velocidad a la que esta agua se recarga”, afirma el Sr. Habtemariam. El agua subterránea,

es decir, la que yace en la capa de roca permeable que se encuentra bajo la superficie terrestre, es una fuente importante de agua dulce para la mayoría de la población de Etiopía. “Esto llevaría un descenso drástico de las reservas de agua subterránea disponibles, lo que podría suponer que se abandonarían los sondeos e incluso la escasez de agua potable”.

Por otro lado, subestimar la rapidez de recarga del agua podría provocar que se adoptaran políticas sobre recursos hídricos innecesariamente austeras o tener consecuencias en las decisiones de desarrollo (por ejemplo, la falta de recursos hídricos podría entorpecer el crecimiento urbano).

Lograr que estos estudios a largo plazo sobre un período de 100 años o más den unos resultados exactos utilizando otros modelos de balance hidrológico ha sido todo un desafío, apunta Tricia Stadnyk, Profesora Asociada de Ingeniería Hídrica en la Universidad de Manitoba, en el Canadá. “Muchos modelos de balance hidrológico dan muy buenos resultados al simular el flujo del agua en corrientes, ríos y otras masas de agua, pero fallan estrepitosamente al predecir la cantidad de evapotranspiración”, afirma, en referencia al proceso de evaporación del agua desde la tierra y al viaje de regreso del agua desde las plantas hasta la atmósfera. “Esto supone un gran problema para las predicciones relacionadas con el cambio climático, puesto que la evapotranspiración es uno de los principales parámetros en los que nos fijamos.”

Conforme las temperaturas se vuelven más extremas a causa del cambio climático, otro tanto sucede con la tasa de evapotranspiración. Cuanto mayor sea la evapotranspiración, menor será la cantidad de agua en la superficie terrestre, y viceversa. A su vez, esto influye en todo el ciclo hídrico anual y puede dar lugar a extremos imprevisibles, que van desde la escasez de agua, lo que causa sequías, hasta un exceso de este recurso, lo que provocará inundaciones.

Ningún tipo de clima es inmune a estos cambios, que pueden afectar tanto al Canadá, país en el que más del 60 % del territorio está constituido por un tipo u otro de permafrost (suelo congelado) y existen cuatro estaciones diferenciadas, como a Etiopía, un país con un clima mayoritariamente tropical y en el que las temperaturas permanecen más o menos constantes durante todo el año.

El ajuste del modelo permite capturar todas estas distintas condiciones, lo que permite aplicarlo a escala mundial. Científicos de varios países están trabajando con el OIEA para recibir capacitación y apoyo en el uso del modelo del balance



hídrico mediante isótopos del OIEA y de otros modelos a fin de mejorar la gestión de los recursos hídricos. En Etiopía, por ejemplo, se ha puesto en marcha un proyecto trienal de cooperación técnica para estudiar la cuenca del Awash alto, un gran reservorio de agua subterránea que abastece de agua dulce a más de 2,6 millones de personas. Otros países, como el Canadá, están estableciendo redes de muestreo isotópico para mejorar la exactitud al utilizar modelos como el del OIEA, o ya lo han hecho.

**El modelo del balance hídrico mediante isótopos del OIEA puede ayudar a los expertos a predecir de manera exacta y fiable el impacto que el cambio climático puede tener en los recursos hídricos en un futuro lejano.**

(Fotografía: L. Toro/OIEA)

## El modelo del balance hídrico mediante isótopos del OIEA

Los científicos emplean el modelo del balance hídrico mediante isótopos del OIEA para simular y estimar la influencia a largo plazo del cambio climático en el movimiento y la disponibilidad del agua en todo el ciclo del agua, un ciclo repetitivo que empieza en el aire, sigue en la superficie terrestre y acaba cuando el agua penetra en la tierra. El modelo incluye el cálculo mensual del balance de masas isotópicas de cada uno de los componentes del balance hídrico para mejorar su proceso de calibración y validación.

El programa informático del modelo, de código abierto, intuitivo y que se presentó en 2015, incluye herramientas de tratamiento preliminar, modelización y análisis que hacen más sencilla la introducción de datos y la visualización y el análisis de los resultados. Está concebido para trabajar con una variedad de conjuntos de datos locales y mundiales relacionados, entre otros ámbitos, con el clima, la vegetación, las precipitaciones, el flujo del agua, la topografía y el suelo. Los datos isotópicos que se utilizan para calibrar el modelo y validar sus resultados provienen, por lo general, de datos recopilados a nivel local, así como de datos procedentes de repositorios mundiales, como la Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación del OIEA (RMIP, véase la página 18) y la Red Mundial de Isótopos en Ríos (RMIR).





# Pasar la prueba

## El OIEA evalúa la calidad de los análisis de agua realizados por los laboratorios

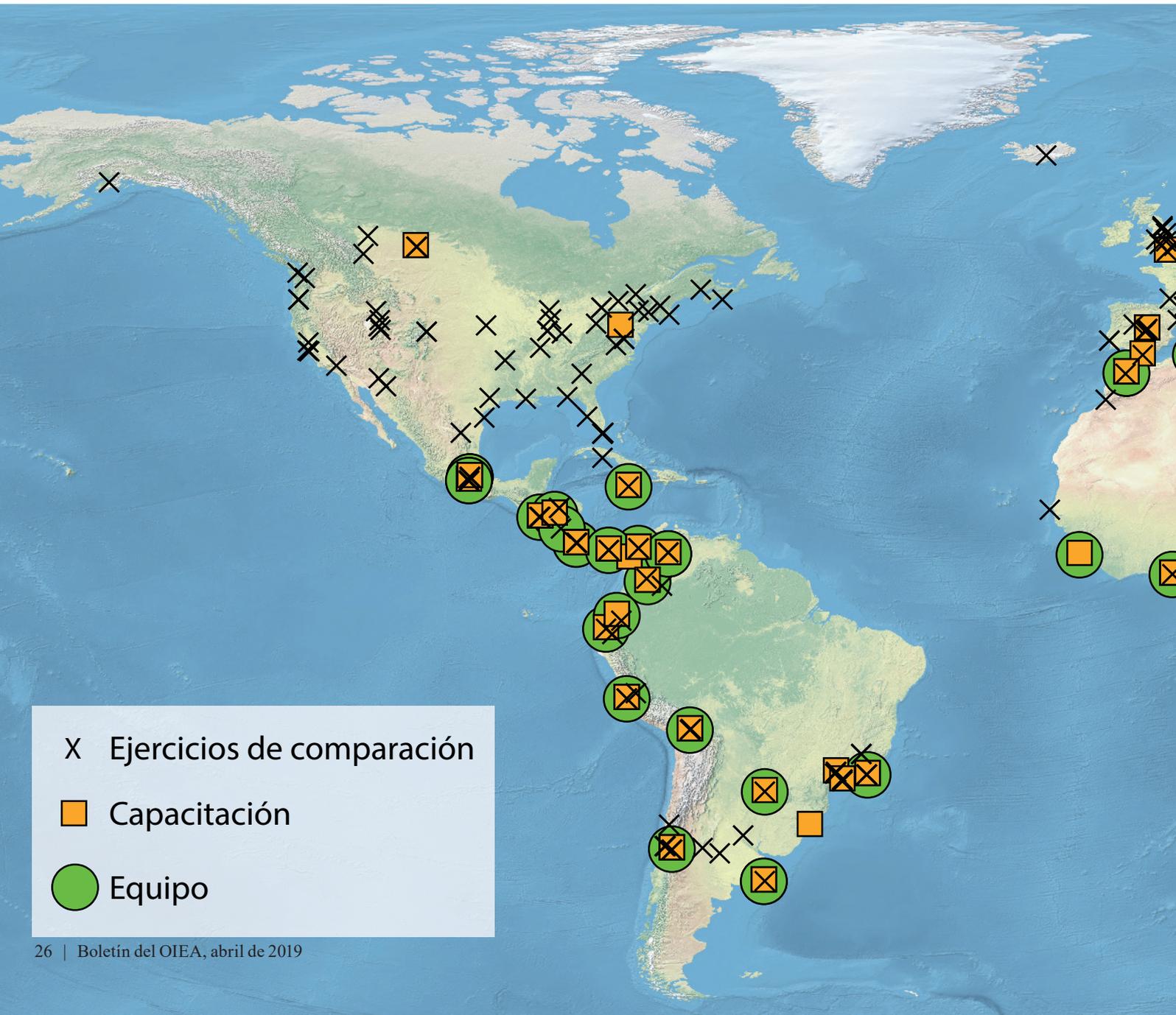
**Laura Gil**

Las comparaciones permiten a los científicos saber si el análisis químico del agua es excelente, bueno, cuestionable o inaceptable. Durante los últimos 30 años, el OIEA ha realizado comparaciones de hidrología isotópica entre cientos de laboratorios y se ha convertido en una fuente mundial de pruebas de competencia a en hidrología isotópica.

“La calidad de las mediciones es un aspecto fundamental de toda ciencia”, afirma Luis González Hita, Técnico de Hidrología en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. “Esto es válido también para la hidrología isotópica. La

garantía de tener datos correctos y fiables nos da una base sólida para convencer a los encargados de formular políticas.”

Los especialistas en hidrología isotópica son científicos que utilizan datos isotópicos para estudiar los recursos hídricos. Sus estudios ofrecen información crucial para elaborar estrategias y políticas de protección del agua. Cada cuatro años aproximadamente, más de 300 laboratorios de hidrología isotópica participan en pruebas de competencia de comparaciones entre laboratorios a nivel mundial organizadas por el OIEA.



X Ejercicios de comparación

■ Capacitación

● Equipo

La comparación de los datos con las muestras para pruebas del OIEA, que constan de una amplia variedad de aguas de todo el mundo, ayuda al personal de cada laboratorio a detectar y mejorar las deficiencias analíticas y a garantizar la producción sistemática de datos exactos y precisos.

Las comparaciones ordinarias entre laboratorios tienen en la actualidad más importancia que nunca: la tecnología avanza con rapidez y esto hace que los métodos y los instrumentos de hidrología isotópica sean cada vez más económicos y accesibles. Aunque tienen ventajas, estos cambios tecnológicos dan lugar a un mayor riesgo de errores, puesto que los principiantes en este ámbito suelen tener menos capacitación avanzada.

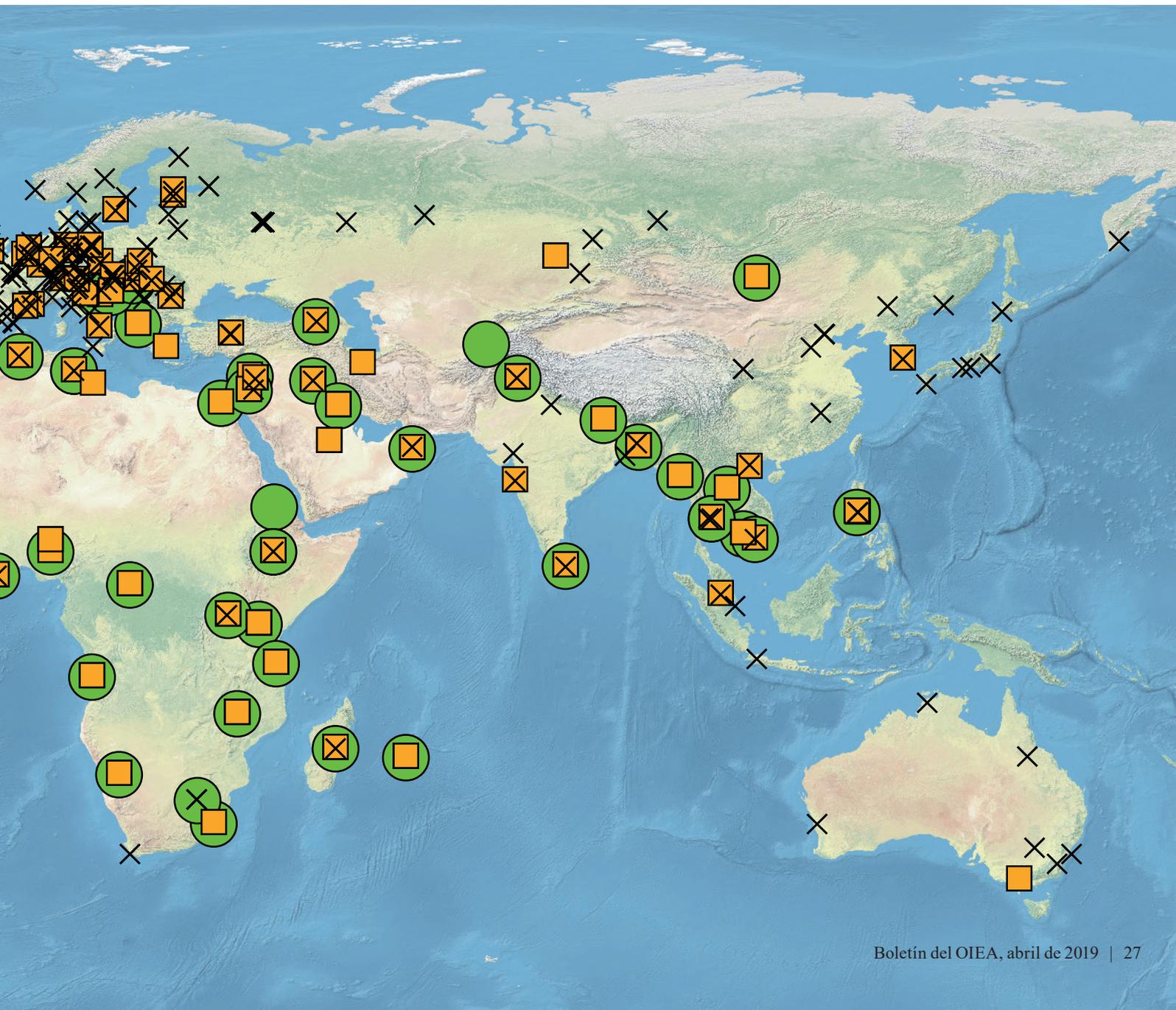
“Hoy día la tecnología hace gran parte del trabajo, especialmente por medio de métodos láser”, explica el Sr. González Hita. “Esto significa que para realizar las evaluaciones los científicos dependen más de los métodos y menos de los conocimientos”.

### En busca de la excelencia

Existen dos tipos de proyectos de comparación entre laboratorios. Por un lado, la Comparación entre Laboratorios de los Isótopos presentes en el Agua (WICO), que pone a prueba la capacidad de los laboratorios de medir la presencia de deuterio ( $^2\text{H}$ ) y oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ) en muestras de agua. Las mediciones exactas de estos isótopos permiten a los científicos determinar la edad y el origen del agua (para más información consulte la página 4).

**El mapa muestra las ciudades que han participado en ejercicios de comparación entre laboratorios (WICO y TRIC) desde 2016, los lugares en que el OIEA ha impartido capacitación a expertos en hidrología isotópica desde 2007 y los sitios a los que el OIEA ha donado láseres isotópicos desde 2007 por conducto del programa de cooperación técnica del OIEA.**

(Fuente: OIEA)



Por otro, la Intercomparación de Tritio (TRIC), que comprueba la capacidad de los laboratorios de medir la presencia del radioisótopo natural tritio ( $^3\text{H}$ ) en el agua. Las mediciones de tritio sirven para analizar las tasas de recarga hídrica y para estudiar el agua que tiene menos de 60 años (véase la página 4). El TRIC comprueba la precisión y la corrección de estas mediciones. Con 90 laboratorios, en el ejercicio TRIC más reciente, que tuvo lugar en 2018, hubo una participación sin precedentes.

“Estos proyectos de comparación entre laboratorios funcionan de manera sencilla”, apunta Leonard Wassenaar, Jefe del Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA, sito en Viena (Austria). “Nosotros aquí preparamos y verificamos minuciosamente las muestras de agua y las enviamos a cada uno de los laboratorios. Estos las analizan y nos mandan sus resultados para que a continuación los comparemos con los valores de referencia del OIEA. Por último, recopilamos los resultados en un informe general anónimo dirigido a la comunidad científica y, paralelamente, enviamos un informe detallado a cada laboratorio con sugerencias y recomendaciones de mejora”.

Los informes elaborados por el OIEA después de cada ejercicio contienen recomendaciones fundamentadas para ayudar a los laboratorios a refinar sus métodos y mejorar su eficacia. Asimismo, ayudan a los expertos del OIEA a detectar deficiencias y mejorar aún más la ayuda, entre otras cosas, la capacitación del personal de laboratorio, por conducto del programa de cooperación técnica del OIEA.

### Pruebas de vigilancia

El ejercicio WICO más recientes, de 2016, fue, con 235 laboratorios participantes, la comparación entre laboratorios en materia de isótopos estable más grande jamás realizada a escala mundial. Los resultados se publicaron en la revista científica *Rapid Communications in Mass Spectrometry* en noviembre de 2017.

Durante el ejercicio WICO de 2016, Wassenaar y su equipo intentaron algo nuevo.

“Añadimos metanol a una de las muestras de agua para poner a prueba la vigilancia de los laboratorios en la detección de contaminantes interferentes, por supuesto, sin previo aviso”, explica el Sr. Wassenaar. “Tras advertir que esto pasó inadvertido para muchos de ellos, desarrollamos algunas estrategias para que detectaran la presencia en el agua de contaminantes interferentes que podrían dar lugar a resultados incorrectos”.

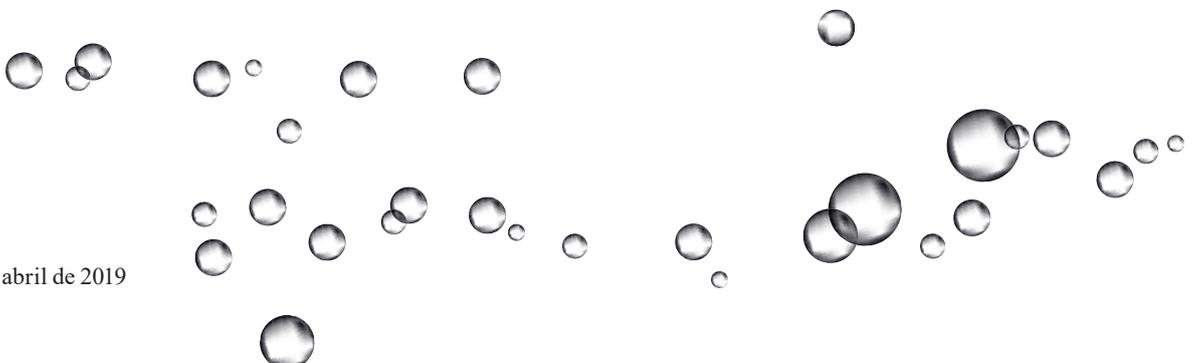
La mayoría de los laboratorios que participaron en el WICO de 2016 obtuvieron resultados entre aceptables y excelentes en el análisis de isótopos de oxígeno, mientras que en el análisis de deuterio solo la mitad de los participantes obtuvo ese resultado. Entre el 5 y el 6 % obtuvo resultados muy malos que eran inaceptables y que, según Wassenaar, podían deberse al rápido aumento del número de instrumentos en los laboratorios, como láseres de bajo coste, sobre todo en los laboratorios con menos experiencia.

“Llegamos a la conclusión de que estos malos resultados de los laboratorios podían deberse a ‘factores desconocidos’ no cuantificables”, prosigue el Sr. Wassenaar. “Cuando parece que los laboratorios lo están haciendo todo bien pero aun así obtienen malos resultados, estos podrían deberse a errores en sus hojas de cálculo de Excel o a un instrumento con un mantenimiento inadecuado. Son fallos y errores humanos que, a pesar de ser comunes, pueden no ser obvios para los laboratorios”.

El Sr. Wassenaar cita entre estos errores los factores relacionados con el conocimiento y las aptitudes, como la experiencia de los operarios, los errores básicos de procesamiento de datos, el incumplimiento del protocolo de medición, las muestras deterioradas y los instrumentos analíticos con un funcionamiento deficiente.

Según estudios recientes publicados en la revista *Accreditation and Quality Assurance*, los errores humanos podrían contribuir de manera significativa a los malos resultados de los análisis geoquímicos. La encuesta realizada tras el WICO de 2016 entre los laboratorios participantes respalda la hipótesis de que los errores humanos, técnicos e instrumentales son los principales factores de los malos resultados en cuanto a los isótopos del agua.

“Si se encuentran errores, es posible corregirlos. De ahí la importancia de saber dónde tenemos resultados fiables y dónde no”, apunta el Sr. González Hita. En el último ensayo del WICO, su laboratorio, en México, obtuvo buenos resultados. “Gracias al WICO de 2016 pudimos confirmar que estábamos haciendo análisis de buena calidad. Esto es bueno también para los países vecinos, porque pueden hacer uso de nuestros servicios y podemos intercambiar prácticas óptimas”.



# Gestión del agua en zonas urbanas: la función de la hidrología isotópica y las enseñanzas extraídas de la crisis del agua de Ciudad del Cabo

Jodie Miller

La crisis del agua que sufrió Ciudad del Cabo (Sudáfrica) entre finales de 2017 y principios de 2018 fue una ocasión para evaluar la función de la hidrología isotópica en el mantenimiento de la integridad de las redes urbanas de abastecimiento de agua. La integridad del abastecimiento de agua es fundamental para la sostenibilidad a largo plazo de la economía de África meridional y exige conocer la relación entre el clima y la utilización de los recursos hídricos, y los efectos en los factores socioeconómicos de este vínculo. El balance hídrico de una región, o relación entre la entrada y la salida de agua, tiene importantes consecuencias socioeconómicas, como la capacidad de abastecer los centros urbanos, reducir la pobreza, proteger los suministros de alimentos y energía, y desarrollar competencias científicas para fundamentar las estrategias locales de gestión del agua.

En años recientes, estas cuestiones han alcanzado un punto crítico con la fuerte sequía que ha afectado a Ciudad del Cabo, urbe en el extremo sur de África con una población de 3,8 millones de personas. Las precipitaciones inferiores a la media registradas entre 2014 y 2017 se tradujeron en un alto nivel de estrés hídrico en Ciudad del Cabo durante el verano austral de finales de 2017 y principios de 2018. Casi todo el abastecimiento de agua de la ciudad procede de sus depósitos de aguas superficiales que poseen una capacidad total conjunta de 828 991 millones de litros. En marzo de 2018, el agua almacenada en estos depósitos era inferior al 20 % de su capacidad, el nivel más bajo de que se tenga constancia, y el más grande ellos, el embalse de Theewaterskloof, estaba al 13,5 % de su capacidad, que es de 480 188 millones de litros. Se habló bastante de la llegada inminente del “día cero”, momento en que se suspendería el abastecimiento de agua en la ciudad para mantenerlo en las infraestructuras más importantes, como los hospitales, y se pidió a todos los residentes que redujeran el consumo de agua a 50 litros diarios por persona.

Al final, ese día nunca llegó. Los esfuerzos colectivos de la ciudad por ahorrar agua permitieron aguantar con las reservas disponibles hasta la llegada de las lluvias del invierno. No obstante, la posibilidad de interrumpir el abastecimiento municipal de agua transformó el uso y el valor que la población daba al agua y dio lugar a un verdadero cambio de las pautas de uso. Al mismo tiempo, la cuestión de cómo un gran centro urbano podría proteger y complementar su seguridad del agua a corto plazo planteó importantes cuestiones científicas, por ejemplo, sobre la manera de seguir y cuantificar las contribuciones relativas de las muy diversas entradas de agua a las redes de abastecimiento. La desalación, el reciclado de aguas residuales grises, la captación directa del agua de lluvia y la extracción de agua subterránea se utilizan, a



Jodie Miller es Profesora Asociada del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Stellenbosch, en Sudáfrica. Trabaja principalmente en proyectos de hidrología isotópica en Mozambique, Namibia y Sudáfrica. Participa en un proyecto coordinado de investigación del OIEA sobre hidrología isotópica en zonas urbanas y es Vicepresidenta de la Asociación Internacional de Geoquímica (IAGC) y responsable de la Plataforma de Infraestructura de Investigación en Biogeoquímica del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Sudáfrica.

varias escalas, como complementos de los embalses de aguas superficiales en muchas redes municipales, aunque pueden poner en peligro la calidad del agua. La gestión de la cantidad y la calidad del agua, atendiendo a la diversificación cada vez mayor de los flujos de entrada, precisa nuevos enfoques e instrumentos científicos a fin de elaborar estrategias en materia de prácticas óptimas.

## Hidrología isotópica en zonas urbanas

Entre los instrumentos científicos disponibles para contribuir al seguimiento de las diversas fuentes de entradas de agua de la red municipal cabe mencionar el estudio de los isótopos estables del agua. El estudio y la aplicación de isótopos naturales de hidrógeno y oxígeno en el ciclo del agua es fundamental en hidrología isotópica.

Debido a la amplia urbanización y al crecimiento demográfico, la hidrología isotópica en zonas urbanas ha cobrado impulso en años recientes en tanto que recurso para comprender los procesos relacionados con el abastecimiento de agua en esas zonas. El componente más importante de la hidrología isotópica en zonas urbanas es la determinación de las características isotópicas de todas las entradas de agua de la red de abastecimiento urbana a fin de efectuar el seguimiento en el sistema de cada uno de los componentes. Los responsables de la gestión del agua pueden utilizar esta información para planificar políticas de gestión a corto y largo plazo, comprendida la supervisión de las contribuciones relativas, los tiempos de permanencia en la red, las fugas y las correspondientes pérdidas del sistema, y la gestión de la contaminación.



**Debido a la media de precipitaciones desde 2014, el nivel del agua ha descendido a niveles críticos en la presa de Theewaterskloof, en la provincia del Cabo Occidental (Sudáfrica).**

(Fotografía: A. Silva Garduño/OIEA)

Se analizaron muestras de agua del grifo obtenidas de viviendas privadas de la ciudad de Stellenbosch, que acoge la Universidad del mismo nombre y es el epicentro de los principales distritos vitícolas del país para determinar las relaciones isotópicas de oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ) y deuterio ( $^2\text{H}$ ). Los resultados describen de manera fascinante la capacidad de la hidrología isotópica en zonas urbanas para apreciar las fluctuaciones en las redes urbanas de abastecimiento de agua. En lugar de centrarse en el agua uniforme que vemos salir del grifo, las relaciones isotópicas registran los altibajos y las pautas concordantes y divergentes.

Esencialmente, los isótopos permiten conocer los perfiles de cada segmento de la red local de abastecimiento de agua: las fuentes, las distintas plantas de tratamiento y la información sobre el tiempo que el agua permanece en la red de distribución. La hidrología isotópica en zonas urbanas pasará a ser un componente fundamental del conjunto de recursos a disposición de los responsables de la gestión del agua, que intentan lograr unas reservas de agua sostenibles a largo plazo en los centros urbanos en constante crecimiento de todo el mundo.

**Muestra de agua tomada en el Cabo Occidental por Jodie Miller.**

(Fotografía: A. Silva Garduño/OIEA)



# La contaminación y la renovación del agua subterránea a través de la representación gráfica de los isótopos

Joel Podgorski, Michael Berg y Rolf Kipfer

Cada vez resulta más difícil obtener agua subterránea de buena calidad para el consumo, la industria y la agricultura debido al aumento de la población, la sobreexplotación de los recursos hídricos, el uso de la tierra y el cambio climático. Los recursos de aguas subterráneas proporcionan el 50 % del agua de bebida a escala mundial y el 43 % del agua utilizada para el riego. No obstante, los acuíferos de aguas subterráneas cercanos a la superficie se contaminan fácilmente a causa de los fertilizantes y los plaguicidas, el vertido de productos químicos y las aguas residuales. Además, la sobreexplotación y la extracción incontrolada del agua de los acuíferos puede acabar con las reservas de este recurso debido al rápido descenso de los niveles freáticos.

Los mapas de vulnerabilidad de los acuíferos son un instrumento útil para ayudar a los responsables de la gestión del agua a proteger y conservar los recursos de aguas subterráneas. Estos mapas contribuyen a determinar qué zonas son especialmente sensibles a la contaminación o a la sobreexplotación y, consiguientemente, ayudan a fundamentar iniciativas en materia de gestión y rehabilitación de los recursos hídricos. La representación gráfica de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas también es clave para lograr el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 de las Naciones Unidas, u ODS 6, que pide garantizar el acceso sostenible al agua para todos y, en particular, al agua potable (meta 6.1), y que defiende, asimismo, la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos (meta 6.5).

## Vulnerabilidad de los acuíferos

Desde un punto de vista técnico, la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación o a la sobreexplotación de sus aguas puede evaluarse de muchas formas. En el pasado, se empleaban las características geológicas generales, los datos de los sondeos y los datos hidrológicos regionales. Sin embargo, estos elementos suelen ser imprecisos, inexactos o sencillamente inexistentes. También se han utilizado modelos informáticos complejos, pero estos requieren datos exactos y a menudo su rendimiento se ve afectado por unos costos computacionales elevados y una disponibilidad de datos limitada, por lo que su aplicación se suele limitar a campos de estudio reducidos.

Los indicadores químicos y los análisis estadísticos pueden servir para establecer un vínculo entre los datos ambientales disponibles y la vulnerabilidad de las aguas subterráneas. Un ejemplo de ello es el nitrato, un contaminante del agua introducido principalmente por la agricultura cuya medición resulta sencilla y económica. A fin de elaborar mapas sobre la vulnerabilidad de las aguas subterráneas o para la protección



Joel Podgorski, Michael Berg y Rolf Kipfer trabajan en el Departamento de Recursos Hídricos y Agua Potable (W+T) del Instituto Federal Suizo de la

Ciencia y Tecnología del Agua (Eawag).

El Eawag es un instituto suizo de investigaciones hídricas que desarrolla conceptos y tecnologías para gestionar de manera sostenible las masas de agua y el agua como recurso. En colaboración con universidades, otras instituciones de investigación, entidades públicas, la industria y organizaciones no gubernamentales, el Eawag trabaja junto con su red internacional con miras a armonizar los intereses ecológicos, económicos y sociales en cuanto al uso de los recursos hídricos.

de este recurso, debe disponerse de los datos sobre el contaminante (a la sazón, el nitrato) o relativos al indicador de vulnerabilidad respecto de la zona que se quiere estudiar para que estos mapas predictivos sean fiables y exactos.

## Representación gráfica en línea

Con el fin de demostrar la eficacia de los mapas estadísticos de vulnerabilidad de los acuíferos, se volvieron a analizar los datos de un mapa de vulnerabilidad previo relativo al Canadá por medio de la Plataforma de Evaluación de Aguas Subterráneas (GAP), disponible en línea de manera gratuita ([www.gapmaps.org](http://www.gapmaps.org)). Los mapas de vulnerabilidad de los acuíferos generados mediante la GAP dieron lugar a un mapa predictivo probabilístico exacto de las zonas de alta vulnerabilidad de los acuíferos sin necesidad de recopilar una gran cantidad de datos sobre toda la zona objeto de estudio.

## Utilización del tritio para representar gráficamente las tasas de recarga del agua

En la lluvia se encuentran de forma natural trazas del radioisótopo tritio como resultado de la interacción de la radiación cósmica en la alta atmósfera. En los ensayos superficiales de armas nucleares llevados a cabo entre 1952 y 1962 se introdujeron grandes cantidades de tritio en el ciclo hidrológico, que, en consecuencia, se convirtió en un indicador mensurable de la recarga del agua subterránea moderna. Si bien los niveles globales de tritio presentes en las precipitaciones se han ido reduciendo hasta alcanzar los bajos niveles naturales anteriores a los ensayos con bombas, las capacidades de detección para la realización de análisis sensibles nos siguen permitiendo detectar con exactitud la presencia del isótopo.

Una de las principales ventajas de utilizar tritio, o  $^3\text{H}$ , para la representación gráfica es que este isótopo es un constituyente fundamental de la molécula de agua ( $^1\text{H}^3\text{HO}$ ) y, por lo tanto, está presente en las precipitaciones. Por consiguiente, todo el tritio detectable en otras etapas del ciclo hidrológico — ríos, lagos, aguas subterráneas— revela la presencia de agua contemporánea procedente de precipitaciones recientes. Así podemos saber si el agua data de los últimos decenios, información que podemos utilizar para determinar y representar gráficamente de forma directa hasta qué punto las precipitaciones podrían contaminar estos acuíferos, incluso aunque el agua subterránea nunca se haya contaminado.

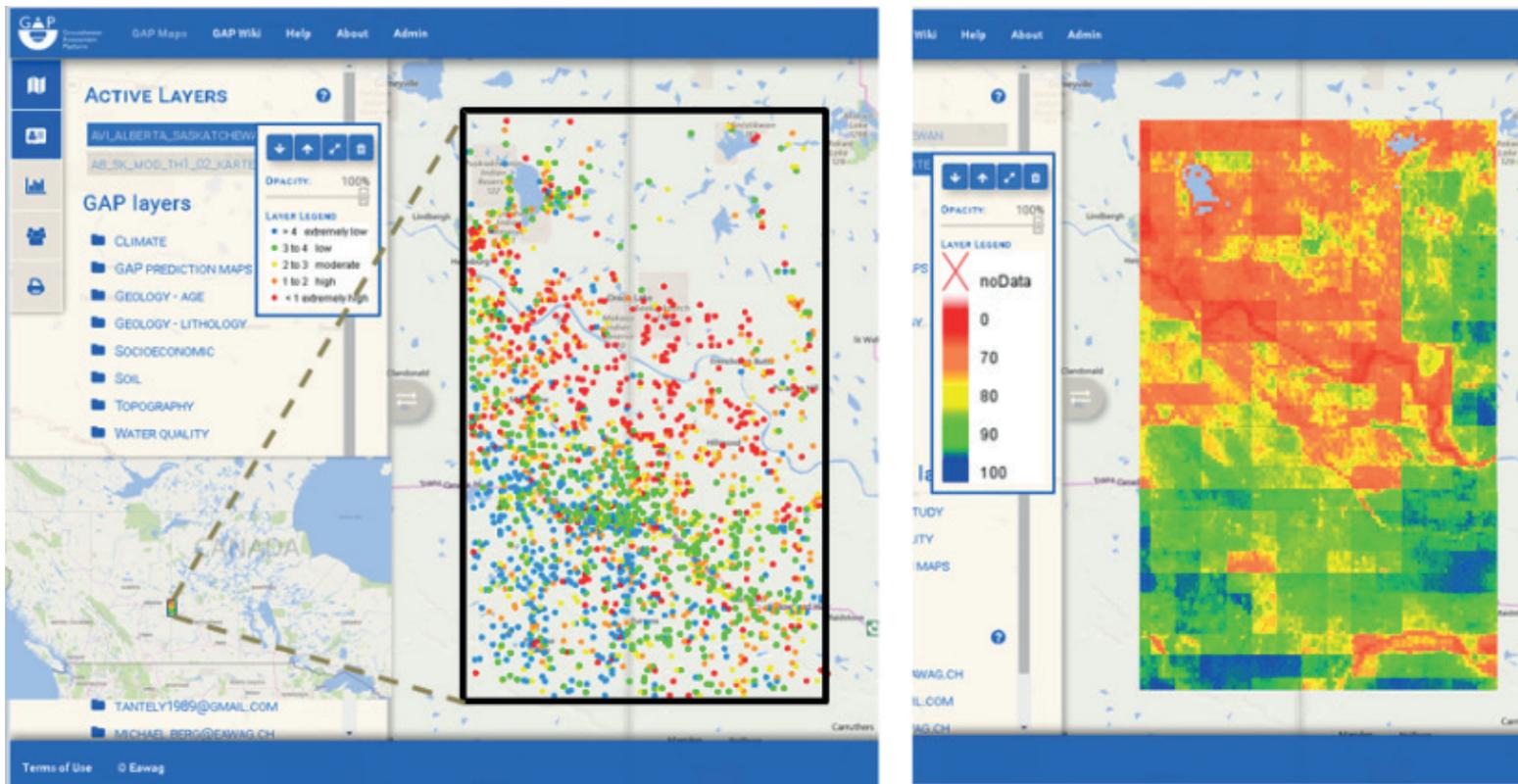
Hasta la fecha, los métodos que se basan en mapas estadísticos para estimar la vulnerabilidad de los acuíferos no han utilizado de manera generalizada las mediciones del tritio, ya que este no suele incluirse en los estudios de aguas subterráneas y su análisis aún es costoso. Entretanto, pueden emplearse otros parámetros isotópicos o de calidad del agua fácilmente obtenibles para la representación gráfica de las vulnerabilidades. Por ejemplo, el carbono 14, la composición isotópica estable del agua ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ), el nitrato y el cloro también pueden ayudar a evaluar la edad del agua subterránea o comprobar si ha estado expuesta a la contaminación.

Los mapas estadísticos y en línea de la vulnerabilidad de los acuíferos y la recarga del agua subterránea mediante isótopos e indicadores químicos suponen un importante avance y constituyen una aplicación práctica del tritio y de los trazadores isotópicos naturales conexos. Actualmente, la aplicación de los extensos conjuntos de datos mundiales del OIEA relativos al  $^3\text{H}$ , el  $^2\text{H}$  y el  $^{18}\text{O}$ , junto con los mapas geoestadísticos anteriormente descritos, ofrece muchas posibilidades en relación con cuestiones referentes a la calidad y la cantidad de las aguas superficiales y subterráneas en todo el mundo. El OIEA está realizando nuevos esfuerzos en esta esfera en cooperación con el Instituto Federal Suizo de la Ciencia y Tecnología del Agua (Eawag) a fin de llevar a cabo evaluaciones basadas en pruebas empíricas y representaciones gráficas del agua potable salubre a escala internacional. Asimismo, esperamos que la representación gráfica de los isótopos ayude a expertos de todo el mundo a gestionar las aguas subterráneas de forma sostenible y equilibrada.

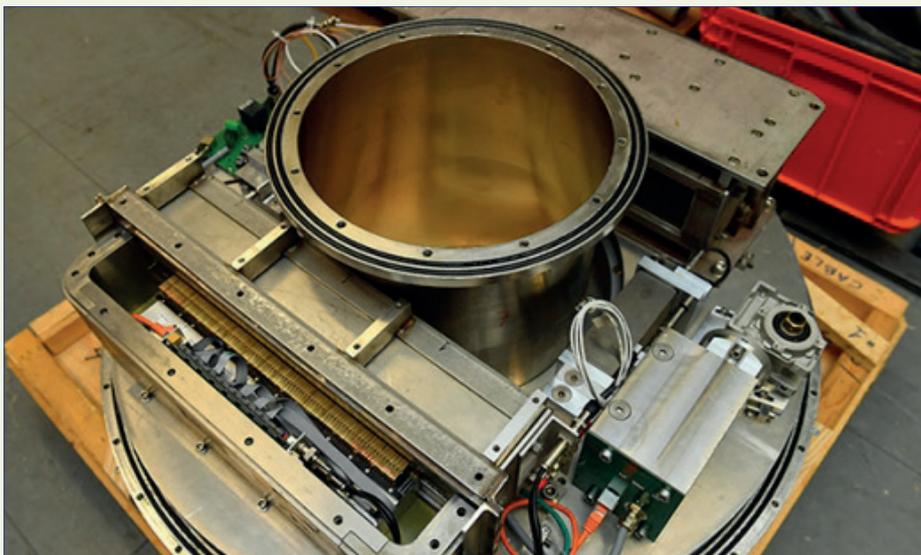
*Este artículo se ha redactado en colaboración con hidrólogos isotópicos del OIEA.*

**Estudio de indicadores de vulnerabilidad de los acuíferos relativo a la región occidental del Canadá (izquierda), comparado con un nuevo mapa de regresión logística de los valores de esos indicadores de vulnerabilidad en la plataforma en línea GAP (derecha). Las zonas más vulnerables aparecen marcadas en rojo. Las zonas marcadas en verde son menos vulnerables o están adecuadamente protegidas frente a la contaminación superficial.**

(Imagen: Eawag)



## Un nuevo dispositivo de salvaguardias refuerza las prácticas de verificación por el OIEA del combustible nuclear gastado



**Componentes del interior del dispositivo de PGET, que se utiliza para verificar el combustible nuclear gastado.** (Fotografía: D. Calma/OIEA)

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) trata de verificar que todos los materiales nucleares de todos los Estados con acuerdos de salvaguardias amplias en vigor siguen adscritos a actividades pacíficas. Para ello, aplica una serie de medidas técnicas conocidas como salvaguardias. El nuevo dispositivo de tomografía por emisión pasiva de radiación gamma (PGET) permitirá al OIEA verificar el número de barras (o agujas) de combustible en conjuntos de combustible nuclear gastado.

A diferencia de otros instrumentos empleados para verificar el contenido de combustible nuclear gastado, como el dispositivo digital de observación de

la radiación Chérenkov y el dispositivo de ensayo de atributos del combustible gastado, el dispositivo de PGET puede confirmar también que no faltan agujas en los conjuntos de combustible gastado de un contenedor cerrado, lo que resulta muy útil para la aplicación de salvaguardias en centrales nucleares, instalaciones de almacenamiento subacuáticas y plantas de encapsulamiento en repositorios geológicos. Según Tim White, experto en tecnología del OIEA, el uso de la tomografía por emisión pasiva de radiación gamma para verificar materiales nucleares será una “incorporación muy útil al conjunto de instrumentos de verificación de salvaguardias del OIEA”.

Al término de su vida útil en el reactor, las barras de combustible se almacenan y ulteriormente se someten a disposición final o, en algunos casos, a reprocesamiento. La verificación de que el material nuclear en las barras no se desvía de los usos pacíficos es una parte fundamental en la tarea de asegurar a la comunidad internacional que los Estados cumplen sus obligaciones de no proliferación.

Para detectar la presencia de uranio o plutonio, el dispositivo de PGET toma tres mediciones simultáneas: del número total de neutrones y rayos gamma, la espectrometría gamma y la imagenología tomográfica de las posiciones de las agujas de combustible gastado. El instrumento tarda tan solo cinco minutos en obtener esas mediciones y un minuto más en procesar y analizar los datos. De esta manera, la PGET “ofrece a los inspectores un punto de datos adicional”, señala el Sr. White. “Permite obtener una imagen más completa de las actividades y aumenta la solidez del proceso de verificación”.

El OIEA está apenas comenzando a incorporar la PGET a sus actividades de salvaguardias. El instrumento se ha probado en las piscinas de combustible gastado de tres centrales nucleares y está listo para empezar a utilizarse en prácticas de verificación de salvaguardias y sobre el terreno por inspectores de salvaguardias. La Comunidad Europea de Energía Atómica (Euratom) también ha manifestado su interés por emplear esta tecnología en actividades de verificación y es posible que varios países hagan lo mismo.

— Matt Fisher

## El OIEA celebra un taller en Uzbekistán sobre la selección y la evaluación de emplazamientos para centrales nucleares

Uzbekistán, el último país en poner en marcha un programa nucleoelectrico, ha iniciado el proceso para seleccionar el emplazamiento de una central nuclear y aspira a conceder la licencia al emplazamiento en septiembre de 2020, según han confirmado funcionarios locales. Se trata de uno de los 30 países que están considerando la posibilidad de incluir la energía nucleoelectrica en su canasta energética, planificando esta medida o trabajando ya activamente para ello.

A petición del Gobierno de Uzbekistán, el OIEA y el Uzatom, organismo de reciente creación para el desarrollo de la energía nuclear, celebraron un taller en febrero de 2019 en Taskent sobre los

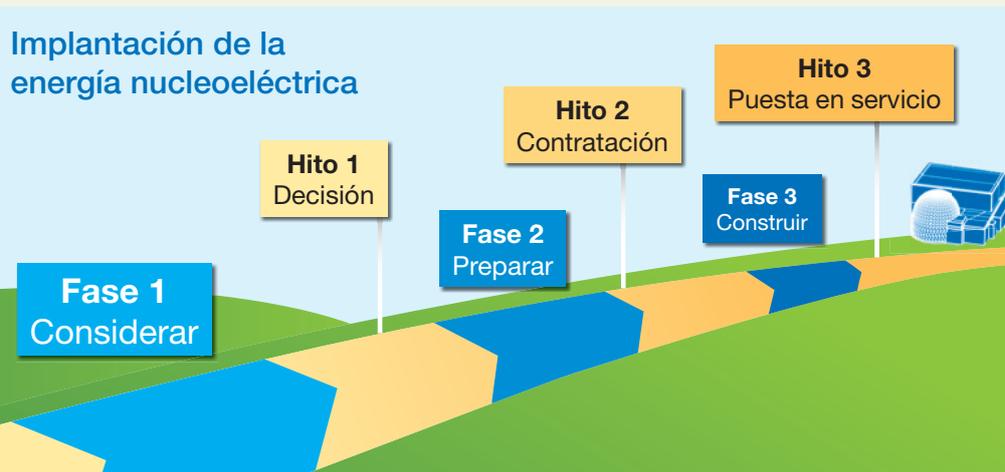
aspectos relacionados y no relacionados con la seguridad que han de tenerse en cuenta en la selección y la evaluación de emplazamientos para centrales nucleares.

El taller, que contó con la participación del Uzatom, el órgano regulador nuclear y otras organizaciones nacionales pertinentes, se centró en los servicios de examen de la seguridad, las normas de seguridad y otros recursos del OIEA en apoyo de la selección y la evaluación de emplazamientos para centrales nucleares.

Como apunta Greg Rzentkowski, Director de la División de Seguridad de las Instalaciones Nucleares del OIEA, “para iniciar un programa nucleoelectrico es

necesario un compromiso de seguridad tecnológica nuclear a largo plazo que comienza en el momento que se toma la decisión de seguir adelante [...] Dos medidas importantes adoptadas en una fase temprana del proceso son establecer un marco jurídico y regulador eficaz y garantizar que los posibles emplazamientos se han evaluado debidamente antes de ser seleccionados para albergar una instalación nuclear. Las normas de seguridad del OIEA ofrecen orientaciones claras en ambos aspectos, y alentamos a todos los países a que las apliquen”.

En el taller se presentó el enfoque de los hitos del OIEA utilizado en el desarrollo de un programa nucleoelectrico nuevo.



En él se abordan los “emplazamientos y las instalaciones complementarias”, uno de los 19 temas sobre infraestructura nuclear que exigen la adopción de medidas durante el desarrollo de un programa nucleoelectrónico.

De acuerdo con el enfoque de los hitos, el OIEA presta servicios integrales, entre otras cosas, en materia de seguridad tecnológica, seguridad física, marcos jurídicos y reguladores, desarrollo de recursos humanos, planificación para casos de emergencia y salvaguardias. Algunos de estos servicios son los exámenes por homólogos y las misiones de asesoramiento tales como el Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear y el servicio de examen Diseño del Emplazamiento y los Sucesos Externos.

— *Ayhan Altinyollar*

## El papel de las técnicas nucleares en la producción de alimentos en China



**El uso de tecnologías nucleares está totalmente incorporado en la investigación agrícola en la Academia China de Agronomía. En la foto, un técnico prepara las muestras para realizar un ensayo de inocuidad de los alimentos.** (Fotografía: M. Gaspar/OIEA)

Con un 19 % de la población mundial pero solo un 7 % de sus tierras arables, China se enfrenta a la dificultad de cómo alimentar a una población en aumento y cada vez más pudiente sin descuidar la protección de sus recursos naturales. Los agrónomos del país han hecho un uso creciente de las técnicas nucleares e isotópicas para la producción de cultivos en los últimos decenios. En la actualidad, en cooperación con el OIEA y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ayudan a los expertos de Asia y más allá de sus fronteras a desarrollar nuevas variedades de cultivo recurriendo a la irradiación.

En muchos países la investigación nuclear en agricultura la llevan a cabo organismos nucleares que no dependen de los centros nacionales de investigaciones agrícolas, pero en China el uso de técnicas nucleares en la agricultura forma parte de la labor de la Academia China de Agronomía (CAAS) y de las academias provinciales de ciencias agrícolas, lo que permite que los resultados puedan ponerse en práctica inmediatamente.

De hecho, la segunda variedad mutante de trigo que más se utiliza en China, Luyuan 502, fue desarrollada por el Instituto de Ciencias de los Cultivos de la CAAS y

la Academia de Ciencias Agrícolas de Shandong mediante la mejora por inducción de mutaciones en el espacio (véase el recuadro titulado “Base científica”) y, como explica Luxiang Liu, Director General Adjunto del Instituto, su rendimiento es un 11 % mayor que el de la variedad tradicional, además de ser más resistente a la sequía y a las principales enfermedades. Cultivada en más de 3,6 millones de hectáreas, una superficie parecida a la de Suiza, es una de las 11 variedades de trigo que se han desarrollado a fin de mejorar la resistencia a la sal y la sequía, la calidad del grano y el rendimiento.

Gracias a la estrecha cooperación con el OIEA y la FAO, China ha sacado al mercado más de 1000 variedades mutantes de cultivos en los últimos 60 años, y las variedades desarrolladas en este país representan una cuarta parte de los mutantes incluidos actualmente en la base de datos OIEA/FAO de variedades mutantes producidas en el mundo, explica Sobhana Sivasankar, Jefa de la Sección de Fitomejoramiento y Fitogenética de la División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura, que añade que los nuevos métodos de inducción de mutaciones y de selección de mutantes de alto rendimiento establecidos en el Instituto sirven de modelo a investigadores de todo el mundo.

El Instituto utiliza aceleradores de haces de iones pesados, rayos cósmicos, rayos gamma y sustancias químicas para inducir mutaciones en un gran número de cultivos, entre ellos, el trigo, el arroz, el maíz, la soja

y las hortalizas. “Las técnicas nucleares son la clave de nuestro trabajo y se integran plenamente en el desarrollo de variedades vegetales con el fin de mejorar la seguridad alimentaria”, añade el Sr. Liu.

A lo largo de los años el Instituto se ha convertido también en uno de los principales colaboradores del programa de cooperación técnica del OIEA: más de 150 fitotécnicos de más de 30 países han participado en cursos de capacitación y han obtenido becas en la CAAS.

La agencia nuclear de Indonesia (BATAN) y la CAAS intentan encontrar fórmulas de colaboración en lo que respecta al fitomejoramiento, y los investigadores indonesios buscan la manera de aprender de la experiencia de China, apunta Totti Tjiptosumirat, Jefe del Centro de Aplicaciones Isotópicas y Radiológicas de la BATAN, que añade que “la difusión y la promoción activas de las actividades de China en fitomejoramiento sería útil para la investigación agrícola en toda Asia”.

### De la inocuidad a la autenticidad de los alimentos

Otros cuantos institutos de la CAAS utilizan técnicas isotópicas y de base nuclear en sus actividades de investigación y desarrollo y participan en diversos proyectos coordinados de investigación y de cooperación técnica del OIEA. El Instituto de Normas de Calidad y de Tecnología de Ensayo para Productos Agrícolas ha elaborado un protocolo para detectar miel falsa por medio del análisis isotópico. Se estima que gran cantidad de lo que se vende en China como miel se produce de manera sintética en laboratorios, en vez de ser miel de colmena. De ahí la importancia de este recurso para tomar medidas enérgicas contra los autores de fraudes, explica Chen Gang, encargado de dirigir el trabajo de

investigación que se realiza con técnicas isotópicas en el Instituto. También existe un programa para determinar la procedencia geográfica de las reses mediante la utilización de isótopos estables.

Como resultado de proyectos coordinados de investigación y de cooperación técnica del OIEA realizados entre 2013 y 2018, el Instituto utiliza técnicas isotópicas para analizar la inocuidad y verificar la autenticidad de la leche y los productos lácteos. “Tras recibir apoyo durante algunos años, ahora somos completamente autosuficientes”, afirma el Sr. Gang.

### Mejorar la eficiencia de la nutrición

Distintos institutos de la CAAS utilizan isótopos estables para estudiar la absorción, la transferencia y el metabolismo de los nutrientes en los animales. Los resultados sirven para optimizar la composición de los piensos y las pautas de alimentación. El rastreo de isótopos es un método de mayor sensibilidad que los métodos analíticos tradicionales, lo que supone una gran ventaja al estudiar la absorción de los micronutrientes, las vitaminas, las hormonas y los fármacos, indica Dengpan Bu, Profesor del Instituto de Ciencias Animales.

A pesar de haber perfeccionado el uso de muchas técnicas nucleares, China busca en algunos ámbitos el apoyo del OIEA y la FAO: la industria láctea del país está atenuada por la baja tasa de absorción de proteínas de las vacas lecheras. Los rumiantes procesan menos de la mitad de las proteínas de los piensos animales y el resto termina en los excrementos y la orina. “Además del malgasto que supone para el agricultor, el elevado contenido en nitrógeno de los excrementos es perjudicial para el medio ambiente”, concluye el Sr. Bu. El uso de isótopos para seguir la



**Los científicos de China están considerando la posibilidad de utilizar técnicas de base nuclear para determinar mejor el metabolismo de ganado como el de la imagen en una granja cerca de Pekín y aumentar la cantidad de nitrógeno utilizado por las vacas procedente del pienso.**

(Fotografía: M. Gaspar/OIEA)

pista del nitrógeno procedente del pienso en su viaje a través del organismo del animal permitiría realizar los ajustes necesarios a la composición del pienso y ayudaría así a mejorar la eficiencia del nitrógeno. Esto tiene especial importancia ante el aumento constante del consumo de lácteos en China, que en la actualidad es de un tercio de la media mundial por persona. “Buscamos conocimientos especializados internacionales, por conducto del OIEA y la FAO, que nos ayuden a hacer frente a este problema”.

— Miklos Gaspar

## BASE CIENTÍFICA

### Inducción de mutaciones en el espacio

La irradiación provoca una mutación que genera variaciones genéticas aleatorias y da lugar a plantas mutantes con características nuevas y útiles. La mejora por inducción de mutaciones no consiste en una transformación genética, sino en utilizar los componentes genéticos propios de la planta e imitar el proceso natural de mutación espontánea, que es el motor de la evolución. Mediante la radiación, los científicos pueden acortar de forma significativa el tiempo necesario para producir variedades vegetales nuevas y mejoradas.

En la inducción de mutaciones en el espacio, denominada también mutagénesis espacial, las semillas se mandan al espacio para aprovechar los rayos cósmicos, que son más fuertes, e inducir la mutación. Los experimentos se llevan a cabo con satélites, transbordadores espaciales y globos de gran altitud. Una de las ventajas de este método es que el riesgo de que las plantas sufran daños es menor que con la irradiación gamma en la Tierra.

# Miles de publicaciones del OIEA accesibles gratuitamente en línea



 **IAEA**  
International Atomic Energy Agency  
*Atoms for Peace and Development*

[www.iaea.org/books](http://www.iaea.org/books)

[sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)

Conferencia Internacional sobre el

# Cambio Climático y el Papel de la Energía Nucleoeléctrica

7 a 11 de octubre de 2019, Viena (Austria)



Organizada por el



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica  
*Átomos para la paz y el desarrollo*

**#Atoms4Climate**

CN-275



Lea este y otros números del *Boletín del OIEA* en línea en [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Para más información sobre el OIEA y su labor, visite [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

síguenos en      

o entre en [h2o.iaea.org](http://h2o.iaea.org)