



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa
Hidrológico
Internacional



GRAPHIC

GRAPHIC

AGUAS SUBTERRÁNEAS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Pequeños Estados insulares en desarrollo (PEID)



PROGRAMA HIDROLÓGICO INTERNACIONAL
UNESCO/División de Ciencias del Agua



Pozos de vigilancia de las aguas subterráneas en la isla de Roi-Namur, en el atolón de Kwajalein (República de las Islas Marshall)

INTRODUCCIÓN: AGUAS SUBTERRÁNEAS, CAMBIO CLIMÁTICO Y PEQUEÑOS ESTADOS INSULARES EN DESARROLLO (PEID)

I. ESTADO ACTUAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS PEID

II. POSIBLES EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS PEID

III. IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA LAS ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PEID

GRAPHIC

COMPROMISO MUNDIAL SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

El Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) inició en 2004 el proyecto de Evaluación de Recursos Hídricos Subterráneos bajo los efectos de la Actividad Humana y del Cambio Climático (GRAPHIC) para entender mejor los efectos del cambio climático sobre los recursos mundiales de aguas subterráneas.

Visión de GRAPHIC

- Fomentar la gestión sostenible de las aguas subterráneas teniendo en cuenta las previsiones sobre el cambio climático y los efectos de la actividad humana.

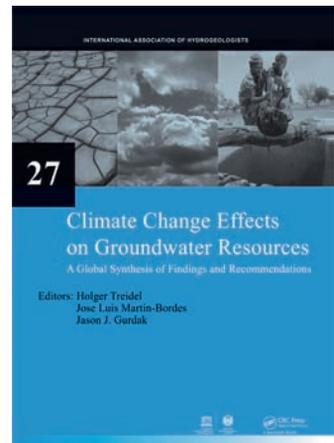
Misión de GRAPHIC

- Proporcionar una plataforma de intercambio de información mediante estudios monográficos, grupos de trabajo temáticos, investigaciones científicas y comunicación.
- Ser de utilidad a la comunidad mundial formulando recomendaciones basadas en datos científicos que sean pertinentes para la formulación de políticas.
- Utilizar las redes regionales y mundiales para mejorar la capacidad de gestionar los recursos hídricos subterráneos.

GRAPHIC contribuye a mejorar la comprensión del modo en que las aguas subterráneas interactúan con el ciclo hidrológico mundial, sustentan los ecosistemas y la humanidad y, a la vez, responden a los efectos complejos y combinados de las actividades humanas y el cambio climático. Con el fin de alcanzar esos objetivos, GRAPHIC es una iniciativa colaborativa que proporciona, a nivel mundial, un marco para la investigación, la educación y la divulgación en el plano internacional. GRAPHIC guía la reflexión sobre las investigaciones internacionales a llevar a cabo en las grandes regiones geográficas, sobre los temas relacionados con los recursos hídricos subterráneos y los métodos que permitan desarrollar los conocimientos combinados necesarios para abordar los aspectos científicos y sociales de la crisis mundial relacionada con las aguas subterráneas en el contexto del cambio climático.

GRAPHIC adopta un enfoque científico multidisciplinario que trasciende las investigaciones en física, química y biología para incluir los sistemas humanos de gestión de recursos y las políticas gubernamentales. GRAPHIC se ha dividido en temas, métodos y regiones. Los temas abarcan: i) la cantidad de agua subterránea (recarga, descarga y almacenamiento); ii) su calidad; y iii) los aspectos vinculados a la gestión. GRAPHIC utiliza numerosos métodos científicos, como el análisis de datos recopilados sobre el terreno, la geofísica, la geoquímica, la paleohidrología, la teledetección y la modelización. GRAPHIC realiza estudios en África, Asia y Oceanía, Europa, América Latina y el Caribe y América del Norte.

Puede encontrarse información adicional sobre GRAPHIC en www.graphicnetwork.net.



En la publicación *Climate Effects on Groundwater - A Global Synthesis of Findings and Recommendations* se compilan 20 estudios realizados en el marco de la red GRAPHIC en más de 30 países.

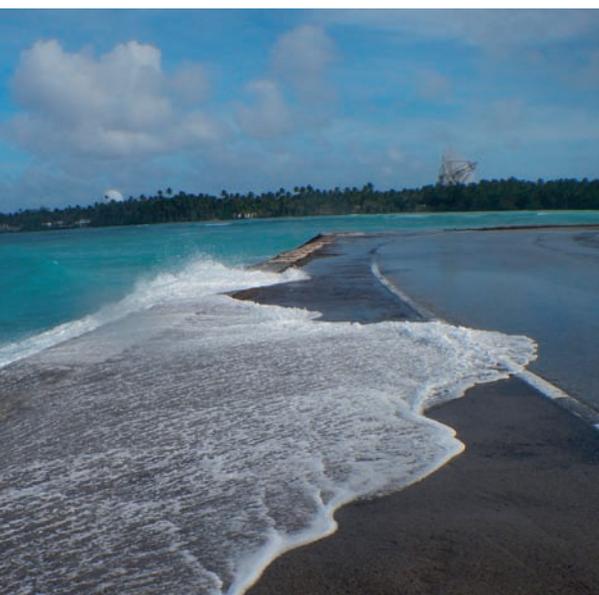
INTRODUCCIÓN: AGUAS SUBTERRÁNEAS, CAMBIO CLIMÁTICO Y PEQUEÑOS ESTADOS INSULARES EN DESARROLLO (PEID)

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS son un elemento esencial del ciclo hidrológico y un valioso recurso natural que constituye una de las principales fuentes de agua para la agricultura y para usos domésticos e industriales en todo el mundo. Cerca de la mitad del agua potable del mundo¹ y un 43% del agua que se consume efectivamente para la irrigación² provienen de fuentes subterráneas. Las aguas subterráneas son esenciales para alimentar muchos ríos, lagos, humedales y otros ecosistemas que dependen de ellas³. Sin embargo, los recursos hídricos subterráneos del mundo se encuentran en una situación de crisis⁴ debido a su extracción excesiva en muchas regiones semiáridas y áridas y a las consecuencias aún inciertas del cambio climático⁵.

Se prevé que el **CAMBIO CLIMÁTICO** modifique considerablemente el ciclo hidrológico mundial. Existe un amplio consenso sobre el hecho de que los principales efectos del cambio climático que los seres humanos percibirán serán sus repercusiones en los recursos hídricos a escala mundial, incluidas las aguas subterráneas^{6,7}, y los desastres relacionados con el agua, como las inundaciones y sequías. Las incidencias directas

del cambio climático sobre los procesos naturales (descarga, recarga y almacenamiento de aguas subterráneas y calidad de esas aguas) podrían verse agravadas por las respuestas del ser humano, como un aumento de la extracción de agua subterránea debido a la mayor frecuencia y duración de las sequías. En definitiva, los efectos del cambio climático en los recursos hídricos subterráneos están estrechamente vinculados a los objetivos de desarrollo sostenible y a los factores del cambio mundial, como el crecimiento demográfico, los cambios en el uso del suelo y la urbanización⁸.

LOS PEQUEÑOS ESTADOS INSULARES EN DESARROLLO (PEID) son un grupo de 52 países en desarrollo situados en islas de baja altitud compuestas de arrecifes de carbonato y roca volcánica en el Pacífico, el Caribe, África, el océano Índico y el mar de la China Meridional. Todos afrontan desafíos similares en materia de desarrollo sostenible⁹. Si bien su tamaño individual es reducido, colectivamente los PEID tienen una población de 63,2 millones de habitantes y un producto interno bruto (PIB) de 575.300 millones de dólares estadounidenses¹⁰.



Inundación provocada por una marejada ciclónica en la isla de Roi-Namur, en el atolón de Kwajalein (República de las Islas Marshall).

Los PEID figuran entre los sistemas humanos y naturales más vulnerables debido a su tamaño reducido, su aislamiento geográfico, su rápido crecimiento demográfico, su capacidad restringida y sus limitados recursos naturales, así como a su exposición a los desastres naturales (ciclones, huracanes, terremotos y erupciones volcánicas) y a la variabilidad del clima y el cambio climático. Sus dificultades económicas suelen estar relacionadas con el tamaño reducido de los mercados nacionales y su fuerte dependencia con respecto a escasos mercados remotos, los elevados costos de la energía, las infraestructuras, los transportes y los sistemas de comunicación, las grandes distancias que los separan de los mercados de exportación y los recursos de importación, y la gran inestabilidad del crecimiento económico⁹.

La vulnerabilidad de los PEID se ve directamente agravada por los limitados recursos de agua dulce (aguas subterráneas y superficiales) que podrían correr grandes riesgos debido al aumento del nivel del mar y la variabilidad y el cambio climáticos. Para llamar la atención sobre los PEID, las Naciones Unidas proclamaron 2014 Año Internacional de los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo¹⁰.

El presente documento tiene por objeto resumir: i) el estado actual de las aguas subterráneas en los PEID; ii) los posibles

efectos del cambio climático en las aguas subterráneas de los PEID; y iii) la importancia de los recursos hídricos subterráneos para la atenuación de los efectos del cambio climático en los PEID. Se presentan aquí resultados de estudios de GRAPHIC relativos a los PEID, entre los cuales se cuentan algunos situados en el Pacífico, el Caribe y otras regiones del planeta. Este documento forma parte de una serie de publicaciones de GRAPHIC posteriores al documento de posición¹¹ publicado en 2015.



I. ESTADO ACTUAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS PEID

En los pequeños Estados insulares en desarrollo (PEID), los recursos hídricos son limitados y tienen una vulnerabilidad especial frente a tensiones antrópicas y naturales. La fiabilidad y disponibilidad del suministro de agua limpia es ya un problema crucial en muchos PEID, y será cada vez más urgente en el futuro¹².

En un estudio reciente (2014) se documenta la situación de los acuíferos y las aguas subterráneas en 43 PEID¹³. Este estudio fue llevado a cabo por el PHI de la UNESCO y el IGRAC en el marco del Programa de Evaluación de las Aguas Transfronterizas (TWAP) del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM).

Las aguas subterráneas son una importante fuente de agua dulce en numerosos PEID (fig. 1). En estos países, las aguas subterráneas se encuentran principalmente en dos tipos de acuíferos: las “lentes de agua dulce” y los “acuíferos colgados”. Las lentes de agua dulce flotan sobre una masa de agua salada (más densa) que suele saturar las partes más profundas de la base de una isla (fig. 2). Ambas capas están separadas por una zona de transición relativamente delgada en la que el agua dulce y el agua salada se entremezclan. La lente de agua dulce suele alcanzar su mayor grosor bajo el centro de la isla, donde la capa freática se eleva por encima del nivel del mar, y es más delgada cerca de la costa. El volumen y la extensión de esta lente corresponde al equilibrio entre la cantidad de agua que se

recarga (precipitaciones, flujo de retorno del riego, filtración de ríos y lagos) y se descarga (al océano y por los pozos de extracción). En los PEID, los acuíferos colgados se sitúan sobre capas horizontales de confinamiento (poco permeables) o en compartimentos con una serie de diques volcánicos verticales¹⁴.

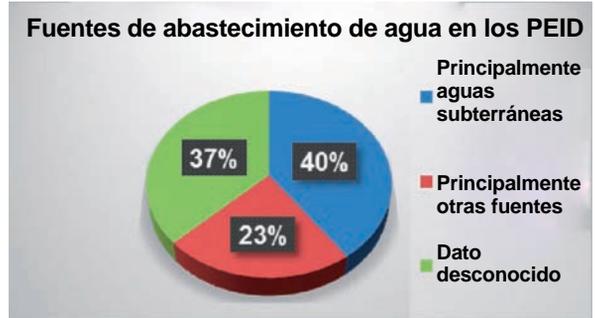


Fig. 1. Fuentes de abastecimiento de agua en los PEID¹³

SECCIÓN HIDROGEOLÓGICA CONCEPTUAL

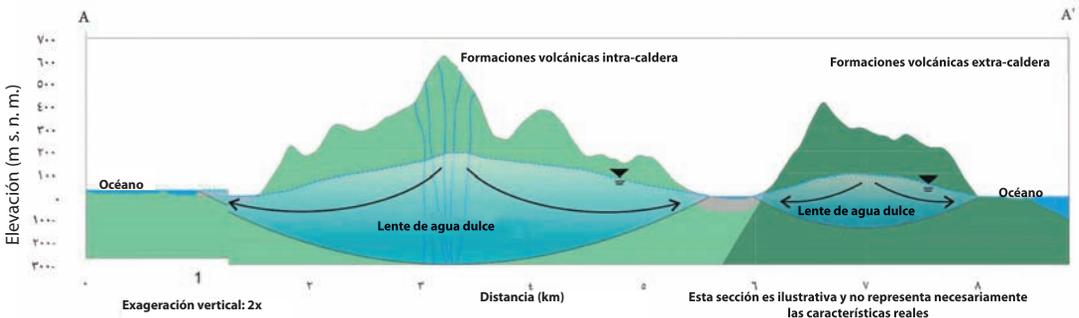


Fig. 2. Ejemplo de lente de agua dulce en la Samoa Americana¹³

II. POSIBLES EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS PEID

Los PEID son vulnerables frente a tensiones antrópicas y naturales.

Los PEID comparten muchas similitudes que aumentan su vulnerabilidad y reducen su resiliencia ante la variabilidad y el cambio climático: su superficie, su lejanía, su crecimiento demográfico, la propensión a los desastres naturales y la sensibilidad a los fenómenos climáticos extremos, la extrema apertura de sus economías y sus capacidades y recursos limitados¹². La disponibilidad de agua dulce es limitada en la mayoría de los PEID, puesto que se presenta en forma de lente subterránea rodeada de agua salina. En definitiva, los recursos hídricos de los PEID son especialmente vulnerables frente a tensiones antrópicas y naturales.

La sobreexplotación y la contaminación ponen en riesgo la disponibilidad de las aguas subterráneas en los PEID.

La disponibilidad de las aguas subterráneas en los PEID, al igual que en muchas regiones costeras del mundo, se ve amenazada por índices de extracción y agotamiento que han aumentado notablemente en los últimos decenios¹⁵⁻¹⁷. La sobreexplotación de las aguas subterráneas para el regadío, el uso municipal y el sector turístico, un sector económicamente importante para los PEID, resulta especialmente problemática para estos países. La intrusión de agua marina en los acuíferos costeros está provocada por la extracción y la sobreexplotación de las aguas subterráneas para satisfacer la demanda de agua dulce de los más de mil millones de habitantes de las zonas costeras^{7,18}. La intrusión salina se ha incrementado en general en los PEID entre 2000 y 2010 (fig. 3)¹³. El problema se ve exacerbado por la escasez de agua y el rápido crecimiento demográfico que suelen caracterizar a las zonas costeras^{18,19}.

Variación de la intrusión salina

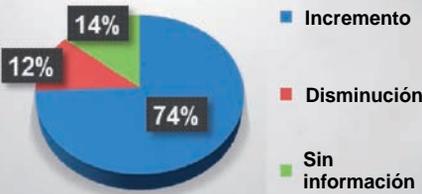


Fig. 3. Variación de la intrusión salina en los PEID entre 2000 y 2010¹³





Variación prevista en el índice de recarga

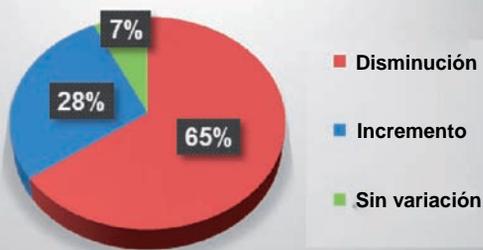


Fig. 4. Variación prevista en el índice de recarga en los PEID³.

La fiabilidad y disponibilidad del agua dulce en los PEID es un problema crucial.

La fiabilidad y disponibilidad del suministro de agua limpia es ya un problema crucial en muchos PEID, y será cada vez más urgente en el futuro¹². Según la mayoría de las hipótesis sobre los efectos futuros del cambio climático, es probable que la disponibilidad de agua dulce en los PEID se vea gravemente amenazada debido a los cambios previstos en la distribución de las precipitaciones, que podrían reducir el índice de recarga (fig. 4).

La subida del nivel del mar por el cambio climático reducirá la disponibilidad de las aguas subterráneas en los PEID.

Un motivo de especial preocupación es el efecto amplificador que supone la combinación de la subida del nivel del mar y la disminución del grosor de las lentes de agua potable en los PEID²².

Las consecuencias de la subida del nivel del mar para los acuíferos costeros e insulares se verán agravadas por el menor nivel de recarga. Además, las variaciones en la escorrentía de agua dulce y la descarga de agua subterránea submarina²³ pueden alterar la calidad de las aguas costeras y afectar a la productividad de los ecosistemas marinos cercanos al litoral^{12,24}. Las infraestructuras hídricas de las zonas costeras bajas son también vulnerables a los daños provocados por la subida del nivel del mar, las inundaciones, los huracanes y las tormentas.

Las aguas subterráneas de los PEID son especialmente vulnerables a las variaciones extremas de las precipitaciones, las marejadas ciclónicas y otros efectos similares del cambio y la variabilidad climáticos.

En numerosos PEID, especialmente las islas carbonatadas y de poca altitud, las aguas subterráneas presentan una vulnerabilidad inherente debido a varios factores: escasa superficie y reducido volumen de aguas subterráneas aptas para su consumo como agua potable, crecimiento demográfico y demanda superior a las capacidades, recursos hídricos superficiales que rozan los límites de la sostenibilidad, sobreexplotación de las lentes de agua dulce, intrusión salina y contaminación por desechos humanos y animales^{5, 25,26}. Esas vulnerabilidades se ven agudizadas por las tormentas tropicales y por el cambio y la variabilidad climáticos, ya que se prevé un descenso de las precipitaciones, un incremento de la evapotranspiración y posibles reducciones de los índices de recarga.



Se prevé que la subida del nivel del mar incremente la magnitud de la intrusión salina y la salinización de las aguas subterráneas costeras, lo que reducirá el volumen de agua dulce disponible para los humanos y para los ecosistemas en los PEID y en otras zonas costeras^{12,20,21}. La subida del nivel del mar podría afectar también a la calidad de las aguas subterráneas, debido a sus efectos negativos para el drenaje de las aguas de lluvia y el tratamiento de las aguas residuales en las zonas urbanas¹².

Así, por ejemplo, en 2004 una marejada ciclónica provocada por el huracán Frances contaminó las aguas subterráneas de la isla de Andros Norte (Bahamas)^{27,28}. Tras la marejada, las concentraciones de cloruro en las aguas subterráneas se multiplicaron casi por 30 y alcanzaron valores superiores a los establecidos por la Organización Mundial de la Salud para el agua potable, de 250 mg/l. Según los estudios, la marejada no afectó directamente a la lente de agua dulce, sino que el sistema de zanjas y conductos provocó una infiltración directa y una rápida intrusión salina en el sistema al quedar inundado con agua del mar. Como consecuencia de ello, se decidió bombear el agua de los sistemas de canalización de la isla para fomentar la recarga y la dilución del agua subterránea salobre^{27,28}.

Las sequías provocadas por el fenómeno de El Niño/Oscilación Austral (ENOA) pueden reducir la recarga y el grosor de las lentes de agua dulce en ciertos PEID.

En los PEID de baja altitud del océano Pacífico, el océano Índico y el mar de la China Meridional, las aguas subterráneas son especialmente sensibles a la variabilidad climática en escalas temporales de interanuales a multidecenales. Las sequías provocadas por el fenómeno de El Niño/Oscilación Austral (ENOA) pueden hacer disminuir los índices de recarga y reducir sustancialmente el grosor y la extensión de las lentes de agua dulce²⁹. Además, la salinidad de las aguas subterráneas en ciertos PEID del Pacífico está correlacionada con la temperatura de la superficie del mar y el Índice de Oscilación Austral. Las sequías graves han obligado incluso a abandonar varias islas muy pequeñas al quedar agotadas sus reservas de agua subterránea dulce²⁹. En los periodos de sequía, es fundamental modificar el bombeo de las aguas subterráneas en las islas para preservar las lentes de agua dulce. Asimismo, durante los periodos secos, diversas especies de árboles de los PEID se alimentan directamente de las aguas subterráneas y pueden reducir sustancialmente la disponibilidad de las aguas subterráneas y exacerbar los efectos de la sequía en estas aguas²⁹.



Sistema de zanjas en la isla de Andros Norte²⁷.

III. IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA LAS ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS PEID

Las aguas subterráneas cumplen una importante función en la adaptación de los PEID al cambio climático.

En numerosos PEID, las aguas subterráneas ofrecen un suministro más seguro, suficiente y económico que las aguas superficiales. Para muchos de estos países, el uso de las aguas subterráneas será importante para garantizar el acceso al agua potable. Sin embargo, el carácter sensible de las lentes de agua dulce requiere una gestión cuidadosa de las aguas subterráneas.

POLÍTICA Y GOBERNANZA

Se necesita una mejor gobernanza de las aguas subterráneas en los PEID.

En muchos PEID, las aguas subterráneas son vulnerables al cambio climático y a las actividades humanas debido a las deficiencias de las medidas normativas y de las políticas hidrológicas nacionales, que no establecen prioridades o directrices claras a los organismos competentes, así como por la insuficiencia de recursos financieros y humanos para gestionar las aguas subterráneas y los sistemas de abastecimiento^{13, 29} (figs. 5a y 5b).

En una gestión adaptativa de las aguas subterráneas se deben incorporar las políticas hidrológicas y agrícolas regionales.

Los PEID pueden lograr la sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos incorporando eficazmente políticas hidrológicas y agrícolas regionales que contribuyan a controlar la captación ilegal de aguas subterráneas, crear infraestructuras y establecer normativas para el almacenamiento de las aguas subterráneas (véase más adelante la gestión de la recarga de acuíferos) y diversificar los cultivos y aplicar las mejores técnicas disponibles de irrigación eficiente⁵. Este modo de gestión debe alcanzar un equilibrio entre protección ecológica, desarrollo humano, crecimiento económico y costos socioeconómicos aceptables.

Las comunidades deben participar en la definición de objetivos para la sostenibilidad de las aguas subterráneas.

La participación social es fundamental para establecer objetivos de sostenibilidad que contribuyan al éxito de las estrategias de gestión a corto y largo plazo. Ello es especialmente importante en muchas regiones en las que no hay participación social en la gestión y planificación de los recursos hídricos debido a la desconexión entre las administraciones y las comunidades²⁹.



Fig. 5. Medidas normativas para controlar la captación de aguas subterráneas (a) y para la protección de las aguas subterráneas (b) en los PEID³.

USO DE LA TIERRA

La ordenación del uso de la tierra en los PEID debe optimizar los beneficios económicos y de adaptación para el sector hídrico.

La adopción de prácticas de ordenación del uso de la tierra que contribuyan a estabilizar la disponibilidad de los recursos hídricos constituye una estrategia de adaptación frente al aumento de las sequías y de la variabilidad de las precipitaciones que pueden sufrir los PEID en el siglo XXI⁵. Por ejemplo, en ciertos PEID, la eliminación selectiva de freatofitos (plantas que se alimentan de las aguas subterráneas), como los cocoteros, puede incrementar la recarga y el rendimiento sostenible y reducir la salinidad de las aguas subterráneas²⁹. No obstante, el beneficio potencial para la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos debe valorarse en relación con los beneficios que esos árboles aporten a las comunidades y al turismo.

La propiedad de la tierra puede obstaculizar la gestión sostenible de las aguas subterráneas.

En ciertos PEID del Pacífico, la tierra pertenece a menudo a propietarios tradicionales, lo que suele provocar conflictos entre las autoridades y los propietarios a la hora de establecer reservas hídricas en tierras privadas. Debido a que el derecho consuetudinario de muchos PEID del Pacífico atribuye la titularidad de las aguas subterráneas a los propietarios de la tierra, los gobiernos suelen ser reticentes a adoptar medidas legislativas que establezcan que el agua pertenece a todos los habitantes o al Estado, o que prohíban usos que contaminen la tierra, por temor a infringir los derechos de propiedad²⁹. Por ello, algunos PEID no disponen de una protección jurídica de las aguas subterráneas frente a la sobreexplotación o la contaminación.

PROMOVER LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA EN LOS PEID

Mejorar la relación entre la vigilancia de las aguas subterráneas y la captación sostenible.

Una estrategia de adaptación fundamental para los PEID consiste en fomentar la sostenibilidad de la captación de aguas subterráneas basándose en una mejor vigilancia de estos recursos hídricos. La instalación de pozos de observación y la vigilancia constante de la zona de transición son medidas básicas para entender mejor el comportamiento de las lentes de agua dulce.



Conocer la respuesta de las lentes de agua dulce ante diversas situaciones (períodos prolongados de sequía, influencia de las mareas, precipitaciones intensas, etc.) es un primer paso necesario para optimizar los planes de captación de aguas subterráneas con objeto de equilibrar el suministro y la demanda. La captación de aguas subterráneas con pozos horizontales es una estrategia de gestión importante para evitar el ascenso temprano del agua salina (“*upconing*”).

La gestión de la recarga de acuíferos es un enfoque de adaptación prometedor para algunos PEID.

Algunos PEID podrán aplicar estrategias de adaptación al cambio climático que incorporen análisis de idoneidad de proyectos de gestión de la recarga de acuíferos (MAR) y almacenamiento y recuperación artificiales (ASR). La gestión de la recarga de acuíferos puede ser un enfoque con un costo relativamente bajo para captar y almacenar el excedente de agua de lluvia en acuíferos locales durante los períodos húmedos, algo que puede redundar en beneficio de las lentes de agua dulce y compensar la escasez de recursos

hídricos superficiales durante los períodos secos. Así, por ejemplo, se están llevando a cabo proyectos de MAR y ASR en la isla de Roi-Namur, una isla unida artificialmente que forma parte del atolón de Kwajalein (República de las Islas Marshall)³⁰. Roi es la porción occidental y Namur la porción oriental (véase la imagen de Google Earth más abajo). El abastecimiento de agua en la isla se limita a la captación y el almacenamiento de aguas superficiales durante la temporada de lluvias y el bombeo de la lente de agua dulce durante la estación seca y en épocas de sequía.

En Roi, las aguas subterráneas se bombean de la lente mediante un pozo horizontal de mil metros de longitud, en el que varias bombas extraen el agua de la parte superior de la capa freática a fin de limitar la formación de una depresión cónica y la intrusión salina en la lente de agua dulce.

Namur dispone de una importante cubierta vegetal y sus aguas subterráneas se recargan de modo natural, sin infraestructuras de MAR. En esta parte de la isla existe un pozo en la lente de agua dulce, pero no se explota activamente para el suministro de agua. Por ello, la lente de agua dulce de Namur es más representativa de los atolones naturales y se calcula que cuenta con 4,2 millones de galones de agua dulce (unos 16.000 metros cúbicos)³¹. En un marcado contraste, la lente de agua dulce de Roi es unas 50 veces mayor (se calcula que contiene 226 millones de galones, más de 850.000 metros cúbicos) debido al uso de técnicas de MAR y a que la vegetación y la pérdida de agua subterránea por evapotranspiración son relativamente menores³¹.

Los modelos de circulación general (GCM) son actualmente insuficientes para generar hipótesis sobre el cambio climático en los PEID.

Actualmente, los GCM no aportan una resolución espacial lo suficientemente precisa para generar hipótesis para muchos PEID sin usar técnicas

estadísticas de reducción de escala²⁹. Además, muchos GCM presentan una incertidumbre considerable en cuanto a las previsiones de precipitación en los trópicos, dado que no simulan adecuadamente la convección tropical y actualmente no reproducen algunas de las principales formas de variabilidad climática de carácter interanual a multidecenal, como el ENOA²⁹. Para planificar mejor la gestión y la sostenibilidad de las aguas subterráneas en los PEID se necesitarán mejores técnicas de reducción de escala, modelos climáticos regionales y GCM con una resolución más precisa combinados con modelos del flujo de las aguas subterráneas.

Se deben detectar y solucionar las vulnerabilidades de los sistemas diseñados para la gestión de las aguas subterráneas.

Por ejemplo, sería factible reducir el riesgo de inundación por las marejadas ciclónicas, que probablemente afectarán a las Bahamas, aislando y cubriendo el sistema de zanjas y conductos de la isla de Andros Norte²⁷. Asimismo, la instalación de cisternas de captación del agua de lluvia o grandes depósitos de almacenamiento superficiales podría incrementar el suministro de aguas superficiales y subterráneas a escala local²⁹.

Mejorar las capacidades humanas e institucionales y los conocimientos técnicos en los PEID.

Resulta de suma importancia implantar una gestión adaptativa y sostenible de las aguas subterráneas, especialmente en los PEID que dependen íntegramente de estos recursos como única fuente de agua potable. Sin embargo, numerosos PEID carecen de las capacidades humanas e institucionales y de los conocimientos técnicos necesarios para detectar las vulnerabilidades de los recursos hídricos subterráneos y aplicar estrategias adaptativas de gestión del agua.

En Roi, se utilizan depósitos revestidos de hormigón (a la izquierda de la imagen) para captar el agua de lluvia y recargar artificialmente las aguas subterráneas cuando hay exceso de capacidad. Fuente: Google Earth



COLABORADORES

Jason J. Gurdak

Coordinador de GRAPHIC
San Francisco State University
San Francisco (Estados Unidos de América)

Diana M. Allen

Departamento de Ciencias de la Tierra, Simon Fraser University
Burnaby (Canadá)

Shannon Holding

Departamento de Ciencias de la Tierra, Simon Fraser University
Burnaby (Canadá)

Tales Carvalho Resende

Programa Hidrológico
Internacional de la UNESCO
(IHP)
París (Francia)

Marc Leblanc

Coordinador de GRAPHIC
Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
Aviñón (Francia)

Alice Aureli

Programa Hidrológico
Internacional de la UNESCO
(IHP)
París (Francia)

Mehrdad Hejazian

Departamento de Ciencias de la Tierra y del Clima, San Francisco State University
San Francisco (Estados Unidos de América)

Peter Swarzenski

Servicio Geológico de los Estados Unidos
Santa Cruz (Estados Unidos de América)

Andreas Antoniou

Centro IGRAC de la UNESCO
Delft (Países Bajos)

Aurélien Dumont

Programa Hidrológico
Internacional de la UNESCO
(IHP)
París (Francia)

REFERENCIAS

1. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, tercera edición del *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: "El agua en un mundo en cambio"*, 349. UNESCO, 2009.
2. Siebert, S. et al., Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1863-1880 (2010).
3. Kløve, B. et al., Climate Change Impacts on Groundwater and Dependent Ecosystems. *J. Hydrol.* (2013). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.037.
4. Famiglietti, J. S., The global groundwater crisis. *Nat. Clim. Change* 4, 945-948 (2014).
5. *Climate change effects on groundwater resources: A global synthesis of findings and recommendations*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
6. Green, T. R. et al., Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *J. Hydrol.* 405,532-560 (2011).
7. Taylor, R. G. et al., Ground water and climate change. *Nat. Clim. Change* 3, 322-329 (2012).
8. Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC), *Groundwater in the sustainable development goals: Position paper* 8, 2014. En <http://www.youblisher.com/p/1042011-Groundwater-in-the-Sustainable-Development-Goals/>
9. Naciones Unidas, Oficina del Alto Representante para los Países Menos Adelantados, los Países en Desarrollo Sin Litoral y los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (OHRLLS), *Small Island Developing States - Small Island Big(ger) Stakes*, 28, 2011. En http://unohrlls.org/UserFiles/File/UN_SIDS_booklet_5x6-5_062811_web.pdf
10. Naciones Unidas. Año Internacional de los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo - 2014, en <http://www.un.org/en/events/islands2014/index.shtml#&panel1-1>
11. Gurdak, J. J. et al., GRAPHIC groundwater and climate change: Mitigating the global groundwater crisis and adapting to climate change, 12. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, 2015.
12. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, *Climate change and water*, 210, 2008.
13. Allen, D. M. et al., *Assessment of SIDS groundwater systems - Transboundary Water Assessment Programme*, 43. Simon Fraser University, 2014.
14. IGRAC, Pequeños Estados insulares en desarrollo, en <http://www.un-igrac.org/areas-expertise/small-island-developing-states>
15. Konikow, L. F., *Groundwater depletion in the United States (1900-2008)*, 63. U.S. Geological Survey, 2013. En <http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5079>
16. Konikow, L. F. y Kendy, E., Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeol. J.* 13, 317-320 (2005).

17. Wada, Y. et al., Global depletion of groundwater resources. *Geophys. Res. Lett.* 37 (2010).
18. Small, C. y Nicholls, R. J., A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. Coast. Res.* 19, 584-599 (2003).
19. Millennium Ecosystem Assessment, *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press, 2005.
20. Werner, A. D. et al., Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Adv. Water Resour.* 51, 3-26 (2013).
21. Uhlenbrock, K., The science and communication needed to help communities plan for sea level rise. *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 94, 238 (2013).
22. Bobba, A., Singh, V., Berndtsson, R. y Bengtsson, L., Numerical simulation of saltwater intrusion into Laccadive Island aquifers due to climate change. *J. Geol. Soc. India* 55, 589-612 (2000).
23. Gonnee, M. E., Mulligan, A. E. y Charette, M. A., Climate-driven sea level anomalies modulates coastal groundwater dynamics and discharge. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2701-2706 (2013).
24. Michael, H. A., Russoniello, C. J. y Byron, L. A., Global assessment of vulnerability to sea-level rise in topography-limited and recharge-limited coastal groundwater systems. *Water Resour. Res.* n/a-n/a (2013). DOI: 10.1002/wrcr.20213.
25. Holding, S. y Allen, D. M., Risk to water security for small islands: an assessment framework and application. *Reg. Environ. Change* (2015). DOI: 10.1007/s10113-015-0794-1.
26. Holding, S. y Allen, D. M., Wave overwash impact on small islands: Generalised observations of freshwater lens response and recovery for multiple hydrogeological settings. *J. Hydrol.* 529, 1324-1335 (2015).
27. Bowleg, J. y Allen, D. M., en *Climate change effects on groundwater resources: A global synthesis of findings and recommendations*, 63-73. CRC Press, Taylor & Francis Group.
28. Holding, S. y Allen, D. M., From days to decades: numerical modelling of freshwater lens response to climate change stressors on small low-lying islands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 933-949 (2015).
29. White, I. y Falkland, T., en *Climate change effects on groundwater resources: A global synthesis of findings and recommendations*, 75-105. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
30. Hejazian, M., Swarzenski, P., Gurdak, J. J., Odigie, K. y Storlazzi, C., Effects of land-use change and managed aquifer recharge on geochemical reactions with implications for groundwater quantity and quality in atoll island aquifers, Roi-Namur, Republic of the Marshall Islands, en *Abstracts with Proceedings* (AGU, 2015).
31. Gingerich, S. B., Groundwater resources and contamination at Roi-Namur Island. *Kwajalein Atoll Repub. Marshall Isl. US Geol. Surv. Water-Resour. Investig. Rep.*, 95-4275 (1996).



© PHI-UNESCO, noviembre de 2015

Fotografías:

Portada: © Mehrdad Hejazian

Contraportada: © Mehrdad Hejazian

Págs. 2 y 3: © Peter Swarzenski © Mehrdad Hejazian

Págs. 4 y 5: © Mehrdad Hejazian © Peter Swarzenski Págs. 6 y 7: ©

Mehrdad Hejazian © Diana Allen

Pág. 9: © Mehrdad Hejazian

Cubierta posterior: © Peter Swarzenski

INFORMACIÓN DE CONTACTO

**PROGRAMA HIDROLÓGICO
INTERNACIONAL (PHI)**

UNESCO/DIVISIÓN DE CIENCIAS DEL AGUA (SC/HYD)

7 PLACE DE FONTENOY

75732 PARÍS 07 SP (FRANCIA)

TEL.: (+33) 145 68 40 01

ihp@unesco.org - www.unesco.org/water/ihp