



## **PROGRAMA UNESCO/OEA ISARM AMÉRICAS ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS DE LAS AMÉRICAS**

### **ESTRATEGIA REGIONAL PARA LA EVALUACION Y GESTION DE LOS SISTEMAS ACUIFEROS TRANSFRONTERIZOS EN LAS AMERICAS**

#### **PHI-VIII/SERIE ISARM AMÉRICAS N° 4**

Publicado en 2015 por la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) - Programa Hidrológico Internacional (PHI) y por el Departamento de Desarrollo Sostenible (DDS) de la Organización de los Estados Americanos (OEA).

Serie ISARM Américas, N° 4  
ISBN 978-92-9089-196-3

© UNESCO 2015

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO y de la OEA la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO o de la OEA.

Se autoriza la reproducción, a condición de que la fuente se mencione en forma apropiada, y se envíe copia a la dirección abajo citada. Este documento debe citarse como:

UNESCO, 2015. Estrategia Regional para la Evaluación y Gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en las Américas

Dentro del límite de la disponibilidad, copias gratuitas de esta publicación pueden ser solicitadas a:

Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)  
Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe  
UNESCO

Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso  
11200 Montevideo, Uruguay  
Tel.: +598 2413.2075  
Fax: +598 2413.2094  
e-mail: [phi@unesco.org.uy](mailto:phi@unesco.org.uy)  
<http://www.unesco.org.uy/phi>



## **PROGRAMA UNESCO/OEA ISARM AMÉRICAS ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS DE LAS AMÉRICAS**

# **ESTRATEGIA REGIONAL PARA LA EVALUACION Y GESTION DE LOS SISTEMAS ACUIFEROS TRANSFRONTERIZOS EN LAS AMERICAS**

Esta publicación ha sido elaborada con la documentación aportada por los Coordinadores Nacionales del Programa UNESCO/OEA ISARM Américas relativa a los Sistemas Acuíferos Transfronterizos de las Américas y con el aporte de especialistas y personal de UNESCO/PHI y de OEA/DDS. Su compilación y edición estuvo a cargo del Coordinador Nacional de Canadá, Alfonso Rivera con la colaboración de Ofelia Tujchneider y Nelson Da Franca.

**Montevideo/Washington DC  
2015**

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

Blanca Jimenez-Cisneros  
*Directora de la División de Ciencia del Agua*

Alice Aureli  
*Jefa, Sección Aguas Subterráneas, PHI*

Zelmira May  
*Hidróloga Regional, Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe (a.i.)*

Nelson Da Franca  
*Consultor Senior en Aguas Subterráneas, UNESCO*

**Organización de los Estados Americanos – OEA**

Cletus Springer  
*Director del Departamento de Desarrollo Sostenible – DDS*

Maximiliano Campos  
*Jefe Área Geográfica América Latina, DDS*

Enrique Bello  
*Jefe Adjunto Área Geográfica América Latina, DDS*

Lydia Ugas C.  
*Asistente Técnica de Proyectos, DDS (hasta diciembre 2013)*

**Coordinadores Nacionales**

**ARGENTINA**  
Ofélia Tujchneider – UNL/CONICET

**BELICE**  
Rudolph Williams Jr. – BNMS

**BOLÍVIA**  
Hugo Delgado Burgos – SERGEOTECMIN

**BRASIL**  
Júlio Tadheu Silva Kettelhut – SRHU/MMA

**CANADÁ**  
Alfonso Rivera – NRCan/GSC

**COSTA RICA**  
Rodrigo Calvo Porras – ICE

**ECUADOR**  
Guillermo Gallardo – INAMHI

**CHILE**  
Francisco Echeverría – DGA

**COLOMBIA**  
Omar Franco – IDEAM

**EL SALVADOR**  
Celina Mena – SNET

**ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA**  
Randy Hanson – USGS

**GUATEMALA**  
Fulgencio Garavito – INSIVUMEH

**GUYANA**  
Bhaleka Seulall – HYDROMET

**HAITI**  
Urbain Fifi – Université de Quisqueya

**HONDURAS**  
Sergio Galel Sánchez Arita – DGRH/SERNA

**MÉXICO**  
Felipe I. Arreguin Cortez – CNA

**NICARAGUA**  
Rigoberto Lopez Valdivia – DRHC/MARENA

**PANAMÁ**  
Silvano Vergara – ANAM

**PARAGUAY**  
Fernando Larroza – DRH/VMME/MOPC

**PERÚ**  
Edwin Zenteno Tupiño – INRENA

**REPUBLICA DOMINICANA**  
Francisco T. Rodriguez – INDRHI

**SURINAME**  
Moekiran A. Amatali – HRD

**URUGUAY**  
Jose Luis Genta – DNH

**VENEZUELA**  
Fernando Decarli – DHMO/DGCH/MINAMB



## TABLA DE CONTENIDOS

1. PREFACIO.....	1
2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	2
3. ANTECEDENTES Y ALCANCE DE LA ESTRATEGIA REGIONAL.....	6
3.1 Antecedentes sobre ISARM Américas .....	6
3.2 Los avances en ISARM Américas.....	7
3.3 Origen de la iniciativa del Libro sobre estrategias para el manejo de Sistemas Acuíferos Transfronterizos de las Américas.....	8
3.4 Bases para una estrategia de gestión de los Acuíferos Transfronterizos .....	9
3.5 Los aspectos de gobernanza involucrados en la gestión de los SAT .....	10
3.6 Visión integral, coordinación y fortalecimiento institucional .....	11
3.7 El factor aguas subterráneas en la gobernanza de los SAT.....	12
3.8 El factor transfronterizo en la gestión de los SAT.....	13
3.9 Objetivos de largo plazo .....	15
4. NIVEL DEL CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS EN LAS AMÉRICAS.....	16
4.1 Antecedentes sobre los conocimientos de los SAT.....	16
4.2 Sistemas acuíferos transfronterizos identificados al final de 2009.....	17
4.3 Niveles de conocimiento de los SAT en 2012 .....	18
4.4 Conclusiones .....	28
5. SINOPSIS DE LA GESTIÓN DE LOS SAT EN LAS AMÉRICAS .....	30
5.1 Aspectos Institucionales .....	30
5.2 Aspectos socioeconómicos.....	36
5.3 Aspectos medioambientales y climáticos.....	83
5.4 Instrumentos legales, situación actual y tendencias.....	86
5.4.1 Artículos sobre el derecho de los Acuíferos Transfronterizos .....	86
5.4.2 Situación actual y tendencias .....	104
6. CONOCIMIENTO BÁSICO CIENTÍFICO y TÉCNICO NECESARIO PARA LA EVALUACIÓN Y GESTION DE LOS SAT.....	105
6.1 Introducción .....	105
6.2 Aspectos de evaluación de los SAT.....	106
6.2.1 Modelo conceptual y escala de evaluación.....	107
6.2.2 Disponibilidad de agua subterránea .....	109
6.2.3 Vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea.....	121
6.2.4 Incertidumbres en la evaluación de los SAT .....	130

6.3 Los efectos transfronterizos .....	133
6.4 Aspectos de gestión sostenible.....	141
6.4.1 ¿Distribución justa y equitativa del recurso?.....	142
6.4.2 Elementos para plan de gestión .....	143
6.4.3 Geoindicadores de estado.....	147
6.4.4 Indicadores de sostenibilidad de aguas subterráneas .....	150
6.5 Conclusiones .....	152
7. ENFOQUES PARA IMPLEMENTAR LA ESTRATEGIA REGIONAL .....	154
7.1 Introducción .....	154
7.2 Etapas y planteamientos hacia la realización de la estrategia.....	154
7.3 Compartir información y modalidades de colaboración .....	156
7.4 Cooperación, colaboración y participación social.....	159
7.5 Comunicación .....	166
7.6 Financiamiento .....	166
7.7 Desarrollo de recursos humanos (desarrollo de capacidades).....	168
7.7.1 Hidrogeología.....	168
7.7.2 Gestión integrada del recurso hídrico .....	169
7.8 Casos de buenas prácticas de gestión.....	172
ANEXO 7-A.....	179
REFERENCIAS.....	180
GLOSARIO DE TÉRMINOS SELECCIONADOS .....	192
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS .....	197
ANEXOS .....	198
LISTA DE CUADROS .....	204
LISTA DE FIGURAS .....	205
LISTA DE TABLAS.....	206

## 1. PREFACIO

La Estrategia Regional para la evaluación y gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos (SAT) en las Américas está estructurada en 6 capítulos. El capítulo 2 presenta las principales conclusiones y recomendaciones de la estrategia propuesta. El capítulo 3 presenta los antecedentes y alcance de la Estrategia Regional. El capítulo 4 provee un resumen de los niveles de conocimiento actuales de los SAT de las Américas. En el capítulo 5 se presenta una sinopsis de la gestión de los SAT en las Américas. El capítulo 6 describe con detalle los conocimientos tanto científicos como técnicos necesarios para una adecuada evaluación y gestión de los SAT. Finalmente, el capítulo 7 propone enfoques para implementar la Estrategia Regional.

El agua es el recurso natural más importante de la vida, y en los últimos años las comunidades y las naciones se han dado cuenta de la importancia de los recursos hídricos compartidos y en particular del caso de las aguas subterráneas.

Los acuíferos transfronterizos se han convertido en objeto de una creciente atención por parte de la comunidad internacional; sin embargo, las cuestiones relacionadas con la gobernanza de los acuíferos transfronterizos aún no se han desarrollado completamente.

En su actual octava fase (2014-2021), el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO, bajo el tema global “Seguridad hídrica: respuestas a los desafíos locales, regionales y mundiales”, ha dedicado un esfuerzo prioritario al tema de la gestión y gobernanza de los acuíferos transfronterizos, intensificando el estudio de los recursos de agua subterránea en una escala global y dedicando especial atención a la elaboración de directrices y marcos para la protección y el uso racional de los acuíferos transfronterizos.

La UNESCO está especialmente comprometida en este tema a través de la iniciativa ISARM del Programa Hidrológico Internacional (PHI), iniciada en 2000. En las Américas, este programa ha sido particularmente activo y ha preparado previamente tres estudios sobre los sistemas acuíferos transfronterizos, brindando así un invaluable apoyo a los países en su uso sostenible y su protección.

Este cuarto volumen presenta una estrategia para aplicar ante los desafíos regionales, y la UNESCO desea destacar el valor del trabajo realizado durante dos años por 24 países del continente; la cooperación de expertos, instituciones y gobiernos, coordinada a través de ISARM Américas, es un ejemplo de éxito en la contribución de la ciencia a la toma de decisiones y de un alto nivel de colaboración internacional.

El Programa Hidrológico Internacional espera que este esfuerzo contribuya a generar atención sobre la importancia de apoyar la gestión sostenible los recursos hídricos subterráneos transfronterizos y los esfuerzos de cooperación, garantía de paz y desarrollo de la región.

Programa Hidrológico Internacional  
División de Ciencias del Agua  
UNESCO

## 2. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Editado por Alfonso Rivera

Una estrategia regional como la descrita aquí para el continente americano, no solo provee un cuadro para el monitoreo y la toma de decisiones basadas en conocimientos sobre la gestión y el desarrollo, sino que también puede facilitar la manera de prever o solucionar conflictos entre vecinos que comparten el recurso. El establecimiento de guías básicas como las descritas en esta estrategia para los sectores científicos, técnicos, legales y administrativos, representan ese cuadro de uso y desarrollo sostenibles de los sistemas acuíferos transfronterizos.

Dirigido y coordinado por la UNESCO y la OEA, el grupo ISARM Américas ha recorrido un largo camino en la creación de una red de alianzas con un inventario de los 73 SAT (hasta 2009) en el continente americano; en el intercambio de datos e información con los vecinos; y en cooperar en la preparación y publicación de la síntesis de varios de los conocimientos de los SAT. Sin embargo existen muchos desafíos para la implementación futura la de la estrategia regional y la gestión de esos SAT.

El clima de confianza entre los países que comparten SAT es fundamental a efectos de promover la cooperación efectiva y el intercambio de información para una gestión compartida. En este sentido, el proceso desarrollado por ISARM Américas, con el apoyo de la UNESCO y la OEA por más de 10 años ha sido exitoso en el logro de sus objetivos: tres publicaciones junto con una sólida red de expertos a nivel nacional.

Los instrumentos legales a nivel internacional en el continente americano son aún muy incipientes. El único convenio sobre la gestión integrada de los acuíferos transfronterizos en las Américas es el del Sistema Acuífero Guaraní: “Declaración Conjunta – San Juan, 2 de agosto de 2010 – Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní” (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay).

A nivel nacional, en la mayoría de los países americanos las aguas subterráneas no cuentan con un régimen jurídico claramente definido. Por ello es recomendable que en el futuro se desarrollen cuadros jurídicos simples y claros.

En el sector público, los organismos competentes en la gestión el agua no son los únicos actores involucrados, dado que la multiplicidad de normativas que rigen en las zonas de frontera convoca a otros organismos a los cuales se suman las autoridades municipales o provinciales con jurisdicción en el área del SAT. Esta diversidad de situaciones influye de manera muy significativa en la forma de abordar un plan de gestión del agua y con mayor razón, de un acuífero transfronterizo. Si bien no podría establecerse un modelo único, es pertinente en cada caso tener presente estas particularidades, ya que al momento de tomar decisiones, estos factores pueden aflorar.

La implementación de acciones en un SAT no sólo es responsabilidad de las agencias del gobierno central, sino también de los organismos regionales y locales (provincial, estatal, municipal) y de la sociedad en su conjunto. Para generar acciones de buena gestión de un SAT, son necesarias las asociaciones de los diferentes niveles administrativos. Para ello es recomendable que los gobiernos proporcionen apoyo a los organismos locales.

De manera general, la recopilación y procesamiento de datos hidrogeológicos, los estudios y ejecución de obras para el manejo, así como la protección de los acuíferos tienen altos costos. Además, estos estudios a menudo requieren tecnologías avanzadas para su desarrollo lo que impide que se pueda implementar en la mayoría de los países con las capacidades técnicas disponibles. La mayoría de los países en desarrollo enfrentan otras prioridades básicas de su sociedad, teniendo poca capacidad para la inversión pública, lo cual hace difícil proporcionar fondos para actividades relacionadas con el manejo de acuíferos transfronterizos.

En este contexto, se vuelve una cuestión estratégica el identificar fuentes de financiamiento de origen nacional o internacional, con el fin de proporcionar fondos para la ejecución de las tareas necesarias para expandir el conocimiento y aplicar una gestión sostenible del SAT. Esto es aplicable tanto a las intervenciones dentro del propio país (nacional), como en aquellas que son comunes a los países que comparten el acuífero.

Por lo tanto, es importante establecer consenso y compromiso entre los países sobre el financiamiento de la gestión y estudios de acuíferos transfronterizos. Una alternativa para minimizar estas limitaciones es por medio de la participación de organismos multilaterales de desarrollo y los donantes internacionales los cuales, combinados con los recursos técnicos y financieros de las organizaciones no gubernamentales locales, pueden ayudar a iniciar relaciones transfronterizas a largo plazo.

Un camino que ha demostrado ser factible para minimizar estas limitaciones es la participación de organismos multilaterales de desarrollo y donantes internacionales. Estos organismos tienen mecanismos para implementar proyectos los cuales facilitan que los países se unan para implementar las acciones necesarias.

En general, no se registran conflictos entre los países que comparten los SAT. Algunos conflictos han surgido, y podrían aumentar, en los SAT de Norteamérica donde la competición por el recurso del agua subterránea en las fronteras (todos los usos) es mucho más evidente. La cooperación e intercambio de conocimientos ha sido clave en la prevención de conflictos.

En la mayoría de los países del continente americano las respuestas políticas reflejan hasta cierto punto los tiempos de cambio global y grandes incertidumbres, las cuales dependen de: a) una buena información; b) una buena difusión de la información; y c) una buena comprensión de esa información.

Como resultado de la iniciativa UNESCO/OEA ISARM Américas y gracias al esfuerzo de la red de colaboradores de los países americanos, se puede concluir que donde ya existen mecanismos institucionales para la evaluación de acuíferos transfronterizos se requerirán esfuerzos considerables para que estos se hagan efectivos y faciliten las evaluaciones bi- o multi-nacionales, mientras que donde esos mecanismos no existen será necesario crearlos.

Al final, una gestión sostenible de acuíferos transfronterizos requiere acciones a niveles múltiples. El optimizar el uso de los recursos disponibles y al mismo tiempo preservar o aumentar la disponibilidad del agua, junto con el desarrollo de opciones de adaptación, reforzaran el uso compartido de un SAT. Esos sectores se sobreponen tanto en los aspectos sociales como técnicos de la gestión, los cuales trascienden las facetas inter-disciplinarias, inter-sectoriales e inter-gubernamentales de los problemas sociales y técnicos. Por ello, la gestión integrada de los recursos hídricos deberá estar basada en esquemas flexibles que no solo manejen la

demanda sino también la participación social en la solución de problemas, consideren los cambios en el uso de la tierra y del agua, y promuevan el incremento de la sostenibilidad del agua.

En la aplicación de la estrategia primero se debe tomar en cuenta los resultados de otras prácticas de manejo de aguas subterráneas exitosas (transfronterizas o no) alrededor del mundo (p.ej. Robins et al., 1999).

El éxito de la implementación de la estrategia esbozada en este documento depende de las acciones por y dentro de los países que cruza el acuífero transfronterizo. Es necesario que los países que contienen el acuífero transfronterizo cooperen y compartan información. Por ejemplo, los datos compilados (uso del agua, calidad del agua, o niveles de agua) o estudios científicos, deben estar disponibles para un exitoso desarrollo del acuífero, asociado a una gestión sostenible. Es poco probable que el exitoso desarrollo y gestión de un acuífero puedan ser logrados sin países dispuestos a cooperar y a compartir la información disponible.

Al mismo tiempo, la cooperación, colaboración, comunicación y participación social dentro de un país también son necesarias. Es necesario desarrollar alianzas entre los diferentes niveles de la administración: nacional/federal, regional y local. El diseño de la gestión puede ser a nivel federal, pero a menudo tiene que ser implementado a nivel regional o local para que pueda tener éxito. Una información confiable, comunicada al público relacionado con la gestión (por ejemplo, las medidas de conservación) debe ocurrir si este va a participar en los esfuerzos a nivel local. El éxito de la implementación de una estrategia depende fuertemente de la disponibilidad de recursos humanos formados. Educar al público sobre la importancia de la gestión del acuífero para el futuro es necesario para el éxito en la gestión de los acuíferos transfronterizos. Si las personas son capaces de desarrollar una actitud positiva hacia el cambio, es probable que trabajen juntos para proteger el acuífero.

Los desafíos son combinar las recomendaciones científicas y técnicas en la estrategia propuesta aquí con los numerosos instrumentos jurídicos e institucionales existentes en los 24 países, así como la Resolución de la ONU sobre SAT. La estrategia ha sido diseñada para establecer vínculos entre la ciencia y las políticas y los instrumentos existentes para la gestión de SAT. Esta pretende explicar y desarrollar el papel de la ciencia y la toma de decisiones informada para la comprensión colectiva, el desarrollo, la gestión y protección de los SAT de las Américas. Por lo tanto su principal mensaje es: *"una estrategia fuerte con base científica que pueda ser la columna vertebral para la toma de decisiones debidamente informada"*.

Los países que participan en las iniciativas de ISARM Américas reconocen que un único convenio global será difícil de relacionar a las amplias variaciones en las condiciones de las aguas subterráneas transfronterizas y problemas identificados en los países del continente americano. La clave para la gestión de las aguas subterráneas en los SAT reside en las realidades locales de hidrogeología y los patrones socio-culturales de usos del agua de los países que comparten los acuíferos. Las acciones de ISARM Américas, han posibilitado el desarrollo sistemático de la información para la gestión de SAT en las Américas.

Por último, se debe subrayar que las instituciones internacionales como la UNESCO y la OEA, juegan un papel muy importante, al convocar a los países, permitiéndoles llegar a acuerdos y establecer cooperación en los acuíferos transfronterizos. Los países miembros esperan que la UNESCO y la OEA continúen desempeñando el

papel de liderazgo que han jugado en la preparación, realización y ejecución de la estrategia regional para la gestión de SAT de las Américas.

### 3. ANTECEDENTES Y ALCANCE DE LA ESTRATEGIA REGIONAL

Editado por Alfonso Rivera y Marcela Espinoza Nissim

#### 3.1 Antecedentes sobre ISARM Américas

**El Programa UNESCO/OEA ISARM Américas sobre Acuíferos Transfronterizos de las Américas**, iniciado en 2000, es un ámbito de trabajo de nivel científico, inserto en el Programa Hidrológico Internacional (PHI), que bajo el patrocinio de UNESCO y el Departamento de Desarrollo Sostenible (DDS) de la Organización de Estados Americanos (OEA), propicia el estudio conjunto y la cooperación e intercambio de información entre los países miembros para avanzar en el conocimiento de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos en las Américas (SAT). En el seno de este grupo, que integra a los países del continente americano, sus miembros participan a través de Coordinadores Nacionales, en su mayoría representantes de las instituciones nacionales competentes u otros expertos designados por sus respectivas autoridades.

El programa mundial “Gestión de los Recursos Acuíferos Transfronterizos-ISARM” se inició durante la 14<sup>o</sup> Sesión del Consejo Intergubernamental del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, realizado en París, en junio de 2000.

En el contexto de los países de América, el Programa UNESCO/OEA ISARM Américas comienza a gestarse a partir del Taller sobre Acuíferos Transfronterizos que tuvo lugar durante el XXXII Congreso de la Asociación Latinoamericana de Hidrología para el Desarrollo (AHLSD), en conjunto con la Asociación Internacional de Hidrogeología (AIH), realizada en la ciudad Mar del Plata, Argentina, en octubre de 2002.

El programa busca promover el conocimiento de los recursos hídricos subterráneos que se encuentran en el territorio compartido por dos o más países, la colaboración entre éstos para construir consensos en el ámbito científico, medio ambiental, institucional, socioeconómico y legal en relación a tales recursos y su área circundante, así como a los aspectos fundamentales asociados a la gestión de los mismos.

En función de tales objetivos, ISARM Américas ha trazado un plan de trabajo comenzando por un inventario de los Sistemas de Acuíferos Transfronterizos, el que se actualiza permanentemente conforme se avanza en el intercambio de información. Este inventario se conforma con la recopilación de datos disponibles sobre las características hidrogeológicas, el uso actual del agua subterránea compartida y los aspectos legales e institucionales. Otro frente de trabajo importante del Programa es la identificación de casos de estudio de interés particular.

En este contexto, se estableció una red de expertos multidisciplinarios para la identificación y definición de acuíferos compartidos, intercambiar experiencias y enriquecer las visiones a través de estudios de caso para identificar los asuntos relevantes para la gestión exitosa de los recursos acuíferos compartidos internacionalmente. Igualmente, a través de la publicación de los trabajos y estudios de casos se busca crear conciencia sobre la importancia de los recursos hídricos subterráneos, no sólo en los tomadores de decisiones y los responsables de las políticas de gestión de estos recursos, sino en toda la comunidad para

animarlos de manera constructiva a promover prácticas de respeto y preservación de estos recursos, así como políticas de gestión adecuadas y coherentes.

En consecuencia, este marco de trabajo responde a la necesidad de abordar en un ámbito multilateral los aspectos científicos y de gobernanza que comprende la gestión interna de cada país con respecto a los acuíferos que se presentan en el territorio de más de un país. Es necesario contar con mayor información de una manera global e integrada sobre estos recursos a fin de desarrollar herramientas que apoyen a los países en la formulación de políticas coherentes y en el desarrollo de acciones compatibles con la idea de una gestión responsable y sostenible de los SAT.

Para llegar a un estado deseable de gestión de los SAT, se ha visto que es imprescindible partir desde un trabajo conjunto del ámbito científico con la participación de todos los países de las Américas que comparten Sistemas Acuíferos Transfronterizos, liderados por un grupo de especialistas conocedores de la región.

### **3.2 Los avances en ISARM Américas**

El programa ISARM Américas ha logrado posicionarse como una iniciativa muy exitosa promoviendo la cooperación, intercambio de experiencias y de información entre los 24 países que lo integran, desde Argentina/Chile hasta Canadá/Estados Unidos sobre los respectivos Sistemas Acuíferos Transfronterizos. Entre 2003 y 2012, ISARM Américas, coordinada y apoyada conjuntamente por UNESCO y OEA ha tenido éxito en inventariar 73 acuíferos transfronterizos en el continente americano.

En esta etapa, se ha logrado un creciente relevamiento de información científica de varios acuíferos transfronterizos y también sobre los aspectos jurídicos e institucionales vigentes en los países miembros, incluyendo los acuerdos internacionales que en algunos casos puedan tener aplicación entre dos o más países fronterizos.

El material preparado en el ámbito de ISARM Américas está recopilado en tres publicaciones:

- El Libro I, editado en 2007, contiene un inventario con información relevante de 68 acuíferos transfronterizos identificados hasta esa fecha (UNESCO, 2007).
- El Libro II, editado en 2008, describe los aspectos legales e institucionales respecto al tratamiento del tema en cada país (UNESCO., 2008).
- El Libro III, publicado en 2010, entrega una síntesis de los aspectos socioeconómicos, climáticos y ambientales involucrados en el manejo de los acuíferos transfronterizos inventariados (UNESCO, 2010).

Dentro del programa mundial ISARM, es pertinente tener en cuenta el rol del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO en el apoyo a la Comisión de Derecho Internacional de las Naciones Unidas (UNILC) al desarrollo del "Proyecto de artículos sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos" (también denominado coloquialmente "Ley de Acuíferos Transfronterizos"), recogido en la Resolución de las Naciones Unidas ONU – A/RES 63/124. Dicho articulado se basó en el Capítulo IV del Informe de la Comisión de Derecho Internacional adoptada en

su 63° periodo de sesiones, el 15 de enero de 2009, en base a lo acordado en la reunión del 11 de diciembre de 2008.

El articulado provee recomendaciones y pautas que podrían orientar a los países a lograr una gestión pacífica y sostenible de los acuíferos transfronterizos basándose de manera importante en los aportes científicos generados en este ámbito, en especial el inventario del PHI de la UNESCO, como el Mapa Mundial de Acuíferos Transfronterizos, ya que estos orientaron los trabajos de la primera serie de artículos. Este articulado no ha sido aún incorporado en un instrumento formalmente vinculante para los Estados, pero su valor es el de constituir un avance en haber generado un consenso sobre los conceptos y principios fundamentales que cabría tener en cuenta para definir políticas y planes de gestión de los SAT.

A partir de esta Resolución, se abre una etapa en que los Estados son invitados por la Asamblea a *“concertar los correspondientes arreglos bilaterales y regionales para la adecuada gestión de sus acuíferos transfronterizos sobre la base de los principios enunciados en el proyecto de artículos”*. En este contexto, los organismos de los países que son responsables de implementar las políticas y estrategias de gestión de los SAT necesitarán un fuerte apoyo para llevar adelante los trabajos técnicos que puedan requerir sus autoridades, a fin de proporcionarles elementos de juicio que los orienten en la adopción de una postura interna frente al tema y una eventual decisión.

La estrategia aquí presentada para los SAT de las Américas considera todos los acuerdos existentes estableciendo vínculos estrechos con los mismos y considerando las características científicas, institucionales, culturales, ambientales y socioeconómicas de los 73 SAT inventariados.

### **3.3 Origen de la iniciativa del Libro sobre estrategias para el manejo de Sistemas Acuíferos Transfronterizos de las Américas**

La idea de una estrategia del continente Americano surge en parte por la evolución que ha tenido el trabajo realizado por los países en ISARM Américas. La estrategia del continente americano para la evaluación y gestión de acuíferos transfronterizos ha de tener en cuenta la información recopilada en los tres libros elaborados por los países, así como los avances alcanzados en las reuniones y talleres de Coordinadores Nacionales de ISARM Américas.

El articular las bases para una visión y estrategia conjunta de las Américas surge durante el 5° Taller sobre Acuíferos Transfronterizos de las Américas, realizado en Montreal, en 2007 (UNESCO, 2007), ocasión en la que los Coordinadores Nacionales acordaron la preparación de un documento de trabajo para su análisis conjunto. En función de estas tareas, se realizaron las siguientes reuniones:

- Primera Reunión, Quito, Ecuador, 6-7 de Julio de 2008 (UNESCO, 2008)
- Segunda Reunión, Miami, Estados Unidos, 11-13 de agosto de 2009 (UNESCO, 2009)
- Tercera Reunión, Quito, Ecuador, 14-17 de septiembre de 2009, en ocasión del 7° Taller de Coordinación sobre Acuíferos Transfronterizos de las Américas UNESCO/OEA-ISARM (UNESCO, 2010a).
- Cuarta Reunión, San José de Costa Rica, 7 de mayo de 2010 (UNESCO, 2010b)

- Quinta Reunión en Medellín, Colombia, 17-19 de noviembre de 2011(UNESCO, 2011)
- Sexta Reunión en Río de Janeiro, Brasil, noviembre 2012 (UNESCO, 2012)

En estas reuniones la UNESCO y OEA convocaron al denominado “grupo de estrategia” que incluyó a aquellos Coordinadores Nacionales y expertos interesados en contribuir con la estrategia.

### **3.4 Bases para una estrategia de gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos**

Como ya se ha mencionado, sobre este estado de avance, se ha visto la necesidad de generar una estrategia conjunta que nazca de la información relevada sobre las diversas características de los acuíferos transfronterizos en las Américas, y de los consensos sobre aspectos técnicos y científicos que deben tomarse en cuenta al visualizar una política de gestión de los SAT.

La Estrategia pretende orientar a los países aprovechando el acervo de conocimientos y consensos del ámbito científico que se está construyendo respecto de los acuíferos transfronterizos, para contar con una visión general de los recursos de agua subterránea y los aspectos sociales, económicos e institucionales que caracterizan la zona geográfica de influencia de los SAT. Esta información debe constituirse en el mediano o largo plazo en una herramienta importante para la generación de políticas y normas en materia de gestión de los SAT, aportando elementos relevantes que orienten a los países miembros en la toma de decisiones.

Asimismo, se busca contribuir, desde el ámbito científico, con lineamientos y herramientas que ayuden a los respectivos organismos competentes a desarrollar sus planes de gestión orientados por una visión integral y con ello, proporcionar los elementos básicos para una futura evaluación y gestión sostenible de los SAT de las Américas.

La gestión de los Sistemas de Acuíferos Transfronterizos deberá tener en cuenta el factor de sostenibilidad bajo criterios de responsabilidad, considerando el acervo común generado por las prácticas vigentes de los países, así como la base técnica y científica de conocimientos necesarios para implementar la estrategia, a fin de guiar a los actores involucrados para concordar decisiones informadas y compatibles con sus expectativas, en términos de lograr los necesarios estándares de seguridad hídrica.

Al contar con una estrategia consensuada de gestión de los SAT se propicia la colaboración, prácticas de buena vecindad y políticas internas bajo criterios comunes para una gestión sostenible de los mismos. El principio fundamental es lograr un balance entre los requerimientos socioeconómicos y ambientales de los Estados que comparten un sistema acuífero transfronterizo.

La iniciativa de formular una estrategia tiene en consideración la necesidad de las propias instituciones a cargo de la gestión de los SAT, de contar con suficientes elementos de juicio y herramientas de apoyo en su gestión, pero también, en otras instancias internas, a sus autoridades de gobierno nacionales, regionales y municipales. Igualmente, los mismos usuarios del agua subterránea, son actores significativos en este contexto, como destinatarios finales de toda la labor implicada en la gobernanza de los SAT.

En la iniciativa de construir una estrategia conjunta de gestión de los acuíferos no solo se respetan los mecanismos existentes de cooperación, sino que se aprovechan las experiencias generadas en ellos y busca crear también nuevos mecanismos que ayuden a avanzar en la construcción de consensos y buenas prácticas en torno a la gestión de los SAT.

Abordar este tema desde las instancias multilaterales de cooperación e intercambio de información y de experiencias generadas en el ámbito de ISARM permite a los países ampliar la visión sobre la realidad de los SAT y sobre los posibles modelos de gestión, apuntando a la preservación y uso sostenible de los recursos hídricos.

### **3.5 Los aspectos de gobernanza involucrados en la gestión de los SAT**

#### ***Gobernanza***

La gobernanza de las aguas subterráneas es el proceso mediante el cual estos recursos son administrados, a través de la aplicación de los principios de responsabilidad, participación, información y transparencia, y de las reglas jurídicas. Es el arte de coordinar las acciones administrativas y la toma de decisiones entre los distintos ámbitos de competencia y niveles territoriales— uno de los cuales puede ser global (adaptado a partir de Saunier y Meganck 2007, “Diccionario e Introducción a la Gobernanza Ambiental Internacional”).

La gobernanza trata sobre los procesos y mecanismos de interacción entre los actores gubernamentales y no gubernamentales, es un concepto dinámico; mientras que la gobernabilidad se refiere al estado resultante de la aplicación de estos mecanismos y procesos, es un fin de la administración. Es preferible, cuando se habla de gobernanza referirse al buen gobierno, más allá de la gestión o manejo, conceptos ligados a la administración. La gobernanza se refiere a los procesos y a los sistemas a través de los cuales opera la sociedad. Se refiere al amplio método de “gobernar”, que incluye pero no se restringe a la perspectiva más limitada de “gobierno”. Se refiere a la interrelación de las estructuras formales e informales, a los procedimientos y a los procesos (Hoekstra, 2006); a los sistemas de hacer las reglas, las redes de actores a todos los niveles de la sociedad (de lo local a lo global), dentro del contexto del desarrollo sostenible (IHDP, 2006).

Al abordar el tema de la gobernanza de los SAT, es importante identificar los aspectos específicos que deberían considerar los organismos competentes al momento de administrar dichos recursos, formular políticas de gestión, tomar decisiones y/o coordinar los actos concretos implicados en su gestión.

#### ***Información***

Desde luego, se requiere como principal elemento un acervo de conocimientos confiable que permita tener una visión de conjunto sobre los SAT, donde la información científica integrada es componente primordial aunque no el único, ya que también debe considerarse el entorno en su totalidad, incluyendo a la población como un actor preponderante, así como la institucionalidad y el marco normativo que define el ámbito de acción de los organismos competentes.

#### ***Institucionalidad y marco normativo adecuado***

La institucionalidad y la normativa de cada país son los instrumentos internos que definen el margen de acción del cual disponen los organismos competentes para

establecer un plan de gestión en lo que concierne a su territorio y los acuerdos que tenga con el país fronterizo.

### ***Principios de gestión sostenible***

Igualmente la tarea de administrar estos recursos debería regirse bajo ciertos principios generalmente aceptados como la sostenibilidad en el uso de los recursos, la transparencia, la responsabilidad y participación social en la generación de políticas, iniciativas o proyectos que involucren su aprovechamiento, entre otros.

### ***Atención especial a la condición subterránea y transfronteriza de los SAT***

Además de considerar todos los principios y normas que están en la base de un manejo sostenible de los recursos naturales y en especial de los recursos hídricos, también será preciso atender a dos aspectos importantes que caracterizan a los SAT de manera muy particular, esto es, su condición de aguas subterráneas y por otra parte, su condición transfronteriza.

En cuanto a su **condición subterránea**, es evidente el desafío que implica el esfuerzo de contar con información precisa y completa sobre los SAT. Ello plantea a los países la necesidad de intensificar los esfuerzos para tener una base de datos adecuada para tomar medidas oportunas sobre la protección y administración sostenible de sus recursos. Esto implica acelerar el proceso de relevamiento de información que llevan a cabo los países en sus instancias internas y dar prioridad a esta tarea, debiendo procurar que ella sea abordada de manera integral, con plena coordinación entre las entidades técnicas y las autoridades políticas.

Por otra parte, **el carácter transfronterizo de los SAT** requiere que las instituciones competentes presten atención a los aspectos internos e internacionales implicados. En consecuencia, es preciso considerar las particularidades de las poblaciones presentes en las zonas de frontera del país participante, así como a la coexistencia de normas internas aplicables a esas áreas que generan competencias compartidas entre dos o más instituciones.

Asimismo, cabe considerar el marco político y normativo que define en cada caso la relación vecinal entre los países que comparten un acuífero determinado. En el caso de los SAT, es posible que muchos de los lineamientos locales generalmente válidos para la gestión del agua en los respectivos países, deban adecuarse caso a caso a las singulares circunstancias de cada acuífero transfronterizo, y al escenario social y político vigente, tanto en el contexto interno como internacional.

### **3.6 Visión integral, coordinación y fortalecimiento institucional**

En la misma idea de respetar la conducción y políticas individuales de los países en el camino hacia la construcción de visiones conjuntas sobre la gestión de los SAT, se estima importante fortalecer sus instituciones para que puedan llevar a cabo estas políticas y al mismo tiempo aportar en la generación de herramientas validadas desde el consenso técnico y científico, que puedan constituirse en modelos disponibles para los Estados.

El principio fundamental adoptado por los SAT es lograr un balance entre los requerimientos de orden económico, ambiental y humano que sostienen los Estados que comparten un acuífero, teniendo en perspectiva la mantención, estabilidad y protección de los recursos del acuífero transfronterizo.

La visión y la misión de ISARM Américas han sido adoptadas por los Coordinadores Nacionales de los 24 países participantes y están definidos a continuación:

#### **VISIÓN**

Lograr un manejo de los Acuíferos Transfronterizos orientado a su mejoramiento, sostenibilidad y protección de los recursos de agua subterráneos que traspasan las fronteras de los países participantes.

#### **MISIÓN**

Incrementar la generación e intercambio de conocimientos respecto de los Acuíferos Transfronterizos, creando canales de comunicación, cooperación y trabajo mancomunado entre los países participantes de ISARM Américas

### **3.7 El factor aguas subterráneas en la gobernanza de los SAT**

En este tema, resulta especialmente ilustrativo el trabajo que se ha desarrollado en el ámbito del Proyecto GEF *“Gobernanza de las Aguas Subterráneas, Un marco para Acciones Locales, en el contexto de la Consulta Regional América Latina y el Caribe”* (da Franca, 2012) que tuvo lugar en Montevideo, en abril de 2012. Ello se ha desarrollado en un marco de cooperación entre el Programa Hidrológico Internacional de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Asociación Internacional de Hidrogeólogos y el Banco Mundial.

Durante la sesión de trabajo sobre gobernanza y políticas de las aguas subterráneas, los debates se centraron en torno a los siguientes principios:

**Sostenibilidad**, considerando que no basta con manejar los conceptos de recarga y extracción, sino que se requiere incrementar el conocimiento del recurso y velar porque la gestión sea equilibrada, pero que además busque mejorar el estado de los acuíferos, integrando una visión sistémica de las posibles consecuencias no sólo ambientales sino también sociales y económicas.

**Transparencia** en la gestión y en la disponibilidad del recurso, esto es, la cantidad disponible según la recarga del acuífero, así como su uso actual y futuro. El esfuerzo de los países debería ir en la dirección de establecer normas de transparencia que permitan poner a disposición de la comunidad la información relevante sobre la disponibilidad y posibilidad de agotamiento del almacenamiento en el futuro. Este principio debería idealmente estar presente en los procesos de evaluación y estudios de impacto ambiental y demás permisos sectoriales que las respectivas legislaciones contemplan para el desarrollo de proyectos que involucran el uso de aguas subterráneas de manera significativa.

**Participación ciudadana**, no solo para crear conciencia e involucrar a la comunidad en la gestión del agua subterránea, sino también para el propio Estado, como herramienta de control interno y legitimación social que debería estar presente en los procesos de formulación de las políticas de manejo sostenible, así como en los actos administrativos involucrados en su gestión. El seguimiento activo

de los organismos y de la comunidad respecto del estado de los acuíferos ayudará a acordar los niveles aceptables de extracción, considerando también estándares deseables de calidad del agua.

**Responsabilidad** en la evaluación de los costos y beneficios implicados en el uso del agua subterránea, sin desatender sus consecuencias ambientales y sociales. Ello requeriría desarrollar las normas técnicas adecuadas para un resultado eficiente en las iniciativas de uso del agua, teniendo como finalidad prioritaria el beneficio de la población o la conservación del medio ambiente. Igualmente es indispensable contar con mecanismos y procedimientos adecuados para identificar a los usuarios directos y el marco de responsabilidades que les cabe como beneficiarios del recurso, considerando que deben respetar los derechos de otros usuarios, así como la disponibilidad y calidad del agua.

**Integración** en la gestión del agua subterránea, incorporando no sólo los aspectos relacionados con la distribución del recurso a los usuarios, sino también la forma en que debería ejercerse el derecho de uso, las obligaciones implicadas en ello, para el adecuado tratamiento y reutilización de las aguas residuales o recarga artificial, así como la cooperación entre los actores involucrados.

### **3.8 El factor transfronterizo en la gestión de los SAT**

Como ya se ha señalado anteriormente, en cuanto a los aspectos legales, sociales e institucionales implicados en la gestión del agua, el organismo competente debe articular una política que guarde coherencia con las necesidades de preservación y uso adecuado de los recursos hídricos. Debe haber una relación con los planes y políticas de gestión de otros organismos del Estado en sus áreas de actividad, del ámbito social, económico o productivo en el espacio territorial que constituye el entorno de la cuenca, atendiendo, asimismo, a la coexistencia de diversos regímenes normativos que son aplicables a ese territorio en particular.

En el ámbito de las relaciones vecinales, los países limítrofes suelen tener acuerdos en diversas áreas de la integración física que constituyen el día a día de la interacción entre las poblaciones colindantes, tales como el desarrollo de conexiones para el tránsito transfronterizo, el funcionamiento de controles fronterizos, el desarrollo de proyectos de explotación o de preservación de recursos en zonas fronterizas, transferencia energética, integración cultural, entre otras.

Las zonas fronterizas de los países suelen presentar ciertas características comunes que normalmente conllevan a la coexistencia de normas específicas que tienen aplicación en esas áreas territoriales. A ello debe sumarse la existencia de normas internas de los países colindantes, cuya aplicación podría incidir en el uso de los recursos de los SAT y por supuesto, el marco jurídico internacional que pueda tener aplicación en los territorios donde se ubican los SAT.

Cada frontera y cada pueblo fronterizo tiene sus propias particularidades. Así como hay fronteras donde los pueblos contiguos de uno y otro país tienen una gran comunicación, interacción e interdependencia y una historia e identidad cultural común, también las hay donde los pueblos contiguos han vivido las consecuencias de un conflicto reciente.

Aunque parezca paradójico, muchos pueblos fronterizos se encuentran lejos de los centros desarrollados, pero ya forman parte de corredores de tránsito internacional por donde se conducen importantes flujos de comercio y ello los llevará en el corto plazo a una mayor interacción, junto con un mayor desarrollo y a una creciente

demanda de servicios básicos, incluyendo el suministro de agua. Por ejemplo, en Sudamérica existen comunidades fronterizas que sufren un gran aislamiento en el territorio de su propio país, en tanto que del otro lado de la frontera puede existir una ciudad con pleno desarrollo, o bien emprendimientos industriales, agrícolas o mineros, circunstancias que los pueden impactar positiva o negativamente.

En cuanto a los elementos de participación ciudadana, que suelen ser parte importante en la gestión de los recursos hídricos, en el caso de los SAT, el factor transfronterizo hace más complejos aún estos procesos, considerando que entre los actores significativos se encuentran pueblos de diversas etnias, a veces coexistiendo en una misma zona de influencia de un acuífero, con sus particulares visiones y sus propios sistemas de ordenamiento social, e incluso con problemas de divisiones internas, lo que puede dificultar la identificación de sus legítimos representantes.

La presencia de estos pueblos bajo la jurisdicción de dos o más países hace aún más difícil identificar a dichos actores y suele ocurrir que los organismos gestores del agua se enteran de su existencia cuando ya han aflorado conflictos que los involucran, ya sea como partes en una disputa entre comunidades o entre éstas y potenciales usuarios del sector productivo. La falta de previsión en la identificación de estos actores puede también impactar en las relaciones bilaterales entre los países colindantes, desafiando e instando a sus agentes a buscar soluciones adecuadas.

Igualmente, la coexistencia de actividades muy disímiles que suele darse en los territorios fronterizos, no sólo conlleva la aplicación de diversos marcos normativos que rigen las actividades productivas, los aspectos ambientales y los estatutos de protección social asociados a sus poblaciones, sino que también hace necesario identificar una gran diversidad de actores involucrados.

El sector del turismo tiene una presencia muy importante en las zonas de frontera y con demandas crecientes en sentidos diversos, ya que por una parte requieren más infraestructura de conectividad fronteriza, desarrollo de servicios básicos y agilización de los tráficlos internacionales, y por otra, exigen preservación del medio ambiente o de los derechos de los pueblos indígenas en la frontera, como parte importante de los productos turísticos que ofrecen.

En el sector público, los organismos competentes en la gestión el agua no son los únicos actores involucrados, dado que la multiplicidad de normativas que rigen en las zonas de frontera convoca a otros organismos a los cuales se suman las autoridades municipales o provinciales con jurisdicción en el área del SAT.

Esta diversidad de situaciones influye de manera muy significativa en la forma de abordar un plan de gestión del agua y con mayor razón, de un acuífero transfronterizo. Si bien no podría establecerse un modelo único, es pertinente en cada caso tener presente estas particularidades, ya que al momento de tomar decisiones, estos factores pueden aflorar.

En definitiva, tener una visión de conjunto para analizar todo el espectro socio económico y cultural que presenta el área de cada SAT ayudará a una mejor gestión de los mismos.

### 3.9 Objetivos de largo plazo

Como soporte a la estrategia, el grupo ISARM Américas persigue cinco objetivos de largo plazo, con un horizonte de 20 años. La definición de tales objetivos reflejan el resultado de las reuniones de trabajo del grupo realizadas por los Coordinadores Nacionales de los 24 países miembros. Ello incluye la importancia crítica del conocimiento y cooperación como base para la sostenibilidad de los acuíferos que cruzan la jurisdicción de dos o más países del continente americano, así como el articulado de la Resolución de Naciones Unidas sobre los Acuíferos Transfronterizos. Los objetivos son:

1. Generar conocimiento sobre el estado, la preservación, uso y suministro de los recursos de agua subterránea de los SAT.
2. Asegurar la generación de lineamientos para la gestión de los acuíferos transfronterizos, incluyendo el saneamiento, la sostenibilidad y vulnerabilidad del acuífero, y su conectividad y uso conjuntivo con las aguas superficiales en las cuencas transfronterizas.
3. Contribuir al intercambio de información y conocimiento científico y tecnológico, de cooperación y comunicación entre los Estados Miembros que comparten acuíferos transfronterizos para fomentar estrategias sostenibles innovadoras entre los países participantes.
4. Intensificar el desarrollo de estándares comunes, protocolos y consensos científicos relacionados con datos, información, parámetros y procedimientos, así como simulación hidrológica conjunta de los SAT validados por los países para la gestión del agua subterránea, promoviendo su adopción entre los Estados Miembros.
5. Alentar el desarrollo y establecimiento de lineamientos legales e institucionales *ad hoc* relacionados con el manejo de aguas subterráneas, siguiendo instrumentos internacionales y mecanismos de apoyo institucional que permitan orientar a los países, en los procesos encaminados a su adopción en ámbitos bilaterales y en el contexto de una eventual convención multilateral.

#### 4. NIVEL DEL CONOCIMIENTO DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROSTRANSFRONTERIZOS EN LAS AMÉRICAS

Editado por Alfonso Rivera, Fulgencio Garavito, Nelson da Franca y Omar Vargas.

##### 4.1 Antecedentes sobre los conocimientos de los SAT

Inventariar el nivel del conocimiento actual de los sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas, desde Canadá y Estados Unidos hasta Argentina y Chile no es tarea sencilla, considerando que se trata de un total de 24 países y que la disponibilidad de datos de las aguas subterráneas transfronterizas en las Américas es muy variable.

Para preparar una visión general de los niveles de conocimiento de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas se tomaron en consideración varios aspectos tales como las características hidrológicas y geológicas específicas de los acuíferos, la demanda de agua subterránea y su uso, aspectos socioeconómicos, ambientales y climáticos, además de los aspectos institucionales y legales en cada país.

La falta de información y los vacíos existentes en cada SAT, fueron considerados durante los diálogos entre los países en los diversos talleres de coordinación de ISARM Américas. El deseo de conocer, colaborar y compartir de cada uno de los países participantes facilitó enormemente la presentación de la información disponible en las tres publicaciones del programa:

- **Sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas – Evaluación preliminar** – publicado en 2007, serie ISARM Américas no 1, disponible en español e inglés. Publicación que incluye mapas editados por IGRAC y textos sobre los acuíferos transfronterizos preparados por los Coordinadores Nacionales (UNESCO, 2007).
- **Marco legal e institucional en la gestión de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas** – publicado en 2008, serie ISARM Américas No 2, disponible en español e inglés (UNESCO, 2008).
- **Aspectos socioeconómicos, ambientales y climáticos de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas** – publicado en 2010, serie ISARM Américas No 3, disponible en español. Edición que incluye texto y mapas de los SAT por los Coordinadores Nacionales del programa (UNESCO, 2010).

La información contenida en esos tres libros permite presentar una primera visión de los niveles de conocimiento de los SAT en las Américas. Sin embargo, hay que considerarla solamente como indicativa, como una base para ser completada y mejorada por los países con nuevos datos que serán adquiridos en el futuro.

#### **4.2 Sistemas acuíferos transfronterizos identificados al final de 2009**

El conocimiento de los sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas ha evolucionado con el desarrollo de las actividades del programa UNESCO/OEA ISARM Américas. El inventario, al inicio del programa en 2002, indicaba menos de dos docenas y al final de 2009 el número de sistemas acuíferos transfronterizos inventariados alcanza 73: 21 en América del Norte, 18 en América Central, 4 en el Caribe y 30 en América del Sur.

Estos números, especialmente en América del Norte, América Central y América del Sur, seguramente aumentarán en los próximos años gracias a los estudios que están en desarrollo en los países.

El significado o importancia de los sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas es bastante diverso. En algunos casos estos recursos son la fuente principal de abastecimiento de agua, en otros están poco explotados. Hay muchos de estos acuíferos que son sumamente importantes para los ecosistemas que dependen de ellos, como es el caso del Sistema Acuífero Pantanal, compartido por Bolivia, Brasil y Paraguay.

El nivel de cooperación entre los países varía de casi inexistente, a una cooperación técnica participativa de la sociedad, de la comunidad científica y de los gobiernos. En general, en la región se aprecia un fuerte interés en cooperar a fin de compartir y evaluar la información generada por el programa.

La ubicación de los acuíferos transfronterizos identificados en las Américas (Tabla 4.1) está indicada en el mapa general de la Figura 4.1. Se puede observar la presencia de sistemas acuíferos con áreas diferentes. Esta distribución espacial fue obtenida con la información enviada por los países, a través de los Coordinadores Nacionales de ISARM Américas.

En América del Norte, los acuíferos transfronterizos están ubicados únicamente entre 2 países debido a sus características geográficas. La misma situación se presenta en el Caribe, donde solamente la isla la Hispaniola es compartida entre 2 países.

En América Central fueron identificados dos acuíferos compartidos entre 3 países. Los demás sistemas acuíferos son compartidos por 2 países.

En América del Sur existen acuíferos transfronterizos que son compartidos por 2, 3, 4 y hasta 6 países, según sus dimensiones y ubicación geográfica.

Tabla 4.1. Acuíferos transfronterizos identificados en las Américas

<b>AMÉRICA DEL NORTE/NORTH AMERICA</b>					
1N	ABBOTSFORD-SUMAS	CANADÁ-EUA	12N	SANTA CRUZ	MÉXICO-EUA
2N	OKANAGAN-OSOYOOS	CANADÁ-EUA	13N	SAN PEDRO	MÉXICO-EUA
3N	GRAND FORKS	CANADÁ-EUA	14N	CONEJOS MÉDANOS-BOLSÓN DE LA MESILLA	MÉXICO-EUA
4N	POPLAR	CANADÁ-EUA	15N	BOLSÓN DE HUECO-VALLE DE JUÁREZ	MÉXICO-EUA
5N	ESTEVAN	CANADÁ-EUA	16N	EDWARDS-TRINITY-EL BURRO	MÉXICO-EUA
6N	NORTHERN GREAT PLAINS	CANADÁ-EUA	17N	CUENCA BAJA DEL RÍO BRAVO-GRANDE	MÉXICO-EUA
7N	CHÂTEAUGUAY	CANADÁ-EUA	18N	LOS MIMBRES – LAS PALMAS	MÉXICO-EUA
8N	SAN DIEGO-TIJUANA	MÉXICO-EUA	19N	JUDITH RIVER	CANADÁ-EUA
9N	CUENCA BAJA DEL RÍO COLORADO	MÉXICO-EUA	20N	MILK RIVER	CANADÁ-EUA
10N	SONOYTA-PÁPAGOS	MÉXICO-EUA	21N	RICHELIEU/LAKE CHAMPLAIN	CANADÁ-EUA
11N	NOGALES	MÉXICO-EUA			
<b>CARIBE/CARIBBEAN</b>					
1CB	MASACRE	HAITÍ-REP. DOMINICANA	3CB	LOS LAGOS	HAITÍ-REP. DOMINICANA
2CB	ARTIBONITO	HAITÍ-REP. DOMINICANA	4CB	PEDERNALES	HAITÍ-REP. DOMINICANA
<b>AMÉRICA CENTRAL/CENTRAL AMERICA</b>					
1C	SOCONUSCO-SUCHIATE/COATÁN	GUATEMALA-MÉXICO	10C	SARSTÚN	GUATEMALA-BELICE
2C	CHICOMUSELO-CUILCO/SELEGUA	GUATEMALA-MÉXICO	11C	TEMASH	GUATEMALA-BELICE
3C	OCOSINGO-USUMACINTA-POCÓM-IXCÁN	GUATEMALA-MÉXICO	12C	DELTA DEL RÍO MOTAGUA	GUATEMALA-HONDURAS
4C	MÁRQUEZ DE COMILLAS-CHIXOY/XACLBAL	GUATEMALA-MÉXICO	13C	CHIQUIMULA-COPÁN RUINAS	GUATEMALA-HONDURAS
5C	BOCA DEL CERRO-SAN PEDRO	GUATEMALA-MÉXICO	14C	ESQUIPULAS-OCOTEPEQUE-CITALÁ	GUATEMALA-HONDURAS-EL SALVADOR
6C	TRINITARIA-NENTÓN	GUATEMALA-MÉXICO	15C	OSTÚA METAPÁN	EL SALVADOR-GUATEMALA
7C	PENÍNSULA DE YUCATÁN-CANDELARIA-HONDO	GUATEMALA-MÉXICO-BELICE	16C	RÍO PAZ	EL SALVADOR-GUATEMALA
8C	MOPÁN-BELICE	GUATEMALA-BELICE	17C	ESTERO REAL-RÍO NEGRO	HONDURAS-NICARAGUA
9C	PUSILA-MOHO	GUATEMALA-BELICE	18C	SIXAOLA	COSTA RICA-PANAMÁ
<b>AMÉRICA DEL SUR/SOUTH AMÉRICA</b>					
1S	CHOCO-DARIÉN	COLOMBIA-PANAMÁ	16S	AGUA DULCE	BOLIVIA-PARAGUAY
2S	TÁCHIRA PAMPLONITA	COLOMBIA-VENEZUELA	17S	OLLAGÜE	BOLIVIA-CHILE
3S	LA GUAJIRA	COLOMBIA-VENEZUELA	18S	CONCORDIA-ESCRITOS-CAPLINA	CHILE-PERÚ
4S	GRUPO RORAIMA	BRASIL-GUYANA-VENEZUELA	19S	AQUIDAUANA-AQUIDABÁN	BRASIL-PARAGUAY
5S	BOA VISTA-SERRA DO TUCANO-NORTH SAVANNA	BRASIL-GUYANA	20S	CAIUÁ-BAURU-ACARAY	BRASIL-PARAGUAY
6S	ZANDERIJ	GUYANA-SURINAME	21S	GUARANÍ	ARGENTINA-BRASIL-PARAGUAY-URUGUAY
7S	COESEWIJNE	GUYANA-SURINAME	22S	SERRA GERAL	ARGENTINA-BRASIL-PARAGUAY-URUGUAY
8S	A-SAND/B-SAND	GUYANA-SURINAME	23S	LITORÁNEO-CHUY	BRASIL-URUGUAY
9S	COSTEIRO	BRASIL-GUAYANA FRANCESA	24S	PERMO-CARBONÍFERO	BRASIL-URUGUAY
10S	TULCÁN-IPIALES	COLOMBIA-ECUADOR	25S	LITORAL-CRETÁCICO	ARGENTINA-URUGUAY
11S	ZARUMILLA	ECUADOR-PERÚ	26S	SALTO-SALTO CHICO	ARGENTINA-URUGUAY
12S	PUYANGO-TUMBES-CATAMAYO-CHIRA	ECUADOR-PERÚ	27S	PUNEÑOS	ARGENTINA-BOLIVIA
13S	AMAZONAS	BOLIVIA-BRASIL-COLOMBIA-ECUADOR-PERÚ-VENEZUELA	28S	YRENDÁ-TOBA-TARJEÑO	ARGENTINA-BOLIVIA-PARAGUAY
14S	TITICACA	BOLIVIA-PERÚ	29S	EL CÓNDOR-CAÑADÓN DEL CÓNDOR	ARGENTINA-CHILE
15S	PANTANAL	BOLIVIA-BRASIL-PARAGUAY	30S	ASCOTÁN	BOLIVIA-CHILE

SISTEMAS ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS de las AMÉRICAS

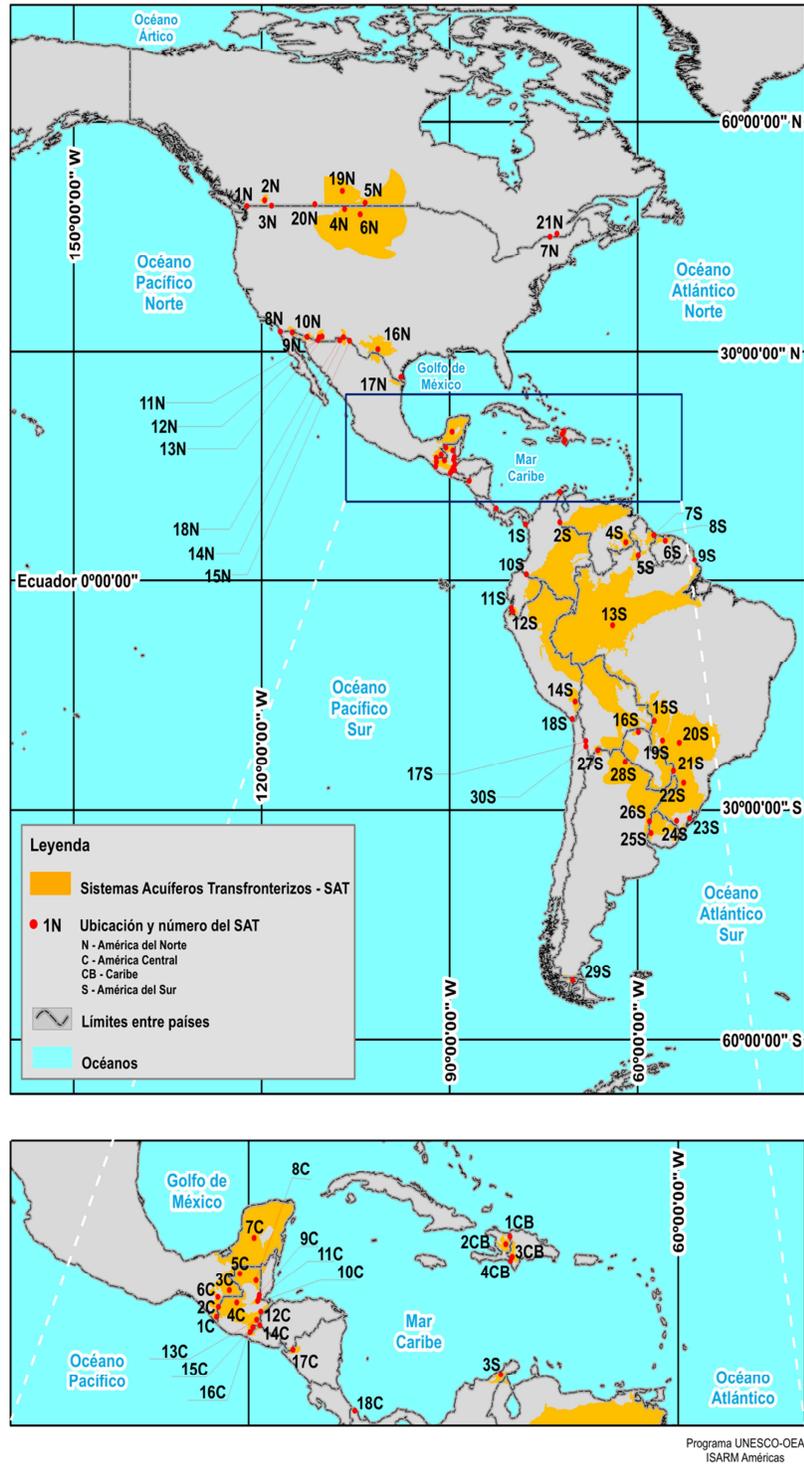


Figura 4.1 Sistemas Acuíferos Transfronterizos (SAT) en las Américas en 2009

### 4.3 Niveles de conocimiento de los SAT en 2012

Hacer una evaluación del nivel del conocimiento de los SAT de las Américas es un ejercicio amplio y cargado de subjetividad si no se enfocan algunos criterios que delimiten el dominio de la evaluación. Estas reflexiones fueron abordadas por el Grupo Estratégico de UNESCO/OEA ISARM Américas para la preparación de la Estrategia Regional para la evaluación y gestión de los Sistemas de Acuíferos Transfronterizos SAT en las Américas.

Para cerrar los espacios de la subjetividad se orientó una encuesta a los países del continente con las siguientes preguntas e instrucciones:

1. ¿Se tiene definida la geometría del acuífero en base de datos ISARM?

Con esta pregunta de base, se trata de determinar si se conocen los límites hidrogeológicos y estos se encuentran en la base de datos de ISARM Américas.

2. ¿Se cuenta con caracterización de parámetros hidráulicos (K, S, niveles piezométricos), dinámica de flujo (zonas de recarga, tránsito y descarga), variables químicas básicas (TDS, pH, alcalinidad), y conectividad con aguas superficiales, clima y uso del agua?

En este punto se debe especificar si el sistema acuífero además de su delimitación espacial cuenta con estudios que permitan reconocer sus características hidráulicas, variación de niveles piezométricos, definición de zonas de recarga y descarga; y mediciones básicas de variables hidroquímicas.

3. ¿Se cuenta con un modelo hidrogeológico conceptual del SAT que integre los componentes geológico, hidrológico, hidrogeológico, e información cuantitativa de uso del agua subterránea según sectores económicos?

En este nivel se precisa la existencia de un modelo hidrogeológico conceptual del SAT en el cual son apreciables las unidades geológicas e hidrogeológicas; condiciones de flujo, condiciones y zonas de recarga y descarga; rangos de variación de niveles piezométricos y conexiones hidráulicas con corrientes o cuerpos de agua superficial, climático, y usos de la tierra. Adicionalmente se supone un inventario de puntos de agua subterránea que permite tener estadísticas de uso según sectores económicos.

4. ¿Existe un modelo matemático que integre la información hidrogeológica con fines de predicción y pronóstico, monitoreo sistemático y escenarios de vulnerabilidad?

Definimos vulnerabilidad de las aguas subterráneas como la medida del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas (OMM, 2012).

En este estado del conocimiento de los sistemas acuíferos se tiene un modelo hidrogeológico conceptual claro que permite el desarrollo de modelos matemáticos para simulación de escenarios de predicción. Para alimentar los modelos se debe contar con un monitoreo sistemático, balances hidrológicos, y un seguimiento al sistema y especialización de escenarios de vulnerabilidad intrínseca.

Cada país debió diligenciar la encuesta en una hoja electrónica para cada SAT que se encuentra en su territorio, siendo las respuestas excluyentes: *Si* o *No*. Esto agrega un grado de subjetividad a las respuestas que puede ser reducido con una revisión posterior al análisis de resultados. Sin embargo, con esta compilación de niveles de conocimiento ya se puede realizar un análisis rápido pertinente para los propósitos de la estrategia regional y las finalidades de ISARM Américas.

En el capítulo 6 de esta estrategia se presenta con más detalle los conocimientos necesarios para una adecuada evaluación y gestión de los SAT que se proponen para el continente americano.

En este capítulo se sintetizan los resultados obtenidos a partir de la encuesta y analizados integrando la información reportada por los países participantes en ISARM Américas. Los análisis y resultados se presentan para América del Norte, América Central, Caribe y América del Sur respetando la codificación de los SAT de las Américas acordados en este programa.

## **AMERICA DEL NORTE**

Se identifican 10 SAT en América del Norte compartidos por Canadá y EUA (1N, 2N, 3N, 4N, 5N, 6N, 7N, 19N, 20N y 21N) y 11 SAT compartidos por EUA y México (8N, 9N, 10N, 11N, 12N, 13N, 14N, 15N, 16N, 17N y 18 N).

De los SAT compartidos por EUA y Canadá, cinco cuentan con un modelo geológico suficiente en el cual se identifica la geometría del acuífero de manera precisa e inclusive contienen las condiciones de frontera de los mismos tanto en Canadá como en EUA (1N Abbotsford-Sumas, 3N Grand Forks, 7N Chateauguay, 20N Milk River, y 21N Richelieu/Champlain). En los otros cinco (2N Okanagan-Osoyoos, 4N Poplar, 5N Stevan, 6N Northern Great Plains y 19N Judith River) la geometría del acuífero no está bien definida.

En los acuíferos 1N, 3N, 4N, 6N, 7N, 20N, y 21N, se cuenta tanto en Canadá como en EUA con caracterización de parámetros hidráulicos, dinámica de flujo (zonas de recarga, tránsito y descarga) y caracterización de variables químicas básicas. Del lado de EUA esta condición la cumplen además los SAT 4N y 6N. Adicionalmente cuentan con caracterización de parámetros hidráulicos del lado canadiense los SAT 5N y 20N.

Los SAT: 1N, 3N, 5N, 20N, 21N y 7N del lado canadiense cuentan con modelos hidrogeológico conceptuales que integran las componentes geológica, hidrológica, hidrogeológicas, e información cuantitativa de uso del agua subterránea según sectores económicos. De lado de EUA cuentan con modelo hidrogeológico conceptual los SAT 1N, 4N, 5N, 6N, 20N y 7N.

Asimismo, se han desarrollado modelos matemáticos en los dos países que integran información hidrogeológica con fines de predicción y pronóstico, monitoreo sistemático y escenarios de vulnerabilidad intrínseca en los SAT compartidos 1N y 7N. Del lado de EUA adicionalmente tienen estos modelos los SAT 4N y 6N y del lado canadiense el SAT 3N.

En términos generales, el conocimiento hidrogeológico de los SAT compartidos por EUA y Canadá es insuficiente en los SAT 2N, 19N, 4N y suficiente en los SAT 1N, 3N, 5N, 7N, 20N y 21N y 6N.

Los SAT compartidos por EUA y México cuentan con información sobre nivel de conocimiento de los acuíferos compartidos reportada del primer país. De acuerdo con esto, los SAT involucrados en esta frontera tiene un nivel de conocimiento suficiente sobre la geometría de los SAT en las bases de datos ISARM, caracterización de parámetros hidráulicos, dinámica de flujo (zonas de recarga, tránsito y descarga) y variables químicas básicas.

Todos los acuíferos tienen modelos hidrogeológicos conceptuales que consolidan información geológica, hidrológica, hidrogeológica e hidroquímica, e información de uso del agua subterránea. Además, en todos los SAT se han corrido modelos matemáticos con fines de predicción y pronóstico, y se han realizado monitoreos sistemáticos. La excepción la constituye en el lado estadounidense el SAT Sonoyta-Papagos (10N) cuyo conocimiento es insuficiente pues se reduce a la identificación de la geometría del sistema acuífero.

## **CARIBE**

En el área del Caribe se reconocen 4 SAT: 1CB, 2CB, 3CB, y 4CB, compartidos por Haití y República Dominicana y de los cuales no se tiene información del nivel de conocimiento.

## **AMERICA CENTRAL**

En América Central se identifican 18 SAT compartidos por Guatemala-México (1C, 2C, 3C, 4C, 5C, 6C); Guatemala-México-Belice (7C); Guatemala-Belice (8C, 9C, 10C y 11 C); Guatemala-Honduras-Salvador ( 14C), El Salvador-Guatemala (15C, 16C), Guatemala-Honduras (12C, 13C), Honduras-Nicaragua (17C) y Costa Rica-Panamá (18C).

Se cuenta con información de Guatemala para los acuíferos compartidos con México y Belice. Se reporta que no hay conocimiento de la geometría de los 11 SAT restantes. Sin embargo, los SAT 1C, 6C, 7C, 8C, 9C, 10C y 11C tienen información de caracterización de parámetros hidráulicos, dinámica de flujo e hidroquímica. Igualmente se reporta que todos cuentan con modelos hidrogeológicos conceptuales que integran información geológica, hidrológica, hidrogeológica y de uso de las aguas subterráneas. No se han desarrollado modelos matemáticos de los sistemas acuíferos.

El SAT 14C (Esquipulas-Ocotepeque-Citala) compartido por Guatemala, Honduras y El Salvador tiene un nivel de conocimiento suficiente en el lado guatemalteco pero insuficiente en Honduras, donde no se ha definido la geometría del acuífero, ni se conocen sus características hidráulicas, hidrodinámicas e hidroquímicas. Únicamente se cuenta con modelo hidrogeológico conceptual y monitoreo de este SAT en el lado guatemalteco. El SAT 15C (Ostua Metapan) cuenta con un nivel de conocimiento suficiente en la parte guatemalteca pero no así en la parte salvadoreña donde se tiene definida su geometría y caracterizados los parámetros hidráulicos y dinámica de flujo, pero aún no se cuenta con un modelo hidrogeológico conceptual adecuado, ni con un monitoreo sistemático.

El SAT 16C tiene un nivel de conocimiento insuficiente. Se tiene definida su geometría en El Salvador y Guatemala, se tiene información de parámetros hidráulicos y dinámica de flujo pero solo se tiene modelo hidrogeológico conceptual en el lado guatemalteco.

Los SAT 12C y 13C compartidos por Guatemala y Honduras son desconocidos en el lado hondureño, mientras que en el lado guatemalteco se ha definido la geometría

del 12C (delta del Río Motagua), se han caracterizado parámetros hidráulicos y la dinámica de flujo y se cuenta con modelos hidrogeológicos conceptuales y monitoreo para los dos SAT.

El SAT compartido por Honduras y Nicaragua (17C) tiene un bajo nivel de conocimiento. No se reportan avances en ningún aspecto. El SAT 18C tiene la misma situación en Panamá aunque en Costa Rica se ha definido su geometría, se han evaluado sus condiciones hidráulicas y dinámica de flujo, sus condiciones de calidad del agua y se ha elaborado un modelo hidrogeológico conceptual.

En sentido amplio, los SAT compartidos por Guatemala, México y Belice tienen un conocimiento insuficiente en cuanto a su geometría y condiciones hidráulicas aunque cuentan con modelos hidrogeológicos conceptuales. Aún no han desarrollado modelos matemáticos con capacidad de predicción y pronóstico, y no cuentan con sistemas de monitoreo de variables de cantidad y calidad que puedan utilizarse para una gestión futura.

Los SAT compartidos por Guatemala, Salvador y Honduras tienen un nivel de conocimiento insuficiente pues solo se reportan resultados del lado guatemalteco principalmente. En El Salvador se ha definido la geometría de estos acuíferos sin llegar a reconocer características, comportamiento hidráulico y condiciones de flujo. Los modelos hidrogeológicos conceptuales corresponden al lado guatemalteco. En estos SAT no se ha avanzado en el monitoreo sistemático de las unidades hidrogeológicas, ni en la modelación matemática del subsuelo. Por otro lado, el nivel de conocimiento del SAT compartido por Nicaragua y Honduras es nulo. El acuífero compartido con Panamá y Costa Rica únicamente es conocido de manera suficiente en este último.

## **AMERICA DEL SUR**

En América del Sur se reconocen 30 SAT. De estos no se cuenta con información de los SAT compartidos por Guyana-Surinam (6S, 7S y 8S) y Bolivia-Paraguay (16S). De los reportados, uno no tiene ningún nivel de conocimiento (1S Choco-Darien) y corresponde a la frontera Colombia-Panamá que tiene condiciones de acceso inhóspitas. En el 43,3% del total de SAT de América del Sur (13) únicamente se ha definido la geometría de los acuíferos (4S, 5S, 9S, 10S, 13S, 14S, 15S, 17S, 19S, 23S, 24S, 27S y 29S) y eventualmente se cuenta con información hidráulica pero no con modelos hidrogeológicos conceptuales robustos.

El SAT 25S cuenta con un conocimiento preliminar en Argentina hasta el punto de un modelo hidrogeológico conceptual construido con esta información inicial, mientras en el lado uruguayo sólo se ha definido su geometría. Del SAT 22S compartido por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay solo se tiene definida su geometría en este último país. En Brasil además de su geometría se le reconocen sus características hidráulicas y comportamiento hidrodinámico y en Argentina se tiene un conocimiento preliminar de este SAT en su territorio que permite formular un modelo hidrogeológico conceptual preliminar. En la frontera entre Argentina y Bolivia está el SAT 27S del cual Argentina tiene conocimientos preliminares sin información hidráulica o hidrodinámica.

Del SAT 20S que comparten Brasil y Paraguay sólo se tiene información del estado de conocimiento proveniente de Brasil que reporta un nivel insuficiente soportado en la definición de la geometría del acuífero y el reconocimiento de características hidráulicas e hidrodinámicas del sistema. También es insuficiente el conocimiento que se tiene del SAT 12S compartido por Ecuador y Perú pues solo se conoce en el

lado peruano su geometría y alguna información hidráulica y de flujo que aún no permite elaborar un modelo hidrogeológico adecuado.

De esta manera, quedan 8 SAT (26.6% del total de SAT de América del Sur) con un conocimiento suficiente para soportar la gestión de las aguas subterráneas transfronterizas en el sur del continente con un buen nivel de confiabilidad. Se trata de los SAT 2S, 3S, 11S, 18S, 26S, 28S, 30S y 21S.

De los SAT compartidos por Colombia y Venezuela (2S y 3S) se tienen definidos en ambos países: la geometría, las características del modelo hidráulico e hidrodinámico, la hidroquímica y los usos del recurso. Con esta información se han elaborado modelos hidrogeológicos que sirven para toma de decisiones en ambos países. El nivel de conocimiento de estos SAT de la parte norte de América del Sur es suficiente pero debe ser mejorada para que sea útil para gestión integrada de recursos hídricos. En igual condición de nivel de conocimiento se encuentra el SAT 11S que comparten Ecuador y Perú de acuerdo con el reporte del lado peruano. En la frontera entre Chile y Perú se encuentra el SAT 18S que de acuerdo con el reporte de los dos países cuenta con un nivel de conocimiento suficiente para desarrollar modelos matemáticos con fines de predicción y pronóstico y monitoreo sistemático, además de modelación hidrogeológica conceptual que integra información del estado, y dinámica en cantidad y calidad de las aguas subterráneas de este SAT.

El SAT 26S tiene un buen nivel de conocimiento en la parte argentina donde inclusive se monitorea y se tiene integrada información hidráulica, hidrodinámica, hidroquímica y de dinámica de uso y demanda. Sin embargo, en la parte uruguaya de este SAT solo se ha definido su geometría.

En la frontera Argentina-Bolivia-Paraguay se encuentra el SAT 28S. De este SAT se tiene únicamente información reportada por Argentina en la que se reconoce un nivel de conocimiento suficiente pues cuenta, por lo menos en este país, con un modelo hidrogeológico confiable, monitoreo sistemático y modelación con fines de predicción y pronóstico. Actualmente, a través del Programa Marco de la Cuenca del Plata, se trabaja en la profundización del conocimiento por parte de los 3 países.

El SAT 30S es compartido por Bolivia y Chile y se cuenta con información del nivel de conocimiento del lado chileno. En el lado chileno del SAT, se conocen sus características hidráulicas, dinámica de flujo, y características químicas. Se cuenta con un modelo hidrogeológico conceptual, monitoreo y modelación matemático. Aun no se ha definido su geometría de manera clara.

Caso aparte es el SAT 21S compartido por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay y conocido como el SAT Guaraní del cual se tiene un amplio y suficiente conocimiento por su valor estratégico como una de las mayores reservas de agua dulce del mundo. El conocimiento de este SAT se ha realizado por medio de estrategias de cooperación internacional e iniciativas nacionales compartidas.

En resumen, se caracterizaron un total de 73 acuíferos transfronterizos en las Américas: 21 SAT en América del Norte; 18 SAT en América Central; 4 SAT en América Insular del Mar Caribe; y 30 SAT en América del Sur. De los 73 SAT caracterizados, 65 acuíferos transfronterizos son binacionales; 6 tri-nacionales; 2 tetra-nacionales; y 1 hexa-nacional.

La tabla 4.2 presenta los resultados por país, del conocimiento de los Acuíferos Transfronterizos de ISARM Américas considerado en las cuatro categorías, de

acuerdo con la información disponible en cada uno de los SAT. En esa tabla están reportados un total de 158 acuíferos dado que los resultados de la encuesta fueron recibidos por país, por lo que varios SAT están repetidos en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Niveles de conocimiento de los SAT de las Américas

	Acuíferos estudiados	Geometría definida	Parámetros hidrogeológicos	Modelos hidrogeológicos conceptuales	Modelos matemáticos de predicción
Canadá	10	5	6	6	3
EUA	21	16	17	16	14
México	18				
Belice	5				
Guatemala	16	4	12	16	2
El Salvador	3	3	2	2	1
Honduras	4	0	0	0	0
Nicaragua	1	0	0	0	0
Costa Rica	1	1	1	1	
Panamá	2	0	0	0	0
Colombia	5	4	2	2	0
Venezuela	4	4	3	1	0
Ecuador	4				
Perú	5	4	4	2	2
Bolivia	7				
Brasil	11	11	3	1	1
Argentina	7	7	5	7	3
Paraguay	7				
Uruguay	6	6	1	1	1
Chile	4	2	2	2	2
Guyana	5				
Guayana Fra.	1				
Surinam	3				
Haití	4				
Rep. Dominicana	4				
<b>TOTAL</b>	<b>158</b>	<b>67</b>	<b>58</b>	<b>57</b>	<b>29</b>

En términos generales, y a modo de síntesis puede decirse que en América del Norte el 80% de los SAT tiene un nivel de conocimiento suficiente en relación con el total de SAT de la región (21), pues cuentan con modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, modelos matemáticos y monitoreo sistemático de unidades hidrogeológicas. En América Central este porcentaje es del 40% en relación con el total de sus SAT (18) y en América del Sur este porcentaje es de 27% en relación con el total de sus SAT (30). En América del Sur esto es evidente por la falta de estudios necesarios para obtener modelos hidrogeológicos conceptuales confiables y las limitaciones de monitoreo permanente y sistemático. Asimismo, es notoria la falta de aplicación extendida de modelación matemática para simular escenarios propios de la gestión del agua y la variabilidad climática.

En el Caribe el nivel de conocimiento es insuficiente para los 4 SAT identificados en la frontera Haití-República Dominicana.

La tabla 4.3 resume la información de la encuesta por región y por número total de SAT investigados.

Tabla 4.3 Resumen de la información de niveles de conocimiento de los SAT

Región	SAT por región	Niveles de conocimiento científico y técnico	
		Suficiente	Insuficiente
América del Norte	21	80%	
Caribe	4		100%
América Central	18	40%	
América del Sur	30	27%	
Número total de los SAT	73		

Las figuras 4.2 a 4.6 muestran de manera gráfica la distribución del nivel de conocimiento siguiendo los cuatro temas predefinidos en las encuestas, por país y por tema.

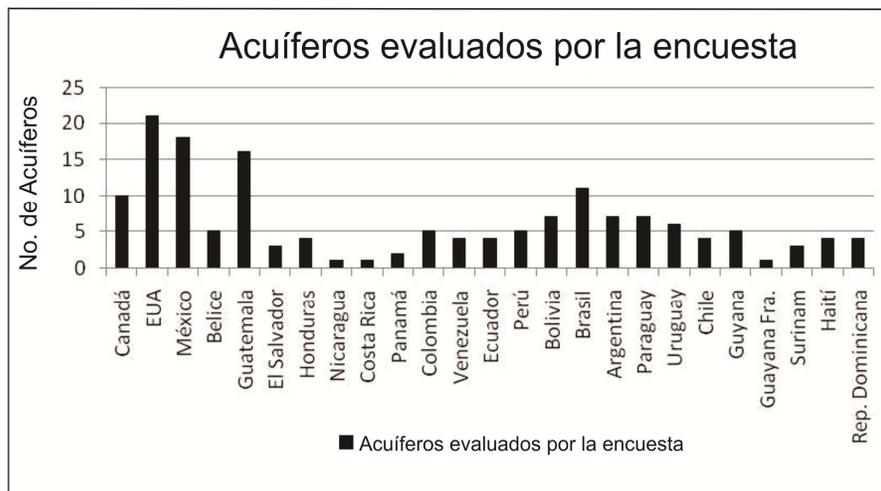


Figura 4.2 Numero de acuíferos, por país, caracterizados por la encuesta.

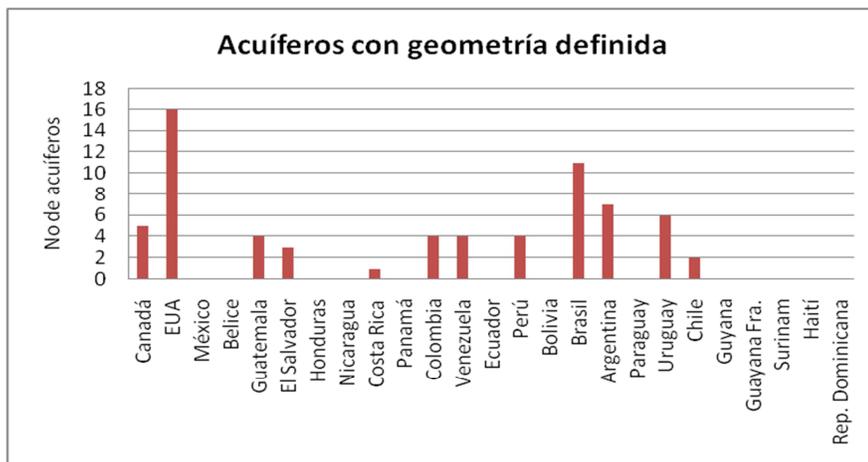


Figura 4.3 Resultados de los acuíferos con geometría definida.

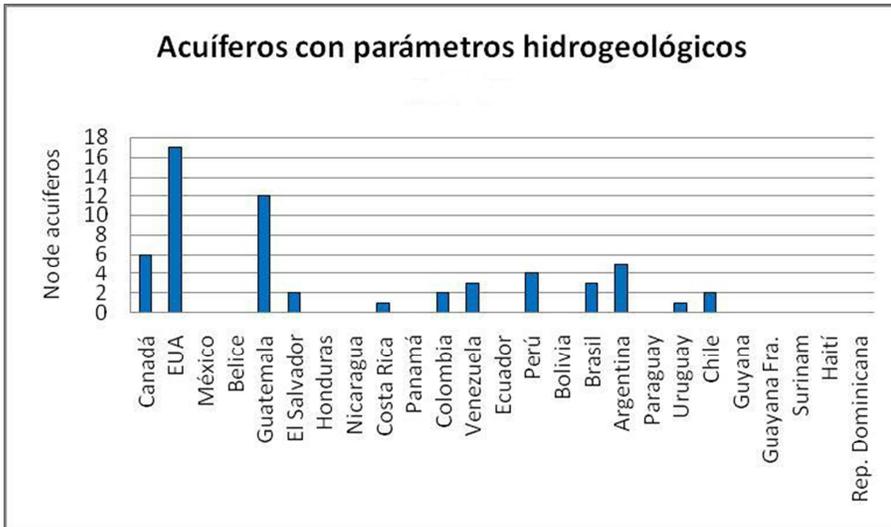


Figura 4.4 Resultados de los acuíferos con parámetros hidrogeológicos

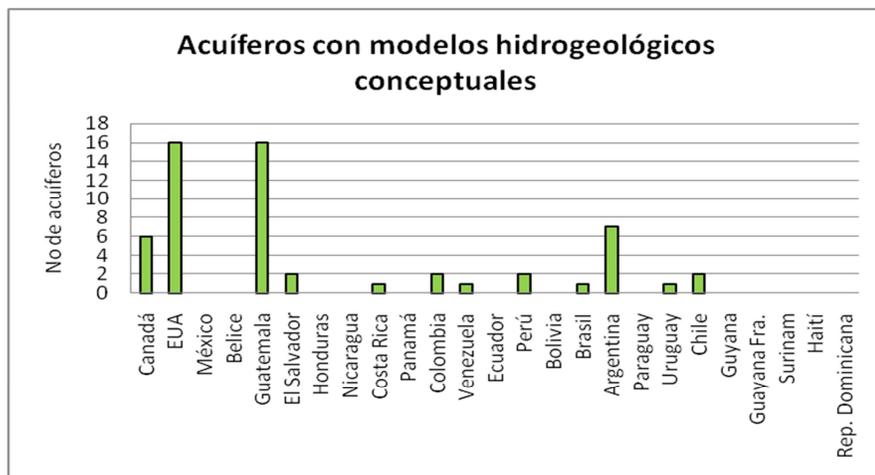


Figura 4.5 Resultados de los acuíferos que cuentan con modelos conceptuales

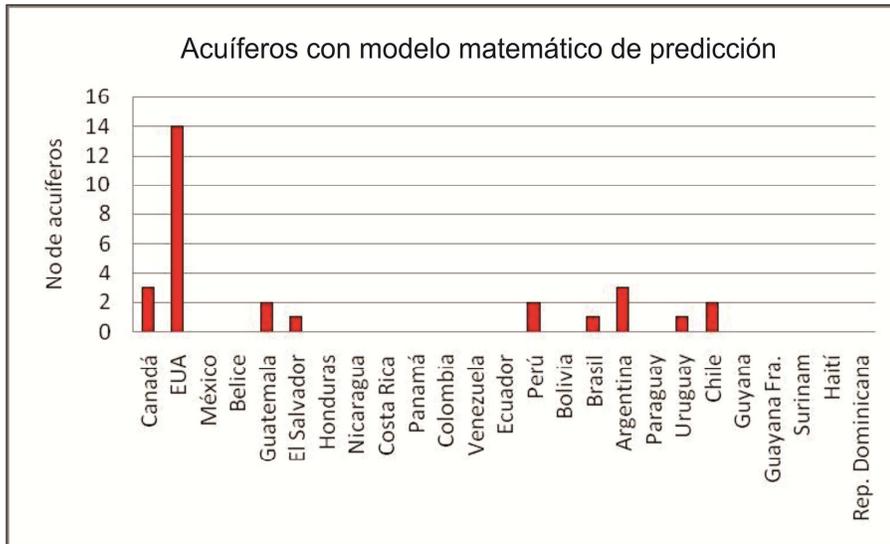


Figura 4.6 Resultados de los acuíferos que cuentan con modelos matemáticos de predicción.

#### 4.4 Conclusiones

Los resultados de las encuestas y el análisis sobre los niveles de conocimiento de los SAT en las Américas permiten extraer las siguientes conclusiones:

- En algunos SAT el nivel de conocimiento es más avanzado en solo uno de los países que comparten el SAT. Para ciertos casos, esto evidencia escasa cooperación o coordinación entre los países que comparten el mismo.
- Existen estudios de caso en desarrollo, los cuales permitirán en un mediano a largo plazo aumentar los niveles de conocimiento de por lo menos 5 SAT: 3 en América del Norte, 1 en América Central y 1 en América del Sur. También están previstos 2 estudios de caso adicionales en el Caribe.
- El conocimiento más básico que requiere un SAT, que es su localización y la delimitación de su geometría, es en un gran porcentaje *suficiente* en América del Norte y América Central, *mediano* en América del Sur, e *insuficiente* en América insular (Caribe).
- Existen 17 SAT considerados con un conocimiento científico *suficiente* (cubriendo los cuatro temas definidos) para una adecuada evaluación y gestión del mismo en América del Norte; 2 en América Central; 7 en América del Sur; y ninguno en el Caribe.
- El otro extremo del nivel de conocimiento necesario para una buena evaluación y gestión de los SAT, es decir, contar con modelos matemáticos que integren información hidrogeológica cuantitativa con fines de predicción y pronóstico, monitoreo sistemático y vulnerabilidad, solo lo han alcanzado unos cuantos países: varios SAT en América del Norte; solo Guatemala en América Central; Brasil, Perú, Argentina y Chile en América del Sur; y ninguno en el Caribe.

- Estos resultados evidencian la necesidad de los países de continuar avanzando en el conocimiento de los sistemas acuíferos transfronterizos en sus territorios con el propósito de contar con una buena evaluación y gestión de los mismos. Estas forman parte de las recomendaciones de la Resolución de las Naciones Unidas sobre los SAT, tal y como se discute en los capítulos 3, 5 y 6.

## 5. SINOPSIS DE LA GESTIÓN DE LOS SAT EN LAS AMÉRICAS

Editado por Alfonso Rivera, José Raúl Pérez, Rodrigo Calvo Porras, Fulgencio Garavito, Lydia María Ugas, Rigoberto López y Fernando Decarli

Este capítulo incluye un resumen de varios aspectos que deben ser considerados en la gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos (SAT) en las Américas. Como tal, presenta una sinopsis actualizada de los aspectos legales, institucionales, socioeconómicos, culturales, ambientales y climáticos con enlaces a la Resolución de las Naciones Unidas, A/RES/68/118, sobre el tema del “Derecho de los Acuíferos Transfronterizos”. Esa resolución sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos es el único instrumento internacional relativo a los SAT que puede servir como lineamiento a los países del continente americano. Por ello se realizó un análisis exhaustivo de la gestión de los SAT de las Américas como base en la preparación de esta guía sinóptica.

### 5.1 Aspectos Institucionales

Esta sección presenta una sinopsis del marco legal e institucional de los SAT en el continente americano, así como un análisis de las leyes nacionales y de los acuerdos internacionales sobre aguas subterráneas. Se discuten reglas sobre pertenencia y jurisdicción sobre las aguas subterráneas, el sistema institucional de las mismas, y las resoluciones sobre uso y protección de aguas subterráneas, y sobre acuíferos transfronterizos.

#### ***Marco institucional del sector agua en los países que comparten sistemas acuíferos en las Américas.***

La caracterización de la institucionalidad del sector de recursos hídricos en el continente y en particular de aquellas naciones que comparten recursos de agua subterráneas en América, conlleva a la identificación de patrones institucionales en los países, que a su vez están asociados a su forma de gobierno, su historia, sus fundamentos y su cultura jurídico-institucional, como factores que inciden en la forma del aparato estatal que tiene por responsabilidad la regulación de los recursos hídricos. La distribución de poderes dentro de una nación, y los mecanismos de participación tienen una gran influencia en el esquema institucional adoptado en cada país.

La tabla 5.1 presenta un resumen de los principales aspectos institucionales de 22 países de las Américas que comparten SAT.

Tabla 5.1 Aspectos Institucionales

<b>América del Norte</b>	Canadá	<p>Las responsabilidades de conservación y protección de los recursos hídricos, de aplicación de regulaciones relativas al agua, preservación de calidad ambiental y natural, incluyendo la del agua, corresponden al mandato del <b>Ministerio del Medio Ambiente de Canadá</b> (Environnement, Canadá).</p> <p>La regulación de los recursos hídricos se lleva a cabo a nivel de las provincias y es frecuentemente el ministerio provincial ambiental la institución que administra los recursos hídricos.</p> <p>No existen hasta ahora instituciones o marcos legales dedicados a los SAT; solo existen acuerdos a nivel local entre algunos de los 10 SAT identificados entre Canadá y EUA dentro de la iniciativa ISARM Américas.</p>
	Estados Unidos	<p>No existe una agencia federal única con responsabilidades exclusivas en la gestión del agua a nivel nacional, siendo la regulación de los recursos hídricos una actividad jurisdiccional estatal, aunque varias agencias de carácter federal intervienen en diversos asuntos relacionados con la gestión del agua. Entre otras, la <b>Agencia de Protección del Medio Ambiente</b> (EPA, en inglés) norma la calidad de aguas; mientras que <b>El Servicio Geológico de Estados Unidos</b> (USGS, en inglés), realiza estudios y desarrolla normas técnicas en materia de aguas subterráneas.</p> <p>A escala de los SAT existen dos instituciones federales, la Comisión Internacional Conjunta (IJC en inglés) entre los EUA y Canadá; y la Comisión Internacional de Aguas Transfronterizas (IBWC en inglés) entre los EUA y México. La IJC incluye varios acuerdos sobre las aguas superficiales transfronterizas, ríos y lagos, pero no incluye acuerdos de ningún tipo sobre los SAT. El 17 de setiembre de 2004 el gobierno federal aprobó la ley sobre la evaluación de los acuíferos transfronterizos entre los EUA y México (TAAA en inglés); esa disposición permitió elaborar el programa TAAP que rige los SAT localizados entre los EUA y México. El objetivo general del programa TAAP es generar información científica que sea útil a los tomadores de decisiones. El programa cuenta con un presupuesto significativo y fue aprobado por un periodo de diez años.</p> <p>No existe nada similar en la frontera norte de los EUA.</p>
	México	<p>La <b>Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)</b> es la institución oficial de los Estados Unidos Mexicanos, con competencia y autoridad en el desarrollo hidráulico y la gestión de los recursos hídricos. Las funciones y atribuciones de la CONAGUA incluyen los aspectos de administración de los derechos de usos de agua, el desarrollo de obras hidráulicas, la conservación y desarrollo de la infraestructura hidro-agrícola en los distritos de riego, la prevención de los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos, incluyendo el servicio de información hidrológica y meteorológica, y la educación al público a través de su Programa Cultura del Agua. CONAGUA formula y ejecuta el Plan Nacional Hídrico.</p> <p>CONAGUA posee 13 <b>Organismos Regionales</b> que corresponden a la subdivisión hidrológica-administrativa del país que cubren las grandes cuencas o regiones hidrográficas de México. Estos Organismos ejercen la autoridad</p>

		estatal o federal a escala de las cuencas o regiones, siendo desconcentraciones de la autoridad central. La participación de los usuarios del agua en la gestión de los recursos hídricos, toma forma mediante los Consejos de Cuencas, de carácter consultivo, un espacio de coordinación y concertación en cada Organismo o Gerencia Regional. Se han creado unos órganos auxiliares de estos Consejos denominados Comités Técnicos de Aguas Subterráneas <b>COTAS</b> para tratar con lo relacionado a la preservación de los acuíferos.
América Central y Caribe	Belice	No existe una organización de gobierno con responsabilidades específicas en la gestión o regulación de recursos hídricos, aunque se estudia un proyecto de ley para el establecimiento de una <b>Comisión Nacional del Agua</b> (National Water Commission). Una Comisión Nacional Pro-tempore del Agua (en inglés, NPTWC) ha preparado esta propuesta de ley.
	Costa Rica	El <b>Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)</b> es la instancia del Gobierno que rige en materia de recursos hídricos correspondiéndole lo relativo a su aprovechamiento y vigilancia, así como administrar el Registro Nacional de Aprovechamiento de Aguas y Cauces. Dependiendo del MINAE, la <b>Dirección de Recursos Hídricos</b> es la instancia con funciones específicas relativas a la gestión de los recursos hídricos. El <b>Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA)</b> tiene competencias en cuanto a la investigación y protección de las aguas superficiales y subterráneas. Promueve la investigación hidrológica, hidrogeológica y agrícola y maneja el Archivo Nacional de Pozos, siendo la autoridad que concede los derechos de perforación de pozos. El <b>Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)</b> , cuya atribución principal es el aprovechamiento de energía, opera la red hidrológica y meteorológica.
	El Salvador	El <b>Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARN)</b> tiene la responsabilidad de proteger los recursos hídricos con facultades de supervisar la calidad ambiental de los cuerpos de agua, incluyendo la gestión y uso de aguas y ecosistemas acuáticos. El <b>Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS)</b> es la entidad a quien corresponde la vigilancia sanitaria de la calidad de agua para consumo humano y el control de las aguas residuales. El agua para riego es competencia del <b>Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)</b> , incluyendo el otorgamiento de permisos y concesiones y el control de la contaminación de las aguas de uso agrícola.
	Guatemala	El <b>Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales</b> se ocupa de la gestión de las aguas superficiales. Para la regulación y control de la explotación de las aguas subterráneas no se han desarrollado competencias específicas. El <b>Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH)</b> se encarga de evaluar y cuantificar los recursos hídricos del país y de operar el servicio hidrometeorológico.
	Haití	El <b>Ministerio de Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Rural (MARNDR)</b> se encarga del manejo de los sistemas de riego y del control de la explotación de las aguas subterráneas. Al <b>Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Comunicaciones (MPTC)</b> están adscritos varios organismos autónomos con competencia en los servicios de agua potable. El <b>Ministerio de Salud Pública y Asuntos de la Población</b> , tiene las funciones de promover la higiene y del control de la calidad de agua. El <b>Ministerio de Planificación y Cooperación Externa</b> es responsable de la formulación y aplicación de la política y los planes de desarrollo a nivel nacional, incluyendo los aspectos relacionados con los recursos hídricos. El <b>Ministerio de Medio Ambiente</b> se ocupa de la preservación del ambiente y de los recursos naturales, incluyendo el agua.
	Honduras	La <b>Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA)</b> es la entidad rectora del agua en Honduras. Su <b>Dirección General de Recursos Hídricos</b> concede los permisos de aprovechamiento de las aguas nacionales. La SERNA ejecuta tareas de control de contaminación, a través del <b>Centro de Estudio y Control de Contaminantes</b> . La <b>Secretaría de Agricultura</b> es la instancia estatal que se ocupa del riego.

	Nicaragua	El <b>Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales</b> (MARENA) formula y dirige las políticas nacionales del ambiente y el uso sostenible de los recursos naturales. Dentro de MARENA, la <b>Dirección de Recursos Hídricos y Cuencas</b> interviene en la promoción de la gestión de recursos hídricos nacionales y transfronterizos. El <b>Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales</b> (INETER) tiene a su cargo la realización de la investigación, el inventario y la evaluación de los recursos del país, y ejecuta estudios de ordenamiento territorial en la escala nacional y regional.
	Panamá	La <b>Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM)</b> , entidad rectora de los recursos naturales y el ambiente, es la única institución con competencias en materia de regulación de aguas superficiales y subterráneas. Una dependencia de ANAM, la <b>Dirección de Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas</b> es la encargada de otorgar permisos y concesiones de uso de agua y exploraciones, perforaciones de pozos, y de operar una red de estaciones hidrometeorológicas. El <b>Ministerio de Salud (MINS)</b> y el <b>Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA)</b> tienen departamentos de perforaciones de pozos para abastecimiento de agua potable a comunidades rurales y uso agropecuario respectivamente.
	República Dominicana	El <b>Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales</b> (MMARN) es responsable de la política de conservación de los recursos naturales. Adscrito al MMARN está el <b>Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos</b> (INDRHI), cuyas competencias principales son: la regulación de los recursos hídricos; el servicio de hidrología; y el manejo de los sistemas de riego. Lo relativo al desarrollo de la infraestructura sanitaria y la prestación del servicio de agua potable y saneamiento compete al <b>Instituto Nacional de Aguas Potables y Alcantarillados</b> (INAPA), y seis entidades municipales llamadas Corporaciones de Agua Potable y Alcantarillado, que se han desprendido del INAPA como operadoras o prestadoras del servicio en los municipios principales del país.
América del Sur	Argentina	La <b>Subsecretaría de Recursos Hídricos</b> es la instancia en la escala nacional que es responsable de la elaboración y ejecución de la política hídrica nacional y del marco regular para la gestión de los recursos hídricos. Los aspectos de calidad de agua, y prevención de la contaminación, son competencia de la <b>Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sostenible</b> , que coordina la política ambiental, e integra el Consejo Federal del Medio Ambiente. El <b>Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA)</b> tiene las funciones de control y contaminación hídrica. En lo relacionado con las aguas subterráneas una dependencia del INA, el <b>Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS)</b> , realiza estudios y proyectos de evaluación, explotación y preservación de los recursos hídricos subterráneos. Dado el régimen federal de gobierno, las provincias son responsables de sus recursos y de la legislación pertinente a los fines de su evaluación gestión y protección. Los códigos/leyes de aguas provinciales no siempre contemplan los aspectos referidos a las aguas subterráneas.
	Bolivia	Las funciones de formular, evaluar y fiscalizar la política hídrica nacional son responsabilidades del <b>Ministerio del Agua</b> , que también da la política sobre el manejo de cuencas y recursos hídricos transfronterizos. El aprovechamiento de las aguas para todos sus usos es competencia de este Ministerio que coordina con otros ministerios en asuntos relativos a recursos hídricos transfronterizos ( <b>Ministerio de Relaciones Exteriores y Cultos</b> ), planeación hidráulica ( <b>Ministerio de Planificación y Desarrollo</b> ) e investigación hidrogeológica ( <b>Ministerio de Minería y Metalurgia</b> , a través del Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas).
	Brasil	En el plano federal la Política Ambiental de Recursos Hídricos, y el seguimiento y control de su aplicación (incluyendo las aguas subterráneas, y los programas y proyectos internacionales de aguas subterráneas) son competencia de la <b>Secretaría de Recursos Hídricos y Ambiente Urbano</b> del <b>Ministerio del Medioambiente</b> . El Proyecto de Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, y el Programa ISARM

	<p>Américas es coordinado por esta Secretaría.</p> <p>La <b>Agencia Nacional del Agua</b> (ANA) es la entidad federal de implementación de la Política Nacional de Recursos Hídricos, administra los recursos hídricos interestatales, e implementa el Sistema Nacional de Información sobre Recursos Hídricos (SNIRH).</p> <p>A nivel sub-nacional, los estados tienen la atribución de regular los ríos dentro de sus dominios (cuencas que nacen y desembocan en territorio del mismo Estado), y de las aguas subterráneas.</p>
Chile	<p>El <b>Ministerio de Obras Públicas</b> posee dos entidades con competencias en recursos hídricos. Una es la <b>Dirección General de Aguas</b> (DGA), que cumple con la función de rectoría de las aguas superficiales y subterráneas, y asigna, bajo una nueva normativa y estándares ambientales, los derechos de uso de agua a quienes los solicitan. La DGA tiene la facultad de conceder derechos sobre el agua, bajo los supuestos previstos en la ley y se encarga de proporcionar y difundir la información generada por su red hidrométrica y la contenida en el Catastro Público de Aguas. La otra es la <b>Dirección de Obras Hidráulicas</b>, que tiene la misión de proveer de servicios de infraestructura hidráulica (riego, drenaje de aguas pluviales, obras de control de inundación, y abastecimiento de agua potable a las localidades rurales).</p> <p>El <b>Ministerio de Medio Ambiente</b> tiene la tuición de todos los aspectos relacionados con la protección de los recursos naturales para conducir los procesos de evaluación de impacto ambiental. Esta tarea está entregada a los respectivos Servicios de Evaluación Ambiental en cada Región.</p>
Colombia	<p>El <b>Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible</b>(MADS) dicta las políticas de gestión de recursos hídricos superficiales y subterráneos, y cuenta con varios institutos especializados, entre ellos el <b>Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales</b> (IDEAM) que genera información hídrica y ambiental y proporciona asesoría técnica al <b>Sistema Nacional Ambiental</b> (SINA) sobre el uso de los recursos naturales en materia ambiental y del clima. Entre sus diversas funciones se destaca el manejo de la información básica sobre hidrología, hidrogeología, y meteorología; realizar estudios e investigaciones sobre hidrología y meteorología; y dirigir y coordinar el Sistema de Información Ambiental.</p>
Ecuador	<p>La <b>Secretaría Nacional del Agua</b>, (SENAGUA), es la institución rectora, reguladora, normalizadora y gestora del uso del agua en el Ecuador. SENAGUA ejerce la Rectoría Nacional en la gestión y administración de los recursos hídricos bajo políticas sectoriales y de regulación, teniendo en cuenta criterios de preservación y conservación del agua y tomando en consideración los principios de equidad, solidaridad y derecho ciudadano. La Constitución vigente otorga a los Consejos Provinciales la gestión de cuencas y micro cuencas bajo las directrices de la SENAGUA. El <b>Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología</b> (INAMHI), es la entidad nacional competente en materia de normativas, desarrollo y operación de instalaciones de medición, y estudios e investigaciones hidrológicas y meteorológicas. El <b>Ministerio de Medio Ambiente</b> es responsable del sistema nacional de gestión ambiental incluyendo al agua, lo cual coordina con otros organismos competentes para expedir y aplicar normas técnicas y parámetros de protección ambiental.</p>
Paraguay	<p>La <b>Secretaría del Ambiente</b>, a través de su <b>Dirección General de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos</b>, formula la política de mantenimiento y conservación de los recursos hídricos y las cuencas hidrográficas. Esta Dirección vela por la regulación del agua, los regímenes de escurrimiento y el mantenimiento y los caudales ecológicos. La <b>Secretaría del Ambiente</b> interviene en la gestión de acuíferos transfronterizos.</p>
Perú	<p>La jurisdicción administrativa del agua corresponde al <b>Ministerio de Agricultura</b> a través de la <b>Autoridad</b></p>

		<b>Nacional del Agua.</b> Una <b>Superintendencia de Recursos Hídricos</b> tiene las atribuciones de promover y supervisar las políticas, planes, programas y proyectos y asuntos normativos en materia de recursos hídricos. Los <b>Distritos de Riego</b> se encargan del manejo y control de agua para riego y también de los acuíferos en su jurisdicción territorial.
	Uruguay	El Poder Ejecutivo es la autoridad de aguas a nivel nacional y le compete formular y llevar adelante las políticas de aguas y la gestión del recurso. Esta competencia se ejerce a través del <b>Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente</b> , con intervención de la <b>Dirección Nacional de Aguas</b> (DINAGUA) y la <b>Dirección Nacional de Medio Ambiente</b> (DINAMA). Es competencia de la <b>DINAGUA</b> la formulación de las políticas nacionales de agua y saneamiento y la administración, uso y control de los recursos hídricos. Es competencia de la <b>DINAMA</b> la evaluación y fiscalización de la calidad de las aguas, y clasificación de cuerpos de agua, así como las autorizaciones ambientales. El <b>Ministerio de Industria, Energía y Minería</b> , a través de su Dirección Nacional de Minería y Geología realiza estudios geológicos e hidrogeológicos y edita mapas. La <b>Junta Asesora del Acuífero Guaraní</b> tiene competencias de asesoría y evaluación de solicitudes, así como mediar en conflictos relacionados con la explotación de dicho acuífero.
	Venezuela	El <b>Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA)</b> es el órgano rector de las políticas ambientales y es la autoridad nacional de aguas. El MPPA asociada a las aguas está representado por la <b>Dirección General de Cuencas Hidrográficas</b> , y la <b>Dirección de Administración de Aguas</b> , quienes ejercen funciones de administración y gestión de aguas superficiales y subterráneas. La <b>Oficina Administrativa de Permisos</b> expide permisos relacionados con aguas subterráneas.

En la mayoría de los países del continente Americano las respuestas políticas reflejan hasta cierto punto los tiempos de cambio global y grandes incertidumbres, las cuales dependen de: a) una buena información; y b) una buena difusión de la información; y c) de una buena comprensión de esa información.

Como resultado de la iniciativa UNESCO/OEA ISARM Américas y gracias al esfuerzo de la red de Coordinadores Nacionales de los países americanos (CNs), se puede concluir que en donde ya existen mecanismos institucionales para la evaluación de acuíferos transfronterizos se requerirá el interés de los países para que estos se hagan efectivos y faciliten las evaluaciones bi- o multinacionales. En donde esos mecanismos no existen será necesario crearlos.

## **5.2 Aspectos socioeconómicos**

Esta sección presenta un breve resumen de los aspectos socioeconómicos de cada uno de los 73 SAT inventariados en el continente Americano. Para comprender mejor estos aspectos, el resumen incluye la ubicación, población, características hidrogeológicas, actividades socioeconómicas y los riesgos potenciales de degradación de los SAT. Una descripción más detallada de cada uno de ellos se puede encontrar en el libro No. 3 de la serie PHI-VII ISARM Américas (UNESCO 2010).

Las tablas 5.2 a 5.4 presentan el resumen de los principales aspectos socioeconómicos de los SAT de las Américas.

Tabla 5.2 Sistemas acuíferos transfronterizos de América del Norte

SAT	Países	Ubicación y población	Características hidrogeológicas	Características socioeconómicas	Riesgos Potenciales
<b>1N</b> Abbstford-Sumas	Can/ EUA	Se extiende entre el sudoeste de la Columbia Británica y el noroeste del Estado de Washington y cubre un área total de 260 km <sup>2</sup> , de los cuales 100 km <sup>2</sup> se ubican en Canadá y 160 km <sup>2</sup> en los Estados Unidos. La población en el área del acuífero es de 160.000 y 30.000 habitantes respectivamente.	Acuífero libre que se ubica sobre una planicie de origen glacial, conformada por arenas y gravas, el acuífero sobreyace a extensos depósitos glacio-marinos donde los sedimentos del valle están confinados por rocas terciarias. La zonas de recarga se localizan en las zonas topográficamente altas y el rango de la recarga se estima entre los 650 y 1000 mm/año.	En el sector canadiense son principalmente de tipo agroindustrial, aves de corral, lecherías y algunos cultivos. En el sector de los EUA las actividades predominantes son de tipo doméstico o urbanístico.	Contenidos elevados de nitratos superiores a la norma hacen suponer que las actividades agroindustriales y urbanas que se desarrollan en el acuífero son un riesgo potencial de degradación del sistema acuífero y están siendo consideradas en los planes de gestión del mismo.
<b>2N</b> Okanagan-Osoyos	Can/ EUA	Se extiende desde la zona centro sur de la provincia de la Columbia Británica en Canadá hasta la zona centro norte del estado de Washington, el área del acuífero se estima en 25 km <sup>2</sup> ubicado al final de una cuenca mucho mayor.	Acuífero multicapas con un espesor de entre los 100 y 500 metros, conformado por sedimentos no consolidados, que se ubica dentro de la cuenca del Lago Okanagan cubriendo un área de 8000 km <sup>2</sup> .	La demanda de agua del acuífero es moderada y se estima que en el sector de Canadá se utilizan unos 63 mm <sup>3</sup> /año siendo mínima en el sector americano. Las actividades agrícolas, en el sector de Canadá están asociadas al desarrollo de viñedos y se vislumbra en el área un incremento de las actividades urbanísticas, producto de las buenas condiciones climáticas.	En general se tiene muy poca información del SAT, lo que limita el identificar posibles factores de riesgo de degradación del sistema.

<b>3N</b> Grand Forks	Can/ EUA	Entre la zona centro sur de la provincia de Columbia Británica en Canadá y una pequeña parte en el centro norte del estado de Washington, tiene un extensión de unos 34 km <sup>2</sup> de los cuales casi todos se ubican en el sector Canadiense. La población en el área del acuífero es de unos 12000 habitantes.	Acuífero de tipo aluvial compuesto de sedimentos no consolidados, cuyo espesor oscila entre los 50 y los 100 metros. El valor de la recarga es entre 30 y 120 mm/año.	Son principalmente de tipo agrícola, del total de la extracción de agua del acuífero más del 90% se enfoca en riego, el restante 10 % en actividades de consumo doméstico.	Se han identificado procesos de contaminación por nitratos asociados a la utilización de fertilizantes y se han dado casos de contaminación puntual a partir de las pocas industrias existentes y de estaciones de servicio. La "Sociedad de Conservación del Acuífero Grand Forks", inició la implementación de un plan de protección del recurso hidrogeológico definiendo zonas de protección de los pozos existentes.
<b>4N</b> Poplar	Can/ EUA	Más del 33% de su extensión se ubica en la parte superior de la provincia de Saskatchewan en Canadá y el resto en el estado de Montana en los Estados Unidos.	No se tiene información sobre las características hidrogeológicas del acuífero.	No se tiene información sobre las características socioeconómicas sin embargo es importante recalcar que el acuífero es la principal fuente de agua de las ciudades de Coronac, Saskatchewan y la única fuente de agua de Scobey, Montana.	La principal amenaza sobre el acuífero se centra en el emplazamiento de una mina de carbón, exactamente sobreyaciendo el área del SAT lo que podría tener graves efectos sobre el recurso. Desde 1980 existe una comisión bilateral responsable de la vigilancia y el intercambio de información de datos sobre la cantidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas.
<b>5N</b> Estevan	Can/ EUA	Se localiza en la provincia de Saskatchewan en Canadá y el Estado de Dakota del Norte en los Estados Unidos.	Formado por valles preglaciares de ríos. Situado dentro de un lecho de rocas muy poco permeable y está cubierto por un acuitardo, compuesto por morrenas. Abarca cerca de 70 km de largo, un espesor de 80	Se tiene muy poca información de parámetros socio-económicos	No se tienen identificados riesgos potenciales que pueden degradar la calidad del recurso, por lo anterior se requiere realizar estudios detallados de este acuífero antes de iniciar cualquier plan o esquema de manejo.

			<p>metros y más de 4 km de ancho. El SAT está conformado por los acuíferos del Valle de Estevan, el acuífero del valle de Weyburn y el acuífero Ravenscrag, los tres funcionando como un sistema único.</p> <p>La explotación del acuífero en el lado Canadiense, se estima en 37,5 mm<sup>3</sup>/año y no se tienen datos exactos del potencial total del acuífero.</p>		
<b>6N</b> Northern Great Plains	Can/ EUA	<p>Es un sistema acuífero muy extenso, localizado entre las provincias de Saskatchewan y Manitoba en Canadá y los estados de Montana, Wyoming, Dakota del Norte y Dakota del Sur de los Estados Unidos. Tiene una extensión de 500.000 km<sup>2</sup> de los cuales el 75% está en el lado de EUA y el 25% en el lado Canadiense.</p>	<p>Es un sistema acuífero confinado compuesto por areniscas, pizarras, calizas y dolomitas, con transmisividad del orden de los 100 m<sup>2</sup>/día. La extracción actual en el lado de EUA es en el orden de los 380.000 m<sup>3</sup>/día pero en el lado Canadiense se estima ha variado en el tiempo entre menos de 4.500 m<sup>3</sup>/día y 45.000 m<sup>3</sup>/día asociados a uso doméstico e irrigación.</p>	<p>No se tienen datos de parámetros socioeconómicos asociados a actividades dependientes del acuífero.</p>	<p>Se evidencian problemas de salinidad asociados a que el sistema tiene aguas de formación compleja con mezclas de agua meteórica, cuencas de salmuera y aguas saladas de origen marino.</p>
<b>7N</b> Chateaugua y	Can/ EUA	<p>Localizado al suroeste de Montreal en Canadá y se extiende hacia la frontera de los EUA en el estado de Nueva York. En el área del acuífero se ubica una población de alrededor de 125.000 habitantes de los cuales 100.000 viven en el sector de Canadá y 25.000</p>	<p>Se compone de rocas sedimentarias fracturadas compuestas por areniscas, dolomitas y calizas, que subyacen a sedimentos glaciares integrados por arcillas, arenas y gravas; las profundidades del SAT oscilan entre los 0 a los</p>	<p>En el sector de Canadá para uso doméstico y agroindustrias, incluyendo las de embalsado de agua y para riego; en el sector de los Estados Unidos los usos predominantes son el</p>	<p>Aspectos que afectan la calidad y disponibilidad del recurso: descensos en el nivel freático de tipo local y se ha detectado presencia de fertilizantes y compuestos químicos orgánicos.</p>

		en el sector de los Estados Unidos. La extensión del acuífero es de unos 2.475 km <sup>2</sup> de los cuales 1.425 corresponden al sector Canadiense y 1.050 al de los Estados Unidos.	500 metros en Canadá y de los 0 a los 100 en los Estados Unidos.	doméstico y uso de manantiales para criaderos de peces. La explotación y tasa de extracción en Canadá es del orden de los 31 mm <sup>3</sup> y desconocida en los Estados Unidos.	
<b>19N</b> Judith River	Can/ EUA	Este es un sistema acuífero muy extenso cubriendo un área del orden de 137.000 km <sup>2</sup> entre las provincias de Saskatchewan y Alberta en Canadá y el estado de Montana en los Estados Unidos. Sin embargo ninguno de los dos países ha estudiado aun el sistema de manera cuantitativa.	No existe información.	No existe información.	No existe información.
<b>20N</b> Milk River	Can/ EUA	Localizado al sur de la provincia de Alberta en Canadá, extendiéndose hacia la frontera de los Estados Unidos al sur, en el estado de Montana. La extensión del acuífero es de aproximadamente unos 30.000 km <sup>2</sup> de los cuales 70% corresponden al sector Canadiense y el resto al de los Estados Unidos. Estas son regiones semiáridas consideradas como deficitarias en agua en ambas lados de la frontera. El sistema acuífero ha sido fuertemente explotado desde el principio de los años 1900s sobre todo en	Es un sistema acuífero compuesto esencialmente por areniscas consolidadas en condiciones confinadas.	El acuífero es una fuente de abastecimiento de agua municipal y con usos agrícolas en el lado canadiense, así como para la recuperación secundaria de petróleo y gas en ambos lados de la frontera.	Dadas las características áridas de la región y el desarrollo socio-económico de la misma, existen riesgos de sobre-explotación del acuífero. La presencia de campos de gas en la región y su creciente explotación, también presenta riesgos de contaminación.

		lado de Canadá.			
<b>21N</b> Richelieu- Champlain	Can/ EUA	Localizado al este y sureste de Montreal en Canadá extendiéndose hacia la frontera de los Estados Unidos al sur en los estados de Nueva York y Vermont. La extensión del acuífero es de unos 16.500 km <sup>2</sup> de los cuales 9.000 corresponden al sector Canadiense y 7.500 al de los Estados Unidos. La población es de alrededor de 575.000 habitantes de los cuales 435.000 viven en el sector de Canadá y 140.000 en el sector de los Estados Unidos.	Compuesto de rocas sedimentarias fracturadas: areniscas, dolomitas, calizas y pizarras, que subyacen a sedimentos glaciares integrados por arcillas, arenas y gravas; las profundidades del SAT oscilan entre los 0 a los 500 metros en Canadá y de los 0 a los 100 en los Estados Unidos. Los primeros 10 a 50 metros del sistema acuífero están compuestos por sedimentos marinos recientes del cuaternario haciendo un acuífero en condiciones freáticas.	En el sector de Canadá los usos son principalmente domésticos, agro-industriales y para riego; en el sector de los Estados Unidos el uso predominante es doméstico. Las tasas de extracción no han sido aún cuantificadas en ambos lados de la frontera.	En cuanto a aspectos que afectan la calidad y disponibilidad del recurso no se conocen descensos en el nivel freático de tipo local, pero se conoce la presencia de aguas salinas originarias del mar Champlain que existía en la zona hace 11.000 años.
<b>8N</b> San Diego- Tijuana	EUA /MX	Sector sur del estado de California en los EUA y en la parte norte del estado de Baja California en México. La población en el 2005 en el sector Mexicano era de unos 2,800.000 habitantes y de unos 400.000 habitantes en EUA, abarcando áreas de unos 300 km <sup>2</sup> en México y de unos 250 km <sup>2</sup> en los Estados Unidos.	Conformado por materiales aluviales en los valles y por conglomerados en las terrazas y lomeríos adyacentes, su espesor en territorio mexicano es de unos 300 m.	Los principales usos del acuífero están enfocados hacia el abastecimiento de la ciudad de Tijuana y en una escala mucho menor hacia la producción agrícola. En el sector de los EUA, de igual manera la utilización de acuífero se enfoca hacia el abastecimiento de ciudades y para riego en la agricultura.	La principal amenaza que enfrenta el acuífero está asociada a las fugas de las redes de aguas residuales de la ciudad de Tijuana, las cuales alcanzan el acuífero e inducen procesos de recarga, con aguas contaminadas y de muy mala calidad. Asimismo se han identificado problemas de salinidad del agua subterránea a mayor profundidad en territorio mexicano y problemas de intrusión salina en la planicie costera de San Diego.
<b>9N</b> Cuenca Baja del Río	EUA /MX	Sector sur de los estados de California y Arizona en los EUA y en la parte norte	Acuífero constituido por clastos no consolidados depositados en el delta	La extracción en el sector de México se estima en unos 826	Los problemas de degradación del SAT, están asociados a procesos de

Colorado		de los estados de Baja California y Sonora en México. La población en el sector mexicano para el 2005 era de 895.106 habitantes.	del río Colorado y en la fosa del Mar del Salton, la profundidad del agua subterránea va desde pocos metros hasta los 50 metros cerca de la Ciudad de San Luis Rio Colorado.	hm <sup>3</sup> /año. Tiene gran importancia para el desarrollo agrícola, especialmente en territorio mexicano donde se dan importantes cultivos de cebada, trigo, algodón, sorgo, maíz y ajonjolí, en menor escala también se utiliza el acuífero para al consumo humano.	salinización que son inducidos por el lavado de suelos agrícolas y la infiltración de aguas del drenaje agrícola. En menor escala se han identificado procesos de contaminación difusa originada por las prácticas agrícolas. Una fracción importante de la recarga de la porción mexicana del sistema procede de los EUA; de hecho hay obras en proyecto que reducirán significativamente la alimentación subterránea que recibe México, por lo que se están contemplando medidas de mitigación y hay enérgica oposición social en ambos países por parte de grupos ecologistas.
<b>10N</b> Sonoyta- Papagos	EUA /MX	Porción norte del estado de Sonora en México y en la porción sur del estado de Arizona en los EUA. La población en el sector Mexicano se estima en 42.597 habitantes para el 2005, y en el sector de los Estados Unidos los datos no son confiables.	Acuífero formado por materiales aluviales con espesores que van de las decenas de metros hasta los 200 metros, su extensión superficial es reducida. En el sector Mexicano los niveles freáticos se ubican entre los 10 y los 120 metros de profundidad; la recarga, estimada en 41,4 hm <sup>3</sup> /año, está asociada a la infiltración del Río Sonoyta.	La extracción de agua subterránea es más importante en territorio Mexicano, el uso principal del agua es agrícola y en el sector de los Estados Unidos se estima que es de uso doméstico.	Los principales problemas que tiene el acuífero en cuanto a la calidad es que presenta procesos de salinización, además se estima que el acuífero esta sobre explotado, con tasas de extracción del orden de los 46,3 hm <sup>3</sup> /año.
<b>11N</b> Nogales	EUA /MX	Porción norte del estado de Sonora en México y en la porción Sur del estado de	Para el sector Mexicano, los estudios indican que el acuífero está	Estas dependen fuertemente del acuífero y están	El SAT presenta problemas de contaminación asociados a las actividades

		<p>Arizona en los EUA. La población en 2005 en el sector de México fue de 156.964 habitantes y para el sector Estadounidense fue de 21.000 habitantes.</p>	<p>constituido por materiales aluviales y rocas fisuradas de poca extensión con una permeabilidad media. El espesor promedio es de 30 m para el acuífero aluvial y de 150 m para el que se aloja en rocas fracturadas. La profundidad del nivel del agua subterránea varía de 10 a 80 m y la recarga se estima en 5,2 hm<sup>3</sup>/año.</p>	<p>asociadas a actividades industriales y el abastecimiento urbano, tanto para el sector mexicano como para el estadounidense.</p>	<p>industriales y urbanas. Se ha identificado la presencia de: percloroetileno, nitratos, coliformes fecales y totales, hierro y manganeso. Esta contaminación se genera en México y se trasladan hasta el territorio norteamericano por la dirección natural de las líneas de flujo. Adicionalmente en el sector de estadounidense se han detectado problemas de disminución de los niveles freáticos. Dada la situación que se presenta en este SAT, los planes de manejo requerirán de la toma de acciones conjuntas. Existe un acuerdo binacional entre México y los Estados Unidos, mediante el cual fue posible realizar estudios de presencia de contaminantes antropogénicos.</p>
<p><b>12N</b> Santa Cruz</p>	<p>EUA /MX</p>	<p>Parte norte del estado de Sonora en México y en la parte sur de Arizona en los EUA. La mayor parte de la población que reside en el área del acuífero se ubica en el sector norteamericano con unos 980.000 habitantes.</p>	<p>Constituido por materiales aluviales, conglomerados y rocas volcánicas fisuradas, con extensión superficial y espesor reducidos y de transmisividad media. La profundidad de los niveles piezométricos varía entre 4 y 10 metros, principalmente en el sector aluvial del acuífero. La recarga estimada en el sector mexicano es del orden de 33 hm<sup>3</sup>/año y se</p>	<p>En el sector mexicano el uso del agua es principalmente para consumo humano en sistemas de acueductos formales y en segundo lugar para riego.</p>	<p>Si bien que la calidad del agua del sistema acuífero es buena, sin fuentes de contaminación puntuales, en cuanto a su disponibilidad es necesario cuantificar con precisión el aporte del acuífero hacia el territorio de los EUA. Un incremento importante en la extracción de agua del acuífero podría reducir o anular el caudal del flujo que se dirige hacia el campo de pozos que</p>

			calcula que el flujo que pasa a través de la frontera es de orden de los 2 hm <sup>3</sup> /año		suministra agua a ciudad Nogales Arizona.
<b>13N</b> San Pedro	EUA /MX	Ubicado en la porción Norte del estado de Sonora en México y en la porción Sur del estado de Arizona en los EUA. La población residente en el área del acuífero es escasa, se estimó que para el 2005 que en el sector Mexicano residían 6.195 habitantes y en el sector Norteamericano 130.000 personas.	Acuífero constituido por materiales aluviales en los valles y por conglomerados en las lomeríos adyacentes, su extensión superficial y espesor son reducidos, su transmisividad es media a baja. La dirección principal del flujo subterráneo es de México a los EUA; se estima que el caudal del flujo que pasa a través de la frontera internacional es de unos 2 hm <sup>3</sup> /año, con una recarga total de 412 hm <sup>3</sup> /año, la profundidad al nivel estático varía de 10 a 90 metros.	Los principales usos del acuífero se relacionan con procesos industriales y en mucho menor grado con actividades de abastecimiento público y de riego.	La calidad natural del agua es buena y según México se registra un riesgo de contaminación derivado de la descarga de aguas residuales de una empresa minera que se ubica en la parte alta del sistema acuífero. En cuanto a la disponibilidad del recurso, el incremento de la extracción en territorio mexicano implicaría una reducción de la recarga subterránea que recibe la porción estadounidense del sistema.
<b>14N</b> Conejo Medanos- Bolsón de la Mesilla	EUA /MX	Se extiende en el estado de Chihuahua (México) y en el estado de Texas (EUA), el acuífero forma parte de las cuencas cerradas de la porción occidental de Texas y de la porción norte de México.	Constituido por materiales aluviales y depósitos de "bolsón", cuyo espesor es de varios cientos de metros y su extensión superficial se estima en unos 10.000 km <sup>2</sup> . Es de tipo "libre", de permeabilidad media a baja y gran capacidad de almacenamiento. La profundidad del nivel freático varía entre los 8 y los 130 metros. La tasa de extracción se estima en 1,6 hm <sup>3</sup> /año en el sector mexicano.	Dado que el área es una zona muy árida, todas las actividades dependen de este acuífero, en especial la agricultura que a pesar de ser de subsistencia utiliza más del 68% de la extracción total del acuífero, la segunda actividad en importancia que depende del acuífero es el uso doméstico.	La calidad del agua no es buena, presenta índices de salinidad medios y altos y en general no es apta para el consumo humano. En cuanto a la disponibilidad del recurso se tiene programado la construcción de una batería de pozos que suministraría agua a Ciudad Juárez.
<b>15N</b>	EUA	Ubicado en el estado de	En el sector mexicano el	En México, la	La concentración de pozos

Bolsón del Hueco-Valle de Juárez	/MX	<p>Chihuahua (México) y en el estado de Texas (EUA). El acuífero forma parte de las cuencas cerradas de la porción occidental de Texas y de la porción norte de México. Extensión total aproximada de 8000 km<sup>2</sup> de los cuales un 20% corresponde a México y un 80% a EUA. La población es de 1.235.279 habitantes en México, (2005), y 700.000 habitantes en EUA.</p>	<p>acuífero está constituido en la parte superior por materiales clásticos aluviales, sedimentos eólicos y depósitos de "bolsón" y en su parte inferior por rocas sedimentarias kársticas e ígneas extrusivas. El sistema es de tipo "libre", de permeabilidad media a baja y gran capacidad de almacenamiento, su espesor alcanza los 800 metros en algunas partes. En el sector de los EUA el espesor supera los 2500 metros en las zonas cercanas a las montañas Franklin. Contiene agua dulce en su tramo superior, especialmente en la faja fluvial del Río Bravo/Grande; agua salobre en su tramo intermedio, y agua salada en su tramo profundo. La profundidad de los niveles varía desde niveles muy someros en la franja ribereña del Río Bravo hasta los 130 y 150 metros de profundidad. La recarga natural tiene lugar en los flancos de las sierras que limitan al valle y a lo largo del cauce del río; recarga incidental en la zona urbana de Ciudad Juárez y en las zonas agrícolas, por infiltración de agua en redes</p>	<p>extracción de agua subterránea es del orden de 310 hm<sup>3</sup>/año, el acuífero es la principal fuente que abastece a Ciudad Juárez y al distrito de riego del Valle de Juárez; la fuente complementaria es el río Bravo/Grande. En los EUA la fuente principal que suministra agua a la ciudad de El Paso y a la zona de riego del Bolsón del Hueco es el río Bravo/Grande, mientras que el acuífero es la fuente complementaria.</p>	<p>en las zonas urbanas colindantes de Ciudad Juárez y de El Paso, ha generado una gran depresión de los niveles del agua subterránea en la porción suroccidental, en este sector se han provocado abatimientos de varias decenas de metros en los últimos 30 años. El abatimiento de los niveles de agua subterránea ha inducido la migración ascendente del agua salobre o salada hacia las porciones someras que contienen agua dulce; este mecanismo y la contaminación derivada de la infiltración de aguas residuales municipales y excedentes de riego, han dado lugar a un deterioro gradual de la calidad del agua. En EUA, el crecimiento de la demanda de agua de la ciudad de El Paso y la limitada oferta de las fuentes de suministro, ha dado lugar al desarrollo de un sistema de tratamiento-recarga-reuso. La concentración del bombeo de pozos ha generado impactos transfronterizos: en ambos lados de la frontera, principalmente el abatimiento de los niveles del agua y la interferencia</p>
----------------------------------	-----	---	--	--	--

			hidráulicas y por infiltración de excedentes de riego.		de los pozos municipales concentrados en las zonas urbanas mayores y la salinización gradual del agua.
<b>16N</b> Edwards Trinity-El Burro	EUA /MX	Ubicado en la porción norte del estado de Coahuila en México y en la porción sur del estado de Texas, Estados Unidos; la extensión superficial en el sector mexicano se estima en unos 22.000 km <sup>2</sup> . La población en el sector de México se estimó para el 2005 en 110.614 habitantes y para el sector de los Estados Unidos en unos 49.000 habitantes.	Acuífero constituido por rocas calizas de alta permeabilidad y en otros sectores por sedimentos aluviales y rocas metamórficas y volcánicas. La profundidad del nivel freático es muy variable, dependiendo de la unidad que se explote, en las áreas de San Antonio y Austin oscila entre los 150 m.s.n.m. y los 330 m.s.n.m. en los condados de Uvalde y Kinney. La explotación del acuífero, se estima en el sector Mexicano en el orden de los 10 hm <sup>3</sup> /año y en el sector norteamericano en unos 72 hm <sup>3</sup> /año.	Las principales actividades en la parte de México se asocian al riego principalmente y en segundo lugar al uso doméstico; por su parte en el sector de los Estados Unidos, la agroindustria consume más del 75 % de la extracción y el restante 25 % se usa para actividades que van desde el uso municipal hasta la minería y cría de ganado.	La calidad de las aguas es buena en las partes someras del acuífero, sin embargo se torna salobre en las partes profundas y en algunos sectores presenta dureza elevada. La calidad de las aguas se ve afectada por la recarga inducida de Río Pecos y por las salmueras de campos de petróleo y escorrentía de tipo agrícola.
<b>17N</b> Cuenca baja del Río Bravo/ Grande	EUA /MX	Se extiende en la porción norte de los estados de Coahuila y Tamaulipas en México y en la porción sur del estado de Texas; la extensión del acuífero se estima en el sector Mexicano en unos 17.500 km <sup>2</sup> . La población: en el sector Mexicano se estimó en 1.373.531 habitantes y en el sector de los Estados Unidos en 1.200.000 habitantes para el 2005	El sistema acuífero está constituido por numerosos acuíferos alojados en los depósitos fluviales del Río Bravo/Grande y sus afluentes principales. Estos acuíferos son de extensión superficial variada y espesores que van desde las decenas hasta los cientos de metros. Los materiales que componen el sistema son principalmente	Las principales actividades asociadas a la utilización de aguas del acuífero son en el sector Mexicano para riego y en menor proporción para la industria; por su parte en el sector de los Estados Unidos se usa el agua para riego agrícola y en menor proporción para uso municipal.	El agua del acuífero solo es apta para el consumo humano y riego en el sector de la franja fluvial del Río Grande/Bravo, en el resto de la planicie costera es salobre o salada; conforme se profundiza el acuífero, la salinidad aumenta.

			sedimentos no consolidados y consolidados, rocas ígneas y metamórficas. Las profundidades del nivel freático varían desde unos metros en las márgenes del Río Bravo hasta los 50 metros con aumentos de profundidad en el sector montañoso.		
<b>18N</b> Mimbres-Las Palmas	EUA /MX	Abarca parte del Estado de Chihuahua en México y parte del estado de Nuevo México. Tiene una extensión total de 15.188 km <sup>2</sup> , de los cuales 11.422 km <sup>2</sup> se ubican en la parte de los Estados Unidos y 3766 km <sup>2</sup> en el sector Mexicano. La población que reside en la zona del acuífero es de 10.000 habitantes en la zona de México y de 27.000 en la zona de los Estados Unidos.	El acuífero está constituido por un medio granular integrado por gravas, limos de origen fluvial y lacustre distribuidos en los valles y llanuras además se estima que presenta una parte fracturada constituida por rocas ígneas extrusivas con estructuras secundarias que le confieren un alto grado de permeabilidad. El acuífero es de tipo libre de permeabilidad alta a baja y gran capacidad de almacenamiento, el espesor del acuífero va desde los 0 a los 1100 metros. La recarga del acuífero se da por medio de entradas subterráneas provenientes de los frentes montañosos y de acuíferos adyacentes.	Las actividades son de tipo agrícola en ambos países y en segundo lugar destaca el uso industrial. La calidad natural del agua del acuífero es buena y está representada por agua dulce con concentraciones de sólidos disueltos totales menores a 1000 partes por millón.	En los sectores sur y sureste del acuífero se presentan "bolsones" con altos índices de salinidad y alcalinidad, que no permiten que el agua se pueda utilizar para el consumo humano ni para la agricultura.

Tabla 5.3 Sistemas Acuíferos Centroamericanos y del Caribe.

SAT	Países	Ubicación y población	Características hidrogeológicas	Características socioeconómicas	Riesgos
<b>1C</b> Soconusco- Suchiate/ Coatán	México- Guatemala	Se extiende por el estado de Chiapas en México y por el departamento de San Marcos en Guatemala. La topografía es montañosa en su parte alta y de relieve plano en su porción costera. La población está concentrada en la zona costera del lado mexicano y en el lado guatemalteco en los valles intermontanos, estimándose una población de 1.5 millones de habitantes.	Constituido por materiales aluviales de granulometría variada, que descansan sobre rocas cristalinas (granitos, dioritas) y volcánicas del Terciario (basaltos y andesitas). El acuífero es de tipo libre, de características hidráulicas variadas y está conectado con el río Suchiate en su porción baja, el cual constituye su nivel base de descarga. En la porción alta, el flujo subterráneo es de Guatemala hacia México, en la porción baja prácticamente no existe circulación subterránea a través de la frontera internacional. El agua subterránea tiene mayor importancia en la porción costera del Océano Pacífico, en donde está expuesto a la intrusión salina, y donde también contribuye al sostenimiento de los ecosistemas costeros (humedales y manglares).	El SAT es fuente importante para la agricultura en la parte baja de la cuenca y para los usos domésticos-pecuarios en toda su extensión.	Los riesgos significativos de impacto transfronterizo son mínimos; aunque los eventos meteorológicos extremos, como sequías, huracanes y tormentas tropicales, pueden afectar la calidad y la disponibilidad de agua.
<b>2C</b> Chicomuselo /Cuilco/ Selegua	México- Guatemala	Se localiza en el estado de Chiapas, México y los Departamentos de Huehuetenango, San	El acuífero está conformado en su parte superior por clásticos no consolidados y en su parte inferior por rocas	El acuífero es la fuente principal de abastecimiento para los sectores doméstico	El acuífero es vulnerable a eventos meteorológicos extremos que pueden

		<p>Marcos y Quetzaltenango Guatemala. La población más importante se encuentra en la ciudad de Huehuetenango. El clima es relativamente seco, especialmente en el territorio mexicano, y la topografía montañosa con pequeños valles inter-montanos.</p>	<p>kársticas limitadas inferiormente por rocas metamórficas y marinas. El acuífero es de tipo libre con desarrollo kárstico importante. Su permeabilidad secundaria es alta por karsticidad y fracturamiento y hay zonas conductoras asociadas con grandes fallas geológicas; tiene estrecha relación con las corrientes superficiales con las que intercambia agua en forma alternada. El agua circula de Guatemala hacia México.</p>	<p>y agropecuario, así como para el consumo humano. El agua subterránea es importante, durante los períodos de estiaje, aprovechándose la descarga de manantiales y la extraída mediante pozos someros en los valles para uso doméstico, pecuario y agrícola en pequeña escala.</p>	<p>generar efectos degradativos sobre la calidad del agua subterránea.</p>
<p><b>3C</b> Ocosingo- Usumacinta- Pocóm/Ixcán</p>	<p>México- Guatemala</p>	<p>Se localiza en el estado de Chiapas en México y en los departamentos de Huehuetenango, Petén y Quiché en Guatemala. El relieve es montañoso, con valles y mesetas inter-montanos. El clima es cálido subtropical en Guatemala y seco en México.</p>	<p>El acuífero está constituido por rocas kársticas que representan complejos sistemas de circulación subterránea, asociados con grandes cavernas y fracturas. El agua subterránea circula de Guatemala hacia México y descarga al río Usumacinta, que representa su nivel de caudal base. En algunas áreas, el agua subterránea se caracteriza por su alto contenido de sulfatos y carbonatos que la hacen poco apta para el consumo humano y animal. El acuífero ha sido poco estudiado, aunque se dispone de información obtenida en los estudios y exploraciones petroleras. Las mediciones hidrométricas sobre el río Usumacinta, proporcionan una idea de caudal base</p>	<p>El acuífero abastece a la población rural que utiliza el agua con fines doméstico y pecuario; así mismo, alimenta a los ríos y sostiene la vegetación ribereña especialmente durante los períodos de estiaje.</p>	<p>El principal impacto transfronterizo consistiría en una reducción significativa del caudal base del río Usumacinta, con seria afectación a los ecosistemas y a la navegación fluvial.</p>

			aportado por el acuífero.		
<b>4C</b> Márquez de Comillas-Chixoy-Xaclbal	México-Guatemala	Se extiende a lo largo del Estado de Chiapas (México) y en los Departamentos de Totonicapán, Quiché, Alta Verapaz, Baja Verapaz y Petén (Guatemala). En las zonas altas existen poblaciones importantes como Santa Cruz del Quiché, Salamá y Cobán.	El acuífero se encuentra en depósitos de rocas sedimentarias del Cretácico Terciario, calizas y dolomitas cretácicas que presentan extensas área de circulación kárstica. El acuífero presenta complejos sistemas de circulación subterránea asociado con grandes cavernas y fracturas. El agua subterránea circula de Guatemala hacia México y la descarga es a través de los ríos Salinas y La Pasión (Guatemala).	Existen manantiales localizados en las partes altas de las cuencas los cuales abastece de agua a las comunidades.	El principal impacto transfronterizo consistiría en la reducción significativa del caudal base de los ríos Chixoy y Xaclbal afectando los sistemas fluviales y los humedales de la región.
<b>5C</b> Boca del Cerro-San Pedro	México-Guatemala	Se extiende a lo largo de los estados de Tabasco, Campeche y Yucatán (México) y en el departamento de Petén (Guatemala).	Se localiza sobre calizas y dolomitas que tienen elevado grado de permeabilidad por fracturación y de extensas áreas con desarrollo de circulación kárstica. En las zonas medias y bajas se tienen sedimentos marinos terrígenos, areniscas calizas arcillosas y lutitas cubiertas por sedimentos recientes depositadas en el ambiente continental. Es un acuífero multi-estrato de modesta productividad y niveles de permeabilidad variable, con intercalación de niveles impermeables a semi-permeables. El flujo es de Este a Oeste, el acuífero ha sido estudiado únicamente en la cuenca del Lago Petén Itzá y en su área de influencia.	El aprovechamiento de aguas subterráneas es escaso y en casi toda el área se caracteriza por el alto contenido de sulfatos y carbonatos, que la hacen poco apta para el consumo humano y animal. El acuífero abastece de agua a las poblaciones del área urbana central de Petén Guatemala y la ciudad de Tenosique.	El principal impacto transfronterizo consistiría en la reducción significativa del caudal base del río San Pedro, afectando a los sistemas fluviales y a los humedales de la región.
<b>6C</b>	México-	Se localiza en el estadode	El acuífero está alojado en	El acuífero es la fuente	En las condiciones

Trinitaria-Nentón	Guatemala	Chiapas, en México y en el departamento de Huehuetenango, en Guatemala. El relieve es montañoso con valles inter-montanos estrechos y el clima es seco. El agua subterránea es importante en la región, sobre todo en la estación seca.	un relleno de materiales no consolidados, depositado sobre una estructura sinclinal de rocas calcáreas. El acuífero es del tipo libre, de permeabilidad media y baja capacidad de almacenamiento. Sus niveles freáticos son someros y tiene estrecha conexión con las corrientes superficiales, con las que intercambia agua. El agua subterránea fluye de Guatemala hacia México.	principal de agua que abastece a la población rural. Actualmente es captada en manantiales y mediante pozos someros en los valles, y es utilizada con fines domésticos, pecuarios y para el abastecimiento de pequeños sistemas de irrigación.	actuales no hay riesgo de impacto transfronterizo.
<b>7C</b> Península de Yucatán-Candelaria-Hondo	México-Guatemala, Belice	Se localiza en la porción Sur de la Península de Yucatán, en los estados de Campeche y Quintana Roo en México, en el departamento de Petén en Guatemala y en los distritos de Orange Walk y Corozal en Belice. En su mayor parte se extiende a lo largo de la Plataforma Yucateca, de relieve plano. La población está ampliamente dispersa en las tres naciones.	El agua subterránea reviste gran importancia relativa porque el terreno kárstico tiene reducida pendiente topográfica y gran capacidad de infiltración. La única corriente superficial es el río Hondo, que recibe parte de la descarga del acuífero captado mediante gran número de pozos poco profundos. El acuífero está formado por rocas kársticas de alta permeabilidad secundaria, asociada con oquedades de disolución, donde se han desarrollado complejos sistemas de circulación subterránea. El agua circula a través del subsuelo de Guatemala a Belice y luego hacia México. En algunas áreas tiene altas concentraciones de sulfatos, por lo que no es apta para el consumo humano y pecuario.	El sistema acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua para la población rural. No se identifica mayor riesgo de impacto transfronterizo, debido al escaso desarrollo en el territorio guatemalteco y a que la recarga en la porción mexicana y beliceña es cuantiosa.	El acuífero es vulnerable a la contaminación antropogénica, porque el terreno kárstico tiene gran capacidad de infiltración y capacidad prácticamente nula para atenuar contaminantes; sin embargo la abundante recarga y la rápida circulación del agua propicia la disolución y el transporte de los contaminantes, especialmente durante las lluvias torrenciales asociadas a los huracanes y las tormentas tropicales.
<b>8C</b>	Guatemala-	Se extiende a lo largo del	La cuenca está conformada	En la zona constituyen	En las zonas bajas en el

Mopán-Belice	Belice	departamento de Petén en Guatemala y en el distrito de El Cayo en Belice. Es parte de la cuenca del río Mopán que nace en Guatemala y uno de los principales afluentes, el río Chiquibul, que nace en Belice.	en un 55% por depósitos sedimentarios con predominio de rocas sedimentarias muy poco consolidadas, alternándose estratos de areniscas, siltitas, margas, calizas, dolomitas y yeso. El 25% del área está conformada por aluviones cuaternarios con predominio de arcillas, y el restante 20% por calizas y dolomitas cretácicas, con elevado grado de permeabilidad por fracturación y con extensos fenómenos de circulación kárstica. Las calizas y dolomitas cretácicas constituyen un acuífero de muy buena potencialidad y permeabilidad muy variable. Las lluvias pueden infiltrar de 25-50%. El flujo es en dirección Suroeste - Noreste, dirigiéndose a Belice y al Mar Caribe. Se han observado valores altos de sulfatos, carbonatos y otros compuestos en las aguas subterráneas.	las principales actividades la agricultura y ganadería con bajo nivel de desarrollo y la actividad forestal. En general los principales usos del agua superficial son para consumo humano, riego, abrevadero, turismo, ecoturismo e industria. En el área existe deficiencia en la cobertura de agua para consumo humano y pecuario: para usos domésticos, se utiliza el sistema de aljibes y de aguadas o pequeñas lagunas almacenadoras de aguas.	territorio beliceño existe el riesgo de intrusión marina.
<b>9C</b> Pusila-Moho	Guatemala-Belice	Se extiende a lo largo del departamento de Petén en Guatemala y de los distritos de El Cayo y Toledo en Belice. Es parte de la cuenca del río Moho que nace en Guatemala y se dirige hacia Belice.	La cuenca hidrográfica está conformada en 80% por depósitos sedimentarios clásticos marinos del cretácico terciario con predominio de rocas sedimentarias muy poco consolidadas, alternándose estratos de areniscas, siltitas, margas, calizas, y dolomitas. El restante 20%	En general los principales usos del agua superficial son para consumo humano, riego, abrevadero, turismo, ecoturismo e industria. En el área existe deficiencia en la cobertura de agua para consumo humano	En las zonas bajas en el territorio beliceño existe el riesgo de la intrusión marina. Por lo que se refiere a la calidad de las aguas subterráneas, se han observado valores altos de sulfatos, carbonatos y otros compuestos.

			<p>está conformado por calizas y dolomitas cretácicas con elevado grado de permeabilidad por fracturación y con fenómenos de circulación kárstica. Los depósitos sedimentarios terciarios constituyen un acuífero multiestrato de productividad baja y de permeabilidad primaria a secundaria.</p>	<p>y pecuario. Para usos domésticos se utiliza el sistema de aljibes y de aguadas o pequeñas lagunas almacenadoras de aguas.</p>	
<p><b>10C</b> Sarstún</p>	<p>Guatemala-Belice</p>	<p>Se extiende a lo largo de los departamentos de Petén e Izabal en Guatemala y del distrito de Toledo en Belice. Es parte de la cuenca del río Sarstún que nace en Guatemala y se dirige hacia Belice.</p>	<p>La cuenca está conformada por 25% de depósitos sedimentarios clásticos marinos, 45% de rocas carbonatadas del cretácico consolidadas, 25% de aluviones cuaternarios recientes principalmente en la porción baja y en jurisdicción del territorio beliceño, y 5% de rocas sedimentarias del terciario superior. Las calizas y dolomitas cretácicas manifiestan elevado grado de permeabilidad por fracturación y también se presentan extensos fenómenos de circulación kárstica. Los depósitos sedimentarios terciarios constituyen un acuífero multiestrato de productividad baja y de permeabilidad primaria a secundaria. Las lluvias pueden infiltrar de 30-40%. El flujo es en dirección Oeste - Este hacia el Este, dirigiéndose a Belice y al Mar Caribe. Se encuentran</p>	<p>En general los principales usos del agua superficial son para las siguientes actividades: agua para consumo humano, riego, abrevadero, turismo, ecoturismo, industria, actividad forestal y artesanal, y transporte fluvial. En el área existe deficiencia en la cobertura de agua para consumo humano y pecuario. Para el primero se utiliza el sistema de aljibes y de aguadas o pequeñas lagunas almacenadoras de aguas para usos domésticos.</p>	<p>No existe información.</p>

			valores altos de sulfatos, carbonatos y otros compuestos.		
<b>11C</b> Temash	Guatemala-Belice	Se extiende a lo largo del departamento de Petén en Guatemala y del Distrito de Toledo en Belice. Es parte de la cuenca del río Temash que nace en Guatemala y se dirige hacia Belice.	Conformada por depósitos sedimentarios clásticos marinos del cretácico terciario, con predominio de un 90% de rocas sedimentarias muy poco consolidadas, alternándose estratos de areniscas, calizas y dolomitas. El restante 10% está conformado por calizas y dolomitas cretácicas con alta de permeabilidad por fracturación y con extensos fenómenos de circulación kárstica. Acuífero multiestrato de productividad baja y de permeabilidad primaria a secundaria. El flujo de agua subterránea es en dirección Oeste - Este, dirigiéndose a Belice y al Mar Caribe.	Los principales usos del agua superficial son para consumo humano, riego, abrevadero, turismo, ecoturismo e industria. En el área existe deficiencia en la cobertura de agua para consumo humano y pecuario. Para el primero se utiliza el sistema de aljibes y de aguadas o pequeñas lagunas almacenadoras de aguas para usos domésticos.	Debido a la conexión directa entre las aguas subterráneas y las superficiales, el acuífero es vulnerable a la contaminación antropogénica y a las inundaciones provocadas por los fenómenos meteorológicos extremos.
<b>12C</b> Delta río Motagua	Guatemala-Honduras	Se extiende a lo largo del Departamento de Izabal (Guatemala) y los Departamentos de Santa Bárbara y Cortés (Honduras).	Geología variada con presencia de una importante área aluvial que cubre extensas zonas planas y que sirve de sustrato para mantener los sistemas de manglares y los humedales en ambos países. Predominan los aluviones cuaternarios. Pueden observarse depósitos sedimentarios terciarios muy poco consolidados, alternándose con estratos de areniscas, calizas, dolomitas, yeso, y rocas metamórficas.	Los principales usos de las aguas subterráneas son para suplir las demandas de consumo humano y animal, riego, turismo, ecoturismo, forestal, industria, minería y en el sostenimiento de los sistemas de humedales y manglares costeros. En las zonas subtropicales y semi-secas el agua subterránea constituye	No existe información.

			<p>En los valles, la conductividad hidráulica de los pozos es alta y normalmente el acuífero es libre y está en contacto directo con las aguas superficiales. Hay fracturación del subsuelo por la presencia de la falla geológica del Motagua. Los depósitos sedimentarios terciarios constituyen un acuífero multiestrato de productividad baja y de permeabilidad primaria a secundaria. Las calizas y dolomitas cretácicas constituyen un acuífero de muy buena potencialidad y permeabilidad muy variable. El flujo es en dirección Suroeste - Noreste hacia el Noreste, dirigiéndose al Mar Caribe.</p>	<p>un recurso muy valioso durante la época que no hay lluvias.</p>	
<b>13C</b> Chiquimula- Copán Ruinas	Guatemala- Honduras	Se extiende a lo largo del departamento de Chiquimula (Guatemala) y del departamento de Santa Rosa de Copán (Honduras).	<p>Acuífero con porosidad secundaria y permeabilidad primaria y secundaria; es importante para la recarga de acuíferos subyacentes. Las áreas con suelos de calizas y dolomitas cretácicas tienen un elevado grado de permeabilidad por fracturación y por fenómenos de circulación kárstica y acuíferos de buena potencialidad. Las mejores áreas acuíferas la constituyen las zonas aluviales del cuaternario. El flujo en la frontera viene de Honduras y se dirige a</p>	<p>En la época seca los pobladores dependen del agua de los manantiales y de los pozos para abastecimiento humano y para demandas pecuarias domésticas. Es una zona muy pobre, con costumbres ancestrales que interfieren en el desarrollo de las comunidades.</p>	No existe información.

			Guatemala. El acuífero en esta zona se encuentra a poca profundidad en el estrato aluvial atravesado por el río Camotán en los pequeños valles intermontanos.		
<b>14C</b> Esquipulas- Ocotepeque- Citalá	Guatemala -Honduras- El Salvador	Se extiende aproximadamente 600 km <sup>2</sup> en los municipios de Metapán, Citalá, San Ignacio, La Palma, en El Salvador; los municipios de Esquipulas, Olopa, Quetzaltepeque, en Guatemala; y los Municipios de Nueva Ocotepeque, Santa Fe, Concepción, en Honduras.	Los elementos fisiográficos dominantes están representados por la cadena volcánica del Terciario con elevaciones de hasta 2700 msnm. El sistema acuífero es un sistema multicapa, libre a confinado, siendo la condición libre más predominante; es de tipo poroso y fracturado, constituido por depósitos sedimentarios en valles aluviales cuaternarios, de piroclastitas y lavas ácidas del Terciario. En muchas zonas se observa alteración hidrotermal. El acuífero somero tiene una profundidad mediana de 20 m; el acuífero profundo varía de 100 a 150 m. Existe una conexión hidráulica entre ríos y sistema acuífero. La dirección del flujo predominante es del Noroeste a Sureste, en Ocotepeque cambia su dirección. Los acuíferos de la región son de bajo rendimiento.	No existe información.	Hay deficiencias en la gestión local y regional de los acuíferos en esa región fronteriza compartida por los tres países.
<b>15C</b> Ostúa- Metapán	Guatemala -El Salvador	Se ubica en el municipio de Metapán en El Salvador y en los departamentos de	El sistema acuífero se extiende a un área de 800 km <sup>2</sup> y es un acuífero multicapa libre a confinado,	La demanda de agua es para consumo humano, riego, abrevadero, turismo,	El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es mayor por aguas

		Jutiapa, Jalapa y Chiquimula en Guatemala. La zona acuífera compartida por ambos países está poblada por aproximadamente 500.000 habitantes.	siendo la condición libre la más predominante, con una profundidad máxima de 20 m para las capas acuíferas someras y de 100 a 200 m para las profundas. Existe conexión hidráulica entre ríos, lagos y acuíferos. La dirección del flujo es de Noroeste-Sureste. El sistema acuífero es poroso y fracturado, siendo constituido por depósitos sedimentarios en valles aluviales cuaternarios en rellenos de escoria volcánica, que incluyen coladas de lavas basálticas. En algunas zonas como Asunción Mita y Metapán, se observan pequeñas áreas aisladas de rocas calizas así como de rocas metamórficas, en la zona de Concepción Las Minas.	ecoturismo e industria.	servidas domiciliarias e industriales, y por residuos de agroquímicos; en particular en las cercanías de la frontera. Asimismo hay riesgos de sobre-explotación y pérdida de áreas de recarga por aumento de desarrollos urbanísticos y deforestación. Debido al clima seco, se observan fenómenos de desertificación y salinización por aumento de sodio en los suelos.
<b>16C</b> Río Paz	Guatemala –El Salvador	Localizado en los departamentos de Ahuachapán y Santa Ana (El Salvador), y parte de los departamentos de Jutiapa, Jalapa y Santa Rosa (Guatemala). Entre los elementos fisiográficos dominantes están la cadena volcánica de la sierra de Apaneca-Santa Ana, y el volcán El Chingo en la frontera entre El Salvador y Guatemala.	En Ahuachapán existe una fuerte explotación geotérmica que utiliza las aguas del acuífero más profundo, entre 1.000 y 2.000 m. Se encuentran valles aluviales importantes en las áreas de Quesada, parte de Jutiapa, Las Marías, Jalpatagua y Las Pilas del lado de Guatemala y el Valle de Singüil en El Salvador; también existen extensiones importantes de depósitos sedimentarios aluviales en la planicie costera. El resto de la cuenca del río Paz está	Los mayores volúmenes de extracción de agua de los acuíferos están ligados a la actividad de irrigación; seguido por la extracción de agua para consumo humano de los sistemas operados por las municipalidades.	No existe información.

			constituida por tobas volcánicas y sedimentos finos eólicos que pueden ser acuíferos. Existe conexión hidráulica, entre ríos y acuíferos. El flujo a través de la frontera es en la dirección NO-SE del lado de Guatemala y NE-SO del lado de El Salvador.		
<b>17C</b> Estero Real- Río Negro	Honduras- Nicaragua	Al Sureste de Honduras y al Noreste de Nicaragua.	Acuífero libre con variaciones de la profundidad del nivel del agua entre 5 y 60m. Está constituido por rocas volcánicas, depósitos aluviales y fluvio-coluviales, su recarga es por infiltración directa de la precipitación y por aporte del Río Negro. El mayor potencial de extracción de agua subterránea se localiza en la zona de rocas sedimentarias.	Aguas de buena calidad con un potencial muy importante para el desarrollo sustentado del recurso a fin de abastecer a la población, la agricultura y la ganadería. El acuífero es de vital importancia, tanto en Honduras como en Nicaragua, ante la demanda de agua para consumo humano en comunidades rurales que no cuentan con servicio de agua establecido.	No existe información.
<b>18C</b> Sixaola	Costa Rica- Panamá	Localizado en la provincia de Bocas del Toro, en Panamá y en la provincia de Limón, en Costa Rica. El área estudiada del acuífero abarca 89 km <sup>2</sup> en Costa Rica y 500 km <sup>2</sup> en el sector Panameño. La población que residía en el área del acuífero en 2007 era de 26.114 (Costa Rica) y 13.927	Acuífero de tipo libre en un 30% en el sector de Costa Rica. Constituido por material franco arcilloso de baja permeabilidad y un 60% materiales limo arcillosos de alta permeabilidad, asociados a los depósitos aluviales del Río Sixaola. En el sector panameño el acuífero es de tipo libre asociado a los depósitos	Principalmente de tipo agroindustrial y en un menor porcentaje al consumo humano y actividades turísticas.	En general las aguas son de buena calidad, sin embargo en el sector de Costa Rica se ha identificado presencia alta de hierro en las aguas subterráneas lo que limita su uso. Las actividades agrícolas son un factor a considerar en cualquier programa de gestión del

		(Panamá).	aluviales de la formación Las Lajas. En el sector de Costa Rica el nivel de explotación es muy bajo alcanzado menos del 1% del total de la recarga, por su parte en el sector de Panamá la explotación del acuífero se da por medio de pozos con caudales de 3 a 10 litros/segundo hasta 1 m <sup>3</sup> /segundo, generalmente con fines agroindustriales.		acuífero dado que son un factor potencial de contaminación.
<b>1CB</b> Masacre	República Dominicana – Haití	Localizado en la provincia Da-jabón en el lado Dominicano y en el Departamento Nordeste en el lado Haitiano sobre un total de 1447 km <sup>2</sup> (360 km <sup>2</sup> en República Dominicana y 1087 km <sup>2</sup> en Haití).	El acuífero está conformado por rocas sedimentarias y magmáticas, como: aluviones, materiales detríticos, andesitas y riódacitas, calizas, dioritas y tonalitas. En Haití las rocas datan del Cretácico y el Cuaternario. El sistema acuífero es libre o confinado con acuíferos semi-permeables, cautivos, aluviales libres, porosos y carbonatados fracturados muy permeables y kársticos. El espesor varía de 30 a 1000 metros.	En República Dominicana los principales usos del acuífero son el riego y en ganaderías, mientras que en Haití se utilizan en riego, consumos doméstico e industrial, tanto a nivel público como privado, en lo rural y lo urbano.	En Haití se presenta cierta irregularidad en la recarga del acuífero. La reducción de la cobertura vegetal disminuye los niveles de infiltración. Los aportes principales provienen de las lluvias y en menor grado de las inundaciones. En caso de sequías las aguas del acuífero suplen la demanda de agua en esta cuenca. Del año 2003-2008 fue registrado un descenso de 1,84 m en el acuífero y la salinidad cambió de 0,6 gr/lit a 10 gr/litro.
<b>2CB</b> Artibonito	República Dominicana – Haití.	Localizado en el centro Occidente de la República Dominicana y en el valle de Artibonito en Haití sobre un total de 11.115 km <sup>2</sup> (2.665 km <sup>2</sup> en República Dominicana y 8.450 km <sup>2</sup> en Haití).	Posee acuíferos libres y confinados de carácter regional, conformados por sedimentos clásticos consolidados de permeabilidad alta a mediana, encontrándose materiales detríticos, variedad de calizas con alta	En República Dominicana la extracción es de unos 20,51 hm <sup>3</sup> /año utilizados para cubrir la demanda de la agricultura, ganadería y en los abastecimientos	Ambos países consideran que la calidad química del agua es media, por la composición química de iones mayores y la presencia de nitratos de entre 2 y 20 mg/litro. Los problemas de erosión

			concentración de carbonatos y presencia de suelos Karst. También se observan capas finas y lentes arenosos con permeabilidad baja; por otro lado también se encuentran rocas vulcano-sedimentarias.	urbanos. En Haití los principales usos son riego, consumo doméstico, industrial público y urbano en general.	son inminentes por la generación de sedimentos. Los acuíferos someros son importantes y su vulnerabilidad por deforestación y por pérdida de cobertura vegetal es mayor.
<b>3CB</b> Los Lagos	República Dominicana – Haití.	Localizado al Noroeste en el valle de Neyba en el lado Dominicano y en la planicie Cul de Sac en el departamento del Oeste en lado Haitiano. Su extensión total es 2700 km <sup>2</sup> en el lado dominicano, pero se desconoce la extensión del acuífero en el lado haitiano.	Conformado por rocas porosas de alta a baja permeabilidad y de extensión variable. Existen acuíferos libres de sedimentos no consolidados, con agua de buena calidad química y de profundidades al nivel freático menores a los 50 metros. Se localizan algunos acuíferos regionales de sedimentos clásticos consolidados de alta permeabilidad. Otros acuíferos están en capas finas y en lentes de arena de baja permeabilidad. Algunos acuíferos locales se presentan libres en capas calcáreas y con baja permeabilidad. También se observan acuíferos en rocas calcáreas margosas con aguas duras y con espesores de estratos acuíferos de 43-788 m.	En República Dominicana las extracciones son principalmente para el consumo humano y los usos para agricultura y ganadería. La calidad química del agua subterránea generalmente es buena. El flujo de las aguas subterráneas de este acuífero alimentan las aguas de Lago Henriquillo.	Ambos países consideran que la calidad química de las aguas subterráneas es buena, pero la reducción de la cobertura vegetal podría incidir en la reducción de la infiltración. La principal recarga de estos acuíferos viene dada por la lluvia y en forma secundaria por las inundaciones. Entre los años del 2003 al 2008 se observó un descenso de 2,29 m en el nivel freático y también fue observado el incremento de la conductividad eléctrica en los muestreos del agua.
<b>4CB</b> Pedernales	República Dominicana – Haití.	Localizado en la provincia de Pedernales en el lado dominicano y en el departamento del Sudeste en lado haitiano. Su extensión es de 2000 km <sup>2</sup> aproximadamente en	Conformado por rocas porosas en acuíferos libres en sedimentos clásticos no consolidados y la calidad química de esta agua son buenas. También se presentan acuíferos libres y	En la República Dominicana los principales usos de las aguas subterráneas de este acuífero son para el consumo humano y en aplicaciones para	En las áreas de recarga de este acuífero son importantes las recargas de la lluvia, principalmente en los años con déficit hídrico (años con efecto de

		la Sierra de Bahoruco y de 300 km <sup>2</sup> en la Península Sur de Barahona. En la porción dominicana se asientan 21.207 habitantes.	confinados en capas finas y lentes de arena con buena calidad química, a excepción de las zonas costeras y de las lagunas salobres. Se observan acuíferos locales en rocas fracturadas con permeabilidades de medianas a bajas, con aguas de dureza alta. También existen acuíferos en rocas calcáreas margosas de baja permeabilidad y de aguas duras. Hacia la frontera con Haití, el acuífero se localiza en las margas del Oligoceno-Mioceno y las profundidades al nivel freático se localizan alrededor de los 30 m.	riego.	sequías). La calidad química del agua de este sistema acuífero es razonablemente buena. La recarga hídrica de estos acuíferos dependen principalmente de las lluvias y en menor grado de las inundaciones. En la zona de Cabo Rojo Pedernales se observa salinización por intrusión marina.
--	--	---	--	--------	---

Tabla 5.4 Sistemas Acuíferos Transfronterizos de América del Sur

SAT	Países	Ubicación y población	Características hidrogeológicas	Características socioeconómicas	Riesgos
1S Choco– Darién	Colombia- Panamá	Se extiende al noroeste de Colombia en el departamento del Choco y la Provincia de Darién al Sureste de Panamá. La población está dispersa en pequeños asentamientos humanos que se abastecen de agua por diferentes fuentes tanto superficiales como subterráneas.	Los acuíferos principales están constituidos por zonas de fracturas, generalmente con agua de buena calidad y por acuíferos sedimentarios por capas acuíferas de origen marino, la calidad del agua es variable. Hay poca información hidrogeológica, no se conocen con detalles la geometría de los acuíferos, direcciones de flujos, áreas de recarga y descarga, ni las características	La actividad principal es la pesca y la agricultura de subsistencia.	El paisaje es de región selvática, de bosques húmedos y con intervención antropogénica de alto impacto; en este tipo de ecosistemas es estratégico la conservación y protección de las áreas de recarga como entrada en el sistema hídrico para la biodiversidad en ambos países.

			hidráulicas.		
<b>2S</b> Táchira – Pamplonita	Colombia- Venezuela	Localizado en la región fronteriza entre Colombia y Venezuela, en los ejes Cúcuta y Villa del Rosario en el departamento Santander de Colombia con una población de 672.000 habitantes y superficie de 165 km <sup>2</sup> , y el eje Ureña y San Antonio, del estado Táchira en Venezuela con una población estimada en 100.000 habitantes y una superficie de 120 km <sup>2</sup> .	Morfología característica de zonas de montañas, piedemonte y planicie aluvial. Acuíferos someros constituidos por sedimentos aluviales de permeabilidad primaria de tipo libre cuyos espesores varían entre 40 m a 70 m y otro inferior asociados a rocas consolidadas fracturadas de porosidad secundaria generalmente con profundidades hasta de 120 m.	En Colombia el uso principal del agua subterránea es para abastecimiento urbano, mientras que en Venezuela es agrícola e industrial.	El aprovechamiento del recurso es mayor en Colombia, no obstante, hay zonas donde su calidad sobrepasa la mineralización permisible; en Venezuela el rendimiento es menor y la calidad es buena pero a medida que se profundiza aumenta el contenido de sales; en la franja de ambos países hay impactos de contaminación no controlada de tipo orgánico, por residuos urbanos e industriales.
<b>3S</b> La Guajira	Colombia- Venezuela	Ubicado en el extremo noroeste de Colombia y noreste de Venezuela con descarga hacia el Mar Caribe. La población en Colombia es de 123.757 habitantes y superficie de 1.708 km <sup>2</sup> , en Venezuela se estiman 25.000 habitantes y una superficie de 205 km <sup>2</sup> . El paisaje presenta zonas desérticas, de acuerdo a los registros de las estaciones el clima es de tipo árido con precipitaciones menores a 500 mm.	Acuífero caracterizado en tres zonas: una somera con profundidades hasta de 25 m constituidos por sedimentos recientes fluviales, eólicos y de playa; una zona intermedia de sedimentos no consolidados terciarios que llegan hasta 70 m, con rendimientos medios a bajos y con predominancia salobre en la calidad de las aguas; y una tercera zona en donde se estiman acuíferos asociados a grietas y cavidades en areniscas y calizas terciarias y cretácicas con aguas de buena calidad, en estratos inferiores a los 250 m de profundidad. Sin embargo, aún no han	Población fundamentalmente indígena, está diseminada en toda la superficie y cohabitan con cultivos aislado, siendo el aprovechamiento del acuífero principalmente para subsistencia de abastecimiento a las comunidades indígenas y animales de cría.	La zona de recarga está localizada hacia la zona oeste de Colombia y las captaciones de los ríos merman la recarga de los acuíferos someros cercanos a la franja litoral en Venezuela que tiene una red hídrica superficial muy pobre y que ve su impacto en el trayecto hacia la descarga al Mar Caribe con la atenuante del incremento de la salinidad del agua en los acuíferos costeros.

			<p>sido aprovechados porque hay poca información al respecto. Las obras de captaciones de agua subterránea son en su mayoría en Venezuela de tipo artesanal conocida como aljibes que no sobrepasan los 20 m y en Colombia, hay pozos con profundidades hasta 60 m.</p>		
<p><b>4S</b> Grupo Roraima</p>	<p>Brasil-Guyana-Zona en Reclamación (ZR)-Venezuela</p>	<p>Localizado entre Brasil, Venezuela y Guyana, este último país en un área en litigio con Venezuela etiquetada en los mapas como: Zona en Reclamación (ZR) y con la leyenda la cual está sujeta al acuerdo de Ginebra del 17 de febrero de 1966. El territorio es reclamado como parte integrante de la jurisdicción del estado Bolívar, Venezuela. El sistema acuífero se extiende al sureste de Venezuela con una extensión de 400 km<sup>2</sup> y alrededor de 10.000 habitantes de población rural diseminada; en Brasil abarca 70.000 km<sup>2</sup> con una población de 20.000 habitantes.</p>	<p>El acuífero en general está constituido por rocas sedimentarias porosas, aunque por procesos tectónicos han cementado las oquedades y disminuido su capacidad, comportándose como un acuífero intergranular-fracturado. La ocurrencia de los acuíferos principalmente es en rocas fisuradas constituidas por areniscas conglomeradas, rocas clásticas bien cementadas, poco o no metamorfizadas generalmente de permeabilidad variable de media a baja. La zona de recarga comprende la cuenca alta, en Venezuela la figura de Parque Nacional beneficia su protección como entrada al sistema hídrico y es el nacimiento de los ríos que drenan hasta el</p>	<p>El aprovechamiento se reduce a pequeñas demandas de volúmenes para abastecimiento humano y agricultura de subsistencia, dada la escasa población y los abundantes recursos hídricos superficiales.</p>	<p>La calidad de las aguas en general es buena con cierto contenido de hierro, aunque la actividad de minería ha causado daños ambientales.</p>

			contacto de las zonas permeables e impermeables, que forman diversas caídas de agua o cascadas.		
<b>5S</b> Boa Vista- Serra do Tucano - North Savanna	Guyana- Zona en Reclamación (ZR)- Venezuela- Brasil	Localizado en el estado de Roraima en la frontera con Guyana, cuenca del río Branco con extensión aproximada de 24.000 km <sup>2</sup> , 14.000 km <sup>2</sup> en Brasil y 10.000 km <sup>2</sup> en Guyana. La población en Brasil es alrededor de 300.000 habitantes, se desconoce en el lado de Guyana y ZR. El relieve es extremadamente plano a levemente ondulado y localmente hay presencia de colinas.	El acuífero se caracteriza por depósitos aluviales del cuaternario y por sedimentos de areniscas, arcillas, limos y arenas. Subyacente la formación geológica está constituida por areniscas, silitos y arcillitas así como derrames de basaltos y andesitas. En Boa Vista el espesor medio es de unos 40 metros. 102 pozos en Boa Vista bombean más de 60.000 m <sup>3</sup> /día. La producción de los pozos está en el orden de 4 a 80 m <sup>3</sup> /h y el rango de profundidades de 20,4 a 57,8 m. La zona de recarga prácticamente corresponde a toda su extensión. El sistema de acuífero es predominantemente libre y semi-confinado. En Brasil casi el 90 % se abastece del agua subterránea. En el área urbana de la capital Boa Vista, las aguas del sistema acuífero de Boa Vista son predominantemente cloruradas sódicas.	No existe información.	Acuífero vulnerable expuesto a la expansión agrícola hacia la frontera en Brasil. Igualmente se considera en general el agua de buena calidad, pero con alta susceptibilidad a la contaminación, debido a la ausencia e inadecuada redes de acueductos y protección en los pozos.
<b>6S/7S/8S</b> ZanderijCoe	Guyana- Surinam	Sistema de acuíferos ubicados entre los países	El sistema acuífero es parte del Mesozoico-	El uso principal es de abastecimiento público	Algunos de los acuíferos han sido explotados

<p>sewijneA-Sand-B Sand</p>		<p>de Guyana y Surinam. Los tres acuíferos se sitúan predominantemente en la faja costera de los dos países. El paisaje se caracteriza por tener colinas redondeadas y una franja costera angosta y plana con pantanos. El clima es de tipo tropical con media de 2.000 mm/año de lluvias.</p>	<p>Terciario que rellena la cuenca costera de Guyana, los sedimentos que componen el acuífero varían en edad, desde Oligoceno, Mioceno al Plioceno. La hidrogeología de los tres acuíferos es bien conocida. El acuífero Arena Superior es el más superficial de los tres acuíferos, en Guyana no se utiliza para agua potable. El A Sand abastece a Paramaribo desde hace más de 50 años y es ampliamente utilizado para abastecer la demanda de agua. El acuífero Coesewijne es parte de la formación constituida por la alternancia de niveles de arena y arcillas, localizados entre los acuíferos A Sand y B Sand y es utilizado para cubrir la demanda en Surinam. El B Sand es el más profundo de los tres acuíferos y es el más utilizado en Guyana, no en Surinam por su gran profundidad.</p>	<p>y doméstico, constituye la principal fuente de agua potable. Las aguas subterráneas son usadas fundamentalmente para consumo humano, los costos de extracción son relativamente altos porque requieren tratamiento para extraer el hierro. En áreas urbanas alrededor del 95 % tiene acceso al agua potable y en las áreas rurales cerca del 70 %.</p>	<p>intensamente durante mucho tiempo, originando descensos alarmantes en los niveles y serias intrusiones salinas por el mar. Esto ha obligado a solicitar financiamientos internacionales a fin de prospectar nuevas zonas para asegurar la provisión de aguas. Las aguas subterráneas tanto en Guyana como en Surinam, representan el único recurso adecuado para abastecer la población concentrada en la región costera.</p>
<p><b>9S</b> Costeiro</p>	<p>Brasil-Guyana Francesa</p>	<p>Ubicado en el extremo norte de Brasil, estado de Amapá, frontera con Guayana Francesa con una extensión de 27.000 km<sup>2</sup>. La población en Brasil es de 54.000</p>	<p>Acuífero libre en toda su extensión, constituido por sedimentos aluviales semi-consolidados a no consolidados. La formación de barreras está constituida por una</p>	<p>En la región hidrográfica amazónica, el agua subterránea es utilizada casi exclusivamente para el abastecimiento</p>	<p>La calidad es buena pero altamente susceptible a la contaminación. Tanto los acuíferos costeros como en la región Amazónica son muy vulnerables a la contaminación</p>

		habitantes, el acuífero abastece algunos municipios de la región norte. El relieve es extremadamente plano a levemente ondulado, localmente hay presencia de colinas.	amplia variedad de litologías de sedimentos de arcilla, silíceos, suelos arenosos a conglomerados. Su origen está relacionado con el sistema de abanicos aluviales y planicies fluviales y lacustres. En Amapá, esta formación está restringida a la parte oriental del estado, distribuida dentro de fallas.	humano.	bacteriológica, porque quedan expuestos a las descargas de aguas servidas sin tratamientos previos, por efectos de pozos mal construidos, con ausencia o inadecuada protección sanitaria
<b>10S</b> Tulcán – Ipiiales	Colombia- Ecuador	Localizado al sur de Colombia en el departamento de Nariños sobre las poblaciones Ipiiales, Carlosama, Cumbal y Potosí, y al norte de Ecuador en la provincia de Carchi, en el Cantón Tulcán. El área en la parte de Colombia es de 1.560km <sup>2</sup> . Las poblaciones de ambos países son del orden de 150.000 habitantes y presenta déficits del recurso agua tanto para consumo humano como para riego.	Afloran rocas vulcano-clásticas constituidas por lavas, cenizas, tobas y pumitas, intercaladas con flujo de lodos originados por las glaciaciones del pleistoceno y la actividad volcánica del levantamiento de la cordillera de los Andes. Los sedimentos de origen volcánico constituyen sistemas de acuíferos de porosidad primaria o intergranular, con permeabilidades medias a baja generalmente con acuíferos de bajos rendimientos. Hay evidencias de dos niveles de acuíferos, uno somero con profundidades hasta 30 m y otro profundo que sobrepasan los 60 m. Se atribuye a la recarga sobre 3.000 msnm en la zona de Páramo. No obstante, el acuífero es	Su aprovechamiento es bajo y se hace a través de pozos excavados, su uso está restringido casi en su totalidad al consumo humano. Las aguas subterráneas son de buena calidad, con la excepción de manantiales termo-minerales que tienen alta concentración de sales disueltas. Las aguas superficiales son las más utilizadas, el acuífero fundamentalmente se tiene de reserva.	No existe información.

			poco conocido.		
<b>11S</b> Zarumilla	Ecuador- Perú	Se extiende sobre la base de la cuenca superficial del río Zarumilla, que involucra los países de Perú y Ecuador con una superficie de 374 km <sup>2</sup> y una población 26,754 habitantes en Perú y un área de 544 km <sup>2</sup> en Ecuador. El paisaje característico es de bosques secos tipo sabana, de lomada y de montaña.	En Perú existen dos tipos de acuíferos, uno libre superficial conformado por depósitos aluviales cuaternarios y otro semi-confinado a mayor profundidad constituidos por depósitos terciarios de origen marino. La profundidad de los niveles freáticos varía entre 0.30 m y 21.32 m. En el lado de Ecuador se encuentran estratos de rocas metamórficas, y el cuaternario indiferenciado recubre casi toda la unidad. Se define un acuífero del cauce aluvial (Q1), acuíferos de depósitos aluviales (Q2), y un complejo acuífero de los depósitos del Neógenos (Ng). La profundidad de los niveles freáticos es variable, fluctúa entre muy someros y en algunos casos superan 20 m.El Neógeno es considerado acuífero confinado. La zona de recarga ocurre en las partes altas de la cuenca en territorio ecuatoriano y en forma secundaria en ambas márgenes y lecho del río Zarumilla.	El uso principal del acuífero es para riego y consumo humano, sin embargo en todo el acuífero se puede considerar su calidad de aceptable a mala. Siendo las mejores aguas las que se encuentran en el acuífero Neógeno y las que registran mala calidad en acuíferos del cuaternario. En Perú el acuífero es poco explotado dada su complejidad y en Ecuador son aprovechados los pozos profundos por estar menos expuestos a la contaminación y principalmente se utilizan para consumo humano.	No existe información.
<b>12S</b> Puyango- Tumbes-	Ecuador- Perú	En Perú es de aproximadamente 1,895 km <sup>2</sup> (Tumbes) y en Chira	Acuíferos constituidos por zonas de fracturas con agua de buena calidad.	El aprovechamiento del acuífero en Tumbes está	No existe información.

<p>Catamayo-Chira</p>		<p>tiene una longitud de 170 km. La población aproximada de Tumbes es de 115,406 habitantes y de 525,611 habitantes en Chira. La población está dispersa en pequeños asentamientos humanos que se abastecen de agua por diferentes fuentes tanto superficiales, como subterráneas. En zonas deficitarias en agua superficial, la explotación del agua subterránea sería una alternativa viable para el abastecimiento de agua, sobre todo para proyectos de agua potable.</p>	<p>Los acuíferos importantes son los rellenos cuaternarios que se encuentran ubicados en las cercanías del sistema hidrográfico de la cuenca Catamayo – Chira. Los acuíferos más importantes por su extensión y espesor se encuentran ubicados en esos valles cuaternarios. En estos acuíferos existe una napa predominante libre con niveles de agua muy superficiales poco profunda. La característica del acuífero en Perú Tumbes, es de tipo libre y otro semi-confinado en depósitos terciarios de origen marino a mayor profundidad; los niveles freáticos fluctúan entre 4 m y 18.8 m. En Chira el acuífero corresponde a depósitos cuaternarios sueltos con acuíferos terciarios más profundos, los niveles de agua en el acuífero superficial oscilan entre 5 m y 9 m. La recarga principal es en la parte alta de la cuenca en territorio ecuatoriano y en forma secundaria en territorio peruano, sin embargo las sequías han tenido impacto negativo sobre la recarga del acuífero y solo hay</p>	<p>destinado en su mayoría para el uso doméstico, su calidad varía de buena a mala y cuando se produce el fenómeno de El Niño se intensifica su aprovechamiento, porque se destruyen alcantarillas y sistemas de desagües de la ciudad. El acuífero de Chira mayormente es para riego, la calidad está en el rango de valores altos de mineralización.</p>	
-----------------------	--	---	---	--	--

			aportes significativos cuando ocurre el fenómeno de El Niño.		
<b>13S</b> Amazonas	Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela	El sistema de acuíferos comprende los países de Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela, los cuales consideraron la existencia de un gran acuífero regional denominado Amazonas, teniendo en cuenta criterios geológicos, hidrogeológicos, topográficos, geomorfológicos y climáticos. El acuífero tendría una extensión total de 3,950.000 km <sup>2</sup> y una población estimada en más de 14.000.000 hab. El SAT Amazonas coincide en su gran mayoría con la gran planicie amazónica en la parte central y en la parte oriental con la provincia del Orinoco y presenta un ecosistema particular. A pesar de la abundancia de agua superficial, las aguas subterráneas son muy utilizadas por los seis países y aprovechadas por muchas comunidades ribereñas.	El conocimiento de las características hidrogeológicas de la zona sub-andina oriental del <b>Ecuador</b> es muy limitada, La Cuenca Oriental Amazónica, cubre aproximadamente 100.000 Km <sup>2</sup> . Regionalmente se puede establecer que los aluviales de los principales ríos, conforman acuíferos de baja permeabilidad ya que la litología predominante la conforma sedimentos de granulometría fina como limos y arcillas En <b>Brasil</b> en las cuencas superficiales se ubican diversos acuíferos constituidos de sedimentos no consolidados y consolidados, se identifican espesores hasta de 2,200 m, como acuífero libre encontrándose también en condiciones confinadas y de gran espesor. Los acuíferos con mejores rendimientos, están constituidos por unidades litológicas poco o no consolidadas con	En el <b>Ecuador</b> , las aguas subterráneas tienen un uso limitado y es exclusivamente para abastecimiento de las poblaciones que se encuentran dispersas. En <b>Brasil</b> el agua subterránea es utilizada casi exclusivamente para abastecimiento humano, la calidad es buena y altamente susceptible a la contaminación. El acuífero Alter del Chaco, suministra a las ciudades de Manaus y Santarem. El acuífero de Solimões abastece a la ciudad de Río Branco y el Içá suministra totalmente a la ciudad de Caracarái al sur del estado de Roraima. El uso de las aguas subterráneas en <b>Venezuela</b> en un alto porcentaje es para riego y el resto es para uso doméstico, la calidad de las aguas en términos generales es buena y prácticamente son	No existe información.

			<p>profundidades promedio de 200 m. La captura se realiza tanto por pozos tubulares (con profundidades de 60 a 250 metros), como por sistema de <i>pontearias</i> en pozos de Amazonas. Los flujos son muy variados, con valores de 10 a 440 m<sup>3</sup>/h.</p> <p>La recarga proviene de las porciones más altas al oeste piedemonte andino y cordillera y a través de infiltración de la precipitación directa y de los ríos Solimoes, Jurúa, Negro y Amazonas.</p> <p>En <b>Venezuela</b> el acuífero está integrado por la Provincia del Orinoco, con acuíferos con buen potencial y buenas características hidrogeológicas, así como buena calidad en las aguas. Generalmente contienen porosidad intergranular, predominando gravas e intercalaciones de arenas y arcillas con profundidades promedio hasta 200 m. La permeabilidad es variable de alta a baja y frecuentemente de tipo libre. La recarga proviene del piedemonte andino venezolano y de la cordillera centro oriental, otra vía es por la</p>	<p>aptas para la agricultura de la región.</p> <p>Los principales usos de las aguas subterráneas en <b>Bolivia</b> son: doméstico, industrial y público-urbano.</p> <p>El agua subterránea en <b>Perú</b> es para uso doméstico, industria, pecuario y agrícola, la calidad se califican de buena a permisible, aptas para el riego y en cuanto a su potabilidad son pasables a buenas.</p> <p>El uso de agua subterránea en <b>Colombia</b> es casi exclusivo para uso doméstico, la calidad de sus aguas son ligeramente duras pero prácticamente buena para todo uso.</p>	
--	--	--	--	--	--

			<p>infiltración directa de la precipitación y de los ríos que drenan los llanos. En <b>Bolivia</b>, la litología sedimentaria está constituida por aglomerados, gravas y arenas con porosidad primaria, cuyo rango de espesor es de 20 a 200 m. En <b>Perú</b>, está conformado por sedimentos aluviales de edad cuaternaria constituidos por gravas, arenas, limos, lodolitas y arcillas, formando horizontes de espesores variables, que se presentan en forma alternada; así como depósitos del terciario conformados por rocas sedimentarias compactas. En la zona de Iquitos se han registrados, niveles superficiales entre 0.36 m y 9.13 m. la recarga proviene de la parte alta de la cuenca y por los aportes de los ríos Ucayali y de la Laguna Yarinacocha, la recarga del acuífero superficial proviene de las infiltraciones de las lluvias torrenciales que ocurren en la selva peruana. En <b>Colombia</b>, la cuenca está cubierta por depósitos del cuaternario fluvio-lacustres que suprayacen</p>		
--	--	--	--	--	--

			<p>rocas sedimentarias detríticas. En el piedemonte llanero se identifican acuíferos libres a confinados, cuyos espesores varían de 40 m a 120 m. los niveles estáticos entre 0.5 m y 10 m y producción promedio de los pozos en 15 l/s. En algunos municipios se tienen profundidades de 80 m y caudales de 5 a 10 l/s para abastecimiento doméstico. La recarga regional se realiza en el piedemonte de Cordillera Oriental (Andes Colombianos) y recarga adicional de manera directa en sedimentos recientes principalmente en la Orinoquia colombiana.</p>		
<p><b>14S</b> Titicaca</p>	<p>Bolivia-Perú</p>	<p>Localizado entre la república de Bolivia y Perú. Corresponde a un clima frío de alta montaña (4.000 m.s.n.m.), con altos topográficos y depresiones endorreicas. En Bolivia abarca una superficie de 19,172 km<sup>2</sup> con una población algo menor a 2.000.000 de habitantes, el paisaje es semi-árido de vegetación arbustiva escasa. En Perú hay alrededor de 500.000 habitantes y está conformado por el altiplano, laderas, áreas</p>	<p>La geología del sistema acuífero está representada por depósitos cuaternarios, se observa la presencia de areniscas, cuarcitas y lutitas correspondientes al Devónico; el Carbonífero está constituido por areniscas y limolitas; en Bolivia el espesor del acuífero es de 20 a 100 m., la recarga se produce en el piedemonte de la Cordillera Oriental. En Perú se menciona afloramientos geológicos como Anzagaro cuyos</p>	<p>Usos domésticos, riego, industrial y público urbano, su calidad es buena. Existen registros de descensos de niveles de agua y exposición de contaminación de desechos sólidos y líquidos. El aprovechamiento en ambas regiones es principalmente para uso doméstico. En Ramis la calidad del agua para riego varía de buena a permisible, y en Coata las aguas</p>	<p>Hay evidencias de ligeros descensos de los niveles del agua.</p>

		intermedias y la cordillera.	depósitos pueden almacenar aguas en sus estratos. Los pozos perforados llegan hasta 50 m y los excavados entre 0.3 m y 23 m. La recarga está determinada por el área de influencia de ríos, pequeñas quebradas, zonas de cultivos y canales de riego sin revestir.	con fines de riego pueden utilizarse en la agricultura bajo ciertas condiciones.	
<b>15S</b> Pantanal	Brasil- Bolivia- Paraguay	Está localizado en la cuenca hidrográfica del río Paraguay, con una superficie de 141,500 km <sup>2</sup> correspondientes 102.000 km <sup>2</sup> en Brasil, 21,500 km <sup>2</sup> en Bolivia y 18.000 km <sup>2</sup> en Paraguay. La población estimada del sistema acuífero es de aproximadamente 400.000 habitantes en Brasil, y menos de 10.000 habitantes en Bolivia.	En <b>Brasil</b> el acuífero está emplazado en una planicie inundable de formación reciente cuya altitud media es de 110 m., se caracteriza por ser libre, conformado por un sistema multicapa, freático constituido por sedimentos terciocuaternarios no consolidados y semi-consolidados, predominantemente arenosos. El flujo preferencial general es hacia el alto río Paraguay, en el lado suroeste brasilero, y sureste desde el lado boliviano y paraguayo. La profundidad máxima de la cuenca alcanza hasta 800 m cerca del río Paraguay. En <b>Bolivia</b> , la mayoría de los acuíferos son de tipo libre a semiconfinado, la litología se caracteriza por ser sedimentaria constituidos por	En Brasil, el aprovechamiento es fundamentalmente para poblaciones en el medio rural por medio de pozos someros y la calidad del agua es rica en hierro y con contenido de materia orgánica en descomposición. En Bolivia, Los usos principalmente son domésticos y ambientales y la calidad en general es buena y localmente salina y contaminada por metales.	No existe información.

			<p>aglomerados, gravas y arenas, en parte limosos y arcillos, cuya porosidad es primaria. El espesor varía de 20 a 200 m. En <b>Paraguay</b>, el área está sobre zonas bajas de la planicie inundación del río Paraguay y el acuífero es de tipo libre y la litología corresponde a un acuífero sedimentario, integrado por conglomerados y areniscas, en partes limoso y arcilloso. La dirección general del flujo se atribuye de oeste a este, descargando el acuífero hacia el río Paraguay. El espesor del acuífero es variable. En los tres países el acuífero es poco explotado pero con gran importancia para la conservación del ecosistema Pantanal y tiene la recarga en la planicie de inundación, existen además áreas de recarga regional en el borde sur-occidental del sistema Acuífero Guaraní.</p>		
<p><b>16S</b> Agua Dulce</p>	<p>Paraguay -Bolivia</p>	<p>Se localiza en la porción norte del Gran Chaco Paraguayo y en el extremo sureste de Bolivia (35,271 km<sup>2</sup>). En Paraguay tiene una superficie aproximada de 30.000 km<sup>2</sup>. La población en el sector de Bolivia se estimó 20.000 habitantes</p>	<p>En Paraguay, los acuíferos de agua dulce del Cretácico son de naturaleza granular compuesto de areniscas rojas masivas mal seleccionadas, también hay acuíferos de areniscas friable, fina a media confinado por capa</p>	<p>En Paraguay el agua del acuífero se utiliza para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes asentados sobre el acuífero (consumo, higiene, riego de huertas), y ganadería. En Bolivia, para</p>	<p>Se verían afectados los indígenas que habitan en el área, la flora y la fauna silvestre en Paraguay. En Bolivia, los ecosistemas presentes en la zona pueden verse afectados por cualquier cambio en el régimen del SAT.</p>

		para el año 2001.	de arcilla plástica, a veces semi-consolidada del Terciario. En Bolivia, la litología se caracteriza por ser sedimentaria, aglomerados, grava y arenas con porosidad primaria (libres y confinados). En Bolivia la zona de recarga se encuentra en la Serranía de la Chiquitanía y los humedales de Otuquis o Tucavaca.	consumo doméstico, agricultura, ganadería como segunda fuente luego del agua superficial.	
<b>17S</b> Ollagüe- Pastos Grandes	Bolivia- Chile	Se localiza en la región fronteriza entre Bolivia y Chile, en la cordillera occidental, al sudeste de Bolivia, Departamento de Potosí, limitando por el oeste con Chile. El área total de acuífero es de 1,956 km <sup>2</sup> , correspondiendo 550 km <sup>2</sup> a la porción Chilena con unos 300 habitantes (100% indígenas) y 1,407 km <sup>2</sup> al lado boliviano con menos de 1.000 habitantes (70% indígenas).	Los acuíferos son libres a confinados y se presentan en rocas fracturadas de edad terciaria, y en sedimentos cuaternarios (permeabilidad primaria y secundaria). En la región se presentan rocas volcánicas, dacitas, andesitas e ignimbritas. También hay depósitos de morrenas conformado por bloques, gravas y cantos. El acuífero central está compuesto por una cubeta mayoritariamente sedimentaria de porosidad primaria y corresponde al área del salar. En Bolivia la zona de recarga está ubicada en los estrato volcanes cubiertos de nieve la mayor parte del año y el proceso es lento. En Chile, el área de recarga corresponde a la cuenca en su totalidad.	Los principales usos son el doméstico y ganadero. El uso es prácticamente nulo en Bolivia, en tanto que en el lado chileno, la economía local es de pequeña escala y no depende de las condiciones del acuífero, pero para minería sí es relevante.	No existe información.

<p><b>18S</b> Concordia/ Escritos - Caplina</p>	<p>Perú- Chile</p>	<p>Ubicado en el extremo costero sur del Perú y Quebrada Concordia en Chile. El área del SAT en Perú es de 916 km<sup>2</sup> y la población aproximada de 294,214 habitantes, mientras que el área en Chile es de 320 km<sup>2</sup> con 189,644 habitantes.</p>	<p>En Perú el acuífero está constituido por depósitos aluviales de edad cuaternaria; es libre de permeabilidad buena a media. La profundidad de los niveles varía entre 2 y 92 m llegando hasta 112 m y el espesor varía de 112 a 458 m, hasta 578 m. La recarga natural se da en la parte alta de la cuenca (zona húmeda) y quebradas ubicadas en ambas márgenes a lo largo del cauce y áreas de cultivo (La Yarada). El acuífero en Chile identifica sedimentos recientes de origen eólico en la Formación Oxaya, formados por granos de cuarzo sub redondeados. Perforaciones de hasta 432 m no encontraron roca basal; aunque en la zona baja del Valle del río Lluta se alcanzó la roca basal a los 381 m.</p>	<p>Los principales usos en Perú se distribuyen en riego (94%), doméstico (4.3%) e industria, público urbano (menos de 2.0%) y agro exportación.</p>	<p>Una explotación excesiva provocaría la contaminación de las aguas, el deterioro de las tierras cerca al litoral y el incremento de la salinidad del agua. En Chile: áreas desprovistas de vegetación, praderas y matorrales. No se observa uso industrial.</p>
<p><b>19S</b> Aquidauana -Aquidabán</p>	<p>Paraguay -Brasil</p>	<p>Ubicado en la cuenca hidrológica del Paraná con una extensión aproximada de 27.000 km<sup>2</sup>, de los cuales 14,600 km<sup>2</sup> en Brasil (140.000 habitantes-9.000 indígenas) y 12,300 km<sup>2</sup> en Paraguay (81,948 habitantes de los cuales, 13,564 indígenas).</p>	<p>La sedimentación ocurre en el Carbonífero Superior y el Pérmico Superior. Es una secuencia sedimentaria con intensa variación facieológica y arenosa. El ambiente de sedimentación es fluvio-lacustre, con sedimentos glaciares. En Paraguay se presentan areniscas y arcillitas. Tiene un</p>	<p>El principal uso en Brasil es para abastecimiento humano, en Matto Grosso está bastante explotado y ocurre hidrotermalismo. El uso en Paraguay es para satisfacer el servicio de agua potable para comunidades rurales como el Distrito de</p>	<p>Se corre el riesgo de afectar especialmente las comunidades indígenas, los humedales, la flora, la fauna silvestre. Brasil no tiene datos sistematizados indicando valores de estas pérdidas pero los riesgos afectarían agricultores, ganaderos, indios, poblaciones urbanas, etc.</p>

			espesor de 400 m con permeabilidad muy baja y drenaje malo a regular en las areniscas finas.	Bella Vista Norte, mientras que el 10% restante se distribuye en pequeñas industrias, comercio y riego de pequeños cultivos.	
<b>20S</b> Caiuá- Bauru- Acaray	Paraguay -Brasil	Ubicado en la cuenca hidrográfica del Río Paraná, ocupando un área de aproximadamente 300.000 km <sup>2</sup> en la zona noroeste del Paraguay principalmente al norte del Departamento de Canindeyu en la frontera Brasil. En Brasil, tiene una extensión aproximada de 280.000 km <sup>2</sup> con una población 13 millones de habitantes. En Paraguay, su extensión es de aproximadamente 18,454km <sup>2</sup> con una población de 36,384 (57% indígena).	El acuífero es poroso, de tipo libre, constituido por rocas de los grupos Bauru y Caiuá. La primera es desértica y la segunda es semiárida con mayor presencia de agua. Las litologías están representadas por areniscas finas, y areniscas groseras inmaduras, con abundantes nódulos y cemento calcáreo. El espesor es variable con valor medio de 200 m y máximo de hasta 300 m. La zona de recarga la compone toda el área del acuífero aflorante.	En Brasil, el principal uso es abastecimiento doméstico e industrial. En Paraguay, el 50% es riego, el 10% es doméstico y un 40% es agroindustria.	Se verían afectados, especialmente, las comunidades indígenas, los humedales, la flora, la fauna silvestre.
<b>21S</b> Guaraní	Argentina -Brasil- Paraguay -Uruguay	El sistema acuífero Guaraní (SAG) subyace en los territorios de Argentina (228,225 km <sup>2</sup> ), Brasil (735,918 km <sup>2</sup> ), Paraguay (87,536 km <sup>2</sup> ), y Uruguay (36,170 km <sup>2</sup> ). Las áreas de afloramiento del SAG suman 124,650 km <sup>2</sup> , de las cuales cerca 80.000 km <sup>2</sup> (64%) representan áreas de recarga. La población ha sido estimada en aproximadamente 90	El SAG ha sido definido como un conjunto de rocas sedimentarias mesozoicas, asociado al conjunto de rocas formadas por sedimentos originados de la acumulación mecánica de partículas detríticas.	El uso principal del agua es el abastecimiento público ya sea en caudal explotado o por número de pozos. Sus aguas son en general potables con baja mineralización.	En la zona no confinada y en áreas urbanas se presenta contaminación antrópica en determinados pozos, en otras hay un leve aumento de la salinidad, en otras más existen descensos importantes de los niveles de agua por explotación intensiva (Riberão Preto). En caso de contaminación importante y regional del SAG, se verían afectados negativamente las

		millones, la mayor parte de la población sobre el SAG es brasileña, cerca del 90% del total. En Paraguay más de la mitad de la población vive sobre el SAG. Con relación a Argentina y Uruguay, el porcentaje poblacional en relación a la población total de los respectivos países está cerca del 21%.			comunidades indígenas, los humedales, la flora, la fauna silvestre en Paraguay y turismo termal y abastecimiento público urbano en Uruguay.
<b>22S</b> Serra Geral	Argentina -Brasil- Paraguay -Uruguay	Abarca todo el planalto paranaense y se extiende por los territorios de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay sobre un total de 516.355km <sup>2</sup> (Argentina: 35.000 km <sup>2</sup> , Brasil: 411,855 km <sup>2</sup> Paraguay: 29,500 km <sup>2</sup> y Uruguay: 40.000 km <sup>2</sup> ).La población en Argentina es de más de 500.000, en Brasil de 31 millones, en Paraguay de 797,547, y en Uruguay de 300.000.	El acuífero es de tipo fracturado con porciones libre a semi-confinado y está constituido por derrames de lavas basálticas que son rocas ígneas de grano fino y composición máfica. Es comparativamente rico en compuestos ferro magnesianos y relativamente pobre (menos de un 50%) en sílice.	El recurso se utiliza para abastecimiento humano e industrial en Argentina; en Brasil el recurso es intensamente explotado (Triangulo Mineiro) para abastecimiento público (ciudades, agricultores y empresas de porte-medio); y en Paraguay es doméstico. En Uruguay, es para riego, doméstico, industrial y público urbano.	La ocupación desordenada del territorio podría afectar especialmente las comunidades indígenas (Ava-Guarani, Mby'a-Guarani y Aché), los humedales, la flora, la fauna silvestre en Paraguay e igualmente por agricultura extensiva y sobre explotación del recurso en las zonas urbanas de las principales ciudades y del lado de Uruguay la producción agrícola ganadera (ej., contaminación por nitratos).
<b>23S</b> Litoraneo- Chuy	Brasil- Uruguay	Está localizado en la región litoral del Atlántico sur abarcando el extremo sur de Brasil y nordeste del Uruguay con un área de alrededor de 43.000 km <sup>2</sup> (33.000 km <sup>2</sup> en Brasil, y 10.000 km <sup>2</sup> en Uruguay).La población en la porción uruguaya es de 60.000 mientras que en Brasil es de 2.35 millones	El acuífero es de tipo libre, poroso, no consolidado, de permeabilidad primaria compuesto por arenas finas y gruesas y variable contenido de cemento arcilloso. La recarga natural en Uruguay tiene lugar a través de la infiltración directa de las aguas meteóricas y desde	No existe información.	No existe información.

		(aunque se usan más las aguas superficiales).	los flancos de las sierras que bordean el valle localizadas al oeste y a lo largo del contacto con el cauce de la red de aguas superficiales. En Brasil se produce en la región externa del cordón litoral al sudeste y nordeste en la formación con menor salinidad.		
<b>24S</b> Permo-carbonífero	Brasil-Uruguay	Está localizado en la cuenca hidrográfica del Río Uruguay con un área de 41.000 km <sup>2</sup> (Uruguay, 20.000 km <sup>2</sup> y Brasil, 21.000 km <sup>2</sup> ). La población total está estimada en cerca de 1.1 millones de habitantes. La recarga es de forma directa, de aguas meteóricas sobre las áreas aflorantes y en contacto con los cauces de la red hidrográfica superficial.	El acuífero en Brasil es de tipo poroso, inter granular no consolidado con porosidad primaria intersticial y baja productividad. En Uruguay es libre a confinado en sedimentos consolidados constituidos por areniscas finas a medias, conteniendo niveles de arenisca gruesa, gravilla y niveles conglomerados con cemento arcilloso.	El uso en Brasil es doméstico/urbano con baja productividad y utilización. En Uruguay el principal uso es doméstico/urbano para pequeñas poblaciones.	Una degradación potencial del SAT afectaría negativamente los pequeños núcleos rurales y la población dependiente de pozos de las ciudades de Bagé y Gravataí en Brasil, y a pequeñas poblaciones que son abastecidas en Uruguay.
<b>25S</b> Litoral Cretácico	Argentina-Uruguay	Se ubica en ambos márgenes del Río Uruguay. Su extensión es total aproximada de 49.017 km <sup>2</sup> (Argentina: 26.017 km <sup>2</sup> , Uruguay: 23.000 km <sup>2</sup> ) con una población 760.000 (Argentina: 500.000, Uruguay: 260.000) habitantes.	El área de recarga se localiza fundamentalmente en el lado uruguayo. La dirección de flujo se desplaza de este a oeste.	En Argentina el recurso se utiliza para abastecimiento humano, ganadería y riego mientras que en Uruguay es para riego, doméstico, industrial y público-urbano	Una degradación del SAT afectaría negativamente la agricultura cercana a zonas urbanas.
<b>26S</b> Salto-Salto Chico	Argentina-Uruguay	Está ubicado al noreste y centro de las provincias Entre Ríos y Corrientes en Argentina, y al oeste de los departamentos de	Las litologías corresponden a areniscas medidas hasta gruesas de origen fluvial y edad terciaria exhibiendo	En Argentina se utiliza preferentemente para el riego de arroz mientras que en Uruguay los usos son	En caso de riesgo Contaminación, por ejemplo por el uso de agrotóxicos o antrópica, se vería afectada la

		Salto y Artigas en Uruguay. Tiene una superficie aproximada de 31,200 km <sup>2</sup> (Argentina: 21.000 km <sup>2</sup> , Uruguay: 10.200 km <sup>2</sup> ) con una población para Argentina de 500.000, y Uruguay de 260.000.	cementación por silicificación posterior. Es de alto rendimiento, libre, semi-confinado a confinado. En Uruguay, las áreas de recarga se ubican en afloramientos y a través de afluentes del río Uruguay y otros cursos menores; en Argentina no están completamente identificadas.	para riego, consumo doméstico e industrial.	producción hortícola en Uruguay.
<b>27S</b> Puneños	Argentina -Bolivia	Está ubicado en la región de la Puna en Argentina y en el Altiplano Sud Boliviano. La extensión se estima en unos 16.000 km <sup>2</sup> en Argentina y 1,600 km <sup>2</sup> en Bolivia. Las poblaciones de Argentina y de Bolivia en el área del SAT son de menos de 1.000 habitantes.	Es de tipo libre a semi-confinado, se aloja en materiales aluviales cuaternarios formados por abanicos aluviales de granulometría gruesa a muy fina, rellenando fosas tectónicas y se caracteriza por ser ignimbritas fracturadas con porosidad secundaria y permeabilidad baja a media. Las zonas de recarga se encuentran en las elevaciones y sus flancos. En Bolivia las zonas de recarga del acuífero están representadas por los estratos volcánicos cubiertos de nieve gran parte del año por lo que los valores son bajos.	La zona está ocupada por poblaciones aisladas que utilizan el recurso para su subsistencia y crianza de ganado ovino y auquénidos así como para la agricultura.	El ganado camélido puede verse afectado en el caso de descenso de los niveles de los acuíferos, los cuales alimentan las vertientes que son fuente de forraje.
<b>28S</b> Yrendá- Toba- Tarijeño SAYTT	Argentina -Bolivia- Paraguay	Está ubicado al noroeste de Argentina, oeste de Paraguay y suroeste de Bolivia. Su extensión es total 284,234 km <sup>2</sup> (Paraguay: 31,170 km <sup>2</sup> ,	SAT constituido por sedimentos terciarios y cuaternarios con permeabilidad primaria. Es del tipo multicapas con un acuífero libre al que	En Argentina el recurso se utiliza para abastecimiento humano y actividades generales.	Se verían afectadas negativamente las comunidades indígenas, la flora y la fauna silvestre en Paraguay.

		Argentina: 250.000 km <sup>2</sup> , Bolivia: 3.064 km <sup>2</sup> ).La población total es estimada en alrededor de 580.000 habitantes. Las áreas de recarga de Bolivia no están identificadas mientras que se encuentran las zonas de tránsito y descarga en Paraguay.	infra- yacen un número no determinado de capas semi-confinadas a confinadas.		
<b>29S</b> Cóndor- Cañadón del Cóndor	Argentina -Chile	Se ubica en la zona austral del continente, al norte del Estrecho de Magallanes. En el territorio argentino tiene una extensión de 5,490 km <sup>2</sup> con una población aproximada de 1.000 habitantes. En Chile es de aproximadamente 7,590 km <sup>2</sup> .	La litología se caracteriza por ser sedimentario, cristalino-metamórfico, y volcánico con una porosidad tanto primaria como secundaria, presentándose tanto de forma libre, como confinado, incluso fósil. Está constituido por depósitos fluvio glaciales y glaciales de meseta de edad Pleistocena sub Holocena. Subyacen arenas y gravas de la Formación Santa Cruz y otra inferior "Formación Magallanes". La recarga es directa para el acuífero freático, mientras que es indirecta para el semi-confinado.	En Argentina el recurso es el insumo básico de la actividad petrolera. También se utiliza para consumo humano y abrevadero de ganado. En Chile el recurso es utilizado igualmente en la actividad ganadera, y el consumo humano.	Podría existir riesgo de afectación como resultado de la actividad petrolera en el área.
<b>30S</b> Ascotan	Bolivia- Chile	El área total del acuífero corresponde prácticamente a la de la cuenca (Bolivia-Chile). Tiene una extensión de 1,791 km <sup>2</sup> y el área correspondiente al sector chileno es de aproximadamente 1,340	Compuesto de materiales sedimentarios y volcánicos con permeabilidad primaria y secundaria, la parte central cubeta sedimentaria de porosidad primaria que corresponde	El uso en Chile es para la industria minera. En Bolivia, no existe explotación.	En Bolivia los ecosistemas con fauna y flora podrían verse afectados por cambios en los acuíferos; en Chile los ecosistemas dependientes de estas aguas subterráneas son variados (Salar de Ascotan, Quebrada del Inca, etc.) y

		<p>km<sup>2</sup>. La población estimada en Bolivia es menor a 1.000 habitantes (todos indígenas).</p>	<p>prácticamente al área del salar (Ascotan). El área de recarga corresponde prácticamente a la cuenca en su totalidad. En Bolivia, está constituida por los estratos volcánicos con una alternancia de niveles piro-clásticos, Vulcano sedimentarios y lavas, contienen aguas fósiles y constituyen acuíferos confinados.</p>		<p>reciben una importante descarga natural.</p>
--	--	--	--	--	---

A la luz de la información presentada sobre los aspectos socioeconómicos de los SAT, se pueden resumir las siguientes conclusiones generalizadas.

- Hay bastantes incertidumbres en la integridad de los SAT, en cuanto a la delimitación de estos sistemas acuíferos
- En varios casos hay duda en cuanto a si el acuífero identificado por dos o más países es el mismo SAT o no (carácter transfronterizo)
- Hay falta de datos y de análisis muy marcados
- En general, no se registran conflictos entre los países que comparten los SAT. Algunos conflictos han surgido, y podrían aumentar en los SAT de Norteamérica donde la competición por el recurso del agua subterránea en las fronteras (todos los usos) es mucho más evidente y eminente (p.ej., 9N y 15N)
- Existe uso importante de aguas subterráneas de los SAT en zonas rurales
- El clima es un factor esencial en la recarga anual y el uso de los SAT cuando existe recarga directa
- El agua subterránea contenida en los SAT sustenta una gran variedad de ecosistemas en Centroamérica y en Sudamérica
- En Norteamérica el agua subterránea de la mayoría de los SAT es extremadamente importante para los usos agrícola y doméstico
- El grado de conocimiento e información sobre los riesgos es muy variado en los SAT inventariados, por lo que los riesgos potenciales no están bien sustentados
- Los riesgos más marcados por contaminación del agua subterránea en los SAT afectarían a las comunidades más vulnerables y los humedales en Centroamérica y en Sudamérica. En Norteamérica, estos riesgos se presentan en los centros urbanos por la sobre-explotación de los SAT
- Existen algunos acuerdos binacionales diseñados específicamente para contener y controlar la contaminación de las aguas subterráneas de los SAT (p.ej., 1N, 11N)
- En América del Sur existe un SAT, el Sistema Acuífero Guaraní, compartido entre Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, donde se realizó un estudio detallado con apoyo del Fondo Mundial para el Medioambiente (GEF por su sigla en inglés), y con colaboración de la OEA y el Banco Mundial

### **5.3 Aspectos medioambientales y climáticos**

Existe amplia diversidad respecto al conocimiento de las tendencias e impactos regionales reportados debidos a la variabilidad y el cambio climático. La variabilidad climática está asociada con las fluctuaciones secuenciales del efecto ENOS (Efectos El Niño Oscilación del Sur –Corrientes El Niño y La Niña) y de otras tendencias del clima a largo plazo.

Las condiciones climáticas en el continente Americano están directamente influenciadas por la dirección de las corrientes oceánicas, entre otras, las corrientes de Humboldt, California, Golfo de México, del Brasil, Las Malvinas y otras; así como el posicionamiento y trayectoria de las corrientes de Chorro (Jet-stream de latitudes medias –Continentes Norte y Sur -); y el desplazamiento, desarrollo y celeridad de la Zona de Convergencia Intertropical –ZCIT.

El desarrollo de la actividad ciclónica en el Mar Caribe y en el Golfo de México; el desplazamiento y frecuencia de los frentes fríos del Ártico y del Antártico y la actividad vulcanológica del Cinturón de Fuego del Océano Pacífico estimulan también la migración de los centros de alta presión atmosférica (anticiclones) y de los centros de baja presión atmosférica (ciclónicos). Estos provocan cambios radicales en la dirección horizontal de los vientos (alisios y contralisios) y cambios en la concentración de vapor de agua en el continente Americano dando paso a la variabilidad climática estacional.

En forma práctica se puede afirmar que con la variabilidad climática, las regiones que normalmente son muy secas y áridas pueden volverse muy lluviosas, y viceversa. Esto se observa con el Fenómeno ENOS en Sudamérica, Centroamérica, Islas del Mar Caribe y en Norteamérica.

En general los países del Caribe y de Centroamérica han demostrado claras modalidades de cambio, especialmente en las zonas áridas y semi-áridas.

**Guatemala** se caracteriza por presentar frecuente incidencia de huracanes, tormentas y depresiones tropicales que repercuten directamente en el régimen de recarga de los acuíferos alojados en los valles aluviales, principalmente con los pozos excavados y que explotan los acuíferos someros, se ha observado que durante los últimos 30 años se han registrado altibajos positivos y negativos; en los últimos 5 años los niveles de los pozos artesanales o excavados no han manifestado una disminución drástica en la recarga de los acuíferos comunicados con México, El Salvador, Honduras y Belice.

**El Salvador** tiene una de las respuestas más focalizadas frente a fenómenos extremos ya que se tienen planes de investigación básicos para el uso regular del acuífero transfronterizo.

En **Nicaragua** los efectos de la Corriente del Niño son la principal causa de afectación y cambios en la precipitación pluvial, mientras que más del 75% del área de recarga de la cuenca Río Negro se encuentra en estado de severa degradación ambiental y su influencia directa en el desequilibrio del ciclo hidrológico de este acuífero compartido con Honduras. En la Costa la variación de las lluvias no ha sido significativa y su promedio se ha mantenido entre 2700 mm y 3000 mm, mientras que en el escenario futuro se prevé un aumento de la temperatura de 3.5°C con lo que se estima la disminución de la precipitación pluvial en las áreas de recarga de este acuífero compartido con **Panamá**.

En **República Dominicana y Haití** se conoce que si las precipitaciones pluviales disminuyen su promedio anual, la recarga de los acuíferos podría verse afectada, así como la disminución de la cobertura vegetal de la cuenca, las áreas forestadas y con la erosión de los suelos se generarían mayores escorrentías que impedirían la infiltración.

En **América del Sur** se han manifestado cambios muy evidentes relacionados con escenarios muy lluviosos en parte de la vertiente del Océano Pacífico, mientras que en parte de la vertiente del Océano Atlántico pueden presentarse escenarios de grandes sequías.

Se ha considerado que los acuíferos **Canadienses** experimentan escasos cambios periódicos durante las precipitaciones pluviales y muy poco han variado durante la última década. Utilizando el Modelo de CC Global, se piensa que los inviernos más

húmedos contribuirán a recargar el acuífero Abbotsford y se han considerado algunas inundaciones debidas a los altos niveles del acuífero Grand Forks. Ante estos fenómenos extremos el procedimiento es el de enviar brigadas de salud después de las inundaciones.

En **Estados Unidos de América** la variabilidad climática para algunas regiones, depende parcialmente de la Oscilación Decenal del Océano Pacífico (ODP), si es negativa, permitirá que el Sistema Monzón de América del Norte (NAMS) continúe su camino sobre el suroeste de Nuevo México o sea empujado hacia el este o el oeste de los Estados Unidos de América.

**México** experimentó variaciones muy grandes en las precipitaciones pluviales en las áreas de recarga de los distintos acuíferos de Yucatán, debido al impacto de las tormentas tropicales; mientras que en acuíferos de Nogales, secuencialmente se manifestaron altas precipitaciones pluviales separadas por sequías habiéndose observado que las lluvias con mayor intensidad aumentaron la escorrentía, pero se redujo la recarga de los acuíferos. La reducción de la corriente del Río Colorado reduce los niveles del agua subterránea, se perforan pozos más profundos, pero se están extrayendo aguas más salinas. En el caso de fenómenos extremos, se incluye la perforación local de nuevos pozos, la renovación de obras de los canales de agua y sistemas de riego y el suministro de ayuda gubernamental a los pobladores y animales locales.

En **Venezuela** con el aumento del 5% al 10% de las lluvias se contribuyó a un aumento del 32% en la recarga del Acuífero Táchira.

La región del Acuífero Zarumilla entre **Perú y Ecuador** fue afectada por una sequía extrema con el aumento de la temperatura promedio, pero posteriormente se tuvieron años muy lluviosos que contribuyeron con el aumento de los niveles del acuífero, aunque no se han alcanzado los niveles originales.

En **Chile y Bolivia** en el acuífero Ollagüe se han apreciado ciclos decadales húmedos y secos afectando los afloramientos de las vertientes y los niveles del acuífero.

En el acuífero Concordia/Escritos-Caplina compartido por **Perú y Chile** toda la cuenca es árida y de escasa precipitación pluvial (menor de 100 mm/año) y con una sequía prolongada por varios años que ha ocasionado una recarga mínima del acuífero.

En **Brasil** sobre el área de recarga del acuífero Roraima se identifica al ciclo hidrológico como el mejor indicador del cambio de las precipitaciones pluviales con disminuciones del 5% al 10%, se observan períodos secos más prolongados e inundaciones que por la deforestación se aumentan las escorrentías y se reduce la recarga a los acuíferos.

En los últimos 30 años, las lluvias sobre la cuenca del **Río de la Plata** aumentaron entre 10% y 15%. Estas precipitaciones pluviales son condicionadas por los Fenómenos del Niño y La Niña. Las condiciones climáticas de la Región son influenciadas por las corrientes oceánicas de Brasil y de Las Malvinas, con proyecciones de aumento de temperatura de 2°C a 5°C para el año 2100.

En **Paraguay** no se han manifestado cambios sobresalientes en el régimen de las lluvias en el acuífero Serra Geral. Pero **Uruguay** para este mismo acuífero se ha

observado un incremento en el promedio anual de lluvias, mientras que **Argentina** en lo referente al acuífero Litoral Cretácico da cuenta de aumento de los volúmenes de lluvia en algunas zonas y disminución en otras.

En **Argentina**, en función de los modelos de pronóstico teóricos utilizados, se detallan dos escenarios de contexto para la región Litoral-Mesopotámica para el período 2081-90. Para el primer escenario se tienen las siguientes características distintivas: preservación de identidades locales, alta tasa de crecimiento poblacional, y desarrollo económico regional. Los resultados indican que las lluvias anuales disminuirán en las provincias de: Misiones, Corrientes, nordeste de Entre Ríos, norte de Santa Fe, Chaco y el Este de Formosa, centro y sur de Santa Fe y oeste y sudeste de Entre Ríos. El segundo escenario considera el aumento continuo de la población y niveles intermedios de desarrollo económico, las predicciones en cuanto a las lluvias tienen un impacto menos notable que en el primer escenario, su reducción en los volúmenes anuales se observará en Corrientes, en la mitad oriental del Chaco y en norte y nordeste de Santa Fe; luego el resto de la región tendrá un aumento en el sur de Santa Fe y en el este de Misiones.

En **Uruguay** se observan cambios en la intensidad y en la periodicidad de las lluvias y con mayor frecuencia de eventos extremos, así como el incremento del promedio anual de lluvia y con mayor énfasis en el período de octubre a febrero.

#### **5.4 Instrumentos legales, situación actual y tendencias**

Este apartado describe instrumentos de diverso valor jurídico que adoptan principios o normas en relación al uso del agua. Debido a que los instrumentos legales sobre el uso del agua a nivel internacional son muy variados (leyes, normas, derechos, principios), solo se hace una referencia breve a los hitos más relevantes.

##### **5.4.1 Artículos sobre el derecho de los Acuíferos Transfronterizos**

La gestión sostenible de las aguas subterráneas es un factor clave para asegurar los recursos hídricos a nivel mundial (Sindico F., 2010). Sin embargo, el derecho internacional ha dado una atención marginal a la gestión y protección de los acuíferos transfronterizos y tan solo recientemente estos recursos se han convertido en sujeto de un derecho internacional por propio derecho (Mechlem K., 2009).

Una de las razones para explicar la no inclusión de los acuíferos transfronterizos es debido a la falta de conocimiento por parte de los tomadores de decisiones y legisladores sobre la naturaleza de los acuíferos y sobre la interrelación física entre recursos superficiales y subterráneos, no tomando en consideración que las aguas subterráneas son parte integral del ciclo hidrológico.

Hoy en día, muchos legisladores y tomadores de decisiones continúan refiriéndose a las aguas subterráneas como distintas a las superficiales con respecto a usos y pertenencia. Por consiguiente, omiten este recurso dentro del régimen legal de la ley internacional de aguas. Se sobreentiende entonces, que el primer paso hacia la evolución de un régimen normativo internacional para las aguas subterráneas tendría que partir por reconocer la interrelación entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

Hay pocos tratados y acuerdos que contengan provisiones sobre aguas subterráneas en diversos contextos bilaterales y multinacionales, a saber, continente, región y cuencas. Entidades, como la Asociación de Ley Internacional (ILA) y la ONU están llevando a cabo esta tarea. La ILA ha producido algunos instrumentos legales útiles, aunque con diverso valor jurídico, incluyendo las Reglas de Helsinki y las de Seúl. En décadas recientes, el tema de compartir acuíferos transfronterizos ha recibido la atención de la comunidad internacional.

Recientemente estos recursos han logrado una atención especial al considerar un articulado con normas y principios básicos para una gestión sostenible de los Acuíferos Transfronterizos, los que fueron recogidos recientemente con valor de recomendación en la Resolución ONU- A-RES 63/124 de la Asamblea General. Dicho articulado se basó en el Capítulo IV del Informe de la Comisión de Derecho Internacional adoptada en su 63° periodo de sesiones, en el 15 de enero de 2009, en base a lo acordado en la reunión del 11 de diciembre de 2008.

Este articulado no ha sido aún incorporado en un instrumento formalmente vinculante para los Estados, pero constituye un avance importante y tiene el valor de haber generado un consenso sobre los conceptos y principios fundamentales que cabría tener en cuenta para definir políticas y planes de gestión de los SAT.

A partir de esta Resolución, se abre una etapa en que los Estados son invitados por la Asamblea a *“concertar los correspondientes arreglos bilaterales y regionales para la adecuada gestión de sus acuíferos transfronterizos sobre la base de los principios enunciados en el proyecto de artículos”*, en miras a considerarlo como base para la elaboración de una convención.

En este contexto, los organismos de los países que son responsables de implementar las políticas y estrategias de gestión de los SAT necesitarán un fuerte apoyo para llevar adelante los trabajos técnicos que puedan requerir sus autoridades, a fin de proporcionarles elementos de juicio que los orienten en la adopción de una postura interna frente al tema y eventual decisiones con respecto a su gestión compartida.

En diciembre de 2013 recordando sus resoluciones 63/124, de 11 de diciembre de 2008, y 66/104, de 9 de diciembre de 2011, la Asamblea General (AG) de la ONU aprobó la Resolución 68/118 *“El derecho de los acuíferos transfronterizos.”* Esta resolución es todavía muy reciente y decidir sobre su adopción en la normativa interna de los países del continente Americano resulta prematuro. Sin embargo, esa resolución sirve de guía e inspiración para la estrategia descrita en esta obra dedicada a los países americanos.

### ***Artículo sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos***

Reconociendo la necesidad de incorporar principios específicos relacionados con las aguas subterráneas contenidas dentro de la Convención, en el 2002 la ONU nombró al Dr. Chusei Yamada como Relator Especial en recursos naturales compartidos para preparar un informe sobre este tema.

Entre 2003 y 2008, el Relator Especial presentó cinco reportes. En 2006, se aprobaron a la primera lectura los 19 artículos y comentarios. En 2008, se culminó la segunda lectura.

En 2008, en la sesión 57 del ILC, el Relator Especial presentó un reporte conteniendo diecinueve artículos que consisten de cuatro partes: Parte I ("Introducción") incluye temas "sobre cobertura y uso de términos". Los artículos cubren: (a) uso de los SAT; (b) otras actividades que han impactado o pueden tener impacto sobre los SAT; y (c) medidas para la protección, preservación y gestión de los SAT.

La Parte II ("Principios Generales") articula la relación entre los principios generales de soberanía de los países que comparten el recurso; uso razonable y equitativo y la obligación de no causar daño; obligaciones generales de cooperación; intercambio regular de datos e información; y acuerdos o convenios bilaterales y regionales de las aguas transfronterizas subterráneas.

La Parte III ("Protección, Preservación y Gestión") articula medidas estándar para *"protección y preservación de ecosistemas, protección de áreas de descarga y recarga; prevención, reducción y control de contaminación; monitoreo; gestión; y actividades planificadas"*. La Parte IV ("Provisiones misceláneas") se refiere a *"Cooperación técnica con países en desarrollo; Situaciones de emergencia; Protección a tiempo para evitar conflictos armados; y datos e información vital para la defensa y la seguridad nacional"*.

Estos artículos fueron únicamente presentados a la asamblea general de la ONU que los adoptó en diciembre 2008 con la Resolución A/RES/63/124 incluyendo los artículos en anexo. En la Resolución, la AG de la ONU *"pide a los países que estén preocupados por hacer acuerdos bilaterales o regionales para la gestión de los SAT que tomen en consideración las provisiones de estos artículos"*.

En el largo plazo, estos artículos idealmente se convertirán en el marco necesario/obligado para una Convención (Mechlem, 2009). Como los tratados para acuíferos específicos están por el momento ausentes y la ley de derecho consuetudinario aún no ha sido desarrollada, una convención como esa representaría la única fuente para aplicar el derecho internacional sobre los SAT y por consiguiente contribuirá a una certeza legal sobre los derechos y obligaciones de los países que comparten estos recursos subterráneos.

Existe abundante literatura sobre cuestionarios llevados a cabo a nivel internacional; sin embargo se observan vacíos de información importantes en los países americanos sobre el desarrollo de la legislación en aguas subterráneas.

El siguiente apartado describe sucintamente la situación actual y las tendencias con respecto a los instrumentos legales en algunos países seleccionados de las Américas.

### ***El desarrollo una normativa internacional aplicable a los SAT***

La *normativa* internacional sobre acuíferos transfronterizos es un campo en desarrollo que tiene sus raíces en los principios de la *normativa* que se ha desarrollado en el contexto internacional para el uso de aguas internacionales (superficiales).

Una definición clásica de *"ley internacional"* fue brevemente descrita como: "el grupo de leyes y principios de acción a que están sujetos los países civilizados en sus interrelaciones" (Brown Weiss, E. 1996). La denominada *"ley internacional"* provee el marco normativo y los procedimientos para coordinar comportamientos, controlar

conflictos, facilitar la cooperación y respaldar los valores (Brown-Weiss, 1996). La “ley internacional” surge a través de acuerdos explícitos e implícitos de los participantes. Acuerdos explícitos se conocen como tratados o convenciones. Acuerdos implícitos son “usos-costumbres” o “principios generales”.

Este concepto ha evolucionado por si solo debido a experiencias y situaciones particulares. Las reglas de la ley internacional reflejan la sabiduría común de las naciones (Solanes M., 1992). La *normativa* internacional de aguas superficiales, como parte del Derecho internacional, regula las relaciones entre Estados con respecto al uso de recursos hídricos compartidos o transfronterizos. Un río o un acuífero puede ser internacional geográficamente, si fluye a través de los territorios de dos o más Estados soberanos; mientras que desde el punto de vista jurídico, un río es internacional si el país fronterizo no tiene todos los poderes sobre las aguas de ese río.

### ***Normas de costumbre y principios básicos aplicables a la normativa internacional de aguas***

El término “Derecho Consuetudinario Internacional” es más complejo e incierto que un acuerdo formal como tratado o convención. El Derecho Consuetudinario Internacional consiste en las prácticas de los países sin considerar obligación legal, esto es, sin considerar que esta práctica o costumbre sea requerida por ley (Dellapenna J., 1999). El Derecho Consuetudinario Internacional da poder a los actores en el ámbito internacional para legitimar sus reclamos y a la vez limitándolos en lo que está permitido hacer (McDougal & Schlei, 1955). La sección esboza trabajos de Utton, Eckstein, McCaffery, Dellapenna, Barberis, con respecto a los principios más elevados del Derecho Consuetudinario Internacional que hayan sido aplicados a las aguas subterráneas y con el que es imperativo cooperar, la doctrina de uso equitativo y razonable y la obligación de no causar daño apreciable. La tabla 5.5 extraída de Eckstein (2010) resume evidencias de Derecho Internacional Consuetudinario para los SAT.

Tabla 5.5: Evidencias de Derecho Internacional Consuetudinario para los SAT (Eckstein, 2010)

#### Acuerdos y convenios internacionales

- 2010 Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní.
- 2009 Memorando de entendimiento estableciendo un mecanismo consultivo para la gestión del SAT Iullemeden.
- 2008 Convención para la protección y uso, 008 Coopération et protection à la realimentation et au suivi de la Nappe Souterraine Franco-Suisse du Genevois.
- 2006 Directivas de la Unión Europea sobre aguas subterráneas.
- 2002 Establecimiento de un mecanismo de consulta para el sistema noroeste del Sahara.
- 2000 Marco Directriz para los Recursos Hídricos de la Unión Europea.
- 2000 Términos de Referencia para el monitoreo e intercambio de información sobre aguas subterráneas del Sistema Acuífero “Nubian Sandstone.”
- 2000 Protocolo Revisado sobre cauces de aguas compartidas en la Comunidad Desarrollada Sud-Africana.
- 1997 Convención de las NU sobre los Usos de No-navegación en cauces de aguas internacionales.
- 1992 Convención UNECE sobre Protección y Uso de cauces de agua transfronterizos y lagos internacionales.

- 1992 Minuta 289 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas U.S.-México CILA.
- 1973 Minuta 242 de La Comisión Internacional de Límites y Aguas U.S.-México CILA.

#### Acuerdos y convenios regionales y sub-nacionales

- 2005 Acuerdo sobre los Grandes Lagos –Recursos Hídricos Sostenibles.
- 1999 Memorando de entendimiento (MOU) entre Ciudad de Juárez, Utilidades México y El Paso Water Utilities Public Services Board of the City de El Paso, Texas.
- 1996 Memorando de entendimiento (MOU) Relacionado a la remisión de aplicación de Derechos de Agua relacionados al Acuífero Transfronterizo Abbotsford-Sumas, entre el estado de Washington y la Provincia de British Columbia.

#### Pronunciamientos Internacionales Oficiales

- 2008 Resolución UNGA, La Ley de Acuíferos Transfronterizos.
- 1994 Resolución UNILC sobre el Agua Subterránea Transfronteriza Confinada.

#### Pronunciamientos Internacionales Extraoficiales

- 2004 Ley de Reglas ILA de Berlín sobre Recursos Acuáticos.
- 1986 Reglas ILA de Seúl sobre Aguas Subterráneas Internacionales.

### ***Tratados: evolución y prácticas***

Existen más de 3600 instrumentos relacionados con cursos de agua superficial internacionales, algunos de ellos datan del primer y segundo siglo del milenio pasado (Wolf, 1999). Mundialmente, unos 286 tratados internacionales sobre aguas superficiales han concluido, cerca de dos tercios de esos tratados fueron ratificados en Europa y Norteamérica en donde los conflictos se intensificaron (Caponera, 1995). Muchos acuerdos sobre aguas son bilaterales y se relacionan con ríos específicos que forman o cruzan fronteras, o lagos que coinciden con ellos. Hay un pequeño número de acuerdos multilaterales.

Los Tratados y Acuerdos Internacionales sobre aguas superficiales varían de acuerdo a:

- Partes en el acuerdo (bilateral/multilateral).
- Asunto (recolección de datos, disposición, planeamiento, construcción, etc.).
- Extensión Territorial (toda la cuenca o parte de ella).
- Intensidad de cooperación (desde la obligación de informar hasta la implementación de programas conjuntos).

La intensidad de la cooperación también afecta el régimen de autoría de las aguas superficiales resultantes del tratado (Solanes M., 1992, p. 119). Tratados que han sido establecidos para regular el uso conjunto de los recursos hídricos tratan en su gran mayoría de agua superficial, específicamente de ríos y lagos.

Hay 3 requisitos para que sea establecido un régimen internacional en cuanto a curso de aguas transfronterizas:

- Apoyo activo y sostenible a largo plazo por parte de representantes políticos de alto nivel;
- Movilización de expertos en geología, meteorología, legal, social, ingeniería y en otras áreas del conocimiento (saber);
- Una estructura gubernamental domestica capaz de una cooperación y colaboración internacional efectiva (Housen-Couriel, 1994).

Los diversos mecanismos y arreglos institucionales como se reflejan en los tratados, convenciones y acuerdos se dividen en 3 categorías:

- Acuerdos entre países ribereños a corta distancia de la ubicación formal;
- Acuerdos que reservan agua entre los países;
- Acuerdos para gestión conjunta comunitaria de las aguas internacionales que se comparten

Muy pocos tratados se refieren expresamente a la existencia de algún derecho consuetudinario subyacente (ver por ejemplo el caso del Acuerdo del Río Mekong de 1995). Estos principios se convirtieron en acuerdos regionales, tales como el “Southern Africa Development Community Protocol of Shared Water Course Systems” (1995) y el Convenio de la CEPE de 1992 sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales (Savenije and van der Zaag, 2000).

### ***Trabajos de la Asociación de Derecho Internacional en la formalización de la normativa internacional de aguas subterráneas***

La Asociación de Derecho Internacional (ILA-por sus siglas en ingles) incluyó primero las aguas subterráneas dentro del derecho internacional de aguas en 1966 cuando fueron desarrolladas las *normas* “Reglas de Helsinki” sobre el uso de las aguas de ríos internacionales. Esas reglas incluyeron “aguas subterráneas” asociadas a un sistema superficial en la definición de "cuenca internacional de drenaje". A pesar de que la importancia del recurso subterráneo fue reconocida, las Reglas de Helsinki excluyeron a los acuíferos confinados, los que constituyen una gran porción de las aguas subterráneas.

Veinte años después, en 1986, la ILA nuevamente se refiere a las aguas subterráneas en las normas de Seúl sobre aguas subterráneas internacionales. Las leyes consistían de 3 artículos de ley especialmente diseñados para gobernar los recursos hídricos subterráneos que atraviesan fronteras internacionales, sin considerar si estaban asociadas o no a un sistema de aguas superficiales. Este fue un paso importante, por primera vez, el derecho internacional específicamente albergó en su ámbito ***acuíferos no-recargables confinados y no confinados***.

La implementación de las Reglas de Helsinki y de Seúl es el reconocimiento fundamental de la relación hidrológica entre aguas superficiales y subterráneas, y sugiere que la gestión de los recursos hídricos subterráneos requiere de un conocimiento de los mecanismos del ciclo hidrológico. Las Reglas de Helsinki avanzaron en el principio fundamental innovador y controversial de uso *equitativo* como el concepto base para el uso compartido, reforzado por los principios consuetudinarios de la necesidad de evitar daño substancial y de notificar a los Estados que comparten el recurso, de alguna acción que pueda tener efectos adversos sobre el recurso compartido. Las reglas de Seúl adoptaron las de Helsinki y su compromiso de uso equitativo y las aplicaron a todos los sistemas internacionales de aguas, incluyendo todos los acuíferos que contribuyeron a, o que fueron afectados por cursos de aguas internacionales, al igual que a aquellos que transformaron fronteras nacionales.

## ***El Borrador del Tratado de Bellagio sobre Aguas Transfronterizas***

En 1991, un grupo de expertos internacionales liderados por el Profesor Albert E. Utton desarrolló el Tratado Preliminar de Bellagio sobre el uso de recursos hídricos subterráneos como modelo para futuros tratados sobre estos recursos compartidos.

El borrador del Tratado incluyó el término “ambiente subterráneo” que toma en consideración la calidad y cantidad del recurso hídrico subterráneo así como la estructura geológica del cuerpo de agua que afecta estas propiedades. El objetivo general del modelo del tratado es *“lograr el uso óptimo de las aguas disponibles y facilitarlo con procedimientos que eviten conflictos y favorezcan la resolución de diferencias sobre aguas subterráneas compartidas, a la luz de presiones crecientes sobre el recurso tanpreciado”*. El Tratado de Bellagio se establece para lograr estos objetivos fijando el interés común entre las partes de un uso razonable y equitativo para su gestión en la región fronteriza. El tratado reconoce dos propósitos generales: **(1) lograr el uso óptimo y conservación de las aguas subterráneas transfronterizas y a la vez proteger el ambiente subterráneo, y (2) desarrollar y mantener una base de datos técnica confiable sobre los acuíferos transfronterizos y sus aguas.**

El énfasis que se hace en recopilar, analizar e intercambiar datos técnicos sobre aguas transfronterizas es el requisito básico y el objetivo del tratado y muestra el cambio de postura de muchos acuerdos internacionales a algo más práctico y orientado hacia tratados multilaterales o bilaterales. El artículo V del Tratado de Bellagio encarga a la Comisión Internacional asignada a implementarlo **“la creación y mantenimiento de una base de datos unificada y coherente”** que recolecte y catalogue la información sobre las aguas subterráneas y que esté disponible en el idioma de las partes.

Lograr el uso óptimo de las aguas disponibles y facilitarlo con procedimientos que eviten conflictos y favorezcan la resolución de diferencias sobre aguas subterráneas compartidas a la luz de presiones crecientes sobre el recurso tanpreciado.

**Tratado de Bellagio**

**“Creación y mantenimiento de una base de datos unificada y coherente”** que recolecte y catalogue la información sobre las aguas subterráneas y que esté disponible en el idioma de las partes.

**Artículo V, Tratado de Bellagio**

## ***Convención sobre Usos No Navegables de los Cursos de Agua Internacionales***

Mientras la Asociación de Derecho Internacional estaba armando y refinando un entendimiento y compromiso colectivo siguiendo los principios básicos que gobiernan las aguas compartidas, la ONU y otras organizaciones internacionales estaban incorporando estos mismos principios dentro de acuerdos multilaterales y en convenciones internacionales. La Convención de 1997 de la ONU: Convención sobre los Usos No Navegables de los Cursos de Agua Internacionales ha sido descrita como un hito gigante y único en la historia del desarrollo del derecho internacional sobre aguas subterráneas. Las reglas de Helsinki están parcialmente reflejadas en la convención de cursos de agua; en efecto, el preámbulo del documento reconoce *“la valiosa contribución de las organizaciones internacionales, tanto gubernamentales como*

*no-gubernamentales, a la codificación y avances del documento dentro del Derecho Internacional”.*

La Convención de cursos de agua internacionales es el acuerdo marco sobre el uso, protección, preservación y gestión de aguas para propósitos generales y no solamente de navegación.

La Convención de aguas internacionales avanza en un conjunto de principios básicos, empezando con el artículo 5 cuyo principio es: “uso razonable, equitativo y participativo”. Consideraciones ambientales están inmersas dentro del término uso equitativo y dentro de este principio los valores de desarrollo y conservación. Otros principios reconocen en el lenguaje de la convención el estar incluida la obligación de no causar daño significativo (Artículo 7), la obligación general de cooperar (Artículo 8), y la obligación de notificar medidas que piensen implementarse y que puedan tener efectos adversos (Artículo 12). La parte IV de la convención se refiere a la protección, preservación y gestión y requiere que los países ribereños unificadamente prevengan, reduzcan, y controlen la contaminación en las aguas internacionales.

La Convención exitosamente sobrepasa el enfoque tradicional de los acuerdos sobre aguas en la separación de aguas compartidas con las consideraciones ambientales más amplias que han dominado las discusiones sobre los recursos internacionales en las décadas recientes, tales como la conferencia de 1972 de Estocolmo sobre el ambiente humano, la conferencia mundial de agua de 1977 en Mar del Plata, y la conferencia de ambiente y desarrollo de la ONU en 1992 en Río de Janeiro.

La Convención no es oficial aun, 16 naciones la han ratificado, pero necesita que 19 más la firmen. Por una serie de razones, los expertos en la materia creen que la convención no será ratificada por la percepción que existe en que no se desea que haya leyes internacionales que puedan tener mayor fuerza que acuerdos multilaterales o bilaterales, y hay preocupación de tener que ceder algunos derechos ribereños. Sin embargo, aunque la convención nunca sea ratificada, lo más probable es que va a tener un impacto significativo en los acuerdos regionales y servirá de guía para delinear regulaciones consistentes sobre los usos de no navegación de las aguas internacionales.

Existe la percepción de que no hay voluntad para el establecimiento de leyes internacionales que puedan tener mayor fuerza que acuerdos multilaterales o bilaterales, y hay preocupación de tener que ceder algunos derechos ribereños.

La Convención obliga a los firmantes a obligaciones específicas relacionadas con la doctrina de un uso equitativo y razonable, la obligación de no causar daño significativo y de cooperar. Numerosas provisiones resaltan la obligación de los firmantes de notificar y consultar uno al otro en temas relacionados a actividades planificadas sobre las aguas compartidas.

### ***Resolución sobre el Derecho de los Acuíferos Transfronterizos***

Como mencionado anteriormente, la resolución más reciente con los artículos sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos fueron presentados a la Asamblea General de la ONU (AG) que los adoptó el 13 de diciembre de 2013 en la Resolución A/RES/68/118 incluyendo los artículos en anexo. En la Resolución, la AG solicita a los países

interesados establecer acuerdos bilaterales o regionales para la gestión de los SAT que tomen en consideración las provisiones de estos artículos.

Esta es la fuente más actual para aplicar el derecho internacional sobre los SAT y por consiguiente contribuirá a una certeza legal sobre los derechos y obligaciones de los países que comparten estos recursos subterráneos.

La Resolución A/RES/68/118 se presenta a continuación.



## Asamblea General

Distr. general  
19 de diciembre de 2013

Sexagésimo octavo período de sesiones  
Tema 87 del programa

### Resolución aprobada por la Asamblea General el 16 de diciembre de 2013

[sobre la base del informe de la Sexta Comisión (A/68/470)]

#### 68/118. El derecho de los acuíferos transfronterizos

*La Asamblea General,*

*Recordando* sus resoluciones 63/124, de 11 de diciembre de 2008, y 66/104, de 9 de diciembre de 2011,

*Observando* la gran importancia del derecho de los acuíferos transfronterizos para las relaciones entre los Estados y la necesidad de asegurar para las generaciones presentes y futuras, mediante la cooperación internacional, una gestión razonable y adecuada de los acuíferos transfronterizos, que son un recurso natural de importancia vital,

*Observando también* que las disposiciones del proyecto de artículos sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos se han tomado en cuenta en instrumentos pertinentes como el Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní, firmado por la Argentina, el Brasil, el Paraguay y el Uruguay el 2 de agosto de 2010, y las Disposiciones Modelo sobre Aguas Subterráneas Transfronterizas, aprobadas por la sexta Reunión de las partes en el Convenio sobre la protección y utilización de los cursos de agua transfronterizos y de los lagos internacionales el 29 de noviembre de 2012,

*Poniendo de relieve* la importancia que siguen teniendo la codificación y el desarrollo progresivo del derecho internacional a que se hace referencia en el Artículo 13, párrafo 1 a), de la Carta de las Naciones Unidas,

*Haciendo notar* las observaciones de los gobiernos y el debate de la Sexta Comisión sobre este tema durante los períodos de sesiones de la Asamblea General sexagésimo tercero, sexagésimo sexto y sexagésimo octavo,

1. *Señala* a la atención de los gobiernos el proyecto de artículos sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos que figura en el anexo de la presente resolución a fin de que les sirva de orientación en los acuerdos y arreglos bilaterales o regionales para la adecuada gestión de los acuíferos transfronterizos;

2. *Alienta* al Programa Hidrológico Internacional de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura a que siga realizando su aportación consistente en prestar asistencia científica y técnica a los Estados interesados;

13-44656



Se ruega reciclar 



3. *Decide* incluir en el programa provisional de su septuagésimo primer período de sesiones el tema titulado “El derecho de los acuíferos transfronterizos”.

68ª sesión plenaria  
16 de diciembre de 2013

## **Anexo**

### **El derecho de los acuíferos transfronterizos**

...

*Consciente* de la importancia para la humanidad de los recursos hídricos subterráneos, indispensables para la vida, en todas las regiones del mundo,

*Teniendo presente* el Artículo 13, párrafo 1 a), de la Carta de las Naciones Unidas, según el cual la Asamblea General promoverá estudios y hará recomendaciones para impulsar el desarrollo progresivo del derecho internacional y su codificación,

*Recordando* la resolución 1803 (XVII) de la Asamblea General, de 14 de diciembre de 1962, relativa a la soberanía permanente sobre los recursos naturales,

*Reafirmando* los principios y recomendaciones aprobados por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, celebrada en 1992, en la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo<sup>1</sup> y en el Programa 21<sup>2</sup>,

*Teniendo en cuenta* los requerimientos cada vez mayores de agua dulce y la necesidad de proteger los recursos hídricos subterráneos,

*Consciente* de los problemas especiales planteados por la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación,

*Convencida* de la necesidad de asegurar el aprovechamiento, la utilización, la conservación, la gestión y la protección de los recursos hídricos subterráneos en el contexto de la promoción de un desarrollo óptimo y sostenible de los recursos hídricos para las generaciones presentes y futuras,

*Afirmando* la importancia de la cooperación internacional y la buena vecindad en este ámbito,

*Recalcando* la necesidad de tener en cuenta la situación especial de los países en desarrollo,

*Reconociendo* la necesidad de promover la cooperación internacional,

...

## **Parte I**

### **Introducción**

#### *Artículo 1*

#### *Ámbito de aplicación*

Los presentes artículos se aplican:

- a) A la utilización de los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos;

<sup>1</sup> Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río de Janeiro, 3 a 14 de junio de 1992, vol. I, Resoluciones aprobadas por la Conferencia (publicación de las Naciones Unidas, núm. de venta: S.93.L8 y corrección), resolución 1, anexo I.

<sup>2</sup> *Ibid.*, anexo II.

- b) A otras actividades que tengan o puedan tener un impacto en esos acuíferos o sistemas acuíferos; y
- c) A las medidas de protección, preservación y gestión de esos acuíferos o sistemas acuíferos.

#### *Artículo 2*

##### *Términos empleados*

A los efectos de los presentes artículos:

- a) Se entiende por “acuífero” una formación geológica permeable portadora de agua, situada sobre una capa menos permeable, y el agua contenida en la zona saturada de la formación;
- b) Se entiende por “sistema acuífero” una serie de dos o más acuíferos que están conectados hidráulicamente;
- c) Se entiende por “acuífero transfronterizo” o “sistema acuífero transfronterizo”, respectivamente, un acuífero o sistema acuífero que tenga partes situadas en distintos Estados;
- d) Se entiende por “Estado del acuífero” un Estado en cuyo territorio se encuentra parte de un acuífero o sistema acuífero transfronterizo;
- e) La “utilización de los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos” incluye la extracción de agua, calor y minerales y el almacenamiento y la eliminación de cualquier sustancia;
- f) Se entiende por “acuífero recargable” un acuífero que recibe un volumen significativo de recarga hídrica contemporánea;
- g) Se entiende por “zona de recarga” la zona que aporta agua a un acuífero, compuesta por el área de captación del agua pluvial y el área por la que esa agua fluye hasta un acuífero por escurrimiento sobre el terreno e infiltración a través del suelo;
- h) Se entiende por “zona de descarga” la zona por la que el agua procedente de un acuífero fluye hasta sus puntos de salida, tales como un curso de agua, lago, oasis, humedal u océano.

## **Parte II**

### **Principios generales**

#### *Artículo 3*

##### *Soberanía de los Estados del acuífero*

Cada Estado del acuífero tiene soberanía sobre la parte de un acuífero o sistema acuífero transfronterizo situada en su territorio. El Estado del acuífero ejercerá su soberanía de acuerdo con el derecho internacional y los presentes artículos.

*Artículo 4**Utilización equitativa y razonable*

Los Estados del acuífero utilizarán los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos con arreglo al principio de la utilización equitativa y razonable, como sigue:

- a) Utilizarán los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos de una manera compatible con la distribución equitativa y razonable de los beneficios obtenidos entre los Estados del acuífero en cuestión;
- b) Tratarán de elevar al máximo los beneficios a largo plazo derivados del uso del agua contenida en ellos;
- c) Elaborarán, individual o conjuntamente, un plan global de aprovechamiento, teniendo en cuenta las necesidades presentes y futuras, así como las fuentes alternativas de agua, de los Estados del acuífero; y
- d) No utilizarán un acuífero o sistema acuífero transfronterizo recargable hasta un grado que impida la continuación de su funcionamiento efectivo.

*Artículo 5**Factores pertinentes en una utilización equitativa y razonable*

1. La utilización de manera equitativa y razonable de un acuífero o sistema acuífero transfronterizo de conformidad con el artículo 4 requiere que se tengan en cuenta todos los factores pertinentes, entre ellos:

- a) La población que depende del acuífero o del sistema acuífero en cada Estado del acuífero;
- b) Las necesidades económicas, sociales y de otro tipo, presentes y futuras, de los Estados del acuífero en cuestión;
- c) Las características naturales del acuífero o sistema acuífero;
- d) La contribución a la formación y recarga del acuífero o sistema acuífero;
- e) La utilización actual y potencial del acuífero o sistema acuífero;
- f) Los efectos reales y potenciales que la utilización del acuífero o del sistema acuífero en uno de los Estados del acuífero produzca en otros Estados del acuífero en cuestión;
- g) La existencia de alternativas respecto de una utilización particular actual y proyectada del acuífero o sistema acuífero;
- h) El desarrollo, protección y conservación del acuífero o sistema acuífero y los costos de las medidas que se hayan de adoptar a tales efectos;
- i) La función desempeñada por el acuífero o sistema acuífero en el ecosistema con él relacionado.

2. El peso que se asigne a cada factor será determinado en función de su importancia con respecto a un acuífero o sistema acuífero transfronterizo concreto en comparación con la de otros factores pertinentes. Para determinar qué constituye una utilización equitativa y razonable, se considerarán conjuntamente todos los factores pertinentes y se llegará a una conclusión sobre la base de todos esos factores. No obstante, al ponderar las diferentes clases de utilización de un acuífero o sistema acuífero transfronterizo, se prestará especial atención a las necesidades humanas vitales.

*Artículo 6**Obligación de no causar un daño sensible*

1. Al utilizar un acuífero o sistema acuífero transfronterizo en su territorio, los Estados del acuífero adoptarán todas las medidas apropiadas para prevenir que se cause un daño sensible a otros Estados del acuífero o a otros Estados en cuyo territorio se halle situada una zona de descarga.

2. Al emprender actividades diferentes de la utilización de un acuífero o sistema acuífero transfronterizo que tengan o puedan tener un impacto en ese acuífero o sistema acuífero transfronterizo, los Estados del acuífero adoptarán todas las medidas apropiadas para prevenir que se cause un daño sensible a través de este acuífero o sistema acuífero a otros Estados del acuífero o a otros Estados en cuyo territorio se halle situada una zona de descarga.

3. Cuando no obstante se cause un daño sensible a otro Estado del acuífero o a un Estado en cuyo territorio se halle situada una zona de descarga, el Estado del acuífero cuyas actividades causen tal daño deberá adoptar, en consulta con el Estado afectado, todas las medidas de respuesta apropiadas para eliminar o mitigar ese daño, teniendo debidamente en cuenta las disposiciones de los artículos 4 y 5.

*Artículo 7**Obligación general de cooperar*

1. Los Estados del acuífero cooperarán sobre la base de la igualdad soberana, la integridad territorial, el desarrollo sostenible, el provecho mutuo y la buena fe a fin de lograr una utilización equitativa y razonable y una protección adecuada de sus acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos.

2. A los efectos del párrafo 1, los Estados del acuífero procurarán establecer mecanismos conjuntos de cooperación.

*Artículo 8**Intercambio regular de datos e información*

1. De conformidad con el artículo 7, los Estados del acuífero intercambiarán regularmente los datos y la información que estén fácilmente disponibles sobre la condición de sus acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos, en particular los de carácter geológico, hidrogeológico, hidrológico, meteorológico y ecológico y los relativos a la hidroquímica de los acuíferos o sistemas acuíferos, así como las previsiones correspondientes.

2. En los casos en que la naturaleza y la extensión de un acuífero o sistema acuífero transfronterizo no se conozcan suficientemente, los Estados del acuífero en cuestión harán todo lo posible para reunir y producir, teniendo en cuenta las prácticas y normas existentes, datos e información más completos con relación a ese acuífero o sistema acuífero. Lo harán de manera individual o conjunta y, en los casos pertinentes, con organizaciones internacionales o por su intermedio.

3. El Estado del acuífero al que otro Estado del acuífero pida datos e información relativos al acuífero o sistema acuífero que no estén fácilmente disponibles hará todo lo posible para atender esta petición. El Estado al que se formule la solicitud podrá condicionar su cumplimiento a que el Estado solicitante pague los costos razonables de la recopilación y, cuando proceda, el procesamiento de esos datos o información.

4. Los Estados del acuífero harán todo lo posible, cuando corresponda, para reunir y procesar los datos y la información de manera que se facilite su utilización por los otros Estados del acuífero a los que sean comunicados.

*Artículo 9*

*Acuerdos y arreglos bilaterales y regionales*

A los efectos de la gestión de un determinado acuífero o sistema acuífero transfronterizo, los Estados del acuífero procurarán concertar acuerdos o arreglos bilaterales o regionales entre sí. Dichos acuerdos o arreglos se podrán concertar respecto de todo un acuífero o sistema acuífero o de cualquiera de sus partes, o de un proyecto, programa o utilización determinados, salvo en la medida en que el acuerdo o arreglo pueda afectar negativamente, en grado significativo, a la utilización del agua de dicho acuífero o sistema acuífero por parte de otro u otros Estados del acuífero sin el expreso consentimiento de estos.

**Parte III**

**Protección, preservación y gestión**

*Artículo 10*

*Protección y preservación de ecosistemas*

Los Estados del acuífero adoptarán todas las medidas apropiadas para proteger y preservar los ecosistemas que estén situados en sus acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos o dependan de los mismos, incluidas medidas para garantizar que la calidad y cantidad de agua retenida en un acuífero o sistema acuífero, así como la vertida por conducto de sus zonas de descarga, sean suficientes para proteger y preservar esos ecosistemas.

*Artículo 11*

*Zonas de recarga y descarga*

1. Los Estados del acuífero identificarán las zonas de recarga y descarga de los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos existentes en su territorio. Esos Estados adoptarán las medidas adecuadas para prevenir y reducir al mínimo los efectos perjudiciales en los procesos de recarga y descarga.
2. Todos los Estados en cuyo territorio se encuentre, en todo o en parte, una zona de recarga o descarga y que no sean Estados del acuífero en lo que respecta a ese acuífero o sistema acuífero cooperarán con los Estados del acuífero para proteger el acuífero o sistema acuífero y los ecosistemas con él relacionados.

*Artículo 12*

*Prevención, reducción y control de la contaminación*

Los Estados del acuífero, individual y, cuando corresponda, conjuntamente, prevendrán, reducirán y controlarán la contaminación de sus acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos, inclusive en el proceso de recarga, que pueda causar un daño sensible a otros Estados del acuífero. Los Estados del acuífero adoptarán un criterio de precaución en caso de incertidumbre acerca de la naturaleza y la extensión de los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos y su vulnerabilidad a la contaminación.

*Artículo 13**Vigilancia*

1. Los Estados del acuífero vigilarán sus acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos. Dentro de lo posible, realizarán esas actividades de vigilancia conjuntamente con otros Estados del acuífero en cuestión y, cuando proceda, en colaboración con las organizaciones internacionales competentes. Cuando las actividades de vigilancia no puedan realizarse conjuntamente, los Estados del acuífero intercambiarán entre ellos los datos resultantes de la vigilancia.

2. Los Estados del acuífero utilizarán criterios y metodologías convenidos o armonizados para la vigilancia de sus acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos. Procurarán determinar los parámetros básicos que serán objeto de vigilancia conforme a un modelo conceptual convenido de los acuíferos o sistemas acuíferos. Entre esos parámetros deberían incluirse los relativos a la condición del acuífero o sistema acuífero enumerados en el artículo 8, párrafo 1, y también los relativos a su utilización.

*Artículo 14**Gestión*

Los Estados del acuífero elaborarán y ejecutarán planes para la adecuada gestión de sus acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos. A petición de cualquiera de ellos, celebrarán consultas respecto de la gestión de un acuífero o sistema acuífero transfronterizo. Siempre que resulte apropiado se establecerá un mecanismo conjunto de gestión.

*Artículo 15**Actividades proyectadas*

1. Cuando un Estado tenga motivos razonables para estimar que una determinada actividad proyectada en su territorio puede afectar a un acuífero o sistema acuífero transfronterizo y, con ello, causar un efecto negativo sensible a otro Estado, aquel Estado, en la medida en que sea factible, evaluará los posibles efectos de esa actividad.

2. Antes de que un Estado ejecute o permita ejecutar actividades proyectadas que puedan afectar a un acuífero o sistema acuífero transfronterizo y, por tanto, causar un efecto negativo sensible a otro Estado, lo notificará oportunamente al mismo. Esa notificación irá acompañada de los datos técnicos y la información disponibles, incluido todo estudio del impacto ambiental, para que el Estado notificado pueda evaluar los efectos posibles de las actividades proyectadas.

3. Si no se ponen de acuerdo en cuanto al posible efecto de las actividades proyectadas, el Estado que notifica y el Estado notificado deberán celebrar consultas y, en caso necesario, negociaciones con el objeto de llegar a una solución equitativa de la situación. Podrán recurrir a un órgano independiente de determinación de los hechos para realizar una evaluación imparcial de los efectos de las actividades proyectadas.

**Parte IV****Disposiciones diversas***Artículo 16**Cooperación técnica con Estados en desarrollo*

Los Estados, actuando directamente o por intermedio de las organizaciones internacionales competentes, promoverán la cooperación científica, educativa,

técnica, jurídica y de otra clase con los Estados en desarrollo para la protección y gestión de los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos, incluidos, entre otros, los siguientes aspectos:

- a) Reforzar la creación de capacidad en los ámbitos científico, técnico y jurídico;
- b) Facilitar su participación en los programas internacionales pertinentes;
- c) Proporcionarles el equipo y las instalaciones necesarios;
- d) Aumentar su capacidad para fabricar tal equipo;
- e) Prestar asesoramiento y desarrollar los medios materiales necesarios para programas de investigación, vigilancia, educación y otros;
- f) Prestar asesoramiento y desarrollar los medios materiales necesarios para minimizar los efectos perjudiciales de las principales actividades que afecten a sus acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos;
- g) Prestar asesoramiento para la preparación de evaluaciones de impacto ambiental;
- h) Apoyar el intercambio de conocimientos técnicos y experiencias entre Estados en desarrollo para reforzar su cooperación mutua en la gestión de los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos.

#### *Artículo 17*

##### *Situaciones de emergencia*

1. A los efectos del presente artículo, se entiende por “emergencia” una situación que resulta súbitamente de causas naturales o de un comportamiento humano, que afecta a un acuífero o sistema acuífero transfronterizo y que constituye una amenaza inminente de causar daño grave a los Estados del acuífero o a otros Estados.
2. El Estado en cuyo territorio se origine la emergencia:
  - a) La notificará, sin demora y por los medios más rápidos de que disponga, a otros Estados que puedan resultar afectados y a las organizaciones internacionales competentes;
  - b) Tomará inmediatamente, en cooperación con los Estados que puedan resultar afectados y, cuando proceda, las organizaciones internacionales competentes, todas las medidas posibles que requieran las circunstancias para prevenir, mitigar y eliminar todo efecto perjudicial de la emergencia.
3. Cuando una emergencia constituya una amenaza para las necesidades humanas vitales, los Estados del acuífero, no obstante lo dispuesto en los artículos 4 y 6, podrán adoptar las medidas que sean estrictamente necesarias para responder a esas necesidades.
4. Los Estados prestarán cooperación científica, técnica, logística y de otra clase a otros Estados que sufran una emergencia. Dicha cooperación podrá incluir la coordinación de las acciones y las comunicaciones internacionales de emergencia, así como el suministro de personal, equipos y provisiones para responder a emergencias, conocimientos científicos y técnicos y asistencia humanitaria.

*Artículo 18*

*Protección en tiempo de conflicto armado*

Los acuíferos o sistemas acuíferos transfronterizos y las instalaciones, construcciones y otras obras conexas gozarán de la protección que les confieren los principios y normas del derecho internacional aplicables en caso de conflicto armado internacional y no internacional y no serán utilizados en violación de esos principios y normas.

*Artículo 19*

*Datos e información vitales para la defensa o la seguridad nacionales*

Nada de lo dispuesto en los presentes artículos obliga a ningún Estado a proporcionar datos o información que sean vitales para su defensa o seguridad nacionales. No obstante, ese Estado cooperará de buena fe con otros Estados para proporcionar toda la información que sea posible según las circunstancias.

Existe abundante literatura sobre cuestionarios llevados a cabo a nivel internacional; sin embargo se observan vacíos importantes de información en los países americanos sobre el desarrollo de la legislación en aguas.

El siguiente apartado describe sucintamente la situación actual y las tendencias con respecto a los instrumentos legales en algunos países seleccionados de las Américas.

#### 5.4.2 Situación actual y tendencias

Los instrumentos legales a nivel internacional en el continente americano son aún muy incipientes. El único convenio sobre la gestión integrada de los acuíferos transfronterizos en las Américas es el del Sistema Acuífero Guaraní (SAG). “Declaración Conjunta – San Juan, 2 de agosto de 2010 – Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní” (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay).

A nivel nacional, en la mayoría de los países americanos las aguas subterráneas no cuentan con un régimen jurídico claramente definido. Sin embargo, hay tendencias muy favorables con respecto a la aplicación de instrumentos legales bien definidos sobre aguas subterráneas, como es el caso de algunas provincias de Canadá (p.ej., Quebec, 2009).

## 6. CONOCIMIENTO BÁSICO CIENTÍFICO y TÉCNICO NECESARIO PARA LA EVALUACIÓN Y GESTIÓN DE LOS SAT

Editado por Randy Hanson, Rubén Chávez-Guillen, Ofelia Tujchneider, Alfonso Rivera, William. M. Alley, Alyssa Dausman, Lourdes Batista, y Marcela Espinoza

### 6.1 Introducción

El aumento de la población en las Américas ha traído como consecuencia un aumento en la demanda de agua, esto ha provocado a su vez un aumento en las extracciones del recurso de muchos acuíferos que cruzan fronteras internacionales (Sistemas de Acuíferos Transfronterizos, o SAT), lo cual hace necesaria una evaluación sistemática y coordinada de la disponibilidad de agua subterránea en los SAT. Estas extracciones han causado igualmente la disminución de los niveles de agua en algunas áreas, provocando aumento en la intrusión salina proveniente del mar, disminución del flujo de algunas vertientes, cambios en los caudales, disminución en el nivel de lagos y en la recarga de aguas subterráneas, así como disminución de los humedales, aumento de la contaminación de las aguas subterráneas proveniente de aguas superficiales y de los caudales de los pozos, y disminución en el almacenamiento del agua subterránea.

Debido a que los acuíferos transfronterizos son la fuente de suministro de agua en muchos países, la gestión de los recursos hídricos y la evaluación de la disponibilidad de agua subterránea se hace necesaria para proteger el recurso y prevenir un daño irreparable al acuífero. Los acuíferos más someros son susceptibles a contaminación por las aguas superficiales, particularmente en áreas en donde hay extracción informal de agua y descargas o tratamiento de aguas de desecho, o donde se arroja basura, agua de descarga de baños o de zonas para lavado.

En otras áreas donde la interacción de aguas superficiales y subterráneas es frecuente (partes no-confinadas de los acuíferos), los usos del suelo para agricultura e industria o de desarrollo de recursos naturales como aprovisionamiento de madera y minería, han sido también causantes de contaminación al sistema de aguas subterráneas. Los tanques sépticos y desagües urbanos también han contribuido a la contaminación de algunos de los recursos subterráneos.

El aumento en la demanda de agua como resultado del desarrollo acelerado en los países de la región, ha provocado sobreexplotación y contaminación en algunos acuíferos transfronterizos. Las interrogantes continúan surgiendo: ¿Cómo contribuyen las aguas subterráneas al uso conjunto? ¿Cuál es la disponibilidad y sostenibilidad actual y futura del agua que proviene de los acuíferos transfronterizos? ¿Pueden trabajar conjuntamente dos países hacia el fin común de gestionar y proteger un recurso subterráneo que es compartido? Antes que un acuífero transfronterizo pueda ser gestionado apropiadamente, ¿cómo pueden 2 ó más países vecinos desarrollar y coordinar una evaluación científica apropiada que les permita implementar y mantener redes de monitoreo, determinar la disponibilidad de agua subterránea, y cuantificar su rol en un uso conjunto?

Bajo este contexto y con respecto al conocimiento, los dos objetivos principales del Programa ISARM Américas son:

- i. Establecer las bases científicas, técnicas, legales y administrativas para el manejo sostenible de los acuíferos compartidos por dos o más países; y
- ii. Prevenir y/o resolver conflictos internacionales derivados de efectos transfronterizos perjudiciales, que la explotación de un SAT en un país pueda generar o haya generado en los países vecinos.

Es importante destacar que, incidentalmente, de los objetivos anteriores se pueden derivar objetivos análogos aplicables a los acuíferos compartidos por dos o más entidades políticas (estados, provincias, condados,...) de un mismo país. Es decir, aunque los objetos de estudio del presente libro, son los SAT compartidos por dos o más países, los conceptos, estrategia y metodologías contenidas en el mismo son igualmente aplicables, con algunas adecuaciones, a los acuíferos transfronterizos que se localizan dentro de un mismo país.

Para alcanzar el primer objetivo, lo ideal sería que se llevara a cabo la evaluación y gestión de un SAT considerado en toda su extensión, mediante estudios y estrategias acordadas entre los países que lo comparten, orientadas a la conservación del recurso hídrico subterráneo, tanto en cantidad como en calidad, y a una distribución entre ellos equilibrando los aspectos sociales, económicos y ambientales de cada uno.

Este capítulo incluye dos secciones esenciales para la evaluación y gestión de los SAT: una contiene la descripción de un conocimiento básico (científico y técnico) necesario para la evaluación, y la segunda cubre los aspectos propios de la gestión. Las secciones tres y cuatro de este capítulo proponen las mejores prácticas de gestión para alcanzar el segundo objetivo descrito arriba y son de utilidad para considerarlas en los últimos dos componentes del principio de sostenibilidad.

## **6.2 Aspectos de evaluación de los SAT**

Para caracterizar un acuífero transfronterizo hay que desarrollar un modelo conceptual y llevar a cabo una serie de evaluaciones y gestiones relacionadas con los datos necesarios para el análisis, geoindicadores de flujo y calidad, la vulnerabilidad del acuífero, la evaluación de la disponibilidad de agua subterránea, así como el análisis de estos componentes para el desarrollo y la gestión del recurso. Estos componentes se interrelacionan, representando una combinación de observaciones, modelación y análisis, en apoyo y como guía a la toma de decisiones. Estos componentes dan una base para la evaluación y protección del recurso con miras a una gestión en el contexto de un *uso conjunto* en un escenario transfronterizo en donde estos objetivos múltiples y su gobernabilidad puedan ser sistemáticamente evaluados en un contexto holístico (Gutierrez-Yurrita, 2009).

Ellos proveen información sobre cantidad y calidad del recurso subterráneo y las fuentes, usos y movimiento del agua en los sistemas acuíferos transfronterizos incorporando el ciclo hidrológico completo y la escala de la evaluación que se propone. Los componentes de una evaluación son un proceso recursivo (Fig. 6.1.) que requiere

coordinación e integración combinada con cooperación a múltiples niveles en un escenario transfronterizo.

La estimación del balance hidrológico y el análisis respectivo de sostenibilidad son parte integral del proceso de evaluación (Alley, 2006, Alley and Leake, 2004, Alley et al., 1999). En forma adicional, la evaluación del acuífero transfronterizo requiere de la evaluación de los componentes de agua superficial y subterránea como un solo recurso a lo largo de la cuenca transfronteriza (Hanson et al., 2010a; Winter et al., 1998).

La evaluación científica de la disponibilidad de agua subterránea incluye los cinco ejes prioritarios distribuidos en el gráfico de disponibilidad de agua subterránea transfronteriza de la figura 6.1, aunque no está restringida a ellos. Cada uno de estos pasos y actividades asociadas están descritas brevemente en las siguientes secciones.

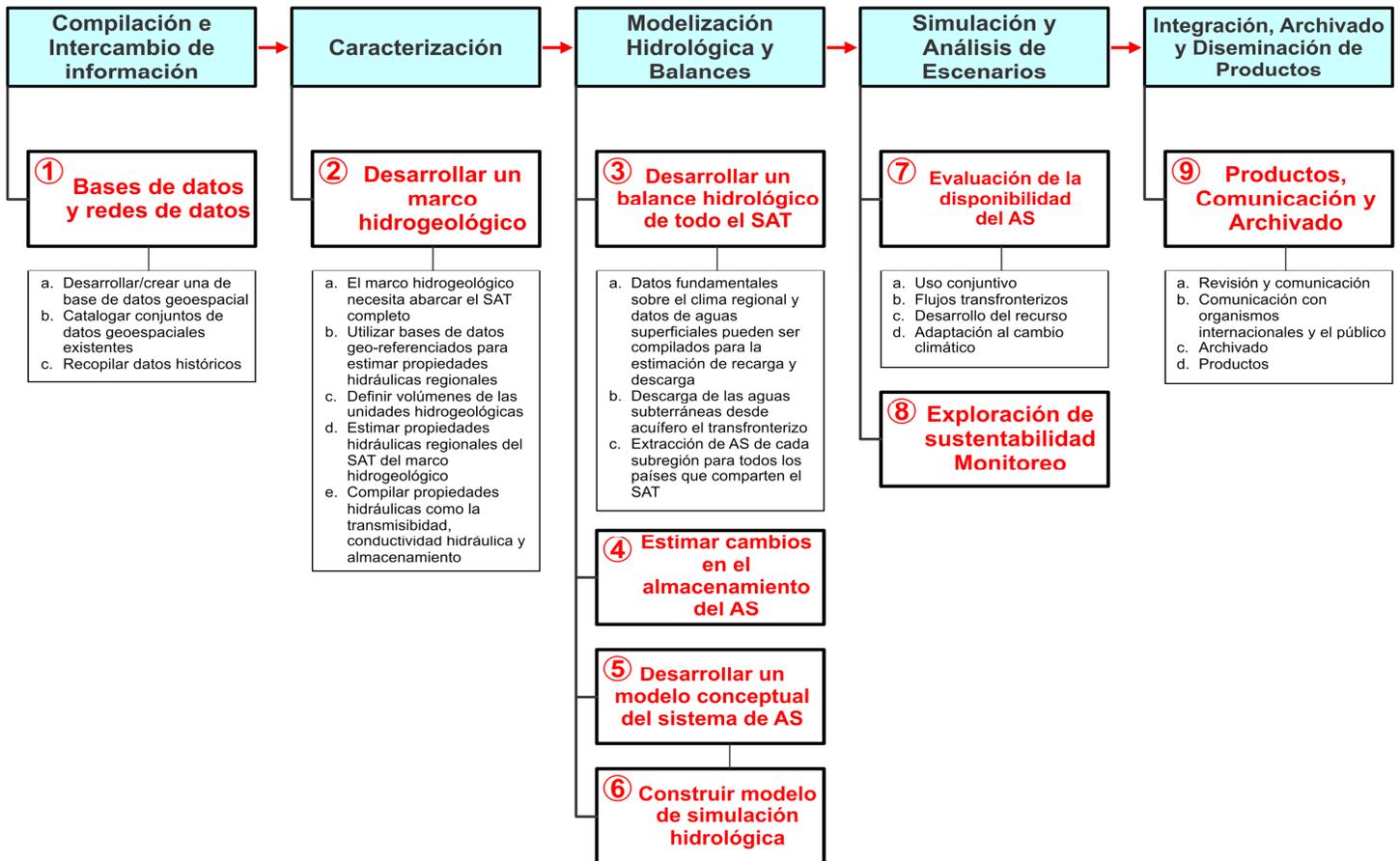


Figura 6.1 Etapas de evaluación de la disponibilidad de agua subterránea de un SAT.

### 6.2.1 Modelo conceptual y escala de evaluación

Como paso inicial, es necesario definir el modelo conceptual y la escala de evaluación del SAT como base para plantear el balance hidrológico de aguas subterráneas que se utiliza para la gestión integrada del mismo. En general, lo deseable es que los recursos

hídricos sean objeto de una gestión integrada, orientada a su manejo sostenible, y que los estudios básicos consideren toda su extensión.

La gestión integrada no debe considerar a los sistemas acuíferos como elementos aislados en el subsuelo, sino como el componente subterráneo del ciclo hidrológico que guarda una estrecha relación con sus componentes superficiales, lo cual significa que para fundamentar técnicamente el manejo sostenible de los acuíferos se requiere de estudios interdisciplinarios que conducen a la gestión integrada de los recursos superficiales y subterráneos.

La escala de evaluación puede o no incluir a toda la cuenca de la que forma parte el SAT. Específicamente, en los SAT de gran extensión – de cientos o miles de kilómetros cuadrados- su evaluación integral puede no ser viable en el corto o mediano plazo, porque el costo y el tiempo requeridos para obtener el conocimiento básico pueden ser muy grandes.

En particular, en relación con uno de los objetivos principales del programa ISARM: la prevención o mitigación de conflictos transfronterizos; el estudio conjunto de todo el SAT puede no ser necesario. Asimismo, cuando la magnitud de las demandas de agua es reducida en comparación con la disponibilidad del recurso, el estudio completo del SAT puede no ser prioritario para uno o varios de los países que lo comparten.

En varias de las regiones del continente americano, principalmente en Sudamérica, los SAT de gran extensión se pueden dividir en varios subsistemas relativamente independientes entre sí y uno o varios subsistemas regionales profundos.

En algunos de ellos, por sus características y distancia hasta las fronteras internacionales, el desarrollo de los recursos hídricos subterráneos puede no tener influencia o impacto alguno sobre las porciones del SAT correspondientes a los países vecinos. En los subsistemas regionales profundos el tránsito del agua en el subsuelo y, en su caso, la propagación de los efectos generados por las actividades humanas suelen ser tan lentos, que para fines prácticos estos no son identificables o no pueden ser diferenciados de los provocados por causas naturales ocurridas a escalas de tiempo mayores que la humana.

Los aspectos anteriores deben ser considerados previamente en la definición de la escala de evaluación y del alcance de los estudios a emprender conjuntamente por los países que comparten el SAT. En todo caso, es obvio que los estudios deberían concentrarse, en principio, en las porciones fronterizas internacionales de los SAT.

Fuera de estas porciones de interés común, el estudio del resto del SAT podría ser realizada gradualmente, en forma independiente por cada país en su propia porción o en colaboración, según se acuerde en cada caso. Sin embargo, en última instancia la escala y el detalle de los estudios debe dar lugar a un sistema de herramientas de análisis que sean capaces de ser precisas en todas partes a nivel de los cambios en los recursos hídricos que requieren una gestión sostenible.

La escala va ligada a la cantidad mínima de información necesaria para formular el modelo conceptual y las subsiguientes etapas de evaluación a los fines del planteo de escenarios.

## 6.2.2 Disponibilidad de agua subterránea

A primera vista, el concepto “disponibilidad de agua subterránea” parece obvio y, dentro del ámbito de los recursos hídricos, sugiere que se trata de un volumen de agua que está “disponible” en forma sostenible a una tasa “razonable” de extracción.

Sin embargo, es subjetivo y tan general que resulta vago y puede prestarse a confusión, aun entre los especialistas en la materia, sobre todo cuando se maneja dentro de un contexto continental o mundial en que, por una parte, hay diferencias en la terminología y criterios de manejo del recurso hídrico adoptados por los especialistas, y por otra, hay numerosos actores que intervienen en la gestión del mismo que no son especialistas en la materia o, aún más, que no son técnicos.

En efecto, el término podría interpretarse también como el volumen total de agua contenido por un acuífero, el volumen renovable del mismo, el volumen de agua de buena calidad, el volumen de agua accesible con infraestructura, etc.

En el presente documento se entenderá por “disponibilidad de agua subterránea”, al volumen medio anual de agua (tasa de extracción) que, a largo plazo, puede extraerse de un acuífero (SAT) en forma sostenible, sin mermar su reserva almacenada o la calidad del agua, y sin provocar efectos perjudiciales transfronterizos.

En cada caso, ese volumen será determinado por cada uno de los países que comparten un SAT, para la porción que les corresponde, considerando tanto su recarga media natural como las modificaciones incidentales, intencionales o naturales de la misma, que se deriven del desarrollo de la cuenca, de la explotación y manejo del SAT, de la construcción de infraestructura hidráulica o de variación climática global y flujos transfronterizos.

Con base en estas estimaciones parciales, se integrará la disponibilidad de agua de la unidad completa para orientar el manejo del SAT en los aspectos que sean de interés común para los países que lo comparten. La figura 6.2 representa un diagrama de los elementos de un modelo conceptual de desarrollo sostenible para un SAT. Ese diagrama es un prototipo de modelo conceptual propuesto para un SAT, el modelo muestra un balance entre la disponibilidad del agua subterránea y los beneficios que se pueden derivar de su uso.

**La disponibilidad de agua subterránea es el volumen medio anual de agua (tasa de extracción) que, a largo plazo, puede extraerse de un SAT en forma sostenible, sin mermar su reserva almacenada o la calidad del agua, y sin provocar efectos perjudiciales transfronterizos.**

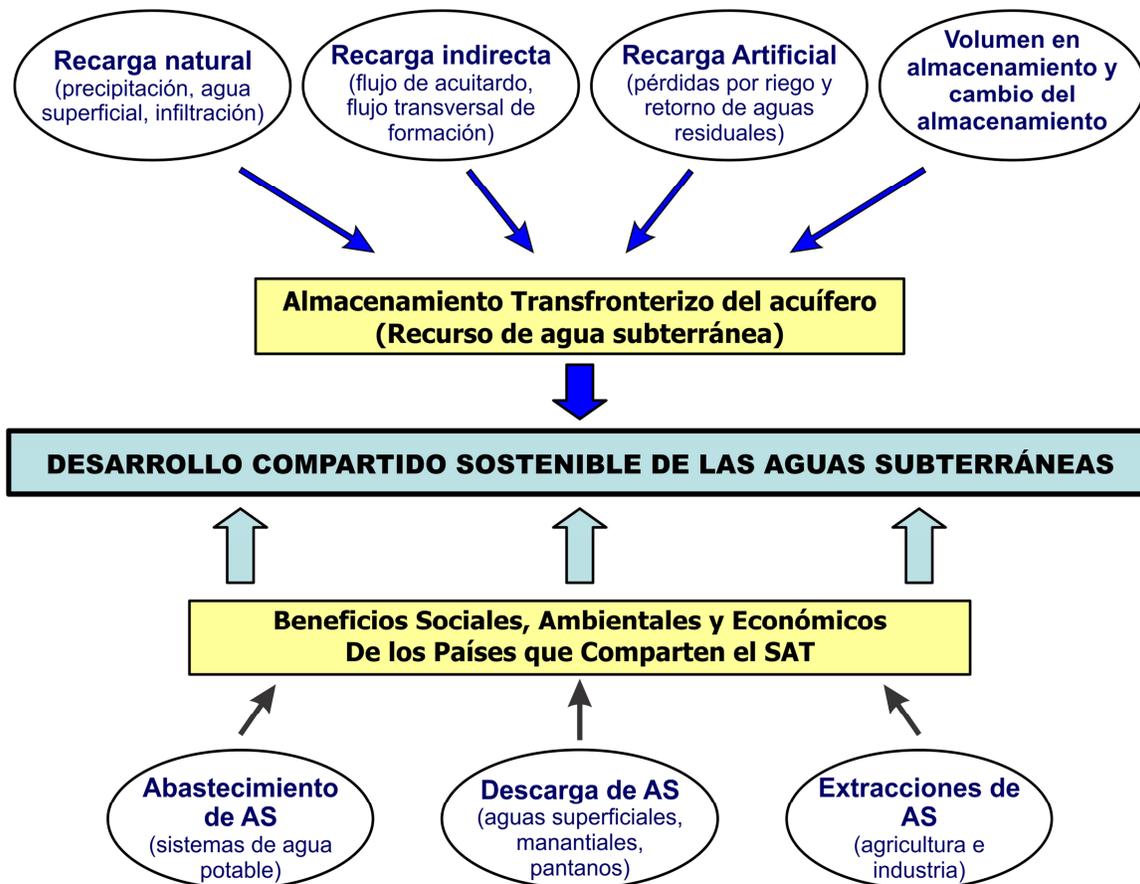


Figura 6.2 Diagrama de elementos de un modelo conceptual de desarrollo sostenible para un SAT (Rivera et al., 2009; modificado y traducido de Hiscock et al., 2002).

El análisis científico de la disponibilidad del agua subterránea en un acuífero transfronterizo incluye un análisis completo del ciclo hidrológico de los caudales del sistema completo en la región de la cuenca que alberga el SAT. Este incluye el clima, el movimiento del agua superficial y los usos a lo largo del área, así como el cuantificar el agua subterránea presente en el acuífero por medio de redes de monitoreo y herramientas de simulación que permitan tener un estimado del recurso hídrico tanto espacial como temporal.

Las herramientas hidrológicas de simulación tales como los modelos numéricos combinados con las redes de monitoreo son necesarios para la evaluación y control de los impactos futuros ocasionados por el hombre y los cambios en el ambiente (tales como urbanismo y clima) sobre los acuíferos. Las redes de monitoreo también aportan datos críticos y tiempos de observación para mantener y calibrar el modelo hidrológico regional, y a cambio estas herramientas de modelación y análisis proveen información para estimar que tan adecuadas son las redes de monitoreo actuales y potenciales.

### ***Redes de datos – monitoreo, recopilación e intercambio de información***

Obviamente, el primer paso para la evaluación de los SAT es la recopilación de la información existente en estudios y su integración en redes de datos que faciliten su procesamiento, y que proporcionen elementos para la evaluación y la gestión integrada del recurso hídrico. Es común que en la mayoría de los países se disponga de estudios de sus acuíferos, de diferente nivel y con diferentes objetivos, aunque no consideren específicamente aspectos transfronterizos, y que se disponga también de exploraciones o estudios del marco geológico superficial y subterráneo, realizados en el contexto de la explotación petrolera, geotérmica, minera o de otros afines.

Como punto de partida, estos estudios contienen información valiosa que puede ser reinterpretada y procesada para su aplicación a los estudios hidrogeológicos. Por esto, es recomendable que cada uno de los países que comparten un SAT lleven a cabo la recopilación de la información y de los estudios disponibles, tanto hidrogeológicos como de otros afines, que puedan contener material de utilidad para los estudios conjuntos que sea necesario realizar para los fines del ISARM.

En lo posible, es conveniente que las partes involucradas acuerden formatos y marcos de referencia comunes para facilitar la correlación de información, especialmente en las fajas fronterizas; de preferencia, es conveniente que la información esté georeferenciada e incorporada en sistemas de información geográfica (SIG) para facilitar su correlación y la integración de conjuntos de datos similares. Es muy recomendable que estas redes o bases de datos sean permanentemente actualizadas, no sólo durante la ejecución de los estudios conjuntos sino, en adelante, para dar seguimiento a las etapas subsecuentes de la gestión de los SAT.

La recopilación y el intercambio de información son uno de los primeros y más importantes pasos para una evaluación (Fig. 6.1, paso 1). Esta recopilación e intercambio permiten analizar las redes de información y determinar si son adecuadas. También ayuda a la organización de la información necesaria para la evaluación de la cantidad y cambios en los recursos hídricos (Fig. 6.5) así como para evaluar la disponibilidad de agua subterránea y su vulnerabilidad.

Otros requisitos para monitorear los datos pueden incluir el tener que seguir las regulaciones de los gobiernos locales o las obligaciones existentes en acuerdos transfronterizos o el apoyar la información generada necesaria para mantener los modelos transfronterizos vigentes. Las necesidades de información están también sujetas al paradigma fundamental de su utilización en la gestión y protección el recurso hídrico.

Las redes de datos son necesarias para la protección del acuífero, la protección ambiental y la del hombre; o una combinación de estos en diferentes sub-regiones de la cuenca transfronteriza. Por otro lado, la protección del ser humano se puede manifestar fundamentalmente por medio de la protección de los pozos y las restricciones para eliminar el agua residual. Sin embargo, la habilidad para desarrollar las redes de datos coordinadas dará las bases para la gestión del recurso y para el proceso de toma de decisiones que apoya estos objetivos potenciales.

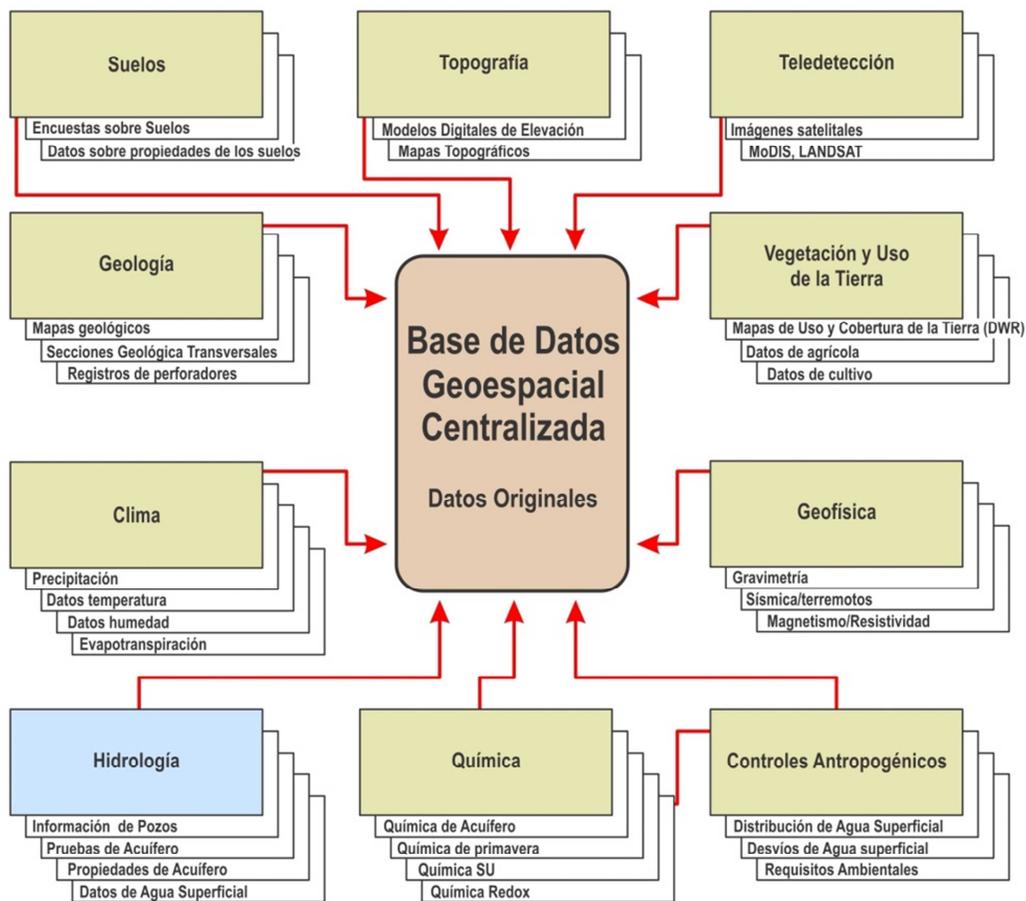


Figura 6.3 Gráfico que muestra la diversidad potencial de tipos de datos y categorías incluídas en la base de datos geoespacial centralizada (traducido de Faunt et al., 2009).

Las redes de datos también necesitan apoyar la evaluación del modelo conceptual y el balance hídrico del SAT. Respecto al uso y movimiento del agua, estos datos necesitan específicamente estar dirigidos a la disponibilidad del recurso, y en cuanto a la calidad del agua estos datos deben tomar en cuenta la vulnerabilidad del agua para consumo humano, para la agricultura y para los ecosistemas.

Muchas redes también sirven como instrumento para evaluar el seguimiento de acuerdos dentro del panorama transfronterizo. Por consiguiente, estas redes son necesarias para apoyar los modelos hidrológicos y de gestión que son usados para la evaluación y deben mantenerse actualizadas (caudales de entrada, caudales de salida, niveles, etc.) y como comparación de los resultados durante los procesos de simulación y análisis.

Las redes de monitoreo deberán ser evaluadas para que puedan suministrar la información necesaria para atender a los actuales desafíos de la gestión y sostenibilidad de los recursos hídricos. Dicho análisis puede ser usado también para identificar vacíos de información y para la selección de futuras redes de monitoreo.

Las necesidades de datos para las redes de monitoreo o como insumo para modelos pueden también ser usados para evaluar una serie de escenarios de sostenibilidad del recurso en cada país. Combinado con un análisis estadístico y de sensibilidad, la cuantificación de incertidumbres de la combinación de redes de datos y de modelos puede ser usada para determinar qué tipo de datos en diferentes ubicaciones pueden suministrar información (o disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones usada como modelo) relacionada con problemas hidrológicos.

Las redes de datos básicos que apoyan el mantenimiento del balance hidrológico y que proveen información a los modelos regionales de flujo hidrológico deberán incluir redes climáticas, geográficas, geológicas, geopolíticas, ambientales, hidráulicas, hidrológicas y de calidad de agua. Todos estos componentes incluyen componentes espaciales y temporales que necesitan ser armonizados e integrados a lo largo de la cuenca transfronteriza (Fig. 6.4.).

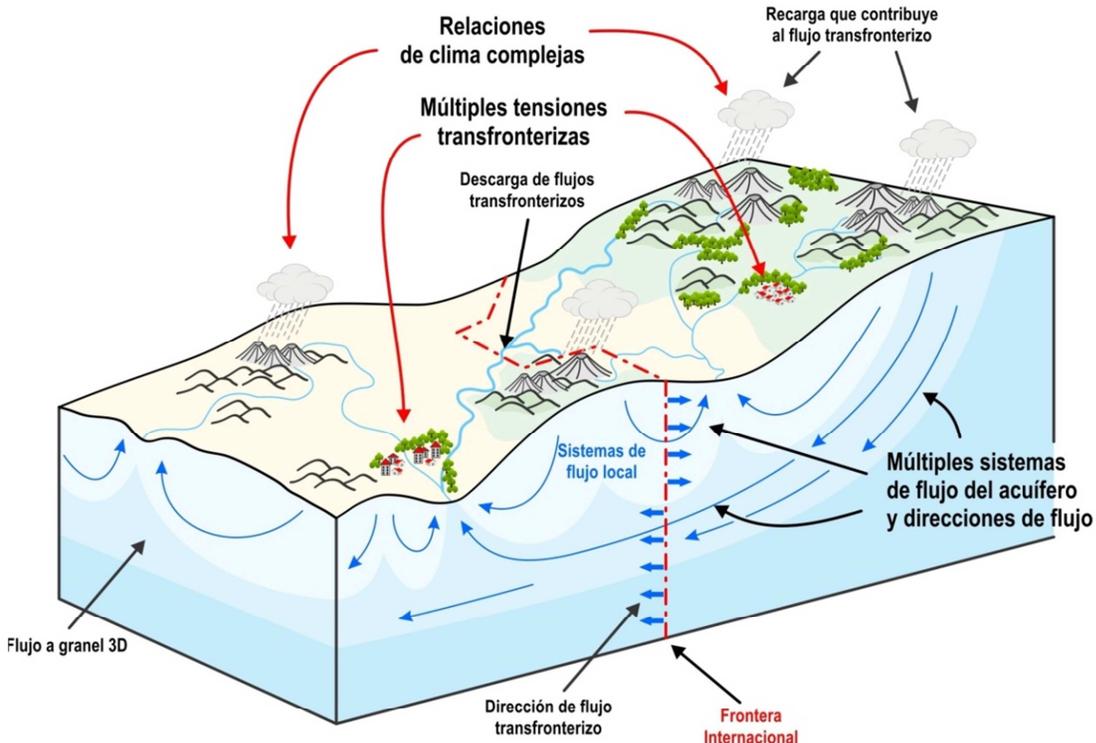


Figura 6.4 Diagrama de los componentes seleccionados dentro de un sistema hidrológico regional transfronterizo (modificado y traducido de Puri y Arnold, 2002).

**Redes de datos climáticos:** Las redes de datos climáticos pueden incluir datos básicos del clima tales como precipitaciones, temperaturas, humedad, albedo (radiación solar de onda corta), y sus primeros derivados potenciales y relativos tales como evapotranspiración, evaporación y humedad relativa. Adicionalmente, las redes climáticas pueden también representar el monitoreo de otros componentes en la

hidrosfera y biosfera que están sujetos a los efectos del clima y como tales proveen indicadores secundarios de la conexión entre la variabilidad y el cambio climático con otros componentes de la cuenca transfronteriza y en particular de la conexión con el agua subterránea (Alley, 2001; Hanson et al., 2004, 2006; Gurdak et al., 2009; Slack and Landwehr, 1992).

**Redes de datos geográficos:** Cualquier red de datos que provea información adicional para definir cambios en la vegetación y uso de la tierra, tipo de cosechas, o urbanismo, es útil para definir las condiciones cambiantes que tendrán impacto en el balance hidrológico o en la simulación del acuífero transfronterizo. Esto puede incluir fotografías aéreas, datos obtenidos por sensores remotos tales como MODIS, LANDSAT o TOPS (Nemani et al., 2002, 2003, 2007; Senay et al., 2007; Gowda et al., 2008) que pueden ser usados para apoyar el balance, así como los datos comparativos provenientes del modelo hidrológico y del análisis de monitoreo.

**Redes de datos geológicos:** Estas redes pueden incluir redes sísmicas para una representación avanzada de fallas que puedan actuar como barreras del flujo en el acuífero transfronterizo, Radar de apertura sintética interferométrica (InSAR) que puede ser usado para monitorear la subsidencia del suelo debido al bombeo del agua subterránea y ayudar a representar las fallas y otras estructuras que controlan los caudales de agua subterránea en los sistemas de acuíferos regionales. (Galloway y Hoffmann, 2006).

**Redes de datos geopolíticos:** Estas redes de datos deberían incluir cualquier dato temporal y geoespacial que represente la jerarquía o distribución en los usos y movimientos de agua. Esta red de datos incluiría también información sobre censos necesarios para seguir los pasos en la urbanización, usos de la tierra o nuevas parcelas que representen unidades de agua contabilizables, tales como *proveedores de agua* o distritos de riego u otras áreas de distribución de agua necesarias para monitoreo o simulación del SAT o la representación de las regiones de usos de agua formales o informales.

**Redes de datos ambientales:** Las redes ambientales pueden incluir datos que agrupen la vegetación natural y ribereña que también contribuye a los flujos de entrada y salida del balance hidrológico del SAT. Estas redes pueden también incluir cualquier monitoreo de caudales de reserva para peces u otros requerimientos que puedan limitar los cambios potenciales inducidos por el uso conjunto del SAT.

**Redes de datos hidráulicos:** La distribución de datos que representan el flujo de embalses o desviaciones provenientes de redes por medio de canales o por irrigación. La recopilación de las propiedades hidráulicas del acuífero también puede ser complementada por cualquier adquisición de datos de comportamiento de pozos que esté llevándose a cabo y que pueda ser adquirida por compañías eléctricas o locales proveedores de agua. Esta información puede ser usada para apoyar simulación de bombeo y de propiedades del acuífero.

**Redes de datos hidrológicos:** Estos datos incluyen caudales, etapas y salidas de reservorios, desviación de caudales e irrigación o caudales de retorno, niveles del agua subterránea, recargas artificiales y bombeo del agua subterránea. Estas redes pueden proporcionar actualizaciones automáticas e información actual para operaciones, planificación y para simulación hidrológica.

**Redes de calidad de agua:** Datos sobre el monitoreo de agua para consumo humano y para agricultura necesarios para estimar la vulnerabilidad así como la calidad del suministro de agua potable e irrigación. Programas de muestreo sistemático, geoindicadores adicionales tales como isótopos seleccionados y atributos químicos para luego representar la edad del recurso, y el movimiento del agua subterránea y partes relacionadas a los extremos finales de las fuentes de recarga y descarga. Hay numerosos programas que ejemplifican este tipo de muestreo y análisis sistemático tales como el programa NAWQA (NAWQA, 2010) usado en EUA y el programa GAMA en California (Kulongoski y Belitz, 2004; Belitz et al., 2003) que provee análisis y síntesis apoyando una evaluación regional de la calidad y caudal de las aguas subterráneas.

### **Caracterización**

Una vez acordado/establecido si se considera el SAT en toda su extensión o sólo una porción del mismo, se procede a definir los límites de la zona a caracterizar (Fig. 6.1, paso 2). En rigor, estos deberían ser los límites físicos o divisorios de aguas subterráneas de los acuíferos; sin embargo, a diferencia de los divisorios de aguas superficiales, que son fáciles de trazar a partir de mapas topográficos, en el subsuelo su definición es muy incierta en la mayoría de los casos, pues no necesariamente coinciden con los superficiales y, generalmente, están ubicados en terrenos montañosos donde la exploración y el monitoreo hidrogeológico directo puede ser dificultosa en algunas situaciones, debido al predominio de rocas consolidadas y por la dificultad de acceso a terrenos de topografía abrupta.

Por lo anterior, salvo cuando los límites físicos están bien definidos por formaciones geológicas que pueden considerarse prácticamente impermeables, los límites del SAT pueden ser definidos en forma convencional, utilizando una combinación de límites topográficos, estructurales, y geológicos, especialmente en las porciones del mismo muy alejadas de las fronteras internacionales de que se trate.

Para el caso de acuíferos someros, la extensión espacial de estudio de un SAT se puede definir mediante la aplicación de la percepción remota, basada en la interpretación de imágenes de satélite procesadas con software de desarrollo relativamente reciente. De esa forma, se pueden detectar rasgos geológicos estructurales regionales, no fácilmente apreciables en fotografías aéreas de mucha menor altura y cobertura geográfica, que sean determinantes en el patrón de flujo subterráneo regional en forma indirecta.

En relación con el ISARM, es obvio que esta caracterización debe ser más detallada en las porciones fronterizas de los SAT. Específicamente, las actividades recomendadas a desarrollar un marco hidrogeológico son (Fig. 6.1, paso 2):

**Definir su alcance** – Un marco hidrogeológico necesita abarcar el acuífero transfronterizo en su totalidad a través de fronteras provinciales e internacionales. La recopilación de estudios interpretativos de la estructura de las unidades estratigráficas, la identificación de fronteras de la unidad geológica a partir de pozos y secciones verticales, y mapas geológicos de afloramientos, suministran información inicial del modelo hidrogeológico (geodatabase). El marco inicial puede ser construido desde la recopilación y reconciliación de estudios previos de cada país lo que permitirá identificar

diferencias potenciales entre las convenciones y el mapeo de las unidades hidrogeológicas.

**Construcción de base de datos geológicos** – La recopilación de una base de datos geológica y litológica, proveniente de los pozos ayudara a refinar la distribución regional y local para el mapeo hidráulico dentro de una unidad hidrogeológica mayor del SAT; esta ayuda a diferenciar o identificar controles estructurales tales como barreras o canales hacia caudales regionales y calidad de agua, la extracción de datos geológicos también ayuda a identificar áreas potenciales de recarga y descarga.

**Definir volumen, límites y extensión de los acuíferos** – Los volúmenes de las unidades hidrogeológicas están definidos por las estructuras superficiales y cualquier límite de afloramientos o límites verticales dentro del acuífero. Estas superficies y límites pueden ser regionalizadas con respecto a una discretización de mallas del modelo hidrológico regional, y necesita ser consistente con el modelo conceptual del ciclo hidrológico de los acuíferos transfronterizos en su totalidad.

**Estimación de las propiedades del acuífero** – Estimación regional de las propiedades hidráulicas del acuífero y las unidades confinadas del marco hidrogeológico junto a las zonas subregionales dentro de cada unidad que puede controlar aspectos de los balance de agua, el caudal subterráneo, las interacciones entre agua subterránea y superficial, o la calidad de agua.

**Recopilación de datos sobre propiedades hidráulicas** – La recopilación de datos relativos a las propiedades hidráulicas tales como transmisividad, la conductividad hidráulica y el almacenamiento, así como capacidad de pozos, son necesarias para calibrar y dimensionar el balance regional dentro de cada unidad hidro-estratigráfica, así como para suministrar observaciones para calibrar el modelo hidrológico transfronterizo.

### ***Balance hidrológico y modelación***

El desarrollo de un balance hidrológico completo dentro de la cuenca transfronteriza debe integrar la información del monitoreo, el modelo conceptual y los modelos hidrológicos que son usados para la evaluación del SAT (Figura 6., paso 3).

El modelo conceptual puede ser una representación simplificada del acuífero transfronterizo, sin embargo, este debe contener suficiente detalle para asegurar que el comportamiento general del sistema está representado y todos los componentes estén cuantificados. Identificar y catalogar los caudales de entrada y de salida, suministran una base para construir el balance hidrológico. El balance hidrológico puede incluir componentes de recarga y descarga de sistemas de caudales locales y regionales y de múltiples acuíferos, así como cambios relacionados en el almacenamiento del agua subterránea (Fig. 6.2).

En algunos casos es necesario conocer los balances previos y posteriores del SAT para evaluar como el uso y movimiento de los recursos ha cambiado, y para evaluar la magnitud relativa y relaciones esenciales entre los componentes de los diferentes caudales. Una contabilidad subregional puede ser necesaria para regiones con recarga y descarga muy locales, o con caudales de ingreso y egreso antropogénicos provocados por usos de suelo y agua.

Los balances hidrológicos derivados de redes de monitoreo, datos derivados de sensores remotos, o en combinación con modelos hidrológicos requieren los componentes esenciales listados abajo para desarrollar un modelo conceptual del sistema de agua subterránea (Fig. 6.1, paso 5):

**Recarga y descarga** – La estimación de caudales de entrada y de salida, así como los datos para un modelo hidrológico regional, empieza con estimar la conexión del agua subterránea con las otras partes de la hidrosfera por medio de datos del recurso sobre clima y superficie. La evolución de la recarga por precipitaciones y pérdida de caudales, descargas ocasionadas por evapotranspiración y el aumento de caudales en el área del acuífero transfronterizo, pueden ser definidas usando datos de uso de la tierra combinados con datos meteorológicos y de clima extraídos de redes de información de suelos y de sensores remotos. (Nemani et al, 2002, 2003, 2007; Senay y otros, 2007; Gowda et al., 2008). La descarga de aguas subterráneas puede tomar la forma de caudales de superficie o sub-superficie, hasta capturar la descarga natural proveniente del acuífero transfronterizo hacia corrientes, manantiales, estuarios, el océano o caudales de salida de estas aguas subterráneas hacia otros acuíferos por medio de pozos o como flujo adyacente a cuencas de agua subterránea. El bombeo y la evapotranspiración directa de agua subterránea pueden también contribuir a la disminución de agua subterránea de un SAT debido a uso de la tierra, por labores agrícolas, de forma natural, o por desarrollo urbano.

**Almacenamiento de agua subterránea**– La estimación de los cambios en el almacenamiento de agua también son necesarios para el balance hidrológico inicial (Fig. 6.1, paso 4). La estimación de pérdidas en el almacenaje debido a la subsidencia o a pérdidas por intrusión salina, tal como agua del mar, también necesitara ser tomada en cuenta como parte de los cambios en el agua almacenada, los cuales pueden no ser observados en los niveles de agua. Cambios adicionales en el agua almacenada pueden ser derivados de tendencias y ciclos periódicos relacionados con el cambio o la variabilidad climática (Kumar and Duffy, 2009; Gurdak et al., 2007, 2009; Hanson et al., 2004, 2006). Estas tendencias y ciclos necesitan ser comparados con las lluvias, el clima, uso de la tierra y disminución de las aguas subterráneas para evaluar los cambios en el agua almacenada y obtener un mejor conocimiento esencial de las frecuencias en el sistema regional de flujos relativos al clima y actividades de desarrollo (Hanson and Dettinger, 2005; Dickinson et al., 2004) que afectan la interacción entre los ciclos naturales de recarga y descarga y los ciclos antropogénicos de la oferta y la demanda.

Un modelo hidrológico completo de simulación numérica de un SAT puede ser utilizado como una herramienta para estimar sistemáticamente el balance hidrológico (Fig. 6.1, paso 6). La modelación también ayuda a entender la totalidad de los flujos de entrada y salida del sistema de aguas subterráneas en el contexto del ciclo hidrológico completo del SAT. La construcción y calibración con datos históricos de un modelo hidrológico regional integrado ayuda a organizar, analizar y comparar los datos existentes dado que los componentes de un modelo conceptual están representados y cuantificados en el modelo hidrológico (Fig. 6.5). La calibración del modelo ayuda a evaluar el uso histórico y el movimiento del agua para cada componente, identificando el estado actual de los recursos hídricos, y clasificar las propiedades importantes y los flujos. La modelación también puede ayudar a evaluar los cambios en caudales y disponibilidad del agua para usos futuros.

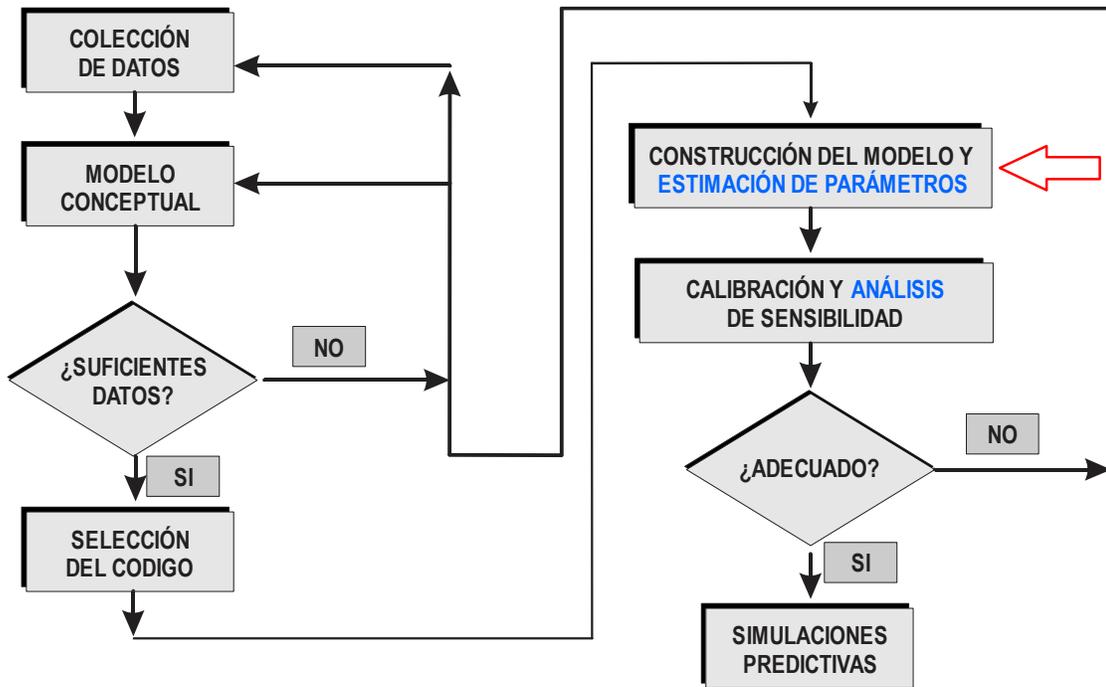


Figura 6.5 Diagrama ilustrando el proceso de evaluación del recurso que combina recolección de datos, modelo conceptual, modelo numérico y análisis relacionado (modificado de ASTM, 1993).

El **CUADRO 6-1** proporciona más detalle en estos tipos de modelos.

### **CUADRO 6-1 Modelos de simulación hidrológica**

Los balances hidrológicos para sistemas complejos son mejor evaluados con un modelo integrado que simula todos los componentes de interés. Esto puede ser logrado con un modelo hidrológico que vincule en su totalidad el movimiento y el uso de los componentes determinados por la demanda y limitados por las provisiones de un sistema hidrológico. Hay un grupo de modelos hidrológicos que incluyen la simulación del uso conjuntivo natural y antropogénico y sus efectos en la dinámica del agua subterránea dentro del ciclo hidrológico, incluyendo el uso y movimiento de precipitaciones, aguas superficiales, procesos de uso terrestre basado en escurrimiento, uso consumativo de vegetación natural, así como de las demandas agrícolas y urbanas.

Asimismo, estos modelos pueden ser usados para responder a problemas transfronterizos específicos, como lo son las interacciones de aguas superficiales/aguas subterráneas (Schmid y Hanson, 2007) o cambios potenciales en la calidad del agua (como el avance del agua marina o la contaminación del agua subterránea), que podrían ser importantes en la disponibilidad de agua subterránea fresca para la agricultura costera y áreas urbanas. Los avances en la modelación numérica serán usados para tratar alguna de las preguntas relacionadas con la disponibilidad del agua, pero la complejidad del modelo sólo habrá de ser incrementada si puede mejorar nuestro entendimiento del sistema o cubrir algunas cuestiones transfronterizas específicas. Numerosos modelos hidrológicos están disponibles gratuitamente, como MODFLOW (Harbaugh, 2005), así como también modelos hidrológicos integrados como MODFLOW-FMP (Hanson y otros., 2010a; Schmid y Hanson, 2009) o GSFLOW (Markstrom y otros, 2008) que pueden ser usados en el desarrollo de un modelo hidrológico transfronterizo. Tales modelos son un marco útil para el análisis de la sostenibilidad pues integran y vinculan los procesos hidrológicos y proporcionan un contexto de suministro limitado y determinado por la demanda de uso conjuntivo. (Hanson y otros, 2010a).

#### **Simulación y análisis de escenarios**

La evaluación de la *disponibilidad del agua subterránea* por medio de la simulación proporciona un método sistemático para evaluar escenarios seleccionados o componentes de caudales de interés para la gestión del recurso transfronterizo (fig. 6.1, paso 7). El uso de un modelo hidrológico puede ayudar a responder algunas de las preguntas más complicadas cuando los efectos de procesos ligados entre si son simulados en forma conjunta. El análisis de escenarios pueden ser realizados con escenarios fijos o se pueden usar componentes para evaluar proyectos o políticas seleccionadas. El análisis con modelación también puede ser evaluado con técnicas optimizadas insertadas dentro del modelo hidrológico tal como el análisis para agricultura usando MODFLOW con el Proceso de Granjas (Schmid y Hanson, 2009) o el análisis para suministro de agua usando MODFLOW para la gestión subterránea (Ahlfeld et al., 2005). Ejemplos de un análisis de escenario transfronterizo incluyen:

**Uso conjuntivo:** el cuantificar las interacciones del agua subterránea - agua superficial puede ayudar a evaluar la captura y reducción de la descarga hacia corrientes y manantiales como resultado de un aumento en pérdidas de agua subterránea y cambios en el uso de la tierra (Schmid y Hanson, 2007; Hanson et al., 2010a).

**Caudales transfronterizos:** cuantificar los efectos del incremento en pérdidas en agua subterránea puede ayudar a evaluar el movimiento potencial de los límites del agua

subterránea y cuantificar el caudal a través de las subregiones transfronterizas en los países, relacionados con población y cambios en el uso del suelo. Ejemplos de caudales transfronterizos incluyen el Yrenda – Toba – Tarijeño SAT de América del Sur (Tujchneider et al., 2011b) o el Hueco Bolson de América del Norte (Eastoe et al., 2010; Anderholm and Heywood, 2003; Heywood y Yager, 2003).

**Desarrollo del recurso:** cuantificar la viabilidad y efectos de los proyectos potenciales de suministro de agua o de recargas. Por ejemplo, un modelo transfronterizo puede proporcionar un marco sistemático para evaluar el impacto de las pérdidas de agua al extraer el agua subterránea almacenada en el acuífero tal como en el Modelo del Bajo Río Grande del SAT Mesilla Bolsón y Bajo Río Grande. (Valdes and Maddock, 2010; SGM-MX, 2010) o en el SAT Guaraní (Foster et al., 2006).

**Adaptación al cambio climático:** el cambio y la variabilidad climática combinados con el aumento en la demanda de los servicios de agua es una de las causas más importantes de desigualdades entre la oferta y la demanda y la mayor amenaza para la sostenibilidad dentro del ciclo hidrológico de los SAT. Los temas de gestión, desarrollo y gobernanza pueden ser evaluados con respecto a ciclos climáticos en combinación con cambios climáticos potenciales. Ejemplos: el análisis del clima del acuífero regional de “Central Valley, California (Hanson et al., 2010b, 2012) o cambio y variabilidad climática de acuíferos transfronterizos (Tujchneider et al., 2011a; Kumar y Duffy, 2009; Hanson et al., 2006; Kim et al., 2006; Dickinson et al., 2004; Webb et al., 2004; Kim et al., 2002).

Los modelos hidrológicos también pueden ser utilizados para explorar la sostenibilidad del recurso y pueden ser usados durante la resolución de un conflicto sobre recursos compartidos (Fig. 6.1, paso 8). El modelo puede ser utilizado como una herramienta neutra para fomentar la comunicación entre los vecinos transfronterizos acerca de sus preocupaciones sobre la sostenibilidad de las extracciones de agua subterránea actuales o futuras relacionadas con algunos componentes de oferta y demanda del recurso. Este tipo de exploración da como resultado un desarrollo conjunto de políticas, o de gobernanza, una ayuda como guía para actividades anuales, para incrementar las inversiones por décadas y al desarrollo de proyectos de adaptación o mitigación (Hsieh et al., 2007; Hanson et al., 2004).

Es importante tener en cuenta que los modelos son una herramienta válida si se operan con un modelo conceptual correcto y si se cuenta con información básica y de calidad suficiente y necesaria. Asimismo, es importante validar estos modelos.

### ***Integración, ordenamiento y difusión de productos***

La información reunida durante la evaluación de un SAT y durante la gestión del recurso, después del análisis inicial, requiere de integración, uso y disseminación de los productos obtenidos. Los componentes de datos y análisis también requieren de un sistema integrado de comunicación, almacenamiento y archivo (Fig. 6.1, paso 9). Los pasos más importantes para este proceso incluyen:

**Revisiones integradas y comunicación técnica:** los científicos que desarrollan la evaluación deben elaborar reportes anuales o bi-anuales que idealmente deberían ser elevados a un comité de aplicaciones técnicas conformado por científicos y gestores (seleccionados por cada país dentro del SAT), y que pueda dar una guía técnica integradora, proveer insumos y lograr un consenso internacional acerca del análisis técnico efectuado al SAT durante las fases de diseño, investigación o de reportes.

**Comunicación con las agencias internacionales y el público:** deben considerarse instancias de presentación a la sociedad civil y grupos del sector privado, agencias locales, estatales, federales e internacionales para reunir e intercambiar información, así como recursos adicionales o coordinados con proyectos paralelos o en desarrollo. Presentaciones conjuntas en reuniones científicas internacionales, publicaciones, o páginas web que den transparencia a los estudios hidrológicos, y muestren una información y entendimiento unificado de los recursos hídricos deberán ser también recursos a tener en cuenta.

**Almacenamiento y archivo:** todos los datos geoespaciales básicos e interpretativos como los marcos geológicos, hidrológicos, climáticos y antropogénicos que sean utilizados para evaluar los recursos hídricos requieren de una ubicación común para que puedan ser compartidos y archivados. Toda la información de apoyo, herramientas para estimaciones y análisis, documentación utilizada para construir el modelo, actualizaciones, y evaluaciones del SAT por medio de un modelo hidrológico, deben estar ubicados en un sitio accesible donde estén archivados y puedan ser compartidos.

**Productos:** el reporte de los resultados es necesario para abarcar todos los niveles de investigación desde la documentación técnica del marco hidrológico, el modelo conceptual, análisis del balance hidrológico, documentación para construir y calibrar el modelo y los datos que fueron usados para el monitoreo y análisis del SAT. El Sistema de Información Geográfica (con meta datos) también es un producto necesario en cualquier investigación de un SAT. Un análisis sintético claro de la disponibilidad de agua subterránea para la comunidad técnica y para el público es también un producto muy importante para todos los que comparten el SAT.

### 6.2.3 Vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea

Una preocupación ambiental muy grande es la protección de la calidad del agua subterránea, un componente integral de la sostenibilidad del recurso compartido. Las causas que originan la contaminación del agua subterránea son variadas y numerosas, pudiendo ser naturales y/o antropogénicas. Una vez que la contaminación del acuífero es constatada será necesario restringir el bombeo de estos pozos. Si la contaminación del acuífero es de origen antropogénico, su recuperación es muy difícil y lenta.

Los contaminantes pueden ingresar al agua subterránea por filtración vertical desde la superficie, entrada directa al pozo, contaminación cruzada entre acuíferos por pozos abiertos en uno o más acuíferos, caudales contaminados con agua salina ya sea como resultado del bombeo o de interacciones con aguas de superficie. Los contaminantes que ocurren de forma natural pueden ser movilizados por cambios geoquímicos producto de la actividad humana, o ser desechos naturales dentro del mismo sistema de caudales regionales.

El concepto de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, es una medida relativa de la posibilidad que los contaminantes lleguen a una determinada ubicación dentro del sistema de agua subterránea en donde el agua es usada para un propósito particular.

Por consiguiente, se hace una distinción entre la contaminación por un producto específico, clase de contaminante, o por actividad del hombre y del ambiente (vulnerabilidad específica), y la vulnerabilidad determinada sin considerar las

propiedades y comportamiento de contaminantes en particular (vulnerabilidad intrínseca). Invariablemente, la evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación considera solo una gama de posibles medios de contaminación, usualmente estos son contaminantes introducidos por el hombre en superficie o cerca de ella desde fuentes no identificadas o distribuidas en el espacio.

Algunas veces otro tipo de información como las posibles fuentes de contaminación, áreas de pozos abandonados, sistemas informales de agua, drenaje agrícola, o pozos pueden prevalecer sobre los análisis más tradicionales de vulnerabilidad. La vulnerabilidad del agua subterránea (Fig. 6.7) ha sido definida como la posibilidad que los contaminantes alcancen una ubicación específica dentro de un sistema acuífero. Es decir, el nivel de agua más superficial del acuífero, el agua profunda, el pozo público, o el nivel en donde se produce un intercambio entre el agua del acuífero y el agua de superficie (U.S. National Research Council, 1993).

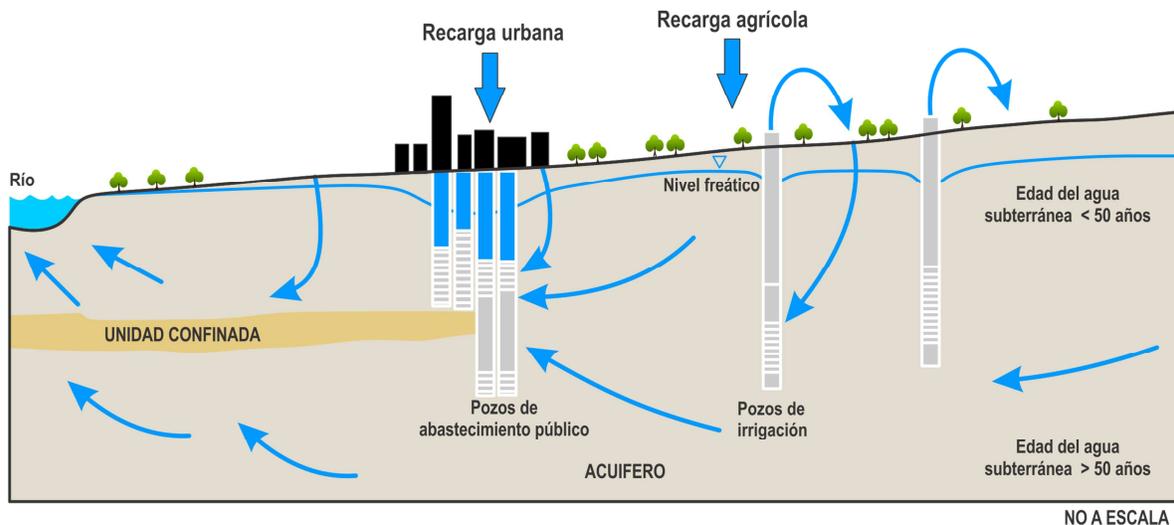


Figura 6.6 Diagrama que muestra los componentes de caudal y uso de la tierra que pueden incidir en la vulnerabilidad del agua subterránea (traducido de Ebers et al., 2005).

El caso mostrado en la figura 6.6 es un sistema acuífero en una zona urbana. El agua que entra por las rejillas de los pozos del sistema de abastecimiento público es de edades diferentes y provenientes de áreas distintas (dados los intervalos de las rejillas) lo que hace al sistema de pozos más vulnerable frente a la contaminación. En este ejemplo, las fuentes de la contaminación pueden incluir aquellas asociadas con actividades urbanas y agrícolas. En algunos casos, los propios materiales que componen el acuífero pueden ser fuente natural de contaminación como en el caso del arsénico.

Por ello una evaluación holística de la vulnerabilidad debe combinar la oferta de agua con una evaluación de los contaminantes naturales y componentes ambientales tales como el agua de superficie o el hábitat propio del recurso que también puede ser vulnerable a la contaminación natural o antropogénica.

**En términos simples, el concepto de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación es una medida relativa que implica la posibilidad de que los contaminantes alcancen un sitio específico dentro del sistema acuífero.**

### ***Factores que inciden en la vulnerabilidad***

Son muchos los factores que afectan la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. La zona vadosa es de especial importancia ya que representa la primera línea de defensa natural como atenuante potencial, como agente para descomponer o neutralizar contaminantes que puedan afectar al acuífero. La posibilidad que los contaminantes se cuele hasta la zona vadosa del acuífero depende de muchos factores, incluyendo la composición de materiales del suelo y de otros materiales geológicos, de la profundidad del agua en el acuífero, del índice de la recarga, y de factores ambientales que influyan el potencial de biodegradación.

Los procesos para eliminar los contaminantes continuarán cuando la zona de saturación haya sido alcanzada, pero la dilución y dispersión pueden volverse más importantes. En algunos escenarios, cambios abruptos de nivel causados por el bombeo del agua subterránea y de los caudales de pozos entre acuíferos pueden aumentar substancialmente el índice del movimiento de los contaminantes entre acuíferos (Clark et al., 2008).

Los acuíferos de menor antigüedad tienden a ser más vulnerables a la contaminación debido a su proximidad con los usos del suelo, con la zona de recarga y por las interacciones entre el agua superficial y la subterránea. En este sentido, las estimaciones de la edad del acuífero (tiempo desde la recarga) basados en medidas de huellas ambientales son comúnmente usadas como indicadores de vulnerabilidad intrínseca. La antigüedad y el monitoreo del acuífero más joven (< 50 años) usando trazadores geoquímicos o isotópicos ha aumentado nuestro conocimiento de la dinámica de los sistemas de agua subterránea (Cook and Herczeg, 1999). Los sistemas de flujos regionales pueden ser ahora clasificados por medio de un marco de sistemas de flujos y de pozos relacionados así como por flujos convergentes o divergentes; ya sea en capas dominadas por flujos horizontales, o compactados masivamente y contenidos por caudales verticales (Dawson et al., 2003).

**El CUADRO 6-2** describe la vulnerabilidad de un acuífero entre algunas unidades hidroestratigráficas.

## **CUADRO 6-2 Vulnerabilidad de un acuífero con diferentes unidades hidroestratigráficas**

Un factor natural clave en la vulnerabilidad de un acuífero es su litología y estratigrafía. Diferencias comparándolo con otras unidades: (1) sedimentos no consolidados y semiconsolidados, (2) arenisca, (3) rocas carbonatadas, (4) rocas volcánicas y (5) rocas intrusivas ígneas y metamorfoseadas.

*Los acuíferos que muestran sedimentos no consolidados y semiconsolidados comúnmente están entre los depósitos más superficiales que son los primeros en desarrollarse y son una fuente prevalente de agua subterránea.* El caudal de agua subterránea es primeramente por medio de porosidad intergranular. La conductividad hidráulica de los acuíferos es variable, dependiendo de cómo son sorteados los materiales del acuífero y de la cantidad de sedimentos y arcilla que estén presentes, pero generalmente es mayor que otros medios geológicos con la excepción de algunas piedras calizas de cavernas y caudales de lava. Los sedimentos no consolidados y semiconsolidados son susceptibles de contaminación debido por lo general a su alta conductividad hidráulica, a condiciones comunes no confinadas con niveles de agua subterránea posiblemente cercanas a la superficie del terreno, y una conexión hidráulica a unidades de agua superficiales. Las características hidráulicas y de vulnerabilidad varían de acuerdo a diversos escenarios geológicos incluyendo acuíferos que se surten de una cuenca, acuíferos costeros, acuíferos de valle y de depósitos glaciares. Las capas estratigráficas y de depósitos, facias deposicionales, y escenarios geológicos gobernarán la vulnerabilidad vertical y lateral de estos depósitos superficiales aluvionales.

*Los acuíferos de areniscas* se encuentran dispersos en América del Norte tales como el Dakota y Navajo y el Acuífero Guaraní en América del Sur. La compactación y cementado han reducido enormemente el espacio primario poroso y por lo tanto la piedra arenisca retiene solo una pequeña porción del espacio poroso intergranular que estaba presente antes que la roca estuviese consolidada. Aberturas secundarias, tales como uniones y fracturas, así como planos de estratificación contienen y transmiten la mayor parte del agua subterránea en arenisca. Debido a esto, la conductividad hidráulica de los acuíferos areniscos es baja a moderada, pero debido a que se extienden por áreas muy grandes, estos acuíferos pueden proveer grandes volúmenes de agua y pueden ser grandes acuíferos regionales. Debido a que la arenisca comúnmente está entremezclada o rodeada de roca sedimentaria o pizarra, el agua generalmente está confinada. Cuando se le expone a la superficie del suelo, estos acuíferos son vulnerables a la contaminación por medio del rápido movimiento del agua a lo largo de aberturas secundarias o desde el caudal del pozo o pozos que atraviesan capas múltiples del acuífero.

*Los acuíferos de Roca carbonatada* (caliza y dolomita) tienen una gama muy amplia de propiedades que transmiten el agua. Algunos no reciben casi agua y son considerados unidades confinadas, otros están entre los acuíferos más productivos tales como el Acuífero Madison en América del Norte y los acuíferos en las regiones transfronterizas del sur de México. Los ambientes en los que las rocas carbonatadas están depositadas varían desde llanuras de marea (tidal flats), arrecifes hasta cuencas profundas en el océano, resultando en porosidades primarias desde 1 al 50%. Los procesos de compactación, cimentación y dolomitización que pueden actuar sobre los depósitos al tiempo que se litifican pueden cambiar enormemente su porosidad y permeabilidad. En donde las rocas carbonatadas están expuestas a la superficie, la solución de las mismas genera una topografía kárstica, lo que se caracteriza por un pequeño drenaje en la superficie y por formas como sumideros y arroyos en hundimiento. Los contaminantes pueden rápidamente entrar y esparcirse a través de los acuíferos kársticos. Aun en terreno no kárstico, las rocas fracturadas carbonatadas pueden ser vulnerables a la contaminación. Asimismo, el bombeo en los acuíferos profundos carbonatados puede oxidar y movilizar contaminantes naturales tales como campos de pozos usados por la Ciudad de Chicago en la Cuenca de Illinois de América del Norte.

*Los acuíferos de roca volcánica* tienen una amplia gama de propiedades químicas e hidráulicas, debido mayormente a variaciones en el tipo de roca y a la forma en que la roca fue extraída y depositada. Rocas no alteradas piro clásticas, por ejemplo, pueden tener porosidad y permeabilidad como sedimentos pobremente acomodados. El material caliente piro clástico sin embargo, puede unirse al acomodarse y ser casi impermeables, excepto por fractura del caudal. Los caudales más masivos son generalmente impermeables, pero las zonas entre caudales pueden ser altamente transmisiva y productivas, ya que pueden contener fisuras frías, zonas de roca fragmentada, o material aluvial

entremezclado. Uniones en forma de columnas que se desarrollan en las partes centrales de los caudales basalto crean pasajes que permiten que el agua se mueva verticalmente a través de los tubos de basalto y lava y pueden proporcionar conductos laterales regionales similares a sistemas cavernosos en acuíferos carbonatados.

*Los acuíferos de roca cristalina de origen intrusivo ígneo y metamórfico comúnmente son utilizados como fuente de agua subterránea, debido a la falta de agua alternativa en algunas áreas.* Los pozos que originan son típicamente pequeños y el bajo almacenamiento de agua en los pozos hace que estos sean susceptibles a secarse en épocas de sequía. Particularmente en áreas húmedas, un manto de roca de lecho desgastada y aluvión sobreponiéndose a la roca dura fracturada puede convertirse en el principal almacén de agua subterránea y servir como el mayor factor para tener pozos a largo plazo. Debido a que los caudales de aguas subterráneas pueden ser rápidos al circular a través de las fracturas en las rocas cristalinas pueden ser susceptibles a la contaminación de fuentes en la superficie o por caudales de los pozos.

### ***Evaluaciones regionales de la vulnerabilidad***

Las evaluaciones de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación varían en su alcance y complejidad desde un ángulo muy simple, cualitativo y relativamente barato hasta una evaluación más rigurosa cuantitativa. Es importante reconocer las incertidumbres asociadas con todos los métodos, incluyendo los errores asociados con la recopilación de datos, variabilidades espaciales naturales y temporales, procesamiento de datos y digitalización, conversión a modelo conceptual, o ignorar posibles vías y fuentes de contaminantes tales como sales, metales y nitratos. Por ejemplo, grandes acuíferos transfronterizos tales como el Guaraní (Foster et al., 2006) y el Bajo Rio Grande (Moyer et al., 2011) son susceptibles de salinización, aguas termales, y contaminantes naturales potenciales tales como uranio que podrían limitar el desarrollo, el uso o la construcción de pozos. La contaminación natural de radionucleidos, arsénico, cromo y otros metales es común para muchos acuíferos regionales de todas las categorías listadas arriba.

El Consejo Nacional de Investigaciones de EUA (1993) en un reporte de evaluación sobre vulnerabilidad del agua subterránea hizo énfasis en tres principios fundamentales a los que se refieren como leyes de vulnerabilidad del agua subterránea, a saber:

1. Todo acuífero es vulnerable.
2. La incertidumbre es inherente en toda evaluación de vulnerabilidad.
3. Lo obvio puede estar oculto y lo sutil pasar desapercibido.

Es útil considerar brevemente cada una de estas leyes en forma individual antes de intentar los modos más usuales para efectuar una evaluación regional sobre la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

***Todo acuífero es vulnerable*** – Las muchas formas en que un acuífero puede contaminarse, particularmente una vez que los pozos están instalados refuerzan este enunciado, así como lo hace la ocurrencia ampliamente difundida en acuíferos con bajos niveles de contaminantes antropogénicos. Por ejemplo, en una evaluación nacional (de los EUA), de 55 compuestos orgánicos volátiles (VOCs) cerca del 19% de las muestras contenían uno o más VOCs a una escala de evaluación de 0.2 microgramos por litro (Zogorski et al., 2006). Por ejemplo, a pesar del corto periodo de uso extensivo, el MTBE (metil-terbutiléter) fue uno de los VOCs más frecuentemente detectados, demostrando cuán rápido puede ocurrir la contaminación en un periodo de diez años o menos de uso extensivo.

**La incertidumbre es inherente en todas las evaluaciones de vulnerabilidad** –La vulnerabilidad de las aguas subterráneas no es una propiedad medible, sino una probabilidad o tendencia de contaminación que debe ser inferida de información que pueda ser medible. Las incertidumbres pueden penetrar las bases de datos espaciales y en esquemas computables (Murat et al., 2004), incluyendo potenciales aplicaciones erróneas al tomar en consideración un área determinada. Como resultado, se debería poder asegurar la disponibilidad de planes para evaluar, revisar y refinar las evaluaciones de vulnerabilidad con el tiempo (tal vez varios años).

**Lo obvio puede verse confuso y lo sutil pasar desapercibido** – Podría ser relativamente fácil identificar las áreas en donde la contaminación de las aguas subterráneas es altamente probable, sin embargo las limitantes de datos con respecto a factores mayores puede complicar el análisis. Puede no ser tan fácil delinear las áreas donde la contaminación del agua subterránea es altamente improbable con igual confianza. Por ejemplo, el agua subterránea en terreno kárstico maduro es altamente vulnerable a intrusión antropogénica y a la movilización de contaminación natural. Sin embargo, es más difícil de demostrar que el agua subterránea que yace bajo una zona no-saturada rica en cal tenga baja vulnerabilidad a la contaminación debido a que hay muchos factores difíciles de cuantificar en juego, tales como el flujo preferencial de caudales o las fuentes. Más aún, el diferenciar zonas que son menos vulnerables puede ser muy difícil debido a que las diferencias no son tan evidentes con los caudales preferenciales. A modo de ejemplo, en algunos casos, los productos transformados a partir de contaminantes orgánicos con diversas propiedades de transformación y efectos sobre la salud pueden ser más prevalentes en el ambiente que el compuesto madre (Kolpin et al. 1997); requiriendo por lo tanto el tener que considerar los productos transformados bajo un análisis detallado de vulnerabilidad del compuesto madre.

Una variedad de métodos han sido utilizados para la evaluación regional de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (Vrba and Zaporozec 1994; Focazio, 2002; Kulongoski and Belitz, 2004; Eberts et al., 2005; Johnson and Belitz, 2009; Belitz et al., 2003, 2010). Estos métodos varían en complejidad desde una evaluación subjetiva sobre los datos espaciales disponibles hasta la aplicación de modelos complejos de transporte.

A pesar que la definición de vulnerabilidad se refiere a la tendencia de los contaminantes para alcanzar una “posición específica en el sistema acuífero”, en la práctica la mayoría de los métodos para una evaluación regional de la vulnerabilidad a la contaminación se refieren, implícita o explícitamente, a la contaminación de la parte más alta del SAT o a la vulnerabilidad del agua subterránea “recientemente recargada” o localizada en el caudal del pozo (Clark et al., 2008). Frind et al. (2006) distinguen entre la vulnerabilidad del acuífero como se describe aquí y la vulnerabilidad del pozo. Este último demuestra los esfuerzos para delinear las áreas de protección de pozos y se refiere en su mayoría a los aspectos tridimensionales de los sistemas acuíferos. Sin embargo, estudios recientes reconocen ahora que el caudal de pozos puede ser una gran vía de contaminación transversal entre acuíferos. (Izbicki et al., 2005; Clark et al., 2008; Landon et al., 2009). Ver cuadro 6-3 para descripción de otros métodos.

**EI CUADRO 6-3** describe los métodos existentes para evaluar la vulnerabilidad

### CUADRO 6-3 Métodos para evaluación de la vulnerabilidad

Generalmente los métodos para evaluar la vulnerabilidad pueden ser agrupados dentro de tres clases: (1) métodos basados en índices (2) métodos estadísticos usando medidas de calidad de agua y (3) por medio de modelos de transporte simulado, basado en procesos conservadores y/o reactivos.

Los métodos basados en índices combinan varios atributos físicos como variables explicativas para desarrollar una gama de categorías de vulnerabilidad inferida. Los resultados del análisis de vulnerabilidad son usualmente mostrados en mapas usando el Sistema de Información Geográfica (GIS) tecnología que facilita el análisis de las relaciones espaciales a otros aspectos del uso del agua y del suelo. Los métodos más simples basados en índices asignan igual peso a todos los atributos y definen grados subjetivos de vulnerabilidad a aquellas áreas en donde los atributos especificados mutuamente ocurren (ej. áreas con suelo arenoso y agua subterránea superficial pueden ser ranqueados como altamente vulnerables). Muchos de estos métodos, sin embargo, asignan diferentes grados numéricos y pesos a los atributos para elaborar clases de vulnerabilidad. Estos métodos son comúnmente aplicados, debido a su simplicidad, pero adolecen de una naturaleza altamente subjetiva de los factores usados y de los pesos asignados. Una aplicación reciente de los métodos basados en índices en Suiza es descrito por Schürch et al. (2007). Uno de los primeros métodos basado en índices es el DRASTIC cuyo nombre se debe a los siete factores considerados: Profundidad de Agua, Recarga, promedio de Acuífero, promedio del Suelo, Topografía e Impacto de la zona vadosa media (en inglés: **D**epth to water, **R**echarge, **A**quifer media, **S**oil media, **T**opography, **I**mpact of vadose zone media, and hydraulic **C**onductivity of the aquifer; Aller y otros 1985). El método DRASTIC ha sido aplicado en su forma original y modificada en un sinnúmero de aplicaciones desde que se desarrolló. Por ejemplo, Denny y otros (2007) modificaron el método para acuíferos fracturados. Los métodos basados en índices pueden ser aplicados para determinar vulnerabilidad intrínseca o específica, aunque esta distinción entre los dos tipos puede ser difícil de hacer en algunos casos. Gogu et al. (2003) compararon 5 métodos basados en índices ilustrando como estos diferentes métodos pueden conducir a resultados muy diferentes.

Cuando las medidas de calidad de agua están disponibles, estas pueden ser combinadas con datos sobre variables potenciales explicativas para desarrollar modelos estadísticos de vulnerabilidad. Uno de los métodos más comunes es la regresión logística, que puede ser usado para predecir la ocurrencia de un factor de calidad de agua por encima de cierto nivel o umbral. Se asume con este método que el logaritmo natural de la tasa de probabilidad  $P/(1-P)$ , en donde  $P$  es la probabilidad cuando se excede el valor binario seleccionado, esta linealmente relacionado a las variables explicativas (Helsel and Hirsch 1992). Es decir:

$$\ln [P/(1-P)] = b_0 + \mathbf{bX} \quad (1)$$

en donde  $b_0$  es una constante de base,  $\mathbf{X}$  es el vector de  $n$  variables explicativas, y  $\mathbf{b}$  es el vector de los coeficientes de pendiente. Los valores estimados de esas variables se convierten de nuevo en probabilidades, por medio de la transformación de la ecuación 1 en:

$$P = \frac{e^{(b_0 + \mathbf{bX})}}{1 + e^{(b_0 + \mathbf{bX})}} \quad (2)$$

En donde  $e$  es la base del algoritmo natural.

Una ventaja de los métodos estadísticos es que ellos producen coeficientes que estadísticamente calzan con relaciones de las variables explicativas para observar datos y a partir de ahí evitar el uso de grados subjetivos de vulnerabilidad. Su utilidad está limitada por la representatividad de los datos medibles de calidad de agua que pueden provenir de pozos con diferentes profundidades, intervalos abiertos, materiales de construcción, historias de bombeo, etc., que pueden o no pueden ser representativos de la calidad del agua en el área en cuestión, y podrían estar distribuidos esparcidamente. Sin embargo, ellos tampoco reflejan las propiedades físicas que controlan las fuentes, distribución, o movimiento del contaminante, y como tal, representa una forma exploratoria de inferencia estadística a una vulnerabilidad

potencial.

Una aplicación temprana de regresión logística para el análisis de vulnerabilidad fue desarrollada por Eckhardt y Stackelberg (1995), quienes desarrollaron modelos de regresión logística para caracterizar la probabilidad de contaminación por fuente no específica de pesticidas, VOCs, y *por constitutivos inorgánicos* en Long Island, Nueva York. Más tarde, Tesoriero y Voss (1997) modelaron la probabilidad de concentraciones de nitrato que excedían 3 mg/L en aguas subterráneas superficiales de la Puget Sound Basin en Washington State. Las probabilidades de contaminación fueron significativamente relativas a la profundidad de los pozos, al tipo de geología superficial y al porcentaje de uso de la tierra tanto urbana como agrícola dentro de un radio de 3.2 kilómetros del pozo. Gurdak et al. (2007) de la misma manera usaron el método para modelar la distribución espacial de la probabilidad de poder detectar nitrato en cantidades mayores a 4 mg/L en aguas subterráneas recientemente recargadas en el acuífero High Plains. Gurdak et al. (2007) también usaron estimados de errores en variables explicativas junto con estimados de los errores en los coeficientes de regresión (error de modelaje) para concluir estimados de predicción incierta. Los resultados revelaron que las grandes incertidumbres en las predicciones varían espacialmente a lo largo del acuífero. Nolan et al. (2002) usaron ese método para mapear la probabilidad de contaminación por nitratos en aguas subterráneas recientemente recargadas en los Estados Unidos. Aplicaciones adicionales de regresión logística a las evaluaciones de la vulnerabilidad de aguas subterráneas son resumidas por Gurdak y otros (2007). Más recientemente, la regresión logística ha sido usada para analizar la probabilidad de detectar contaminantes, tales como perclorato en acuíferos profundos (Fram y Belitz, 2011). La figura 6.8 ilustra un ejemplo de probabilidad predictiva para detectar perclorato de fondo bajo condiciones naturales en aguas subterráneas en una concentración mayor que el umbral de cuatro concentraciones relacionadas a las variables explicativas vinculadas al clima (*Índice de Aridez de UNESCO*) y a otros factores.

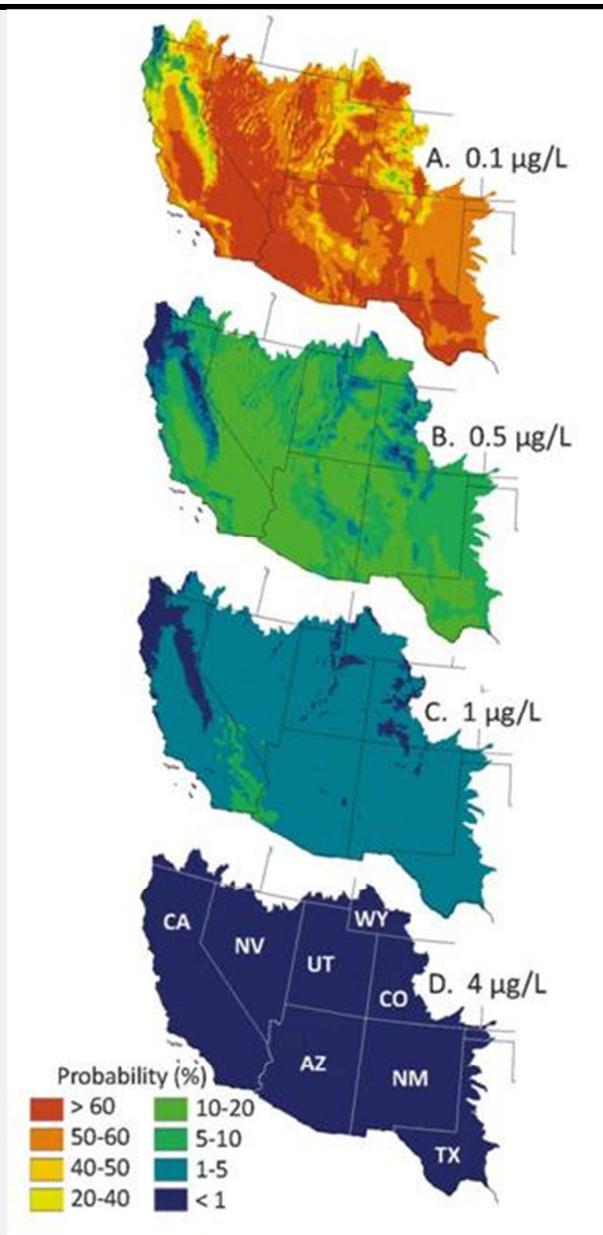


Figura6.7 Probabilidades predictivas de detectar perclorato bajo condiciones naturales en aguas subterráneas en una concentración mayor que el umbral de cuatro concentraciones (Fram y Belitz, 2011).

La utilización de modelos de simulación basados en procesos tienen cuenta más directamente los procesos físicos del flujo del agua y el transporte de contaminantes en el subsuelo. Los modelos de simulación basados en procesos pueden ser usados para estimar la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero al concentrarse en el flujo del agua y pueden incluir algunos aspectos de reacciones físicas o químicas. A modo de ejemplo simple, el método AVI (por su sigla en inglés "Aquifer Vulnerability Index") de van Stempvoort y otros (1992) calcula el tiempo de movimiento vertical advectivo desde la superficie del terreno hasta al punto más alto del acuífero de interés bajo un gradiente de unidad. Ross y otros (2004) ilustran el uso de un modelo geológico 3D para ejecutar cálculos similares. Alternativamente, los modelos basados en procesos pueden ser usados para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea a un

contaminante o contaminantes específicos mediante la simulación del transporte de contaminantes.

Algunos ejemplos incluyen LEACHM (por su sigla en inglés: "Leaching Estimation And Chemistry Model; Hutson y otros, 1997) y el modelo PRZM de la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU. (<http://www.epa.gov/ceampubl/gwater/przm3/index.htm>; Loague y otros, 1998). A pesar de que estos modelos intentan análisis más rigurosos, es probable que al determinar valores de parámetros a la escala regional se introduzcan incertidumbres considerables y que no puedan capturar procesos importantes como canales de flujo preferenciales y flujos episódicos, así como transporte soluble. Muchos de estos modelos tienden a enfocarse en zona someras del suelo. Fogg y otros (1999) utilizan una aproximación de modelación que contempla el transporte completo tanto de la zona vadosa como la zona saturada, incorporando características geológicas en un marco probabilístico *geostático defacies geológicas* que controlan el transporte y el flujo del agua subterránea.

Finalmente, algunos métodos para la evaluación de vulnerabilidad son métodos esencialmente híbridos que combinan componentes de métodos estadísticos, basados en procesos o índices. Por ejemplo, los resultados de un modelo de infiltración de contaminantes puede ser usado para calcular un valor que es combinado con valores de otros datos mapeados para producir un índice de vulnerabilidad de aguas subterráneas (Focazio, 2002). Otros ejemplos incluyen índices simples de *tiempo de residencia* y *ritmo de degradación* que han sido usados para agrupar pesticidas por su potencial a infiltrarse al agua subterránea (Rao y Alley, 1993) o usar aproximaciones basadas en cuadrículas espaciales que están relacionados a diagramas de muestreo aleatorio (Belitz y otros, 2010).

#### 6.2.4 Incertidumbres en la evaluación de los SAT

Las incertidumbres deberán ser consideradas en todas las etapas de la evaluación de los SAT. Estas se derivan no sólo de la imprecisión de los datos y de las simplificaciones utilizadas en la construcción de los modelos en que se basan, sino también de la complejidad física y del carácter dinámico de los sistemas naturales, así como de la escala de espacio y tiempo de los efectos del desarrollo y del cambio climático. Las incertidumbres en las etapas de la evaluación, mediciones, muestreo, análisis y simulación son inevitables; a su vez, éstas pueden causar incertidumbres adicionales en los costos o en las políticas relacionadas con el desarrollo o la gestión de los recursos. Ejemplos de ello son proyectos de mejoras de capital, directivas de desarrollo, extensión de los mercados de agua o prioridades para la gestión conjunta de los recursos.

Se describen dos tipos de incertidumbres: en los datos básicos y en la distribución regionalizada de los mismos.

##### ***Incertidumbres sobre los datos básicos***

La recolección de datos básicos debe ser realizada por personal entrenado para tal fin utilizando equipos y procedimientos adecuados. Actualmente, se dispone de instrumentación variada para el registro y almacenamiento automático de datos hidrogeológicos (niveles, temperatura, conductividad eléctrica del agua subterránea, entre otros), con una frecuencia que se puede programar. Pero aun cuando los datos obtenidos local o puntualmente sean confiables y su registro tenga continuidad, la extensión y complejidad de los sistemas hidrológicos (cuencas y acuíferos) hacen necesaria la extrapolación espacial y temporal de los datos obtenidos, lo cual implica cierto grado de incertidumbre que debe considerarse en su interpretación.

A lo anterior se agrega el hecho de que, generalmente, no existen redes de monitoreo integradas que se diseñen con un criterio holístico encaminado a conciliar los objetivos principales de las diferentes redes: lo común es que se establezca una red hidrométrica (aguas superficiales), otra piezométrica (aguas subterráneas) y otra pluviométrica, pero sin considerarlas en su conjunto, de tal manera que los datos obtenidos en unas y otras se complementen entre sí para lograr un conocimiento más integrado del sistema.

Asimismo, las redes de monitoreo que se establecen en los sistemas hidráulicos de las ciudades o distritos de riego con fines operativos, rara vez toman en cuenta los aspectos de interés general para la evaluación de las fuentes de las cuales se abastecen.

Análogamente, hay incertidumbres en las mediciones o estimaciones de las componentes de un balance hídrico (ingresos y egresos del SAT), especialmente cuando éste se plantea considerando todos los componentes del ciclo hidrológico. En parte, esto se debe a que éstas presentan notables diferencias en su orden de magnitud; así, por ejemplo, una infiltración que genere recarga de acuíferos en un rango de 3% al 15% de la precipitación respectiva, con un error “aceptable” en la estimación de ésta, de un 10%, podría ser del mismo orden o mayor que el volumen infiltrado.

Asimismo, la incertidumbre en la estimación de la precipitación a partir de los datos obtenidos en pluviógrafos, comúnmente puede resultar en un error de 10%, y el error en el caudal aforado en estaciones hidrométricas típicamente puede variar en el rango del 5 al 20%.

En particular, en el balance hídrico de un SAT puede haber componentes (entradas o salidas) que no son considerados individualmente en su modelo conceptual, ya sea porque no son identificados o porque no se dispone de información para cuantificarlos, de manera que su valor queda implícito en los demás términos del balance, genera incertidumbre y puede llevar a conclusiones erróneas.

Otra fuente de incertidumbre está asociada con la colección de muestras de agua, pues en la mayoría de los pozos de bombeo se obtienen muestras, que son una mezcla del agua aportada por los diferentes estratos del mismo, pero no dan idea de la distribución vertical de la calidad del agua, lo cual es un serio inconveniente cuando se trata de problemas de contaminación.

Por ello, es recomendable seguir estrictos protocolos en la colección, manejo y análisis de las muestras de agua, así como en la interpretación de los resultados analíticos (ver p. ej., <http://water.usgs.gov/owq/FieldManual/>; Wilde et al., 1998), y como precaución adicional obtener muestras por duplicado de muestras seleccionadas y utilizar los servicios de laboratorios acreditados.

Igualmente inciertos pueden ser los resultados de la datación de muestras de agua colectadas en pozos, para determinar las edades de las fuentes de contaminación. Esto se debe a que en el interior de un pozo los estratos que aportan aguas de características químicas de edades muy diferentes, de manera que el análisis de las muestras puede dar valores medios muy engañosos y enmascarar concentraciones peligrosas de algunos contaminantes (Bethke and Johnson, 2002; Weissmann et al. 2002).

Por ello, este tipo de estudios requiere de un equipo especial para un muestreo vertical separando muestras de agua provenientes de diferentes estratos seleccionados, con el fin de conocer la distribución vertical de las características químicas. (Izbicki et al., 1999, 2005). La simulación de las edades del agua mediante modelos de transporte también puede ser de utilidad para delinear los efectos provocados por la operación de pozos de bombeo (Zinn and Konikow, 2007a, b).

### ***Incertidumbres en la distribución y la regionalización de los datos***

Singh (1995), incluye las fluctuaciones aleatorias que manifiestan los registros en espacio y tiempo, inherentes a los procesos naturales. En este sentido, la aproximación al dominio continuo de análisis (el sistema acuífero) introducida por la discretización derivada por el muestreo, medición y/o ensayo en localizaciones puntuales (como lo son los pozos de explotación, perforaciones y sondeos de estudio, etc.) da lugar a incertidumbres en el conocimiento del medio natural.

Jiménez Espinosa (2003) señala al respecto que: *“cuando se trabaja con fenómenos naturales, tales como los hidrogeológicos, surge la primera de las dificultades inherente a la propia naturaleza de los datos, como es el elevado coste de adquisición de la información experimental y la no duplicidad de la misma. Nuestro conocimiento del problema hidrogeológico es un conjunto de datos discreto y limitado de muestras. Debemos obtener la mejor descripción del fenómeno natural con la información disponible.”*

Así, un tema de gran importancia a incorporar en el análisis de incertidumbre es el definir si existen patrones estadísticos que describan la probable variabilidad espacial de las características de interés (Capilla, 2003), derivados de la naturaleza mixta de las variables analizadas (determinística y aleatoria). Estos permiten determinar las tendencias de variación espacial de las series de datos y complementar la caracterización.

Mediante la aplicación de métodos geoestadísticos: elaboración y análisis de variogramas, generación de mapas de curvas de isovalor y varianza del error de estimación, tanto para los niveles piezométricos, como para las series químicas y parámetros hidráulicos formacionales; es posible contar con una estimación de la incertidumbre asociada a las interpolaciones realizadas en el intento de representar el continuo en análisis.

### ***Análisis de Incertidumbres***

Se debe considerar la representatividad de los resultados obtenidos en relación con las incertidumbres asociadas tanto a la obtención de datos básicos, como a la estructura de los modelos y/o procedimientos metodológicos utilizados en el procesamiento de la información (Paris, 2005). Capilla (2003) plantea que una forma directa de abordar el estudio de la incertidumbre es la aplicación del criterio experto para seleccionar conjuntos de datos (o parámetros) representativos, evaluando los resultados producidas.

Los métodos más formales de estimación de parámetros, análisis de sensibilidad y análisis de la incertidumbre, pueden ser aplicados a los modelos hidrológicos. De esa manera, las estimaciones finales incluyen la incertidumbre de los datos, la

regionalización, la conceptualización y las incertidumbres de simulación numérica (Hill and Tiedeman, 2007; Hill et al., 2000).

### 6.3 Los efectos transfronterizos

Las metodologías descritas en los apartados anteriores para localizar, caracterizar, evaluar y simular los acuíferos, constituyen las herramientas básicas para el manejo sostenible y la gestión integrada de los mismos. Cuando se trata de un SAT, es recomendable que los países que lo comparten tiendan al amplio estudio técnico y al manejo sostenible de toda la unidad, en forma conjunta o atendiendo cada uno a la porción que les corresponde; sin embargo, si el SAT es de gran extensión, alcanzar este objetivo puede ser muy largo y costoso, o no ser viable. En tal caso, es recomendable que, al menos, se preste especial atención al estudio y manejo de su porción fronteriza, con el fin de prevenir o corregir efectos transfronterizos perjudiciales que puedan implicar serios problemas económicos o sociopolíticos entre los vecinos.

La porción fronteriza a considerar y el nivel de los estudios conjuntos a realizar deben definirse de común acuerdo entre los países involucrados, con base en la información intercambiada y considerando: las características, importancia relativa y nivel de desarrollo del SAT de que se trate, la disponibilidad de recursos presupuestales, los efectos transfronterizos ya generados o los que podrían derivarse de proyectos de desarrollo y los acuerdos transfronterizos ya celebrados.

A falta de información hidrogeológica suficiente, en una etapa inicial de colaboración internacional en materia de aguas subterráneas y con enfoque preventivo, los países que comparten los SAT pueden celebrar un acuerdo o convenio general que refleje la intención de colaborar en la ejecución de estudios y en la prevención de conflictos de esta índole. Por ejemplo, el Acta No. 242 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos, fue emitida en agosto de 1973 con el propósito de llegar a un convenio de alcance general sobre aguas subterráneas en las áreas fronterizas entre los dos países.

Esta disposición fue el punto de partida de los estudios binacionales de acuíferos específicos que se llevaron a cabo en las décadas siguientes y que ahora prosiguen dentro del Programa ISARM y de otros análogos. Este compromiso de consulta previa permite realizar adecuaciones a los proyectos de desarrollo para evitar o minimizar los efectos perjudiciales transfronterizos. El Acta 242, antes citada, contiene un ejemplo de restricción específica del volumen de extracción de agua subterránea dentro de una faja fronteriza:

*“A fin de evitar problemas futuros, México y Estados Unidos se consultarán recíprocamente antes de emprender, en el área fronteriza de sus respectivos territorios, cualquier nuevo desarrollo de aguas superficiales o de aguas subterráneas, o de emprender modificaciones substanciales de sus desarrollos actuales, que pudieran afectar adversamente al otro país.”*

Esta medida tiende a fijar una extracción equitativa en la porción fronteriza de ese SAT, a reserva de que se realicen estudios más exhaustivos y de que se diseñe conjuntamente un plan de manejo del mismo, como de hecho se llevó a cabo en años posteriores.

El **CUADRO 6-4** presenta en detalle un ejemplo cuantitativo de los efectos transfronterizos de un SAT localizado entre México y los EUA: la cuenca del Río Colorado y el acuífero adyacente.

## CUADRO 6-4 La cuenca del Río Colorado compartida por México y los Estados Unidos

La Cuenca del Río Colorado es un vasto acuífero superficial transfronterizo sistema de agua / aguas subterráneas situado en la parte suroeste de los Estados Unidos y en la parte noroeste de México. La cuenca incluye un acuífero del mismo nombre, con una superficie aproximada de 30.000 km<sup>2</sup>. El acuífero de la cuenca, identificados en el inventario del ISARM-Américas como SAT-9N, se extiende a través de los estados de Arizona y California de los Estados Unidos, y los estados mexicanos de Baja California y Sonora (Fig. 6.9). Este estudio de caso es un ejemplo de cómo los cambios en la oferta y la demanda relacionada con cambios en el uso y el cambio climático, el control del río, y los cambios relacionados con la gobernanza de los recursos superficiales y subterráneos ha proporcionado tanto oportunidades como problemas que también incluye el acuífero transfronterizo de esta región árida.

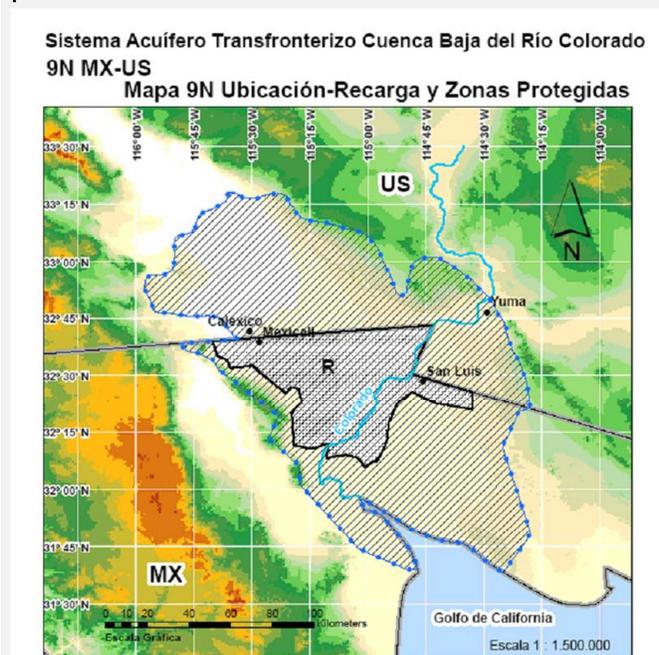


Figura 6.8 Mapa de SAT-9N en la Cuenca del Río Colorado

### Efectos transfronterizos

Desde principio de los 1900s, la introducción y el crecimiento de la agricultura, así como de la urbanización han llevado a un incremento de la demanda en uso municipal y agrícola, particularmente, en la región transfronteriza del valle Mexicali, México (MX), y el Valle Imperial, Estados Unidos (EUA) (Fig. 6.10).

Antes de 1939, el río era la principal recarga del acuífero, siendo la evapotranspiración y el flujo natural del agua terrestre al Golfo de California su principal descarga. En 1939, el Canal Todo Americano (CTA) fue construido (figura 6.10). Desde 1939, el CTA se convirtió en la única fuente de agua superficial para el Valle Imperial, así como para exportaciones para suministro municipal de California del Sur. Sin embargo, el desarrollo agrícola causó recarga artificial proveniente de pérdidas de canal al redireccionar agua de ríos y pozos. Esta práctica incrementó sustancialmente la recarga artificial del acuífero que fue mucho mayor que la natural. La recarga artificial formó una cúpula debajo del canal, a nivel de las aguas subterráneas (Fig. 6.11). La filtración del CTA creó un nuevo vínculo entre los recursos del agua subterránea y del agua superficial en el área transfronteriza, creando nuevos y complejos desafíos transfronterizos.

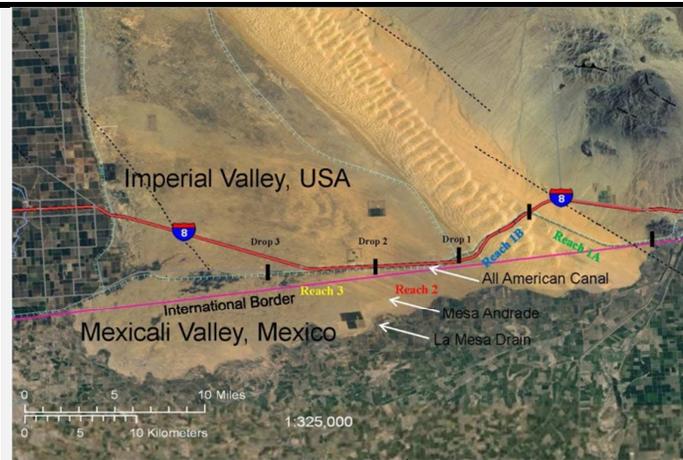


Figura 6.9 Mapa del acuífero transfronterizo a lo largo de la frontera internacional del Valle Imperial, EUA y el Valle Mexicali, MX.

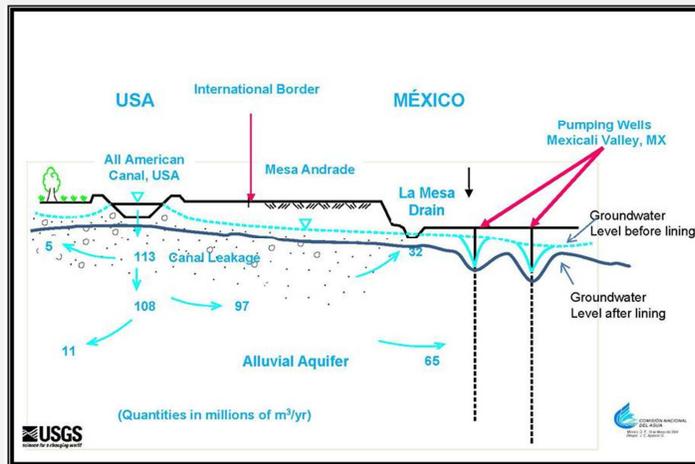


Figura 6.10 Sección transversal esquemática que muestra los efectos potenciales de revestimiento de canales

En 1988, motivado por un incremento en la demanda de California del Sur, los EUA aprobaron revestir el CTA en donde atravesaba dunas de arena, perdiendo aproximadamente 84 Mm<sup>3</sup>/año/agua. En un afán de salvar las pérdidas de transmisión, el CTA fue revestido y la recarga artificial de la cual dependía la agricultura expandida, por lo que el suministro de agua potable fue reducido en el 2010. Así, los cambios en uso conjunto, como el revestimiento de un canal de agua superficial (CTA), creó efectos en el uso del agua y en su movimiento también, así como en su calidad. Los descensos de la recarga artificial afectaron los recursos de agua subterránea en ambos lados de la frontera, incluyendo:

- Niveles de aguas subterráneas reducidos en ambos lados de la frontera con menos aguas subterráneas fluyendo hacia el Valle Mexicali;
- Incremento en la tendencia de salinización del agua subterránea en la porción norte del Valle Mexicali, donde la fuente de agua dulce procedente de la fuga del CTA se redujo;
- Reducción gradual del flujo de agua dulce al drenaje “La Mesa”. Este recibió del CTA hasta 1.000 l/s, resultando en granjeros afectados que se beneficiaban del drenaje de agua (pérdida que ronda 1,200 ha de irrigación);
- Eliminación de “ecosistemas” que han desarrollado nuevos humedales los cuales son un artefacto de filtración a lo largo y cerca de la captura de drenaje “La Mesa” con niveles de aguas subterráneas artificialmente llanos;

- Niveles incrementados de bombeo de pozos ubicados dentro del área de influencia del CTA, y
- Competencia incrementada por agua conservada por partes externas que crearían exportaciones adicionales de la cuenca del Río Colorado para abatir demandas regionales.

Por lo tanto se requiere un nuevo ciclo de adaptación para mantener la demanda de una oferta por el cambio climático, por las extracciones de agua subterránea, por el revestimiento de canales, y por el control adicional del Río Colorado.

### **Gobernanza internacional compartida**

Los recursos naturales de la cuenca del Río Colorado son administrados entre los EUA y México bajo numerosas leyes federales, fallos de corte y decretos, contratos y guías reguladoras, colectivamente conocidas como "Ley del Río" (USBR). Establecida en 1889, la Comisión Internacional de Límites y Aguas (MX) e International Boundary and Water Commission (EUA) es responsable de aplicar tratados limítrofes y acuáticos entre los EUA y México, y atender a toda dificultad que pueda surgir en su aplicación. El Tratado para la Utilización de Aguas del Colorado, del Río Tijuana y del Río Grande se convirtieron en los cimientos para la asignación del agua transfronteriza y la administración entre EUA y México fue firmada en 1944, cinco años tras el comienzo de las operaciones del CTA. Las adaptaciones de gobernanza tienen lugar a través de modificaciones llamadas *minutas*, mediante aprobación mutua de los gobiernos, pero sin crear un nuevo tratado que requeriría una ratificación por ambas partes. Las Minutas son usadas para tratar y resolver colectivamente problemas transfronterizos no cubiertos previamente en el Tratado de Aguas original de 1944.

En el 2012, los dos países firmaron el acuerdo más amplio desde el tratado de 1944 con la Minuta 319. Este acuerdo quinquenal facilita la compra y almacenamiento de aproximadamente 124 Mm<sup>3</sup> como un medio de compartir agua del Río Colorado durante tiempos de sequía y excedente. Esto incluye la posibilidad para México de almacenar agua en el Lago Mead, así como liberaciones piloto al Delta del Río Colorado en México. El acuerdo también permite a proveedores de agua de EUA invertir en infraestructura de México a cambio de que México comparta con los proveedores de agua el agua conservada para mejoras potenciales a esta infraestructura que recientemente se vio afectada por terremotos. Finalmente, el acuerdo permite a proveedores de los EUA, de los Estados California, Nevada y Arizona comprar agua mexicana a lo largo de los tres años siguientes (Minuta 319, IBWC, 2012).

Estudios por separados realizados por los EUA y México han tenido lugar para monitorear y analizar los cambios en las condiciones del agua subterránea. Sin embargo, actualmente ningún estudio conjunto o modelo hidrológico conjunto han sido desarrollados que permitan a todas las partes precisar los efectos de los cambios en el clima o en el uso del recurso hídrico y su movimiento, como con los efectos vinculados al revestimiento del canal y otros. Varias alternativas legales y técnicas han sido desarrolladas, pero un plan conjunto entre México y EUA y estudios serán necesarios para guiar el desarrollo y sostener los recursos para todas las partes en ambos lados de la frontera usando un enfoque holístico de los recursos del agua superficial y subterránea.

Por la naturaleza del Programa ISARM, se sobreentiende que este apartado se refiere a efectos y problemas hidrogeológicos transfronterizos entre los países que comparten los SAT; sin embargo, conviene destacar que los conceptos y criterios que se exponen a continuación son, en su mayor parte, también aplicables a las porciones fronterizas entre entidades políticas de un mismo país: estados, regiones, provincias, municipios u otras.

Un efecto transfronterizo de origen hidrogeológico es la afectación provocada en un país por una acción generada en el país vecino. El efecto puede ser sobre la cantidad, la calidad o el nivel del agua subterránea o superficial y, a su vez, puede implicar efectos colaterales ambientales, económicos, sociopolíticos, legales... Puede ser temporal o permanente, concentrado o difuso, regional o local, perjudicial o benéfico.

Cada uno de ellos puede requerir un tratamiento diferente aunque, esencialmente, en todos ellos tendría que seguirse una secuencia lógica de acciones -identificación, caracterización, evaluación, remediación, mitigación- para definir cuáles son los que por su importancia, magnitud o duración, requieren de una atención binacional.

A continuación se describen los efectos más comunes:

La posición topográfica relativa de los países que comparten un SAT es uno de los factores importantes: lógicamente, el país que ocupa la posición “aguas arriba”, desde el punto de vista hidrogeológico, está menos expuesto a ser afectado, con relación al que está ubicado “aguas abajo”.

El efecto más frecuente es el abatimiento de los niveles del agua subterránea generado por la extracción de pozos en un país, que se propaga a través de la frontera internacional provocando en los vecinos la reducción del caudal y rendimiento de las captaciones, el agotamiento de las más someras, el incremento del consumo de energía y del costo de extracción del agua, la disminución de la reserva almacenada, entre otras afectaciones asociadas.

Asimismo, la extracción de agua subterránea en el país ubicado “aguas arriba” puede interceptar parte del flujo subterráneo que pasa a los vecinos a través de la frontera internacional; en el extremo, el abatimiento en el primero puede ser de magnitud suficiente para invertir la dirección del flujo subterráneo y, a partir de entonces, no sólo suprimir la salida subterránea hacia los otros países sino inducir una alimentación de estos hacia él.

También es común el caso en que los SAT tienen como nivel base de descarga común a un río (Fig. 6.12) que es frontera internacional, de tal manera que, en condiciones naturales, no hay flujo subterráneo de un país a otro, aun cuando haya continuidad hidrogeológica entre ambos. En este caso, la extracción de agua mediante pozos en uno o en ambos lados de la frontera puede abatir los niveles freáticos, reduciendo el caudal base del río, afectando a ecosistemas ribereños (vegetación, humedales, fauna...) y a captaciones de agua superficial o mermando volúmenes de escurrimiento objeto de tratados internacionales de agua superficial.

Si el bombeo en uno de los países es de suficiente magnitud, puede interceptar la totalidad de la descarga del acuífero a la corriente, mermando la disponibilidad de agua superficial, provocar la desconexión superficial-subterránea e inducir una circulación subterránea a través de la frontera internacional.

En algunos casos, el bombeo de pozos se concentra en la faja fronteriza de los países que comparten el SAT, de manera que ambos se provocan efectos transfronterizos mutuamente al superponerse los abatimientos generados. El flujo subterráneo en este caso podrá cambiar de dirección, de un país a otro, según la posición relativa de sus niveles dinámicos.

Un ejemplo muy ilustrativo de esta condición se presenta en el caso de estudio del Bolsón del Hueco, en la frontera entre México y los Estados Unidos, donde el bombeo de las ciudades de El Paso y Juárez han interferido, provocando que los niveles freáticos se desconecten del cauce del Río Grande/Bravo.

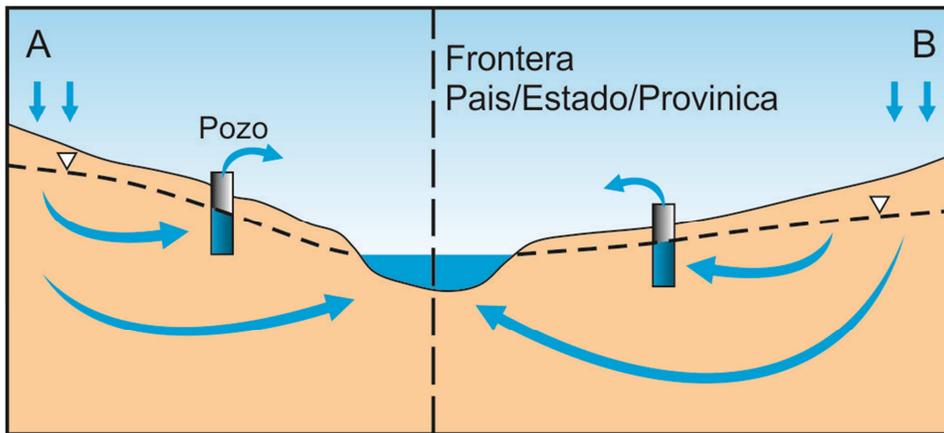


Figura 6.11 La frontera de un País, Estado o Provincia coincide con un río importante o un lago principal; el acuífero aluvial está conectado con el río; en este caso hay poco flujo transfronterizo.

A su vez, el abatimiento de los niveles del agua subterránea puede generar efectos colaterales, tales como contaminación del acuífero, intrusión salina o hundimiento del terreno, entre otros.

Menos común, aunque posible, es que en un país se realicen desarrollos u obras que provoquen un ascenso de los niveles del agua subterránea; por ejemplo, construcción de una presa, zonas agrícolas donde se generen retornos de riego o infiltración en canales no revestidos, obras de recarga artificial, que se propague a los países vecinos.

En general, este efecto puede ser favorable, pues incrementa la reserva de agua subterránea; pero donde la superficie freática es somera puede generar problemas de drenaje en zonas urbanas, industriales o de riego y puede dañar a los ecosistemas aguas abajo o a terrenos agrícolas en los países vecinos, si no hay un manejo integrado de aguas superficiales y subterráneas.

Otro efecto, relacionado con la calidad del agua, se presenta cuando un desarrollo (industrial, municipal, agrícola, minero o de otra índole) en el país aguas arriba contamina su porción del SAT y la pluma contaminante migra en el acuífero hacia el país o los países aguas abajo. En este caso el país generador de la contaminación tiene que emprender acciones para remediar el acuífero eliminando el "foco" de la misma y resarcir el daño causado en el país vecino, especialmente cuando hay afectación a la calidad del agua para consumo humano o daños a la salud pública.

La propagación en el subsuelo de los efectos referidos depende de las características del acuífero –esencialmente, de sus coeficientes de permeabilidad, almacenamiento, transmisividad, de los que depende su difusividad hidráulica. Hay acuíferos de alta difusividad (rocas kársticas y fracturadas) en que los efectos se propagan con rapidez a gran distancia; en cambio, en los acuíferos constituidos por materiales clásticos no consolidados, de difusividad hidráulica mucho menor, la rapidez de propagación de los efectos es relativamente lenta.

Asimismo, debido a la heterogeneidad natural propia de todo acuífero, es común que la rapidez de propagación de los efectos sea notablemente diferente de un estrato a otro, sobre todo en los llamados “sistemas de acuíferos múltiples, lo cual puede llevar a la sobreestimación o a la subestimación de los efectos transfronterizos si no se dispone de una red de monitoreo adecuada.

En todo caso, la distribución, magnitud y evolución de los efectos transfronterizos en el tiempo, se pueden simular si se conocen las características del acuífero en la porción fronteriza, mediante un modelo relativamente local, sin considerar necesariamente todo un SAT de gran extensión.

En términos generales, no se puede fijar a priori la magnitud que debe tener un efecto transfronterizo para considerarlo perjudicial, pues esto es relativo y depende de varios factores, tales como: la magnitud del efecto, la importancia relativa del agua subterránea en los países de que se trata, la presión de las demandas locales o regionales de agua, las condiciones hidrológicas existentes en la faja fronteriza, las características de las captaciones ubicadas en ella. En algunos casos, puede ser necesario extender la consideración de estos factores a cuencas aledañas a las del SAT considerado, cuando el desarrollo genera demandas que motivan la importación o la exportación de agua de una cuenca a otra.

Así por ejemplo, si en el país afectado las captaciones son profundas y tienen alta capacidad de extracción, un abatimiento transfronterizo de una fracción de metro o pocos metros procedentes del otro país, podría no implicar impacto significativo en su caudal y costo de operación. Por el contrario, si se trata de un acuífero de reducido espesor y los pozos en el país afectado son cortos, de baja capacidad de extracción y con reducido tirante de agua en su interior (norias o galerías filtrantes), pequeños abatimientos transfronterizos podrían reducir significativamente su rendimiento y, en el extremo, inutilizarlos. Igualmente vulnerables a ese efecto son los humedales, los manantiales de origen somero y el caudal base de las corrientes alimentadas por el acuífero, por ser mucho más sensibles a descensos o aumentos relativamente pequeños de los niveles freáticos.

Tampoco pueden establecerse valores generales, a priori, de a qué distancia de la frontera debe considerarse que una captación o desarrollo no generará efectos transfronterizos perjudiciales pues, además de los factores señalados en el párrafo anterior, esto depende de la difusividad hidráulica del acuífero y de la magnitud del estímulo que los provoca (cambios en la recarga o en la extracción). En acuíferos de baja difusividad (baja o media permeabilidad y/o alto coeficiente de almacenamiento) sólo son significativos los efectos transfronterizos provocados por acciones aplicadas muy cerca de la frontera; por el contrario, si se trata de un acuífero de alta difusividad (alta permeabilidad y bajo coeficiente de almacenamiento), los efectos pueden propagarse más rápidamente y a mayores distancias. Adicionalmente, los efectos secundarios, como el hundimiento del terreno o la migración de los contaminantes, también pueden tener magnitud, distribución y velocidad de propagación diferentes a las de los efectos hidráulicos que los producen.

Un sustancial indicador de la importancia relativa del efecto transfronterizo, en términos de cantidad, es la relación entre la magnitud del volumen de flujo subterráneo que pasa a través de la frontera y la magnitud de los demás componentes del balance hídrico en la porción del SAT que corresponde al país afectado.

Así, por ejemplo, cuando se trata de acuíferos constituidos por materiales no consolidados, cuya permeabilidad es de media a baja dependiendo del tamaño medio de los granos -a excepción de los clásticos de tamaño grueso, que suelen encontrarse sólo en fajas fluviales relativamente estrechas-, el flujo subterráneo a través de la frontera suele pesar poco en el balance referido. Sin embargo, aun cuando el impacto transfronterizo no pese en el balance hídrico global, puede tener efectos locales de consideración en la faja fronteriza.

**La importancia de los efectos transfronterizos no debe sobreestimarse o subestimarse a priori. En principio, sólo puede establecerse un criterio general conceptual que regule los desarrollos de un país para prevenir efectos transfronterizos perjudiciales, pero no un criterio cuantitativo de validez general. A partir de este criterio, en cada caso tendrá que definirse un acuerdo particular para el manejo del SAT de que se trate, considerando los aspectos y factores enumerados, acuerdo que estará sujeto a revisión periódica.**

#### **6.4 Aspectos de gestión sostenible**

##### ***Gestión sostenible de acuíferos transfronterizos***

El siguiente texto describe los aspectos más importantes del Programa Estratégico de Acción del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Esos aspectos aunque son específicos a un SAT, podrían servir de referencia para otros SAT del continente Americano.

La gestión sostenible del agua subterránea debe atender tanto los niveles regionales como locales. Se debe desarrollar una base común de conocimiento entre los diversos sectores involucrados teniendo como ejes específicos:

- Estudios técnico-científicos de apoyo a la gestión, incluyendo análisis de diagnóstico, generación de nueva información y creación de un sistema de información y un banco de datos.
- Evaluación de los marcos institucionales y normativos relacionados al tema agua subterránea en el ámbito nacional, local y regional.
- Elaboración de una cartografía geológica e hidrogeológica del sistema acuífero.
- Diseño de una red de monitoreo regional y local.
- Construcción de modelos conceptuales y matemáticos de flujo regional y local.

Para lograr la gestión sostenible del sistema acuífero transfronterizo es necesario la convergencia de acciones en forma armónica y coordinada por los países involucrados. En este sentido, es necesario alcanzar un nivel satisfactorio y homogéneo de capacidades técnicas e institucionales.

Cada uno de los países debe tener la posibilidad de implementar estrategias de gestión en ámbito nacional y sub-nacional que sean coherentes y adecuadas a sus zonas específicas y a las presiones de uso. Los Estados soberanos deben adoptar principios

de gestión congruentes y comprometerse a asignar los recursos humanos y financieros necesarios para su gestión sostenible.

Para propiciar la gestión sostenible de los acuíferos transfronterizos es necesario:

- La introducción y fortalecimiento del tema aguas subterráneas y actividades relacionadas a la gestión integrada de recursos hídricos en la agenda de los países involucrados.
- La producción de documentos con información, conocimientos técnicos y manuales de procedimientos sobre temas esenciales relacionados a la gestión de las aguas subterráneas.
- La generación de nueva información confiable sobre aguas subterráneas con base en estudios técnicos detallados.
- El perfeccionamiento en el intercambio de información sobre aguas subterráneas y sobre otros factores relacionados al manejo de los acuíferos en general y el acuífero transfronterizo en particular entre países e instituciones.
- El aumento de la concientización pública sobre el acuífero transfronterizo y sobre la necesidad de su gestión sostenible.
- La creación de espacios de discusión e intercambio de opinión sobre la gestión.
- El apoyo a estudios de especialistas en aguas subterráneas y temas relacionados.
- El establecimiento de comisiones locales de apoyo a la gestión del acuífero transfronterizo.

#### 6.4.1 ¿Distribución justa y equitativa del recurso?

Como ya se ha mencionado, es recomendable que los SAT sean objeto de un manejo sostenible. Sin embargo, y sobre todo en el caso de SAT de gran extensión, el manejo conjunto puede ser complejo. Así, al igual que en la etapa de evaluación de los SAT (ver apartado 6.2), su manejo conjunto también puede orientarse, en principio, a sus porciones fronterizas, con el fin de adoptar un plan de manejo encaminado a la prevención o mitigación de conflictos transfronterizos.

Un aspecto muy complejo se refiere a aplicar el criterio de distribuir el recurso hídrico disponible entre los países que comparten un SAT. Cuando se trata de la distribución de un bien común, es natural pensar de inmediato en una distribución justa y equitativa. Pero ¿cómo se puede entender esto cuando se trata de sistemas naturales que suelen presentar grandes desigualdades o asimetrías en todos los factores involucrados?

Aunque no hay una respuesta única a esa pregunta, se pueden considerar los siguientes aspectos: en la superficie del SAT que corresponde a cada país, en el aporte de cada uno a la recarga total del sistema, en las características del acuífero, en la magnitud de sus demandas actuales y futuras de agua, en la distribución espacial de su reserva almacenada, en el marco legal en materia de agua, en la capacidad económica y tecnológica de las partes, etc.

Por ejemplo, ¿puede uno de los países reclamar una mayor fracción del recurso hídrico disponible porque ocupa una porción mayor del SAT, porque sus necesidades de agua son mayores, porque inició antes la captación y uso del recurso hídrico, porque aporta una mayor fracción de la recarga...?

Aunque parezca lógico, la solución no es tan simple como distribuir el volumen disponible en partes iguales o proporcionalmente a la superficie que les corresponde del SAT. Obviamente, no hay un criterio general de distribución, por lo que en cada caso ésta tendrá que ser objeto de una negociación entre las partes, la cual deberá apoyarse necesariamente en el conocimiento técnico y científico del sistema.

**No hay un criterio general de distribución justa y equitativa, por lo que en cada caso ésta tendrá que ser objeto de una negociación entre las partes, la cual deberá apoyarse necesariamente en el conocimiento técnico y científico del sistema.**

#### 6.4.2 Elementos para plan de gestión

Cada acuífero requiere de una estrategia o plan de manejo particular, que deba incluir:

- acciones para optimizar el aprovechamiento de su recurso hídrico disponible;
- acciones para preservar o incrementar su disponibilidad de agua y, en adelante,
- acciones de adaptación/mitigación al impacto del cambio climático

En todo caso, el conocimiento técnico de los SAT es la base indispensable para su gestión integrada, sin olvidar que por ser sistemas dinámicos– su estado depende de cambios impuestos por la naturaleza (variabilidad “normal” o cambio climático gradual) o por desarrollos antropogénicos– el manejo requiere de un seguimiento continuo de su comportamiento, en forma compartida y coordinada entre los países que los comparten, y a partir de allí se realizarán los ajustes que sean pertinentes.

**El conocimiento técnico y científico de los SAT es la base indispensable para su gestión integrada.**

La estrategia para una gestión sostenible de los acuíferos transfronterizos debería incluir los siguientes elementos sociales y técnicos:

<b><u>Sociales</u></b>	<b><u>Técnicos</u></b>
Manejo del suministro y la demanda	Monitoreo y evaluación del recurso
Participación social	Recarga artificial
Cambios de uso de suelo y agua	Manejo de la evapotranspiración
Ordenamiento de acuíferos	Reciclaje y reutilización de agua
Valor para la conservación, recarga, y reúso	Tecnificación del riego y reconversión de cultivos
Uso conjunto agua subterránea/superficial	Presas subterráneas
Mercados y bancos de Agua	Desalación y barreras de flujo costero
Valor para agua del medio ambiente	Integración y recolección de datos

	(satelitales y terrestres)
Ordenamiento territorial integrado	Modelos hidrológicos integrados de uso conjunto y gestión

La gestión integrada de los recursos hídricos puede conceptualizarse como una estrategia conformada por acciones encaminadas a un manejo sostenible de los acuíferos, que garantice la seguridad del suministro de agua a todos los sectores usuarios –incluida la Naturaleza– en cantidad suficiente y de calidad apta para las actividades productivas, sin provocar impactos ambientales negativos ni afectar a terceros, incluidos los países vecinos en el caso de los SAT.

La gestión debe tener un enfoque **interdisciplinario, interinstitucional e intersectorial**. Interdisciplinario porque la gestión del agua no sólo incluye a los especialistas en hidrogeología sino también a los de varias disciplinas técnicas afines y a los especialistas de disciplinas no técnicas que contemplan los aspectos ambientales, sociales, económicos y legales, entre otros. Interinstitucional porque la gestión del agua no sólo es competencia de una autoridad de aguas sino de otras entidades gubernamentales, directa o indirectamente relacionadas con los recursos hídricos, del sector académico, de los ambientalistas, de las ONG´s, etc. Intersectorial porque en la gestión integrada del agua deben participar, necesariamente, los usuarios organizados, cuyo conocimiento del problema y buena disposición para resolverlo depende en gran parte el cumplimiento de cualquier programa de acciones.

La gestión debe basarse en esquemas flexibles que tomen en cuenta el carácter dinámico de todos los fenómenos hidrológicos naturales, llevando como objetivo principal la sostenibilidad del recurso, tanto en cantidad como en calidad, es decir, que pueda optimizarse su uso actual en todos los sectores, incluido el ambiental, sin comprometer su disponibilidad para las generaciones futuras.

Esto significa que en su manejo se debe tender a mantener un equilibrio a largo plazo entre la renovación y la extracción del sistema, esto es, en intervalos de tiempo suficientemente largos que incluyan períodos secos y lluviosos o incluso anticipar la adaptación al cambio climático.

### **Manejo del suministro y la demanda**

Tradicionalmente, la creciente necesidad de agua era satisfecha siguiendo la práctica de incrementar la oferta, mediante la construcción de nuevas obras de captación; tal práctica se aplicaba aun cuando se reconocía que una fracción considerable del volumen servido se perdía en las conducciones y en las redes hidráulicas o era utilizado con poca eficiencia.

Conforme la oferta de agua fue resultando insuficiente y, en algunos casos, progresaron los efectos de la sobreexplotación, el enfoque se ha ido cambiando hacia una estrategia integral que incluye la regulación de la demanda y el incremento de la oferta o disponibilidad del recurso hídrico.

Atención especial se debe prestar al manejo de la demanda en todos los sectores mediante uso más eficiente y medidas de conservación. Así, en el público urbano es recomendable implementar programas para la detección/reducción de fugas,

mejoramiento de la hidrometría, uso más eficiente del agua, campañas informativas, sanciones por faltas a los ordenamientos legales, modernización de las instalaciones sanitarias.

En el sector industrial, el reciclado del agua y el uso de agua residual tratada en actividades que no requieren agua potable, se ofrecen estímulos fiscales a los usuarios que cambian el agua de primer uso por la residual. En el sector agrícola, la modernización y tecnificación del riego, la reconversión de cultivos hacia otros más productivos y menos consumidores de agua, la rehabilitación de la infraestructura agrícola y la capacitación de los usuarios en la aplicación de tecnologías como la plasticultura.

### **Participación social**

Por considerar que los usuarios son los actores más importantes en la gestión del agua, pues de su conciencia del problema y buena disposición depende el cumplimiento de las medidas administrativas y de los ordenamientos legales, es necesario darles a conocer en términos accesibles la situación de sus fuentes de agua y promover su activa participación organizada en la formulación y ejecución de planes orientados a distribuir, desarrollar y preservar los recursos hidráulicos.

En este contexto, es importante que las agencias del agua que manejan el recurso también deban poner a disposición del público los datos, o sintetizados de datos, que representan el estado actual del sistema hidrológico y el balance hidrológico actual. Con ello se promoverá la comunicación y el consenso con respecto a las políticas y proyectos necesarios para la gestión sostenible de los recursos.

### **Cambios de uso de suelo y agua**

Donde la disponibilidad de agua es insuficiente para satisfacer las demandas de agua es recomendable promover la liberación de derechos sobre volúmenes de agua subterránea para cambiarlos de otros usos al consumo humano, es decir, un ordenamiento territorial que tienda al cambio de uso de suelo y agua.

Esta liberación se lleva a cabo por medio de varios mecanismos como la transferencia de derechos de los concesionarios agrícolas desplazados por la expansión de las manchas urbanas, a los usuarios industriales o a los organismos operadores de los sistemas de agua potable; o la aplicación de programas orientados a mejorar la eficiencia en el uso agrícola. Del mismo modo, la protección de la rica tierra agrícola o de hábitat ecológico, y los recursos relacionados con el agua, se deberá fomentar o regular en el SAT si estos recursos son valiosos.

### **Incremento de la disponibilidad de agua**

Paralelamente, pueden considerarse acciones orientadas a incrementar la disponibilidad de agua subterránea mediante una o varias de las acciones siguientes:

**Recarga artificial** Se refiere al incremento del volumen renovable de aguas subterráneas mediante obras construidas con ese fin específico, utilizando los métodos de recarga o tipos de obra que sean adecuados a las características de los SAT, a la capacidad del subsuelo para atenuar contaminantes y a las características del agua de

recarga. La fuente de recarga puede ser la lluvia, el escurrimiento superficial o el agua residual tratada. La selección de los métodos de recarga a aplicar y el diseño de las obras deben considerar el uso a que se va a destinar el agua de recarga recuperada, con especial atención a la protección de la salud cuando se vaya destinar al consumo humano.

**Captación de agua subterránea salobre o salada con fines de desalación** En las regiones áridas es común que en las porciones bajas de las cuencas los acuíferos contengan agua salobre o salina, derivada de la intensa evaporación y de los depósitos evaporíticos, cuyo aprovechamiento ha sido desechado donde existen fuentes con agua de buena calidad. Sin embargo, en ausencia de éstas y ante la presión de las demandas de agua, se puede considerar la explotación de estos acuíferos para diferentes usos previa desalación del agua.

Asimismo, en los acuíferos costeros afectados por intrusión salina, debe contemplarse la viabilidad de captar agua subterránea salobre o salada en su porción costera, con doble objetivo: incrementar la oferta de agua para diferentes usos previa desalación y formar una barrera hidráulica para frenar el avance de la interface salina hacia tierra adentro.

**Manejo de la evapotranspiración** Estudios realizados por varios investigadores han demostrado que, en las regiones áridas, algunas especies vegetales tienen sistemas radiculares que penetran varios metros en el subsuelo y, cuando alcanzan la superficie freática, extraen importantes volúmenes de agua de los acuíferos. La eliminación de la vegetación nativa que tenga “escaso” valor –ecológico, industrial, medicinal, paisajístico...- y sea consumidora de agua subterránea, puede traducirse en un incremento significativo de la disponibilidad de agua subterránea.

**Recirculación** En las regiones áridas, de escasez natural de agua, donde ya se ha rebasado la disponibilidad del agua subterránea y no es viable, técnica o económicamente, importar agua de otras fuentes cabe la posibilidad de reutilizar el agua mediante tratamiento del agua residual municipal, su introducción al subsuelo para un tratamiento natural complementario y su recuperación para servirla nuevamente para usos que no requieran agua potable y, en el extremo, aun para consumo humano, previo tratamiento.

**Presas subterráneas** En los acuíferos costeros, la construcción de presas subterráneas, puede ser de gran utilidad no sólo para incrementar la disponibilidad de agua mediante la intercepción de su descarga al mar, sino también para proteger al acuífero de la intrusión salina. Desde luego, la aplicación de esta tecnología está limitada a los acuíferos de estrecha sección- una boquilla subterránea de reducidas dimensiones-, en los que es técnicamente y económicamente viable construir una pantalla. Sin embargo, en una variante también puede ser viable construir una pantalla que penetre sólo parcialmente el acuífero (unos cuantos metros), cuyo efecto será el de provocar el ascenso del nivel freático aguas arriba del mismo y el incremento del espesor saturado de agua dulce. La tecnología de las presas subterráneas cobrará mayor importancia conforme al impacto del cambio climático se manifieste en un ascenso gradual del nivel del mar, que invadirá una extensión de terreno continental y modificará las condiciones de descarga de ríos y acuíferos al mar.

## **Manejo de la reserva almacenada**

Los acuíferos de grandes dimensiones contienen una gran reserva almacenada, acumulada en el transcurso de miles o millones de años, cuya magnitud suele ser mucho mayor que su volumen renovable anual y que permite regular las fluctuaciones – estacionales, anuales o de largo plazo de la precipitación pluvial. Esta cuantiosa reserva permite manejar los acuíferos con cierta flexibilidad; por ejemplo, pueden extraerse volúmenes de agua superiores a su recarga media durante varios años, ya sea para compensar la escasez de agua superficial durante ciclos secos o sequías prolongadas o para realizar proyectos productivos a costa de la reserva almacenada, mientras se desarrollan otras fuentes de agua (importación de otras cuencas, recarga artificial, desalación, etc...). En estas condiciones, es viable y hasta recomendable la sobreexplotación temporal controlada, siempre y cuando ésta sea oportunamente suprimida, la reserva subterránea recuperada y no se ocasionen efectos negativos transfronterizos.

La reserva almacenada en el subsuelo cobrará cada vez más importancia, en aquéllas regiones donde el impacto del cambio climático se manifieste en una reducción de la precipitación pluvial, en un aumento de la temperatura y en la consiguiente reducción de la disponibilidad de agua superficial y subterránea.

## **Ordenamientos legales**

En todo caso, es conveniente que la estrategia adoptada esté sustentada en ordenamientos legales (acuerdos, actas, tratados...), que concilien en lo posible lo dispuesto en los marcos legales de los países que comparten los SAT, en la porción de estos que sea de interés común.

### **6.4.3 Geoindicadores de estado**

La condición del ambiente en cualquier momento refleja no sólo la influencia humana sino también los procesos y fenómenos naturales que lo modifican. Con el propósito de describir la condición en que se encuentra un sistema natural –un sistema acuífero en el tema de que se trata- en un momento dado, así como la forma en que evoluciona bajo la acción de factores naturales o antrópicos, la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) a través de su Comisión de Ciencias Geológicas para la Planificación Ambiental (COGEOENVIRONMENT) desarrolló una relación de “geoindicadores ambientales” o “geoindicadores de estado”, como herramienta para asistir en las evaluaciones integradas de los ambientes naturales. Estas pueden también ser aplicadas a los SAT.

Dentro de esta relación, se incluyen varios geoindicadores relativos al agua subterránea (en cantidad y calidad), que representan la importancia que ésta tiene para el desarrollo sostenible de un ámbito geográfico determinado.

Un geo-indicador es un parámetro que valora los cambios en las magnitudes, frecuencias y/o tendencias de un fenómeno o un proceso, natural o antrópico, que puede impactar en sus actividades actuales o futuras y en su entorno. Los geoindicadores han sido desarrollados sobre la base de procedimientos metodológicos estándar usados en geología, geoquímica, geofísica, geomorfología, hidrología y otras ciencias de la tierra.

Para la mayoría de ellos ya existe experiencia y tecnología. Algunos geoindicadores son complejos y costosos, pero muchos son relativamente simples y económicos de aplicar. Dadas estas características, Winograd (1995a, b) y Winograd et al. (1998) establecieron la necesidad de caracterizar los indicadores respecto a:

- **Confiabilidad:** que los datos tengan validez científica, sean accesibles, incluyan series espacio-temporales de calidad y una relación costo-beneficio apropiada.
- **La relación con el problema:** que los datos tengan representatividad a la escala del problema, una cobertura apropiada, ser sensibles a cambios específicos y posibilitar su integración con otras medidas similares.
- **La utilidad para el usuario:** que los datos sean oportunos, aplicables, comprensibles, interpretables, comparables y no redundantes.

Los geoindicadores son medidas (magnitudes, frecuencias, velocidades y tendencias) de procesos y fenómenos -geológicos, hidrológicos, climáticos...- que ocurren en la superficie terrestre y están sujetos a modificaciones que son significativas en períodos de hasta 100 años. Miden tanto eventos catastróficos repentinos como graduales, pero todos evidentes en el período de vida del hombre.

Si bien las actividades antrópicas pueden acelerar, retardar o desviar los cambios naturales –el hombre es ciertamente una parte integrante de la naturaleza y el ambiente-, es esencial reconocer que la naturaleza y el ambiente están continuamente variando en escala temporal y espacial, independientemente de la presencia del hombre.

Por lo tanto, la sostenibilidad ambiental debe evaluarse en función de un ambiente potencialmente cambiante. Los geoindicadores fueron diseñados para ser aplicados en el monitoreo ambiental, informar acerca del estado del ambiente y evaluar de manera general la sostenibilidad de un ambiente a distintas escalas.

Estos permiten responder cuatro preguntas básicas: ¿Qué está sucediendo en el ambiente? (condiciones y tendencias); ¿Por qué está sucediendo? (causas, vínculos entre las influencias humanas y los procesos naturales); ¿Por qué son significativos? (efectos ecológicos, económicos y sobre la salud) y ¿Qué se hace con respecto a ello? (implicancias para la planificación y reglamentación).

Según Andriananse (1993), los geoindicadores no sólo deben ayudar a los investigadores a simplificar, cuantificar y analizar la información del ambiente sino también deben permitir comunicar los eventos complejos de modo simplificado. Tras la idea de lograr la predicción y el monitoreo del ambiente, algunos autores plantean el uso de indicadores:

- **aislados** para la detección de problemas específicos (Malvarez y Bó, 2000);
- **reunidos** en grandes grupos temáticos espaciales o temporales (Berger y Iams, 1996; Berger, 1997); y
- **utilizados para definir y evaluar** los distintos momentos de un proceso ambiental (Friend y Rapport, 1979).

En relación a las aguas subterráneas y los acuíferos transfronterizos, los geoindicadores más relevantes pueden ser: niveles de agua subterránea; calidad del agua subterránea;

de sostenibilidad del agua subterránea (importancia y explotación del agua subterránea). A continuación se da una breve descripción de cada uno de ellos.

**Nivel del agua subterránea:** un indicador muy objetivo del estado de un acuífero es la evolución de su nivel de agua, ya que toda fluctuación de éste refleja un cambio de almacenamiento y es el efecto neto del balance entre los volúmenes de agua que entran y salen del acuífero o de la porción considerada del mismo: un descenso del nivel indica que el volumen de entrada fue menor que el de salida, en el intervalo de tiempo considerado, independientemente de la magnitud de cada uno, de su origen y de las vías por las que tiene lugar (naturales y/o artificiales); a la inversa, un ascenso del nivel indica una ganancia en el almacenamiento.

Sin embargo, este indicador debe basarse en un monitoreo adecuado en cuanto a la cobertura geográfica, a las características de los puntos de medición y al intervalo de tiempo abarcado por ésta, así como en una interpretación racional de los datos. Como se apuntó en párrafos anteriores, los acuíferos, como todo elemento natural, tienen un comportamiento dinámico; en particular, sus niveles de agua presentan fluctuaciones diarias, estacionales, anuales o de largo plazo, en respuesta a los esfuerzos naturales o artificiales a que están sometidos.

Por tanto, la interpretación de sus oscilaciones debe considerar el contexto al cual corresponden los datos, evitando una interpretación simplista de los mismos y el contexto de las condiciones de confinamiento o no confinamiento y coeficientes de almacenamiento relacionados.

Así, por ejemplo, no debe interpretarse *a priori* un abatimiento de niveles como un efecto negativo o una condición destructiva permanente (minado o sobreexplotación), pues este puede ser: el efecto local transitorio provocado por el bombeo de uno o varios pozos dentro de su área de influencia; el efecto regional transitorio de un régimen sostenible de bombeo, que dura mientras su influencia intercepta descargas naturales y alcanza un nuevo estado de equilibrio; o el efecto de una sobreexplotación temporal controlada, adoptada durante una sequía prolongada o mientras se desarrollan otras fuentes de agua.

Si se trata de un SAT de gran tamaño, deberá cuidarse que la cobertura geográfica del monitoreo sea representativa de toda la unidad o de porciones seleccionadas de la misma, ya que las condiciones hidrogeológicas no son las mismas en toda su extensión y, por tanto, un solo geo-indicador para toda la unidad puede ser muy engañoso.

Igualmente, no se pueden generalizar rangos de valores de este geoindicador para identificar si una condición dada es aceptable, moderada o grave, pues sus valores son relativos y dependientes del contexto hidrogeológico en cuestión; por ejemplo, un abatimiento de los niveles freáticos de magnitud dada puede ser aceptable en un acuífero de gran espesor y captado por pozos profundos, mientras que el mismo abatimiento puede ser muy perjudicial en un acuífero de espesor reducido, captado por obras de reducida profundidad (norias, galería filtrantes) y con reducido tirante de agua o que alimenta a afloramientos naturales (manantiales, humedales, corrientes superficiales) y a ecosistemas vulnerables a la falta de humedad.

Por lo demás, este geo-indicador puede representarse gráficamente, en forma muy objetiva, mediante hidrógrafos de pozos o curvas de iso-evolución correspondientes a

intervalos de tiempo seleccionados, de preferencia multianuales que incluyan ciclos secos y ciclos lluviosos.

La **calidad del agua subterránea** ilustra las dificultades de elegir unos pocos parámetros en un ámbito donde existen miles de potenciales contaminantes que son producto de las sociedades modernas. Estos componentes químicos y los propios naturales del agua, pueden variar independientemente y, solos o combinados pueden afectar la salud del hombre y otros organismos y su funcionamiento. En la relación de indicadores de calidad en el contexto de geoindicadores, se ha realizado una selección de algunos parámetros de primero y segundo orden que pueden usarse en la mayoría de los casos para evaluar procesos o tendencias significativas. Se han propuesto los siguientes indicadores de cambio de primer orden (indicados en **negrita y cursiva**), asociados a varios procesos y problemas, y respaldados por varios parámetros de segundo orden:

- **Salinidad:** *Cl*, CE (conductividad eléctrica);  $SO_4$ , Br, TDS (sólidos totales disueltos); F, Br, I, Mg/Ca (halógenos y las proporciones de halógenos relativos al cloruro y proporciones de cationes);  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$ ,  $^{10}B$ ,  $^6Li$  (isótopos estables)
- **Acidez y estado Redox o de óxido-reducción:** *pH*, *HCO<sub>3</sub>*, *Eh*, oxígeno disuelto, Fe, As
- **La edad y la fuente de agua subterránea:**  $^3H$ ,  $^{36}Cl$ ,  $^{222}Rn$  (isótopos radioactivos)
- **Contaminación agrícola:** *NO<sub>3</sub>*,  $SO_4$ , DOC (carbono orgánico disuelto), K/Na, P, pesticidas y herbicidas
- **Contaminación urbana:** *Cl*, *HCO<sub>3</sub>*, *DOC*, B, Cr<sub>6</sub>, hidrocarburos, cafeína, solventes orgánicos, y productos farmacéuticos;  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$ ,  $^{10}B$ ,  $^6Li$  (Isótopos estables).
- **Otros de contaminación natural:** *SO<sub>4</sub>*, *pH*, Fe, As, otros metales como Se, Cr<sub>6</sub>, F, Sr.

Estos indicadores pueden ser muestreados y analizarse con relativa facilidad usando técnicas estándar y equipo de laboratorio. Los cambios en la calidad del agua subterránea se perciben normalmente a escala estacional o anual, por lo que se sugiere una frecuencia de medición de 2 veces por año.

Cabe destacar que los sitios de muestreo y la frecuencia de muestreo deberán ser lo suficientemente representativos como para reflejar las condiciones naturales y antrópicos del comportamiento del sistema de agua subterránea, tanto vertical como horizontalmente. Ambas muestras, tanto de la superficie como muestras compuestas dependiente de la profundidad pueden ser necesarias para delinear cambios en la calidad entre los acuíferos múltiples (Izbicki et al., 1999).

#### 6.4.4 Indicadores de sostenibilidad de aguas subterráneas

En el contexto del desarrollo de indicadores de sostenibilidad, la función principal de los mismos es de simplificar, cuantificar, comunicar, ordenar y comparar los diferentes aspectos constitutivos y el uso de los sistemas hidrogeológicos. Es decir, que estos indicadores permiten describir de manera sintética el estado del sistema o los procesos que en él se desarrollan, de una manera comprensible. A su vez, las mediciones regulares de estos indicadores suministran información temporal de su evolución.

Teniendo en cuenta los indicadores de sostenibilidad de las aguas subterráneas utilizados por Hirata *et al.* (2007) se considera conveniente la definición y monitoreo de los cuatro tipos de indicadores descritos abajo.

**Indicadores de la importancia del agua subterránea:** Estos toman en cuenta el total de la población, la población servida con agua subterránea, el volumen de recurso disponible y sus volúmenes de utilización. Es decir, hacen referencia a la dependencia del suministro público de las aguas subterráneas y al grado de participación del agua subterránea en los distintos usos.

- Indicador 1 = Población servida con agua subterránea en relación a la Población total expresada en 100%
- Indicador 2 = Extracción total del agua subterránea (todos los usos) [ $\text{m}^3/\text{año}$ ] en relación al total de los recursos de agua subterránea disponible (capacidad total de bombeo de la infraestructura actual) [ $\text{m}^3/\text{año}$ ] expresada como un porcentaje de la recarga media respectiva.

**Indicadores de explotación de las aguas subterráneas:** Es la relación entre el recurso de aguas subterráneas al total de la población y la abstracción al recurso disponible.

- Indicador 3 = Relación entre los recursos de agua subterránea en [ $\text{L}/\text{día}$ ] y la población total. Este indicador tiene en cuenta el caudal máximo que puede ser extraído de modo de no causar impactos negativos en los cuerpos de agua.
- Indicador 4 = Relación entre la extracción neta total del agua subterránea en [ $\text{m}^3/\text{año}$ ] en relación al total de los recursos de agua subterránea disponible (capacidad total de bombeo de la infraestructura actual) [ $\text{m}^3/\text{año}$ ], expresada como un porcentaje.

Estos resultados se deben articular en forma continua con los geoindicadores de estado, el diagnóstico socioeconómico y cotejar con la normativa vigente (Gutierrez-Yurrita, 2009).

Finalmente, es importante advertir que al aplicar los geoindicadores a un SAT, los países que lo comparten deben acordar qué porción de éste van a considerar, pues obviamente el valor de un geo-indicador aplicado al SAT en toda su extensión, puede ser muy diferente al valor correspondiente a la porción fronteriza del mismo, lo cual puede llevar a una conclusión engañosa.

De igual manera, deben acordar conjuntamente los geoindicadores a utilizar, los datos básicos para evaluarlos (fecha o intervalos de tiempo) y el criterio de interpretación. Todo esto con el fin de que los geoindicadores sean representativos y puedan ser utilizados con propósitos comparativos o como base para definir un criterio de asignación del recurso entre las partes. Una forma de trabajo puede consistir en que cada país determine los geoindicadores seleccionados para su propia porción del SAT

y, adicionalmente, todos ellos determinan conjuntamente su valor para la porción fronteriza seleccionada sin atender a la frontera política.

## 6.5 Conclusiones

Las grandes demandas de agua proveniente de los acuíferos que están siendo explotados y en ocasiones contaminados, han dado como resultado un desarrollo acelerado en los países que comparten este recurso. Establecer **guías básicas** para los sectores científicos, técnicos, legales y administrativos ayudará a crear un marco de uso y desarrollo sostenible de los SAT. Esto no solo provee un marco para el monitoreo y para tomar decisiones, sino que también facilitará un medio para prevenir o resolver conflictos entre vecinos que comparten el recurso. El desarrollo conjunto de un **modelo conceptual**, a una escala o área que abarque un análisis conjunto, proveerá las bases iniciales para la gestión conjunta y un desarrollo sostenible continuo de los recursos hídricos.

Este enfoque basado en la ciencia para una buena gestión, es una premisa fundamental derivada del programa de gestión compartida que promueve la UNESCO y la OEA a través del programa ISARM Américas entre los países de las Américas. Este capítulo no solamente resume las guías necesarias tanto del ámbito científico y técnico sino que facilita un análisis holístico del SAT a la vez que provee la integración de la información necesaria para la sostenibilidad del recurso para todos.

La **evaluación de disponibilidad de agua** dentro de este marco requiere de un análisis holístico que incluya redes de monitoreo definidas para todos los aspectos del ciclo hidrológico que permitan calcular el balance hidrológico del SAT. Esto incluye la medición de atributos basados en monitoreo en tierra y en sensores remotos que puedan ser compilados en una base de datos conjunta y compartida potencialmente en tiempo real entre los países vecinos, de esa manera el estado del recurso es de conocimiento común. Estas redes a su vez crean flujos potenciales de datos observados necesarios para modelar el ciclo hidrológico.

Como parte de este marco, la comunicación sobre el estado de los sistemas hídricos a los tomadores de decisiones, a la industria y a la sociedad es la pieza fundamental para reducir conflictos y promover la cooperación para un desarrollo sostenible. Finalmente, este marco cuando es combinado con el de modelación hidrológico, provee una estructura para evaluar los efectos del uso conjuntivo, flujos transfronterizos, desarrollo adicional del recurso y adaptación a los cambios de clima y variabilidad.

La salud del recurso no es simplemente la cantidad de agua que está disponible, sino que debe contemplar la vulnerabilidad del recurso a los contaminantes antrópicos y naturales. La vulnerabilidad del SAT a los contaminantes de fuentes superficiales o sub-superficiales y al movimiento entre acuíferos a través de pozos puede ser una limitación fuerte a la sostenibilidad del recurso o al desarrollo adicional del SAT. Ya que el agua subterránea es potencialmente vulnerable, debe tenerse cuidado al evaluar sistemáticamente la naturaleza química de los acuíferos regionales que pueden distinguir entre contaminantes antrópicos y naturales de los factores que pueden originar su movimiento desde y hacia el SAT.

A medida que se van desarrollando guías para la evaluación conjunta de los SAT, se debe reconocer que hay muchas incertidumbres y desconocimiento. La incertidumbre puede ampliar todos los aspectos de nuestro conocimiento de estos recursos empezando con el marco de los recursos que están incorporados en el modelo conceptual, escala de la evaluación y balance hídrico.

Muchas de las incertidumbres empiezan con la poca disponibilidad de datos básicos y los tipos de análisis que se derivan de ellos y de las redes de datos. Una incertidumbre adicional surge cuando estos datos tan limitados se regionalizan o son usados para desarrollar modelos hidrológicos que simulan los usos y movimientos de agua a través del SAT. El análisis de incertidumbres a nivel de datos, redes de datos, análisis y simulación, es necesario para ayudar a cuantificar el nivel de las preguntas y la magnitud de flujos que pueden ser tomados en cuenta en la inversión de recursos financieros para ese propósito. Debido a que estos usos incluyen requisitos para flujos ambientales, variabilidad y cambios climáticos, una gran variedad de indicadores pueden ser necesarios para identificar las incertidumbres naturales y antrópicas.

Los efectos que inciden en el desarrollo de los SAT son en gran medida dependientes del marco hídrico, tipos de usos, y la gobernanza de los países que comparten los SAT. Los efectos más comunes que pueden causar problemas entre países fronterizos que comparten los recursos hídricos incluyen la relación topográfica entre los vecinos que localizados aguas arriba y aguas abajo, la distribución de pozos y sus niveles de extracción, y las relaciones entre los diferentes usos de agua con peligro potencial de contaminación del acuífero.

En particular, la cantidad de sistemas ambientales, sistemas de explotación del recurso formales e informales, la variabilidad y cambio climático, y la conexión con la recarga y el agua de superficie, guían las estrategias de desarrollo y sostenibilidad de los SAT. Se requieren geoindicadores especiales de sostenibilidad para facilitar la toma de decisiones, informar sobre el estado del SAT y proveer medidas simples del estado y salud del recurso.

Por último, **una gestión sostenible requiere de múltiples niveles de acción.** Optimizar el uso de los recursos disponibles, al mismo tiempo que se preservan y se da prioridad a la disponibilidad del agua, así como desarrollar opciones para la adaptación, permitirá colectivamente reforzar el uso conjunto de los recursos del SAT. Estos sectores se superponen en los aspectos sociales y técnicos del manejo que trasciende las facetas sociales y de uso técnico interdisciplinarias, intersectoriales e intergubernamentales.

La gestión de los recursos hídricos se apoyará en esquemas flexibles que no solamente gestionen la demanda sino también permitan la participación social para resolver problemas, usos de la tierra y del agua, e incentive la sostenibilidad incremental del recurso. Este último se puede obtener por medio de proyectos conjuntos que facilitan la recarga artificial, desalinización de agua de baja calidad, el reúso de aguas servidas tratadas, la gestión de la evapotranspiración, y proyectos y políticas que reduzcan la vulnerabilidad a la contaminación. Gran parte de esto no es posible sin el apoyo social en cada lado de las fronteras que facilite la sostenibilidad y la gestión compartida.

## 7. ENFOQUES PARA IMPLEMENTAR LA ESTRATEGIA REGIONAL

Editado por: Alfonso Rivera, Luiz Amore, Julio Kettelhut, Rubén Chávez-Guillén, Jaime Alejandro Vences Mejía y Mario Arias

### 7.1 Introducción

Este capítulo presenta enfoques hacia la implementación de la estrategia regional para la evaluación y gestión de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas. Se definen los pasos y planteamientos hacia la realización de la estrategia. Como tal, se incluyen discusiones relevantes sobre la importancia de: compartir información, comunicación, cooperación, colaboración, participación social, y financiamiento así como el desarrollo de los recursos humanos (capacidades institucionales). En la definición de estas, la estrategia aprovecha los resultados de otras prácticas exitosas de la gestión del agua subterránea (transfronteriza o no) en el continente.

Se espera que estas pautas ayudaran en la toma de decisiones de los organismos con competencia en la gestión de recursos hídricos, o que estas sean propuestas a las autoridades de más alto nivel. También se espera que las pautas aquí propuestas sean articuladas en el marco de procesos de difusión social y participación ciudadana.

### 7.2 Etapas y planteamientos hacia la realización de la estrategia

El enfoque hacia la implementación de la estrategia regional para la evaluación y gestión de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas se presenta con una serie de acciones y planteos que se pueden aplicar a las situaciones de cada SAT.

Una estrategia del tipo propuesto aquí para la región de las Américas no se puede implementar en una sola etapa. La estrategia para la evaluación y gestión de los SAT requiere la elaboración e implementación de diversas etapas y en diferentes tiempos, así como un monitoreo permanente del desarrollo de la misma.

En la implementación de esta estrategia se sugieren dos etapas, una a corto plazo (3 a 5 años) y otra a mediano/largo plazo (5 a 15 años).

Los capítulos precedentes definen con detalle las características generales de la estrategia que sería adecuada para el continente Americano. Estos rasgos generales pueden servir como guía general en la planificación e implementación en cada SAT particular para los dos o más países que lo comparten.

La tabla 7.1 lista los elementos claves en la planificación e implementación de la estrategia.

<b>Elementos claves en la implementación de la Estrategia Regional</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adquisición de conocimientos</li> <li>• Cuadro jurídico transfronterizo</li> <li>• Procesos de planificación regional y sectorial existentes en cada país</li> <li>• Identificación clara de los administradores por cada país</li> <li>• Identificación del montaje financiero</li> <li>• Elaborar plan conjunto de intercambio de información</li> <li>• Elaborar plan de comunicación</li> <li>• Asociar la sociedad civil a la elaboración de la estrategia y planificación en la escala transfronteriza</li> <li>• Adopción del plan de la estrategia por consentimiento mutuo</li> </ul>

Tabla 7.1 Elementos claves en la implementación de la estrategia

En el corto plazo, que podría definirse entre 3 y 5 años, se requiere elaborar un plan de acción para la adquisición de conocimientos con relación al SAT en su cobertura total. El capítulo 6 presenta con bastante detalle las acciones a seguir para establecer las bases científicas y técnicas necesarias para obtener los conocimientos del SAT, así como los aspectos más importantes de una gestión sostenible.

En algunos casos, el SAT puede ya contar con esa información para el cual la etapa de adquisición de conocimientos sería más rápida. En el capítulo 4 se presenta una síntesis de los niveles del conocimiento de los SAT en las Américas. De los 73 SAT identificados e inventariados, solo 16 de ellos tienen niveles de conocimientos superior al 80%; 7 SAT cuentan con 40% de conocimiento; 8 SAT cerca de 30%; el resto de los SAT tienen muy poco conocimiento (menos de 25%) y en algunos casos ningún conocimiento (4 SAT).

En el mediano-largo plazo, que podría definirse entre 5 y 15 años, se requiere elaborar un plan de acción estratégico con esquema directivo de gestión conjunta. Para ello se requiere un marco jurídico transfronterizo que en la mayoría de los casos no existe. En el capítulo 5 se describen los instrumentos legales, la situación actual y las tendencias de instrumentos de diverso valor jurídico que adoptan principios o normas en relación al uso del agua. Ahí se describen los artículos existentes sobre el derecho de los SAT con normas y leyes internacionales sobre las aguas, así como una breve descripción de los aspectos institucionales que incluyen herramientas legales de cada uno de los 24 países de las Américas.

El cuadro jurídico transfronterizo es esencial en la planificación e implementación de la estrategia para cada SAT. Tanto el marco jurídico como los mecanismos para compartir los beneficios entre países, constituyen los elementos fundamentales en la implementación de la estrategia.

En la medida de lo posible, ese cuadro y esos mecanismos podrían ser establecidos con los instrumentos legales existentes, que aunque no sean de naturaleza transfronteriza, se podrían adaptar en el proceso de negociación transfronteriza. Donde estos no existan, se recomienda utilizar la **Resolución 68/118 de la Asamblea General de las Naciones Unidas** sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos; esa

Resolución es el único instrumento internacional relativo a los SAT y puede servir como líneas directivas para los países.

La gestión del SAT debe estar ligada a procesos de planificación regional y sectorial existentes en cada país que comparte el mismo SAT. Para que una estrategia transfronteriza del tipo aquí presentado pueda tener éxito, sea interesante para los países que la comparten, y sea eficaz se requiere que esté conectada a otros procesos ya existentes de planificación regional y sectorial de cada país y en cada lado de la frontera que cruza el SAT.

Se reconoce que no será posible aplicar este ejercicio en todos los casos, sin embargo, el reconocimiento de las planificaciones existentes para la gestión de recursos hídricos de cada país reforzaría los mismos y validaría más fácilmente una estrategia transfronteriza compartida.

Para cada acción identificada dentro de la estrategia del SAT, será necesario identificar de manera clara a los responsables de la misma por cada país. Es recomendable también que se establezca un órgano de gestión internacional de los países que comparten el SAT. Asimismo, se debe elaborar un montaje financiero compartido que permita a esos grupos desarrollar las acciones de la estrategia.

La clave del éxito de una buena gestión conjunta reside en elaborar un plan conjunto de intercambio de información del SAT. Esa información requiere no solo el conocer los aspectos científicos y técnicos del SAT sino otros aspectos relacionados con los usos prioritarios del agua subterránea de cada lado de la frontera.

Para que un plan de colaboración de este tipo pueda tener éxito es necesario que este sea transparente; por lo que se requiere elaborar un plan de comunicación muy temprano en el proceso de planificación de la estrategia.

La experiencia en varios casos de usos de acuíferos compartidos, ha mostrado que un aspecto relevante en el éxito de gestión compartida es el hecho de involucrar a la sociedad civil, a la elaboración de la estrategia y la planificación en la escala transfronteriza.

Finalmente, se deben realizar todos los esfuerzos que sean necesarios para que el plan de implementación de la estrategia se elabore con consentimiento mutuo.

### **7.3 Compartir información y modalidades de colaboración**

Las modalidades de colaboración entre los países que comparten acuíferos transfronterizos, para su estudio, desarrollo y manejo sostenible, son o pueden ser muy variadas: desde un simple acuerdo de alcance local para el intercambio de información hidrogeológica de un área donde se han identificado efectos transfronterizos negativos, o en donde estos se pudieran generar potencialmente, hasta una estrategia que incluya acciones orientadas al manejo sostenible de un SAT de gran extensión, o bien un programa bi- o multi-nacional que considere todos los SAT a lo largo de una frontera internacional.

En sus etapas iniciales, la colaboración puede partir de un intercambio de la información ya disponible en cada país sobre el marco físico y los aspectos hidrogeológicos de los SAT seleccionados de común acuerdo entre los países que los comparten. Lógicamente, los SAT que generalmente tienen mayor prioridad en este sentido son aquellos que están ubicados en regiones de clima seco, donde la reducida disponibilidad de agua superficial determina que el agua subterránea tenga mayor importancia relativa como única fuente permanente, aunque también de lenta renovación.

Si se pretende una colaboración de mayor nivel, duración o cobertura geográfica, es recomendable diseñar un programa formal que, de preferencia, sea coordinado por una comisión estatal, regional, nacional o por un organismo análogo con representación oficial y competencia en los asuntos internacionales de la frontera de que se trate; organismo que sería el intermediario entre ambos países para consultas recíprocas, intercambio de información, estudios binacionales y resolución de conflictos.

El programa puede considerar uno o varios SAT; y si la intención es extender su aplicación gradual a toda la frontera internacional, pueden establecerse acuerdos de carácter general que establezcan compromisos básicos como punto de partida para posibles programas específicos.

Como ejemplo se puede citar el Acta 242 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos (CILA), de 1972, en el cual entre otras disposiciones relativas a la Cuenca Baja del Río Colorado, se establece que: *“...mientras se llega a la celebración por los Gobiernos de México y los Estados Unidos de un convenio de alcance general sobre aguas subterráneas en las zonas fronterizas,...a fin de evitar problemas futuros...se consultarán recíprocamente antes de emprender en el área fronteriza de sus respectivos territorios, cualquier nuevo desarrollo de aguas superficiales o de aguas subterráneas, o de emprender modificaciones sustanciales de sus desarrollos actuales que pudieran afectar adversamente al otro país...”*

La colaboración puede llevarse a cabo a través de reuniones presenciales o remotas, en forma periódica entre los países involucrados, con el objetivo de hacer aclaraciones sobre el material intercambiado y de acordar los términos de un programa conjunto de trabajo.

Es conveniente que las primeras acciones de este programa estén orientadas a la caracterización de los SAT, a la definición de su modelo conceptual, a la evaluación de sus aspectos cuantitativos (recarga, descarga, reserva almacenada...) y a la identificación de los problemas transfronterizos potenciales o ya generados. Un aspecto importante para facilitar la colaboración es la definición de un marco de referencia único para que la información intercambiada sea compatible y de fácil correlación, especialmente la relativa a la faja fronteriza.

En una siguiente etapa, cada país procede a integrar y reinterpretar la información propia y la recibida del país vecino, para definir la conexión hidrogeológica a través de la frontera internacional y evaluar, en su caso, los efectos transfronterizos generados. En su caso, con base en lo anterior, se procede a la definición conjunta de los términos de referencia para realizar los estudios complementarios que se requieran de los SAT seleccionados y/o la definición de las acciones específicas que se requieran para

prevenir los efectos transfronterizos o mitigar los ya existentes. En los términos de referencia deberá especificarse si se considera el SAT en toda su extensión o sólo una porción fronteriza fijada de común acuerdo, así como también los objetivos del programa.

Para la administración de los recursos hídricos es recomendable que cada país considere el estudio y el manejo sostenible de su porción de los SAT como unidades de gestión; sin embargo, cuando estos son muy extensos y los recursos presupuestales disponibles son limitados, su caracterización y evaluación integral puede ser muy lenta, costosa, no prioritaria y no necesaria para el análisis de los problemas transfronterizos.

En estos casos es necesario jerarquizar la necesidad o urgencia de realizar los estudios considerando, entre otros factores: la complejidad de los acuíferos, su estado actual de explotación, su importancia relativa para el desarrollo de la zona, las demandas de agua en ambos lados de la frontera, los programas de desarrollo basados en la captación de agua subterránea y la vulnerabilidad de los acuíferos con relación a los efectos transfronterizos.

Al establecer programas de gestión compartida, se deben consignar los objetivos, la cobertura geográfica, el marco de referencia, el programa de actividades, los mecanismos de interacción, las fuentes y montos de financiamiento, etc. El aporte financiero de cada país puede definirse de común acuerdo en cada caso, conforme a la capacidad económica de cada uno, al grado de conocimiento que tenga de su porción del SAT y a las características de éste con respecto a la frontera, quedando abierta la posibilidad de que el país más desarrollado apoye con recursos presupuestales o en especie (asesoría técnica, equipo, servicio de laboratorios, etc.) al vecino de menor desarrollo.

La ejecución de las actividades de campo que forman parte de los estudios puede ser encomendada a personal especializado de la dependencia u organismo competente en materia de recursos hídricos, a instituciones académicas o de investigación, o a empresas privadas, según convenga.

En algunos casos se puede contemplar la posibilidad de que brigadas de trabajo formadas con personal técnico de ambos países realicen los trabajos en ambos lados de la frontera; aunque esta opción es poco viable debido a restricciones migratorias. Por ello, es recomendable que cada país realice el estudio de su porción de acuífero, para luego intercambiar y conciliar los datos y resultados obtenidos, como base técnica para las etapas posteriores de la gestión.

En una forma de colaboración más avanzada, dentro de sus respectivos marcos legales en materia hídrica, los países pueden formular un plan de manejo sostenible de los SAT que comparten, basado en los resultados de los estudios conjuntos y en el cual se incluyan disposiciones aplicables a la faja fronteriza prefijada, para prevenir o corregir los efectos transfronterizos, sin coartar la libertad o soberanía de cada país para manejar el resto de su porción como más le convenga. Los planes de manejo pueden ser formulados con enfoque de gestión integrada, esto es, considerando no sólo a los acuíferos sino también las fuentes de agua superficial, el reúso de las aguas residuales, en su caso las aguas salobres o marinas y las diferentes acciones para incrementar la disponibilidad de agua, como la recarga artificial, la cosecha de agua de lluvia, el manejo de la evapotranspiración y la desalación (ver capítulo6).

Al respecto, puede citarse el caso del SAT denominado “Bolsón del Hueco”, compartido por México y los Estados Unidos, en el cual se ha llegado a la formulación de planes de manejo que serán conciliados para atenuar los efectos transfronterizos que se están generando mutuamente en las ciudades de El Paso (EUA) y Juárez (México) y se incluye una estrategia preliminar para afrontar tanto el crecimiento esperado de la demanda de agua en ambos lados de la frontera, como el impacto esperado del cambio climático sobre los recursos hídricos.

En otra forma de colaboración, cuando ya hay efectos transfronterizos cuya causa no puede ser suprimida, el país que los provoca puede resarcir los daños mediante apoyos financieros para realizar obras de mitigación en el país afectado o, incluso, obras compensatorias fuera de esa zona. La cuenca baja del río Colorado ofrece un ejemplo ilustrativo de estos casos: la recarga subterránea que recibe el Valle de Mexicali, en México, procedente de las filtraciones en el Canal Todo Americano, que cruza el Valle Imperial, en California, EUA, en las inmediaciones de la frontera entre California y Baja California, está siendo sustancialmente reducida al construirse un nuevo canal revestido que sustituye al original.

Diversas formas de mitigación se han contemplado: la tecnificación del riego en el valle de Mexicali, el almacenamiento de excedentes de agua de México en presas de Estados Unidos, la construcción de un acueducto para exportar agua de esta cuenca a la vertiente del Pacífico con el fin de complementar el abasto de agua a ciudades costeras mexicanas, la construcción de una planta desalinizadora de agua marina, obras todas que en parte serían costeadas por el gobierno estadounidense (ver cuadro6-4).

#### **7.4 Cooperación, colaboración y participación social**

La implementación de acciones en un SAT no sólo es responsabilidad de las agencias del gobierno central, sino también de los organismos regionales y locales (provincial, estatal, municipal) y de la sociedad en su conjunto. Para generar acciones de buena gestión de un SAT, son necesarias las asociaciones de los diferentes niveles administrativos.

El primero es el nivel internacional entre los países que comparten el SAT, así como las agencias multilaterales de desarrollo y organismos de financiamiento entre otros. El segundo se lleva a cabo a nivel nacional, entre las instituciones nacionales que representan diferentes áreas administrativas de los sectores gubernamentales y cuyas actividades están relacionadas con la protección, conservación y uso del agua de los acuíferos. El tercer nivel, y quizás el más importante, es el local.

La gestión de un SAT, especialmente aquellos que se localizan en áreas grandes es una actividad muy compleja debido a la variabilidad de las características físicas, sociales, económicas y ambientales dentro de una gran región.

Debido a esto, es necesario implementar acciones locales con el fin de tener una gestión más eficaz del acuífero, es decir, en forma descentralizada, pero manteniendo la coherencia con el SAT en su conjunto. Sin embargo, dependiendo del tamaño del SAT y

las dificultades institucionales y financieras de un país en particular, es difícil promover la gestión descentralizada.

Para hacer factible esas acciones se necesita establecer alianzas con socios locales, tanto públicos o privados. La participación de estas sociedades apoyaría el establecimiento de acciones de manejo, y mejoraría el control social del proyecto. La identificación y la participación de estas asociaciones deben considerarse como un procedimiento estratégico a ser incorporadas en el establecimiento del proceso de administración, puesto que la sostenibilidad futura de las acciones de manejo está directamente relacionada con la participación de la sociedad local.

El CUADRO 7-1 presenta un ejemplo de uno de los casos más conocidos de cooperación, colaboración y participación social sobre la gestión de las aguas subterráneas, aunque no necesariamente transfronterizas, presentan un ejemplo de buenas prácticas de gestión integrada.

### **CUADRO 7-1 Caso de cooperación, colaboración y participación social de las aguas subterráneas, México.**

En México, la “cooperación Internacional” se define como el conjunto de acciones que derivan de los flujos de intercambio que se producen entre sociedades nacionales diferenciadas en la búsqueda de beneficios compartidos en los ámbitos del desarrollo económico y el bienestar social, o bien, que se desprenden de las actividades que realizan tanto los organismos internacionales que integra el Sistema de las Naciones Unidas como aquellos de carácter regional, intergubernamentales o no gubernamentales, en cumplimiento de intereses internacionales particularmente definidos. La cooperación internacional así descrita se entiende como la movilización de recursos financieros, humanos, técnicos y tecnológicos para promover el desarrollo internacional.

Si bien el objetivo es buscar beneficios compartidos y conjugar esfuerzos para promover el desarrollo internacional, se ve en general que con este tipo de acepciones lo que se pretende es generar situaciones o circunstancias que podrían no existir al momento en que se proponen pero que se procura desarrollar hacia el futuro, pero que sucede cuando esta cooperación surge también de la necesidad de reaccionar ante un problema común o resolver alguna problemática originada cuando los países comparten un recurso natural como una cuenca o un acuífero, la sola existencia de este factor detona la cooperación.

Para el caso de “**colaboración**”, más que indagar en una definición principalmente aceptada a nivel internacional, valdría la pena hacer una clara diferenciación entre cooperación y colaboración. La primera se refiere más a una estructura o trabajo compartido entre varias entidades con un fin común para conseguir un beneficio o producto final muy específico; en tanto que la **colaboración** se entiende como el trabajo o el esfuerzo que no necesariamente se tiene que realizar en conjunto como una unidad, sino que cada entidad pueda desarrollar su propias capacidades en lo que previa y coordinadamente se haya identificado puedan interactuar para conseguir al final un objetivo en común. Por lo que se puede coincidir en que ambas podrían complementarse o bien podrían ser opciones de trabajo conjunto entre países que comparten fronteras. Así mientras en la cooperación el método es interacción con el individuo para llegar a un fin, en la colaboración el método es la suma de entidades que después de haber realizado cada uno su tarea, se unen para llegar muy probablemente a ese mismo fin.

Respecto de la “**participación social**”, es indiscutible que dentro de la vida de las personas como individuos buena parte de su desarrollo se da de manera grupal, coexistencia sin la cual sería difícil comprender la actualidad de la sociedad en la que vivimos ya que gracias a ésta se generan habilidades que estimulan el desarrollo personal y a su vez tienden a mejorar las condiciones de vida de la comunidad.

En general se refiere aquí a la creación de mecanismos que promuevan la equidad tomando en cuenta la diversidad de necesidades de todas las personas que forman parte de una comunidad y es esta necesidad de sana convivencia entre los individuos que la sociedad tiende a generar las condiciones que dan pie a la conformación de INSTITUCIONES, que al final es el gran reto que debe perseguir la cooperación, colaboración y participación social en la gestión de los acuíferos transfronterizos para superar la administración del recurso de manera territorial por país, incorporando derechos y obligaciones compartidos en una visión integral de cuenca.

#### *Construcción de relación de confianza entre países*

La necesidad de establecer esquemas de cooperación y colaboración bilateral o multilateral para establecer acciones conjuntas en los acuíferos transfronterizos, surge entre otras causas, por conflictos emergentes relacionados con la calidad y explotación, o bien por el deseo o preocupación de una o más partes por conocer el grado de explotación, características y funcionamiento del acuífero, en el interés de procurar su conservación y protección. Por ello se debe generar un protocolo de confianza en el

intercambio de información, sin temor de que la información proporcionada pueda ser utilizada a favor de algunas de las partes.

Algunas brechas identificadas que deben superarse en las agendas iniciales son:

- Diferentes sistemas legales
- Diferencias entre los esquemas de gestión del agua subterránea en cada país
- El temor a que con los resultados de las pláticas entre las partes se puedan afectar derechos existentes
- El temor de que el resultado de los estudios conjuntos, genere presiones de un país a otro para que se modifique el manejo que cada país realiza del agua subterránea en su territorio
- La conciencia de que en su país pudieran existir problemas (sobreexplotación, contaminación, etc.) que no quisieran exponer como resultado de las pláticas bilaterales
- Existen además asimetrías o diferencias en los niveles de estudios realizados, en la capacidad de realización, en recursos y prioridades, que impide un mismo nivel de esfuerzo en un acuífero por ambas partes, lo que una parte puede interpretar como falta de cooperación de la otra

#### *Construcción de la cooperación y colaboración*

Se deben determinar estrategias o fases de negociación, que en primera instancia no incluyan temas que puedan causar ruido o barreras entre las partes, por lo que a manera de sugerencia, en una primera etapa se puede iniciar con el intercambio de información, desarrollo de estudios y evaluaciones conjuntas, coordinación de esfuerzos conjuntos para la protección y conservación del acuífero. Los aspectos de gestión del acuífero y derechos de agua deberán abordarse en etapas posteriores cuando la cooperación y participación hayan sido maduradas a través de historias exitosas de esfuerzos conjuntos de cooperación y coordinación.

Al diseñar una agenda de cooperación bilateral o multilateral para negociar acuerdos sobre acuíferos transfronterizos, es recomendable establecer una priorización de los temas. Esta priorización depende de las necesidades, marco normativo, forma de administración del agua, etc., de cada una de las partes. Se presenta un ejemplo, de cómo podría establecerse una priorización.

#### Marco institucional

- Lo primero es definir o crear la institución que llevará a cabo la coordinación internacional; identificar los especialistas o asesores que la estarán apoyando; definir los mecanismos que se utilizarán para formalizar los acuerdos

#### Intercambio de información

- Identificar la información disponible en cada país
- Definir conjuntamente la información que se deberá intercambiar. Es importante que el tipo de información, períodos y áreas a cubrir se definan conjuntamente y exista reciprocidad.
- Intercambiar la información existente conforme a lo acordado conjuntamente

#### Desarrollo de estudios conjuntos

- Identificar conjuntamente los vacíos de información y los datos que se requiere generar en cada país
- Acordar las actividades que sean necesarias realizar en cada país de forma coordinada o conjunta
- Identificar las restricciones de carácter legal o administrativo existentes en cada país que deberán ser consideradas
- Identificar los actores que estarán participando en el desarrollo de los esfuerzos conjuntos
- Identificar los recursos que se requieren para llevar a cabo las actividades identificadas y las fuentes de donde se obtendrán los recursos
- Contratar las instituciones, consultores o especialistas que llevarán a cabo los estudios conjuntos

#### Desarrollo de acciones de conservación y protección

- Con base en la información intercambiada y los estudios conjuntos desarrollados, definir conjuntamente acciones de conservación y protección a desarrollar y acordar el esquema para su implementación (acciones, participantes, recursos)

#### Resolución de conflictos

- Es importante definir procedimientos generales a seguir en caso de presentarse situaciones que generen conflictos, lo cual facilitará las negociaciones para atenderlos

#### *Participación Social*

La participación social no es un fin, sino el medio para lograr equilibrios y consensos entre los diversos intereses del desarrollo y del medio ambiente y para acercar las visiones entre los actores gubernamentales y los sociales con el fin de lograr el manejo sostenible del agua.

#### *El caso de México y Estados Unidos de América*

La Comisión Internacional de Límites y Aguas(CILA), representa más de un siglo de experiencia para los gobiernos de México y Estados Unidos en la aplicación de las estipulaciones de los diversos Tratados de Límites y Aguas, y en las negociaciones de las diferencias que pueden surgir como consecuencia de tal aplicación. Su jurisdicción se extiende a lo largo de la frontera de México con Estados Unidos (3,141 kms), manteniendo una relación de respeto mutuo y entendimiento, cultivando una mejor convivencia internacional, para de esta manera mejorar el bienestar de más de 10 millones de habitantes dentro de la zona fronteriza.

La Comisión Internacional de Límites y Aguas es para México y Estados Unidos la institución y foro binacional de carácter gubernamental que permite y habilita la aplicación de los diversos “Tratados” y “Acuerdos” sobre límites y aguas, en donde la solución técnica a un problema puede ser desarrollada en forma conjunta facilitando así la toma de decisiones de las partes.

La CILA se integra por una Sección mexicana y una Sección estadounidense, cada una de las cuales está dirigida por un Comisionado ingeniero designado por el Presidente de su respectivo país. Al momento de tomar decisiones que requieran acciones conjuntas por parte de los dos gobiernos, los Comisionados obtienen asesoría sobre los criterios a seguir de diversas dependencias federales de sus respectivos países, principalmente, en el caso del Comisionado mexicano, de la Secretaría de Relaciones Exteriores y en el caso del Comisionado estadounidense del Departamento de Estado. Cada Sección tiene dos Ingenieros Principales, un Secretario y un Asesor Legal, y cada Comisionado puede contar con los empleados adicionales que considere necesarios. Cada gobierno asume los gastos del personal y de operación de su Sección correspondiente.

Cada Sección opera de manera independiente de la otra, y trata con las autoridades de su país en los distintos niveles de gobierno, dentro de su función de asegurar que sean cumplidos los derechos y obligaciones que su gobierno asumió dentro de los Tratados de Límites y Aguas.

Del año de 1848 a la fecha, se han establecido 10 Tratados Internacionales, y se han formulado 184 actas del año de 1889 a 1919 y 134 actas de 1922 al 2010. Entre ellos, destaca en 1944, “Tratado Sobre Distribución de Aguas Internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América”, en el que se trata el tema de las aguas superficiales. A la fecha, aún no establece un tratado sobre aguas subterráneas, sin embargo, el tema es objeto de estudio, diálogo y acuerdos entre ambos países.

En el “INFORME COMÚN DE LOS INGENIEROS PRINCIPALES REFERENTE AL PROCESO DE COOPERACIÓN CONJUNTA MÉXICO-ESTADOS UNIDOS PARA EL PROGRAMA DE EVALUACIÓN DE ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZO (19 de agosto de 2009)”se cita como antecedentes de las acciones conjuntas que:

*“Desde la década de los 70 ha tenido lugar en el seno de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) un proceso de intercambio de información sobre aguas subterráneas en diferentes*

*zonas de la frontera entre México y Estados Unidos. Cualquier asunto de información o estudios sobre esta materia se ha atendido caso por caso sobre la base de la consulta recíproca establecida en la Resolución 6 del Acta 242 de la CILA."*

Como ejemplo, el 2 de diciembre de 1997, la CILA emitió un "Informe Común de los Ingenieros Principales relativo al Intercambio de Información y Modelo Matemático del acuífero en la zona de Ciudad Juárez, Chihuahua ~ El Paso, Texas", en el marco del cual, la CILA coordinó el intercambio de información de datos de aguas subterráneas entre los dos países, así como la elaboración y publicación bilingüe del documento conjunto generado como resultado de dicho informe.

El 22 de diciembre de 2006, se aprobó la Ley Pública de Estados Unidos 109-448, relativa al "*Acta sobre Evaluación de Acuíferos Transfronterizos México-Estados Unidos, estableciendo un Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos entre México y Estados Unidos, el cual incluye la posibilidad de aplicar recursos estadounidenses para actividades de evaluación en México.*"

Actualmente, con información proporcionada por la sección mexicana de la CILA, se han identificado conjuntamente 10 acuíferos transfronterizos, siendo estos: Tijuana-San Diego, Cuenca Baja del Río Colorado, Sonoyta-Papagos, Ambos Nogales, Río Santa Cruz, Río San Pedro, Conejos Médanos-Bolsón de la Mesilla, Valle de Juárez-Bolsón del Hueco, Edwards Trinity-El Burro, Cuenca baja del Río Bravo.

Existen otros acuíferos transfronterizos que por sus dimensiones, potencial, ubicación, nivel de explotación, o interés común en los mismos, no se han considerado a nivel binacional (Agua Prieta-Douglas, San Bernardino, los Mimbres, Ojinaga – Presidio)

Se llevan a cabo estudios conjuntos en los acuíferos de Conejos Médanos – Bolson de la Mesilla, Río San Pedro y Río Santa Cruz y se mantiene intercambio de información en el acuífero del Bajo Río Colorado, a fin de dar seguimiento a los efectos del revestimiento del Canal Todo Americano. Asimismo, se ha llevado a cabo intercambio de información, desarrollo de estudios de evaluación y modelación en el acuífero del Valle de Juárez - Bolsón del Hueco, se realizaron estudios conjuntos de la calidad del agua del acuífero de Ambos Nogales, y se ha realizado intercambio de información en la mayoría de los acuíferos transfronterizos identificados conjuntamente.

#### *Experiencias de participación social en México*

Los *Consejos de Cuenca* están definidos por la Ley de Aguas Nacionales (LAN) en la fracción XV de su artículo 3, como órganos colegiados de integración mixta, que serán instancias de coordinación y concertación, apoyo, consulta y asesoría, entre la Comisión Nacional del Agua, incluyendo el Organismo de Cuenca que corresponda, y las dependencias y entidades de las instancias federales, estatales y municipales, y los representantes de los usuarios de agua y de las organizaciones de la sociedad, de la respectiva cuenca hidrográfica o región hidrológica. Los Consejos de Cuenca, no están subordinados a la autoridad federal del agua, en este caso a la Comisión Nacional del Agua.

Con respecto a las aguas subterráneas, las *Comisiones de Cuencas* apoyan a los *Comités Técnicos de Aguas del Subsuelo o Subterráneas* (COTAS) los cuales desarrollan sus actividades en relación con un acuífero o grupo de acuíferos determinados que sean necesarios.

Las Comisiones de Cuenca son un proyecto de cobertura nacional que busca la incorporación de la participación social, institucional y usuaria en la gestión del agua en el país, bajo el principio de subsidiariedad. Se ha hecho mención que en el caso de la participación social en acuíferos trasfronterizos, las acciones que se acuerden en las negociaciones bilaterales o multilaterales, necesariamente generan acciones que deben realizar en el nivel local de cada una de las partes. En el caso de México, estas acciones se realizan en los COTAS.

Los objetivos de los COTAS deben ser congruentes con los del *Consejo*, y sus funciones apegadas a los preceptos de la LAN, su Reglamento, en donde se establece, entre otras, las siguientes funciones:

- Participar en la elaboración de estudios, en la propuesta de plan de gestión y reglamentación del acuífero, así como en la ejecución de acciones que se deriven de ellos
- Recibir y canalizar ante el Organismo de Cuenca o a la Dirección Local que corresponda, las sugerencias, solicitudes, denuncias o quejas de usuarios con relación a la explotación del acuífero
- Informar periódicamente al Consejo sobre los acuerdos y avances de actividades relacionadas con el COTAS, así como a sus representados
- Colaborar con la Comisión en la resolución de los conflictos por el uso y la distribución de las aguas del acuífero
- Promover la participación de los usuarios en la programación hídrica del acuífero
- Vincularse con las organizaciones de usuarios de aguas superficiales que incidan en la contaminación y recarga del acuífero a fin de establecer programas y acciones conjuntas que contribuyan al cumplimiento de su objeto
- Las demás que contribuyan al cumplimiento de los objetivos de los COTAS

Además de la organización e instalación de estos comités, se impulsa su constitución como asociaciones civiles, a fin de que cuenten con personalidad jurídica y patrimonio propio, con la finalidad de que pueden contar con diferentes fuentes de financiamiento, a nivel local e internacional, así establecer convenios con organizaciones no gubernamentales y con el sector académico, para la elaboración de estudios y proyectos.

Se requiere en todos los casos, que los COTAS elaboren su instrumento de gestión del acuífero, en el que se incorpore un diagnóstico de la problemática y las alternativas de solución debidamente valoradas con el propósito de ordenar el proceso de coordinación y concertación en torno a las acciones y proyectos establecidos. Para ello, la Comisión Nacional del Agua, a través de su área técnica, apoya con la elaboración de un "Plan de Manejo del Acuífero", en el que se integra la información hidrológica, ambiental, económica y social del entorno del acuífero, así como información de su disponibilidad, extracción, calidad, usos, etc., y un análisis prospectivo de corto, mediano y largo plazo de continuar la tendencia sin acciones de beneficio. Establece y propone acciones que se deberán realizar para lograr el beneficio esperado. Este documento, es la base para dar inicio a las acciones de discusión, concesos y acuerdos en un proceso de planeación administrativa que dará como resultado el programa de gestión del COTAS.

Un ejemplo de acuíferos compartido, es el COTAS interestatal de Jaral de Berrios-Villa Reyes, cuyo acuífero es compartido por dos estados de la República Mexicana, que cubre el extremo norte del estado de Guanajuato (Valle de Jaral de Berrios), y parte del suroeste del estado de San Luis Potosí (Villa de Reyes). Los usuarios de este Comité, más allá de la división geográfica y política, por su preocupación por el manejo inadecuado de los recursos hídricos y la imposibilidad de garantizar el abasto a futuro debido al agotamiento del acuífero, tomaron la iniciativa de diseñar una estrategia integral para la sostenibilidad del recurso en la región, a través de un marco de planificación hídrica a corto, mediano y largo plazo, buscando la corresponsabilidad de los usuarios, los tres órdenes de gobierno y de la sociedad organizada.

Como resultado de esta iniciativa, a través de un proceso de planeación participativa, en la que participaron autoridades federales, autoridades de los gobiernos de los estados, autoridades municipales con influencia en el acuífero, usuarios de los distintos usos del agua, institutos de investigación y organizaciones de la sociedad civil, se elaboró y aprobó el Plan de Manejo Integral del Acuífero, con la finalidad de frenar la sobreexplotación, reducirla hasta alcanzar su recuperación y garantizar el uso sostenible, a través de acciones y manejo de la disponibilidad, teniendo en cuenta todos los aspectos técnicos, económicos, financieros, sociales y de protección ambiental.

En este Plan, se establecieron 7 líneas estratégicas con sus componentes, los cuales derivaron en acciones con resultados esperados, participantes, responsables y cronogramas de ejecución, con corresponsabilidad de todos los actores, sin importar posiciones jerárquicas o intereses particulares.

A manera de ilustración, se enuncian las líneas estratégicas determinadas:

1. Uso eficiente del agua
2. Coordinación Interinstitucional eficiente
3. Mejoramiento de la cultura del agua
4. Cumplimiento del marco legal
5. Información veraz y oportuna
6. Infraestructura suficiente y adecuada
- 6.1.- Implementar la infraestructura en los diferentes sectores del agua.
- 6.2- Gestionar los recursos para la infraestructura
7. Recuperación de zonas deforestadas

## **7.5 Comunicación**

Las acciones relacionadas con la implementación de sistemas de gestión de los SAT han causado en algunos países reacciones públicas adversas a ellos. Este hecho se produce por diferentes razones, tales como las políticas, los aspectos culturales y económicos, la gestión, etc. La mayoría de estas reacciones están relacionadas con la interpretación de la información disponible a través de los medios de comunicación.

Estas informaciones no siempre son correctas debido a falta de datos técnicos sobre los SAT, así como por el desconocimiento de la población en general sobre cómo gestionar las aguas subterráneas. Asimismo, la mayoría de los tomadores de decisiones, incluyendo aquellos en áreas técnicas, tienen poca familiaridad con las características de la ciencia hidrogeológica y/o sobre la política internacional en esa área. Como resultado, esta falta de conocimiento crea conceptos erróneos acerca de la operación de los SAT, que a su vez genera temores, proporcionando oportunidades para generar desinformación a la sociedad.

La recopilación y difusión de información confiable es un importante paso estratégico para promover la aceptación, por parte de los gobiernos y las sociedades locales, de un proceso de gestión de los SAT. En este contexto, es importante promover la comunicación, así como la capacitación de los actores involucrados, con el fin de desarrollar el conocimiento sobre la gestión de los recursos de agua subterránea.

Por otra parte, la comunicación también es muy importante para motivar a las sociedades locales en la promoción y difusión de buenas prácticas para la protección y gestión de los recursos de agua subterránea; en la importancia y los métodos para la protección de zonas de recarga y descarga; para operar pozos sin contaminación del acuífero; y para evitar la sobreexplotación de los acuíferos por extracción de agua de una manera sostenible.

## **7.6 Financiamiento**

De manera general, la recopilación y procesamiento de datos hidrogeológicos, los estudios y ejecución de obras para el manejo, así como la protección de los acuíferos tienen costos elevados. Además, estos estudios a menudo requieren tecnologías avanzadas para su desarrollo lo que impide que se pueda implementar en la mayoría de los países con las capacidades técnicas disponibles.

La mayoría de los países en desarrollo enfrentan otras prioridades básicas de su sociedad teniendo poca capacidad para la inversión pública, lo cual hace difícil proporcionar fondos para actividades relacionadas con el manejo de acuíferos transfronterizos. Incluso para acciones a ser implementadas en su propio territorio los recursos financieros destinados resultan generalmente insuficientes.

Para el desarrollo de actividades de carácter internacional con interés mutuo, la realidad muestra que esta dificultad es aún mayor dado que depende no sólo de recursos escasos del presupuesto nacional, sino también de conseguir un consenso político entre los países para establecer sus prioridades con respecto a los aspectos legales e institucionales de los mismos. Esa problemática mayor les impide actuar de manera conjunta.

La creación de consensos y compromisos entre dos países sobre este tema es complicada y difícil de aplicar, y cuando se trata de un SAT que ocurre en regiones compartidas por más de dos países, la resolución de estos problemas relacionados con aspectos financieros y logísticos resulta en una complejidad aún mayor.

En este contexto, se vuelve una cuestión estratégica el identificar fuentes de financiamiento de origen nacional, o internacional, con el fin de proporcionar fondos para la ejecución de tareas necesarias para expandir el conocimiento y aplicar una gestión sostenible del SAT. Esto es aplicable tanto a las intervenciones dentro del propio país (nacional), como en aquellas que son comunes a los países que comparten el acuífero.

Un camino que ha demostrado ser factible para minimizar estas limitaciones es a través de la participación de organismos multilaterales de desarrollo y los donantes internacionales. Estos organismos tienen mecanismos para implementar proyectos los cuales facilitan que los países se unan para implementar las acciones necesarias.

Como ejemplos se pueden citar los recursos proporcionados por el GEF (Global Environment Facility, en inglés), a través de su área de aguas internacionales, para ejecutar proyectos para diferentes SAT, en varias regiones del mundo. Estos proyectos no sólo mejoran los conocimientos sobre los sistemas acuíferos transfronterizos, sino que también permiten la sistematización de datos e información en un espacio de tiempo que sería muy difícil realizar para los países, dadas las dificultades de presupuesto nacional mencionadas anteriormente.

Otro ejemplo es el trabajo realizado por el Programa de Acuíferos Transfronterizos de las Américas (ISARM por sus siglas en inglés), programa conjunto de la UNESCO y la Organización de Estados Americanos (OEA), que ha identificado nuevos sistemas de acuíferos transfronterizos, colectando información básica inicial a través de sus estudios ya publicados en tres volúmenes. Los productos de estos estudios resultan en la información que, en forma estratégica, puede generar las condiciones para iniciar acuerdos de cooperación entre países para la búsqueda de información más detallada y el desarrollo de mejores prácticas de gestión compartida.

Los recursos financieros necesarios para la inversión en el monitoreo (equipo para perforación, operación y mantenimiento de pozos individuales y redes de pozos, etc.), inspección y las obras necesarias para la gestión de los SAT, puede, si hay interés entre los países que comparten el acuífero, ser negociados con los organismos

internacionales que promueven el fomento y préstamo, tales como el Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, entre otros. Estas organizaciones internacionales cuentan con apoyo y crédito en áreas dedicadas a estos temas. Los organismos donantes internacionales han reconocido desde hace tiempo la importancia que tienen los acuíferos como fuente de agua para abastecimiento humano y la necesidad de protección de los mismos a través de una gestión sostenible. En muchas regiones del mundo, esta es la única fuente de abastecimiento de agua para las poblaciones locales.

### **7.7 Desarrollo de recursos humanos (desarrollo de capacidades)**

La clave para un manejo sostenible del agua subterránea en los SAT está ligada tanto al conocimiento hidrogeológico como a los patrones socio-culturales de uso del recurso por parte de los países que comparten dichos acuíferos.

Considerando la premisa anterior, el programa de desarrollo de recursos humanos debería estar enfocado en dos grandes temáticas de formación de personal:

**Hidrogeología:** como elemento básico para la evaluación, cuantificación y protección del recurso hídrico subterráneo con enfoque transfronterizo.

**Gestión Integrada del Recurso Hídrico:** con el fin de que la población, como usuarios directos del agua de los SAT, los técnicos y sobre todo los tomadores de decisión comprendan que la interacción entre el aprovechamiento sostenible protección del agua subterránea no son excluyentes, sino más bien una ventana de oportunidad de desarrollo económico, social y ambiental, la cual se verá reflejada en al menos tres acciones concretas que incidirán en el mejoramiento de la calidad de vida de los pobladores de las fronteras, ellas son:

- en la planificación hídrica a diferentes escalas (local, regional y nacional)
- como herramienta fundamental para el ordenamiento ambiental del territorio
- como un instrumento de planificación para la inversión y desarrollo productivo a todo nivel

#### **7.7.1 Hidrogeología**

La gestión del agua subterránea comienza con su evaluación a partir de un estudio hidrogeológico. Este estudio permite ubicarla en el contexto del ciclo hidrológico y su interrelación con el medio circundante.

Conocer el origen, tipo y características del movimiento del agua en el suelo hasta llegar al nivel de saturación y a partir de ese punto entender la mecánica de flujo del agua, permite formular el modelo conceptual del acuífero, con el fin de establecer acciones de aprovechamiento sostenible por medio de la extracción de pozos y captación de manantiales; así como definir las acciones de protección en función del riesgo de contaminación y de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero. La delimitación espacial del acuífero es fundamental en la gestión hídrica, esta debe incluir la identificación de las zonas de recarga y descarga establecidas en función del mismo modelo hidrogeológico conceptual.

Estudios de este tipo, complementados con la evaluación de la recarga potencial y simulaciones numéricas predictivas son la herramienta técnica que debe prevalecer a la hora de tomar decisiones sobre proyectos de desarrollo que requieren de la extracción de agua subterránea. En el capítulo 6 se presentan con más detalle los conocimientos básicos científicos y técnicos necesarios para la evaluación y gestión de los SAT.

A nivel hemisférico, existen diversos programas universitarios de formación tanto de grado como de posgrados enfocados a la temática hidrogeológica, abarcando a diferentes niveles la mayoría de los tópicos de evaluación y protección del recurso hídrico subterráneo. Sin embargo, es necesaria la actualización curricular con contenidos más innovadores, orientados a la evaluación, aprovechamiento y gestión del agua subterránea con un enfoque transfronterizo.

Desde este punto de vista, es necesario aumentar en algunos casos y concretar en otros, la cooperación, colaboración y participación técnica desde al menos tres temáticas específicas que a continuación se describen.

La primera de ellas, es la “capacitación de capacitadores”, colaborando de esta manera con la actualización y sostenibilidad técnica de los diversos programas de formación existentes.

La segunda, deberá enfocarse al apoyo entre países colindantes, con el fin de compartir objetivos de investigación que se enfoquen en la caracterización y gestión de los acuíferos transfronterizos que comparten. El trabajo en conjunto, permitirá uniformizar la evaluación hidrogeológica, incentivará la colaboración horizontal, y permitirá establecer de una manera más directa las diversas estrategias de protección y aprovechamiento sostenible del SAT.

La tercera, es relacionada con el apoyo en la movilidad de estudiantes, por medio de becas a los programas que certifiquen un nivel de excelencia en la docencia e investigación, promoviendo de esta manera, la elaboración de estudios que permitan incrementar el conocimiento sobre los SAT.

En el caso en que se requiera implementar nuevos programas de formación universitaria en la temática hidrogeológica, es imperativo tomar en consideración un plan de sostenibilidad en todos los aspectos, pues si bien es cierto que la cooperación internacional puede ser un elemento fundamental desde el punto de vista curricular, técnico y económico, se deben establecer programas de formación nacionales estables.

#### 7.7.2 Gestión integrada del recurso hídrico

En la actualidad, un programa de formación de recursos humanos en la temática hídrica, debe incorporar lineamientos claves para encarar una gestión del agua más comprensiva, que considere la interdependencia de los usos del recurso y los roles que juegan los distintos actores de la sociedad frente a los problemas relacionados con el agua. En particular, se debe abordar la evaluación y gestión de los acuíferos transfronterizos con el propósito de alentar el desarrollo de la visión inter- y transdisciplinaria que requiere la gestión sostenible del recurso hídrico, y así garantizar tanto el

desarrollo socio-económico como la protección ambiental, sea este local, nacional o regional.

El conjunto de competencias que se pueden desarrollar en el recurso humano capacitado en la gestión integrada del recurso hídrico, debe atender tanto a la formación de capacidades en el plano intelectual, ético, social y profesional, entre las que sin ser exhaustivo se pueden citar las siguientes.

Competencias del “saber conocer” que incluyen: Conocer la importancia ambiental, económica y social del recurso hídrico como elemento integrador y generador del desarrollo local, nacional y regional. Evaluar la importancia global e impacto en los acuíferos transfronterizos. Entender los mecanismos del ciclo hidrológico que permiten la existencia del recurso hídrico superficial y subterráneo, así como de los factores antrópicos y naturales que amenazan potencialmente la calidad y cantidad del agua.

Colaborar en la identificación y evaluación de los factores físicos, mecánicos, químicos, biológicos y sociales que afectan potencialmente la calidad y cantidad del agua.

Conocer la normativa técnica y jurídica nacional y de los países adyacentes con quienes se comparte el SAT.

Las competencias del “saber hacer” están enfocadas a: Promover en conjunto acciones de aprovechamiento sostenible del recurso hídrico, así como de la conservación y protección a partir de estrategias de manejo que consideren la vulnerabilidad y amenaza potencial al recurso en cada uno de los países que comparten el acuífero.

Participar en el quehacer administrativo y operativo del recurso hídrico. Desempeñarse en labores de campo y poseer conocimientos básicos para la interpretación de datos recolectados. Promover la administración y manejo del recurso hídrico desde una perspectiva de gestión integral, siempre con una visión transfronteriza que tome en consideración las particularidades culturales, sociales, económicas y ambientales de cada zona.

Las competencias del “saber vivir” están planeadas para que el estudiante sea consciente de su identidad y compromiso social como persona capacitada en la gestión integrada del recurso hídrico; tenga habilidad para utilizar el lenguaje técnico de manera oral y escrita tanto en las relaciones interpersonales como en su disciplina; y trabaje en conjunto y contribuya en los esfuerzos de grupo de una manera pro-activa, aportando su experticia.

Las competencias del “saber ser” pretenden que el estudiante sea: Un gestor del recurso hídrico con una formación integral, crítica y pro-activa. Un promotor de procesos de prevención de riesgos hidrometeorológicos. Se consolide como persona inmersa en una sociedad de cambio y dependiente del recurso hídrico. Promueva el aprovechamiento racional y protección ambiental del recurso hídrico a partir de la normativa legal. Se muestre comprometido con el mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad.

El enfoque de gestión integrada del recurso hídrico, no se conforma con la capacitación en temas legales a los técnicos en hidrogeología, ni en aspectos generales del flujo del agua subterránea a los tomadores de decisión, es más bien una estrategia que

promueve un cambio en la cultura del agua y en la visión de gestión del territorio, en este caso, transfronterizo.

El Cuadro 7-2 muestra una iniciativa de capacitación y formación en la temática de Gestión Integrada del Recurso Hídrico que está en proceso de desarrollo e implementación en la Universidad de Costa Rica. En el anexo 7-A, se detalla el contenido de cada uno de los niveles de capacitación que están en desarrollo.

### **CUADRO 7-2 Capacitación en la temática en Gestión Integrada del Recurso Hídrico en la Universidad de Costa Rica**

Este programa está integrado por tres modalidades de capacitación enfocadas a diferentes públicos .

La primer modalidad; está dirigida a funcionarios y operarios de acueductos comunales, municipales y públicos en general por medio de Cursos de Educación Continua que permiten sensibilizar a la población sobre la problemática del recurso y su participación dentro de los principios de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Los requisitos de acceso a estos cursos de formación son mínimos, y se proporcionan una serie de facilidades logísticas y didácticas aplicadas a cada grupo poblacional.

La segunda modalidad; está dirigida a los mandos medios de las diversas instituciones locales y nacionales que tienen que ver con el manejo de este recurso por medio de un Diplomado Universitario a nivel técnico. El plan de estudios incluye contenidos propios de ciencias básicas integrados en un ciclo propedéutico, conceptos técnicos y aplicados sobre el recurso hídrico y aspectos de administración e impacto social que sensibilizan sobre la problemática de los acuíferos transfronterizos en el marco de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Como ejes transversales se abordan los temas de gestión del riesgo y el papel de la vulnerabilidad socio-natural del recurso hídrico; con enfoque de género, multicultural e intergeneracional.

La tercera modalidad corresponde con la maestría a nivel de postgrado, que permite complementar la formación académica de técnicos, administradores y tomadores de decisión que tienen que ver con el recurso hídrico. El programa de estudios, está estructurado de tal manera que el estudiante cumpla con un número determinado de cursos básicos formativos que le permitan adquirir los elementos sustanciales del conocimiento de la gestión integrada del recurso hídrico. Por otra parte, y considerando la flexibilidad curricular que requiere un programa de formación multidisciplinario como este, el estudiante puede completar algunos cursos optativos destinados a profundizar conocimientos en temáticas específicas. El proceso de investigación es un pilar fundamental en el cual se apoyan los estudiantes y profesores, con el fin de ampliar sus conocimientos a partir de una reflexión sustentada en el objeto de interés y/o estudio. Los cursos están enfocados a que el estudiantado amplíe sus conocimientos y les permita de una manera ordenada, cumplir con el trabajo final de graduación y a su vez, permitir un currículo flexible, participativo e inmerso en el principio de integración.

### **CUADRO 7-3 Capacitación en la temática en Gestión Integrada del Recurso Hídrico en la Universidad de Costa Rica**

La Maestría en Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (MGIRH, [www.argcapnet.org.ar/mgih](http://www.argcapnet.org.ar/mgih)) es una carrera de posgrado interinstitucional de las Universidades Nacionales de Córdoba, de Cuyo y del Litoral, creada por iniciativa de Arg Cap-Net. Está dirigida a profesionales de diferentes disciplinas, con el objeto de formar recursos humanos que promuevan un cambio en la gestión del agua.

Actualmente, se está desarrollando la tercera cohorte de la carrera. Cuenta con más de 60 alumnos formalmente inscriptos, de profesión ingenieros (civiles, mecánicos, en recursos hídricos, agrónomos), abogados, biólogos, bioquímicos, analistas de sistemas y economistas, que trabajan en organismos encargados o vinculados al manejo de los recursos hídricos y al ambiente, empresas prestadoras del servicio sanitario, universidades, consultoras, municipios, organizaciones no gubernamentales de Argentina e incluso de otros países de Latinoamérica. El plan de estudio de la MGIRH se estructura de acuerdo a los lineamientos que establecen las reglamentaciones para la enseñanza de posgrado de las tres universidades intervinientes, y en total correspondencia con las normativas que fija el Ministerio de Educación de la Nación Argentina. Cuenta con reconocimiento oficial de título, otorgado por Ordenanza de CONEAU N° 49/2008. Durante 2012 se trabajó en las mejoras al plan de estudio y su adecuación a los nuevos estándares fijados por dicho Ministerio. Dicho plan se organiza en dos ciclos. El ciclo de formación básica compuesto por ocho cursos obligatorios que se dictan durante el primer año y por Epistemología. Este último curso puede ser realizado en cualquier universidad, fuera de las que impulsan la carrera, y ser acreditado de acuerdo a pautas que defina el Comité Académico de la MGIRH. El ciclo de formación específica está conformado por cursos en temáticas específicas, acordes al perfil profesional del alumno y/o al tema de tesis propuesto. Estos cursos, por lo general, se realizan en el segundo año de la carrera y se eligen dentro de la oferta de posgrado de las universidades del país. Un trabajo original de tesis permite acceder al grado de Magister.

#### **7.8 Casos de buenas prácticas de gestión**

Como ejemplo de buenas prácticas de gestión de acuíferos se presenta el caso de uno de los SAT más conocidos localizado en América del Sur, el SAT Guaraní (número 21S en el inventario ISARM Américas).

##### SAT Guaraní

El primer proyecto importante apoyado por el Global Environment Facility (GEF) sobre este tema fue el proyecto del acuífero Guaraní (2003-2009). El éxito de este proyecto ha motivado a los países a promover nuevas iniciativas en el mundo para apoyar a las instituciones y las comunidades sobre cómo utilizar, gestionar y proteger las aguas subterráneas. Este caso es un buen ejemplo de la aplicación de los principios básicos descritos en este libro sobre la evaluación y gestión de los acuíferos transfronterizos en el continente americano.

El proyecto para la Protección del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Transfronterizo Guaraní (SAG) ha apoyado a Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay en el desarrollo del conocimiento, los instrumentos de gestión específicos y los marcos nacionales y regionales para apoyar el uso del acuífero y la protección basada en el desarrollo institucional y la cooperación regional.

##### *Resumen del proyecto Acuífero Guaraní*

Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay acordaron ejecutar el Proyecto de Protección del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible del sistema transfronterizo Acuífero Guaraní (Fig. 7.1). La preparación del proyecto comenzó en julio del 2000 y el proyecto fue

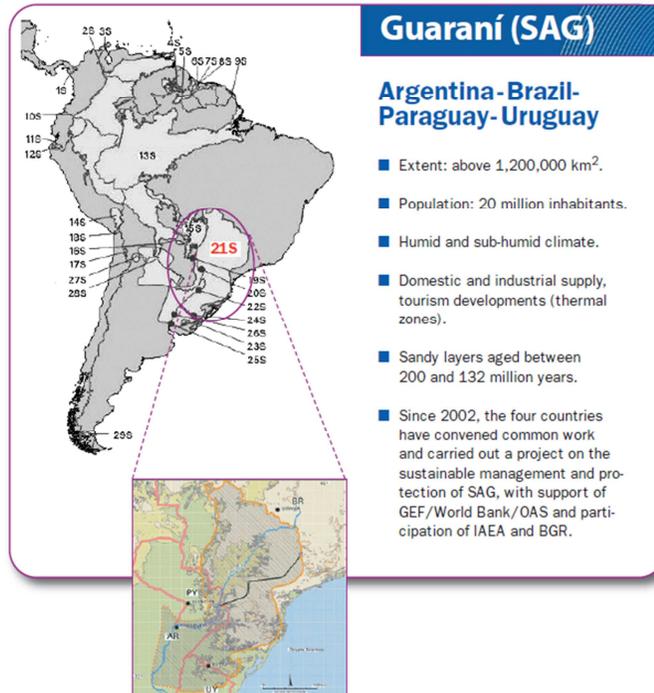
implementado entre el 2003 y el 2009 con el apoyo del GEF, del Banco Mundial como agencia de implementación y la Organización de Estados Americanos, como organismo de ejecución regional. Otros organismos tales como el Servicio Geológico Alemán y la Agencia Internacional de Energía Atómica apoyaron la realización de algunos estudios específicos. Basado en un proceso participativo y desarrollo del conocimiento, el proyecto permitió a los países a elaborar un Programa Estratégico de Acción (PEA) aprobado por los países.

El PEA es el documento principal del proyecto que resume los acontecimientos relevantes de la gestión y prioridades basadas en los avances del conocimiento. Su proceso de elaboración directamente involucró más de 300 representantes institucionales y expertos de diferentes áreas. Representantes nacionales (recursos hídricos y ambientales, universidades, sociedad civil y organizaciones no gubernamentales) participaron en el proceso de ejecución a través de unidades nacionales para seguir el proceso de ejecución y promover la integración de la información dispersa de diversas instituciones relacionadas con las aguas subterráneas.

Dentro del proceso PEA, Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay definieron una lista de prioridades nacionales para mejorar la gestión de las aguas subterráneas; desarrollaron instrumentos de gestión adecuados al acuífero Guaraní; y finalmente acordaron una estructura de cooperación para integrar los esfuerzos necesarios para el mantenimiento, las operaciones y los instrumentos técnicos de apoyo. Los principales retos de las instituciones nacionales y sub-nacionales son ahora la aplicación de todos los instrumentos de gestión del Guaraní, las prioridades en los niveles nacionales y sub-nacionales para fortalecer la gestión de los recursos de agua subterránea y el agua, así como el marco para la cooperación. El marco para la cooperación apoyará las prioridades locales, nacionales, provinciales y regionales para la implementación y desarrollará una integración efectiva entre las instituciones técnicas responsables de gestión de las aguas subterráneas. En agosto de 2010, Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay firmaron un acuerdo para fortalecer la gestión del acuífero Guaraní e insta a los países de proceder a la ejecución del PAE.



Concepcion del Uruguay, Argentina  
© SXC



South America

Figura 7.1 Localización del Sistema Acuífero Guaraní (extraído de Puri y Aureli, 2009).

### Conocimiento básico para la gestión del SAG

Los avances en el conocimiento principal se relacionan con una definición más precisa de los límites y las características del sistema del acuífero; regímenes de flujo de agua subterránea; zonas de recarga y descarga; y cambios en el uso del agua y del suelo en la región, los cuales han cambiado significativamente en las últimas décadas. La adquisición de conocimientos fue promovida desde el comienzo del proyecto a través de una amplia capacitación y apoyo con participación en el programa de instituciones para la gestión del agua en los países y Estados.

El programa de control de calidad incluye también representantes de las comunidades científicas y técnicas en los cuatro países. Se preparó un mapa básico integrado por el Sistema Acuífero Guaraní, definido por los especialistas de los cuatro países. El desarrollo del mapa hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní resultó en la reducción de su superficie total de 1.087.879 km<sup>2</sup>, de los cuales aproximadamente el 21% son en Argentina, 68% en Brasil, 8% en Paraguay y 3% en Uruguay.

Las reservas de agua estática fueron estimadas a 29,551 km<sup>3</sup> (4.000 km<sup>3</sup> ±), pero la recarga profunda es sólo 1.4 km<sup>3</sup> por año, lo que indica la ocurrencia de extracción de agua fósil en áreas confinadas. Se calcularon los volúmenes explotables a 2.014 km<sup>3</sup> (± 270 km<sup>3</sup>), o el 6% de las reservas de SAG, teniendo en cuenta el abatimiento máximo de niveles de agua por bombeo de 400 m. Si la explotación actual se mantuviese a 1,04 km<sup>3</sup> por año, a través de los 1,800 pozos que alcanzan el SAG, las reservas disponibles podrían ser aprovechadas por más de 2.000 años a los actuales patrones de consumo.

Se desarrollaron modelos matemáticos para predecir el comportamiento del acuífero en áreas consideradas como críticas. Basado en estudios regionales, se establecieron siete grandes áreas SAG que deberán guiar el uso y la gestión de las aguas subterráneas. Internamente, cada área presenta las características de flujo especial. En áreas confinadas, el agua se extrae de pozos de más de mil metros de profundidad con temperaturas que pueden alcanzar hasta 50°C. Estudios regionales también fueron apoyados con isótopos ambientales y datación del agua en el acuífero. La gama de la edad del agua es reciente en el área de afloramiento hasta un máximo de 38.000 años.

En la actualidad, 87% de la utilización del agua del SAG se produce en territorio de Brasil. En general, el principal uso de las aguas del SAG es para abastecimiento humano (66%). El uso industrial alcanza el 16%, mientras que su uso en áreas rurales es sólo de 5%. Los usos recreativos en zonas termales han llegado a 13%, mientras que el 100% del agua del acuífero utilizada en Argentina está destinada para uso turístico. En Paraguay y Uruguay, más del 90% de agua del SAG se utiliza para abastecer zonas urbanas. En general, las principales amenazas concentradas sobre la calidad del agua del SAG están relacionadas con el riesgo de contaminación provocados por el hombre en las zonas de afloramiento. Con respecto a la disponibilidad de agua, los mayores riesgos son interferencia entre pozos y aguas fósiles en áreas bajo uso intensivo.

El SAG no es un acuífero en peligro de inminente agotamiento o contaminación, a pesar de ello, algunos conflictos localizados y problemas requieren apoyo para una gestión adecuada. Sin embargo, la combinación del uso creciente del recurso, falta de saneamiento adecuado y el cambio en el uso del suelo puede llevar a una modificación rápida de la situación actual y a la aparición de nuevas áreas críticas.

#### *Los instrumentos de gestión del SAG*

Deben aplicarse los mecanismos de gestión desarrollados y mejorarse las medidas de seguridad para prevenir el uso inadecuado y daño del acuífero en el futuro cercano. Los usuarios y las comunidades locales deben estar comprometidos a un uso racional del recurso; así como también los gobiernos nacionales, autoridades estatales y locales quienes deben reforzar las medidas de gestión y protección de las aguas subterráneas para evitar conflictos emergentes.

De un conjunto de resultados y productos desarrollados y a disposición de los países, cuatro herramientas específicas han sido seleccionadas y priorizadas por los países, dos técnicas, una para apoyar la gestión local y otra para promover la difusión de conocimientos y capacidades en la gestión de las aguas subterráneas. Cada instrumento debería tener la dirección de un comité consultivo de expertos, establecido por los países. Según el programa estratégico de acción aprobado, cada país será

responsable de proporcionar el apoyo necesario para operar una herramienta de gestión.

Sistema de Información Geográfica del Sistema Acuífero Guaraní (SIGSAG): el objetivo de SIGSAG es poner a disposición la información de más de 8.000 pozos para todos los usuarios diferentes en la región del SAG. El sistema se compone de 32 estaciones de trabajo que fueron entregados a las instituciones de gobierno responsable para la gestión de los recursos hídricos en los países, Estados y provincias y las autoridades locales, así como las empresas de suministro de agua. La información proporcionada por el país responsable es compartida automáticamente con otros países y deberá ser accesible por las partes interesadas a través de web ([www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)). Un Comité Técnico Asesor será proporcionado por Argentina, el cual ha colocado una estructura de apoyo en la presa de la Junta Nacional de la presa Yaciretá. En Brasil el SIGSAG está integrado con el sistema de información de aguas subterráneas elaborado por CPRM (Servicio Geológico Federal) y adoptado por los Estados para la inclusión de los datos.

Red de Monitoreo y Modelación Matemática (M & M): inicialmente 180 pozos fueron muestreados con niveles estáticos, la explotación y la calidad del agua con el fin de apoyar la gestión del acuífero Guaraní por instituciones nacionales y Estados nacionales responsables. Además, se han desarrollado modelos matemáticos para la simulación y predicción de cambios en el uso de las aguas subterráneas en los niveles regionales y locales en las áreas pilotos seleccionadas. La red nacional de vigilancia en ejecución por el gobierno Brasileño, incluyendo la red del estado de Sao Paulo, estará totalmente integrada a la red regional. Brasil será responsable de proporcionar todo el apoyo requerido para operar el instrumento y para apoyar la red de expertos de la Comisión de Asesoría Técnica creada por los países.

Comités de apoyo de gestión local: con el fin de apoyar el desarrollo de mecanismos adecuados para la protección del SAG en zonas donde ocurren impactos significativos, debería fomentarse la creación de comités locales de gestión. La experiencia de la creación de comités locales ha sido muy positiva en las áreas pilotos, como es el caso en Ribeirao Preto, donde la comunidad tiene medidas de zonificación propuestos como zonas de protección y zonas de uso controlado del agua subterránea. En Concordia (Argentina) - Salto (Uruguay), los países prevén definir la distancia mínima entre pozos para evitar que haya interferencia en el nivel del agua y la temperatura. Comités locales en Ribeirao Preto e Itapúa deberán ser apoyados por Brasil y Paraguay respectivamente. Los comités transfronterizos de Concordia (Argentina) - Salto (Uruguay) y Rivera (Uruguay) - Santana do Livramento (RS) serán apoyados por Argentina y Uruguay, respectivamente.

Desarrollo de capacidades para la gestión de las aguas subterráneas y difusión de conocimiento: la importancia de la difusión de conocimiento y fortalecimiento de las instituciones involucradas han sido a menudo aspectos destacados por todos los representantes de los países para desarrollar una mejor gestión de las aguas subterráneas en el acuífero Guaraní. El proyecto proporciona un fructífero proceso de involucrar a instituciones nacionales responsables, los oficiales de prensa, periodistas ambientales de medios de comunicación, organizaciones no gubernamentales y sectores académicos, lo cual forma una base para comunicar las acciones para la implementación. En la primera fase, la Comisión involucro sólo a los responsables de prensa de las instituciones nacionales responsables para fortalecerse una acción más amplia y decisiva.

### Desafíos de la cooperación regional y la gestión local en el SAG

El desarrollo de herramientas de gestión del acuífero depende de los esfuerzos integrados de los países responsables del Guaraní. El Programa de Acción Estratégica del acuífero Guaraní estableció diferentes prioridades para el desarrollo de la gestión nacional, estatal y local en el país, así como para mejorar los mecanismos de cooperación regional y funcionamiento adecuado de las herramientas desarrolladas de gestión.

Todas las prioridades establecidas deben ser incorporadas en las acciones de las instituciones de gestión de los recursos de agua en los diversos ámbitos de la administración pública. Las acciones a nivel nacional debieran estar integradas por una unidad nacional de apoyo a la gestión para encaminar e integrar los esfuerzos de todas las instituciones, que hasta ahora han estado actuando de una manera fragmentada y dispersa en el uso, manejo y protección del SAG. En el caso de países federales como Argentina y Brasil, unidades soporte de administración de Estado debieran ser creadas, teniendo en cuenta las necesidades y dominio de las aguas subterráneas. A nivel local, los comités locales de apoyo de gestión establecidos facilitarán la articulación institucional.

Como las Unidades Nacionales de Asistencia a la Gestión se instalan por países, y los Comités Técnicos Consultivos por instrumentos gerenciales temáticos, una unidad de articulación de carácter técnico fue propuesta para integrar acciones, facilitar la comunicación y apoyar el proceso de toma de decisiones; ver el Marco de la Cooperación Regional en la figura 7.2. Según el Acuerdo del Acuífero Guaraní firmado en 2010, una Comisión integrada por los cuatro países deberá coordinar los esfuerzos de cooperación. La Comisión será establecida dentro del Comité de Coordinación Intergubernamental del Rio de la Plata (CIC) bajo el paraguas del Tratado de la Cuenca del Rio de la Plata (1969).

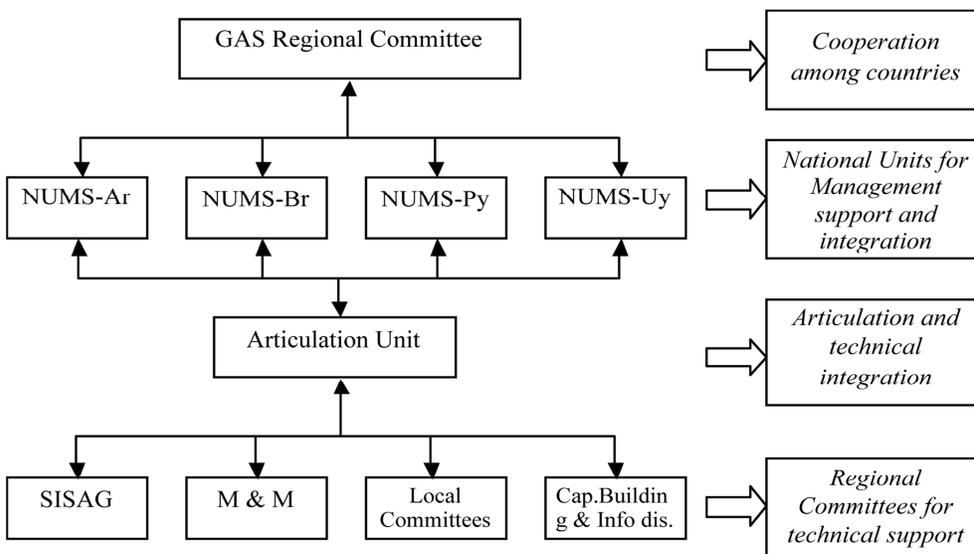


Figura 7.2 Marco de Cooperación Regional

La oficina de la Unidad de Articulación se instaló en Montevideo con el apoyo de Uruguay. Tras el Acuerdo del Acuífero Guaraní, los países son capaces de redoblar los esfuerzos de integración para apoyar a las aguas subterráneas y el plan de manejo del acuífero guaraní a nivel regional.

#### *Desarrollos recientes*

Para apoyar el proceso de toma de decisiones para el uso sostenible y la protección del acuífero Guaraní, las instituciones nacionales han instalado instrumentos de gestión del agua subterránea en los países. El funcionamiento de los instrumentos regionales, dependen de la cooperación y de los marcos institucionales que se implementarán en las próximas etapas. Los países recientemente lanzaron la fase de cooperación con el acuerdo del acuífero Guaraní, firmado en agosto de 2010. El acuerdo para establecer todos los procesos de coordinación necesaria para apoyar la implementación del programa de acción estratégico de los países, es el principal reto.

La aplicación de los cuatro instrumentos de gestión y las acciones principales del PEA tendrá que alcanzar el nivel gubernamental más bajo para que sea efectivo. La siguiente fase de la implementación depende necesariamente en la recolección de datos de pozos, validación, análisis y difusión de la información.

En comparación con los recursos hídricos en general, el movimiento de las aguas subterráneas es muy lento y las escalas de interferencia son dependientes del espacio y del tiempo. A pesar de que los principales instrumentos son los mismos, las estrategias de protección y uso sostenible del acuífero Guaraní tienen que ser adaptadas para aplicarse a la escala local. Se implementaron medidas muy acertadas en los proyectos pilotos locales (es decir, Ribeirao Preto, Concordia-Salto). La capacidad de aumentar el poder social y el fortalecimiento de entidades locales serán elementos clave para preparar la implementación de acciones efectivas para el proceso de gestión y protección del acuífero Guaraní.

Este proyecto puede servir de ejemplo para otros acuíferos transfronterizos. La base para el desarrollo de los acuíferos debe ser técnica para poder obtener una buena comprensión de los recursos. Los instrumentos de gestión: sistema de información geográfica del sistema acuífero Guaraní; la red de monitoreo y modelado matemático; los comités de apoyo de gestión local y fortalecimiento de capacidades para la gestión de las aguas subterráneas; y la difusión de conocimiento, son necesarias para cualquier proceso de toma de decisiones y futuros acontecimientos.



## REFERENCIAS

- Winograd, 1995, Marco Conceptual para el desarrollo y uso de indicadores ambientales y de sostenibilidad para la toma de decisiones en Latinoamérica y el Caribe. Proyecto CIAT/UNEP, CIAT, Cali. Columbia, 50p.
- Ahlfeld, D.P., P.M. Barlow, and A.E. Mulligan.2005. GWM—A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000). USGS Open-File Report 2005-1072. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey
- Aller, L et al. (1985) DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency Report EPA-600/2-87-035, Ada, Oklahoma.
- Alley, W.M., Reilly, T.E., and Franke, O.L.,1999. Sustainability of ground-water resources.U.S.Geological Survey Circular 1186, 79 pp.
- Alley, W.M., 2001.Ground water and climate. Ground Water (39)2:161.
- Alley, W., and Leake, S.A.,2004, The journey from safe yield to sustainability, Ground Water, Vol. 42, no. 1, pp. 12 - 16
- Alley, W.M., 2006, Another water budget myth: The significance of recoverable ground water in storage: Ground Water, v. 45, no. 3, p. 251
- Amore, L. (2008): Guarani Aquifer: from Knowledge to Governance. IN: International Capacity Development in Transboundary Basins. Bonn, Germany.
- Amore, L. and GODARD, M. (2007): Guarani Aquifer Basic Map IN: International Conference on Geomatics. Montreal, CanadaProceedings.
- Anderholm, S.K., and Heywood, C.E., 2003, Chemistry and Age of Ground Water in the Southwestern Hueco Bolson, New Mexico and Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4237, 22p.
- Andriananse, A. 1993.Environmental Policy Performance Indicators.Ministry of Housing Physical Planning andEnvironment. The Hague. The Netherlands.
- Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay (2009): Guarani Aquifer Agreement. Itamaraty. Brasilia. <http://www.itamaraty.gov.br/> [Portuguese and Spanish].
- ASTM, 1993, ASCE Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models, Criteria for Evaluation of Watershed Models, 119 J. Irrig.and Drain.Engr., p.429.
- Belitz, K., Dubrovsky, N.M., Burow, K., Jurgens,B., and Johnson, T., 2003, Framework for a Ground-Water Quality Monitoring and Assessment Program for California: U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 03-4166, 88p.

- Belitz, K., Jurgens, B., Landon, M.K., Fram, M.S., and Johnson, T., 2010, Estimation of aquifer scale proportion using equal area grids: Assessment of regional scale groundwater quality, *Water Resources Research*, 46, W11550, doi:10.1029/2010WR009321. Available at: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2010WR009321.shtml>
- Berger, A. R. 1997. Assessing Rapid Environmental Change Using Ge indicators. *Environmental Geology* 32 (1) p.36-44, Springer Verlag.
- Berger, A. R. y W. J. Iams (Eds). 1996. *Ge indicators: Assessing Rapid Environmental Change in Earth Systems*. Rotterdam, Netherlands, A. A. Balkema. 466p.
- Bethke, C.M, Johnson T.M, 2002, Paradox of groundwater age: correction. *Geology* 30:385–388.
- Brazil. Brazilian Water Agency (ANA). Groundwater resources evaluation and shared management framework proposal for the Apodi Aquifer System, states of Rio Grande do Norte and Ceara. Final Report. Volume 5. 115 p. 2010. [Portuguese].
- Capilla, J., 2003, Análisis de incertidumbre. En: *Geoestadística y modelos matemáticos en Hidrogeología*. Mateu J. e I. Morell (eds.), pp. 195-212.
- Caponera, 1995. *Riparian Rights under International Law: A Study of Israeli-Jordanian Peace Treaty – Niva Telerant*.
- Clark, B.R., Landon, M.K., Kauffman, L.J., and Hornberger, G.Z., 2008, Simulations of ground-water flow, transport, age, and particle tracking near York, Nebraska, for a study of Transport of Anthropogenic and Natural Contaminants (TANC) to public-supply wells, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5068, 47 p.
- Cook PG, Herczeg AL (eds) (1999) *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Cunningham, W.C., 2001. Real-time ground-water data for the nation. U.S. Geological Survey Fact Sheet 090-01, 2 pp.
- Cunningham, W.L., Geiger, L.H., and Karavitis, G.A., 2007, U.S. Geological Survey Ground-Water Climate Response Network: U.S. Geological Survey Factsheet FS2007-3003, 4p.
- Da Franca Ribeiro dos Anjos, N, Miletto, M., Donoso, M. C., Aureli, A., Puri, S., van der Gun, J., Tujchneider, O., and Rivera, A., 2007. Preliminary Assessment: Transboundary Aquifer Systems in the Americas. Preliminary Evaluation, 2007. Book Series UNESCO Publication PHI-VI Series ISARM-Americas **Book no 1**; in Spanish and English 178 pp.
- Dawson, M., Barbara J.; Belitz, K.; Land, M.; Danskin, W.R., 2003, Stable isotopes and volatile organic compounds along seven ground-water flow paths in divergent and convergent flow systems, southern California, 2000 U.S. Geological Survey Water-resources investigations Report WRI 2003-4059, 79p.

- Dellapenna, Joseph W. 1999. "Custom-Built Solutions for International Disputes" UNESCO Courier.
- Denny SC, Allen DM, Journeay JM (2007) DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeol. J.*15:483-494.
- Días Delgado, C., Esteller Alberich, M. A., Lopez –Vera, F. (eds.), 2005, Recursos Hídricos. Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica. Pp: ISBN 9974-7571-6-9.
- Dickinson, J.E., Hanson, R.T., Ferré, T.P.A., Leake, S.A., 2004, Inferring time-varying recharge from inverse analysis of long-term water levels: *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 7, W07403, 15p.
- Eastoe, C.J., Hutchison, W.R., Hibbs, B.J., Hawley, J., and Hogan, J.F., 2010, Interaction of a river with an alluvial basin aquifer: Stable isotopes, salinity and water budgets: *Journal of Hydrology*, 12p., doi:10.1016/j.jhydrol.2010.10.012.
- Eberts, S.M., Erwin, M.L., and Hamilton, P.A., 2005, Assessing the vulnerability of public-supply wells to contamination from urban, agricultural, and natural sources, U.S. Geological Survey Fact Sheet 2005-3022, 4 p.
- Eckhardt DAV, Stackelberg PE (1995) Relation of ground-water quality to land use on Long Island, New York. *Ground Water* 33(6):1019-1033.
- Eckstein, G., 2010. Managing Hidden Treasures across Frontiers: The International Law of Transboundary Aquifers. International Conference "Transboundary Aquifers: Challenges and New Directions" (ISARM 2010. UNESCO, Paris, December 2010).
- Escalante, A. E. F., ed., 2010, La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el Marco del Desarrollo Sostenible, Serie Hidrogeología hoy. Título 6. DINA-MAR. Depth Investigation of New Activities por MAR, 495p.
- Faunt, C.C., Hanson, R.T., Belitz, K., 2009, Introduction and conceptual model of the Central Valley, California: U.S. Geological Survey Professional Paper 1766, Chapter A of Ground-Water Availability of California's Central Valley, Claudia Faunt ed., pp 1-56. (<http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/pp/pp1766>)
- Focazio MJ (2002) Assessing ground-water vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for decision makers. U.S. Geological Survey Circular 1224.
- Fogg GE, LaBolle EM, Weissmann GS (1999) Groundwater vulnerability assessment: hydrogeologic perspectives and example from Salinas Valley, California. In: Corwin DL, Loague K, Ellsworth TR (eds) Assessment of non-point source pollution in the vadose zone, American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, vol. 108, Washington, DC.

- Foster, S., Kemper, K., Garduno, H., Hirata R., and Nanni, M., 2006, The Guarani Aquifer Initiative for Transboundary Groundwater Mangement. The world Bank: global water partnership associate program.  
[http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/GWMATE\\_English\\_CP9.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/GWMATE_English_CP9.pdf).
- Friend, A. and D. Rapport, 1979, Towards a Comprehensive Framework for Environment Statistics: A Stress-Response Approach, Statistics Canada, Ottawa, Canada.
- Fram, M.S., and Belitz, Kenneth, 2011, Probability of Detecting Perchlorate under Natural Conditions in Deep Groundwater in California and the Southwestern United States: American Chemical Society Publications, January 1, 2011.  
 Available at [http://ca.water.usgs.gov/gama/media/Fram&Belitz\\_2011.pdf](http://ca.water.usgs.gov/gama/media/Fram&Belitz_2011.pdf)
- Frind EO, Molson JW, Rudolph DL (2006) Well vulnerability: a quantitative approach for source water protection. *Ground Water* 44(5):732-742.
- Galloway, D. L., and J. Hoffmann (2006), The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology, *Hydrogeol. J.*, doi:10.1007/s10040-006-0121-5
- GAMA, 2010, <http://ca.water.usgs.gov/gama/>
- Gogu RC, Hallet V, Dassargues A (2003) Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques. Application to the Néblon river basin (Belgium). *Environmental Geology* 44(8):881-892
- Gowda, P.H., Chavez, J.L., Colaizzi, P.D., Evett, S.R., Howell, T.A., Tolk, J.A., 2008, ET mapping for agricultural water management: present status and challenges, *Irrigation Sciences*, Vol 26: 223-237 (DOI 10.1007/s00271-007-0088-6).
- Gurdak, J.J., Hanson, R.T., and Green, T.T., 2009, Effects of Climate Variability and Change on Groundwater Resources of the United States: U.S. Geological Survey Fact Sheet FS09-3074, 4 p. (<http://pubs.usgs.gov/fs/2009/3074/>).
- Gurdak, Jason J., Hanson R.T., McMahon, P.B., Bruce, B.B., McCray, J.E., and Thyne, G.D., 2007, Climate variability controls on unsaturated water and chemical movement, High Plains aquifer, USA, *Vadose Zone Journal*, V.6, pp. 531-532.
- Gutierrez-Yurrita, P.J., 2009, ¡A diseñar el futuro! El Holismo de la Tercera Cultura: hacia la la integración científica y cultural, Instituto Politécnico Nacional, Zacateco, Mexico D.F., 309 p.
- Hanson, R.T. Newhouse, M.W., and Dettinger, M.D., 2004, A methodology to assess relations between climate variability and variations in hydrologic time series in the Southwestern United States: *Journal of Hydrology*, Vol. 287, Nos. 1-4, pp. 253-270.
- Hanson, R.T. and Dettinger, M.D., 2005, Ground-water/Surface-water responses to Global Climate Simulations, Santa Clara-Calleguas Basin, Ventura County,

California, 1950-93: Journal of the American Water Resources Association, Vol. 43, No.3, pp. 517 - 536.

Hanson, R.T., Dettinger, M.D., and Newhouse, M.W., 2006, Relations between climate variability and hydrologic time series from four alluvial basins across the southwestern United States: Hydrogeology Journal, Vol. 14, No. 7, pp. 1122-1146.

Hanson, R.T., Schmid, Wolfgang, Faunt, C.C., and Lockwood, B., 2010a, Simulation and Analysis of Conjunctive Use with MODFLOW's Farm Process: Ground Water Vol. 48, No. 5, pp. 674 - 689.(DOI: 10.1111/j.1745-6584.2010.00730.x).

Hanson, R.T., Flint, A.L., Flint, L.E., Faunt, C. C., Schmid, Wolfgang, Dettinger, M.D., Leake, S.A., and Cayan, D.R., 2010b, Integrated simulation of consumptive use and land subsidence in the Central Valley, California, for the past and for a future subject to urbanization and climate change: Proceedings of the Eight International Symposium on Land Subsidence (EISOLS), Queretaro, Mexico, October, 2010, pp. 467-471.

Hanson, R.T., Flint, L.E., Flint, A.L., Dettinger, M.D., Faunt, C.C., Cayan, D., and Schmid, Wolfgang, 2012, A method for physically based model analysis of conjunctive use in response to potential climate changes: Water Resources Research, Vol. 48, 23p., doi:10.1029/2011WR010774.

Harbaugh, A.W. 2005. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Heywood, C.E., and Yager, R.M., 2003, Simulated Ground-Water Flow in the Hueco Bolson, an Alluvial-Basin Aquifer System near El Paso, Texas: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4108, 80p.

Hill, M.C., and Tiedeman, C.R., 2007, Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty: New York, Wiley and Sons, 464 p.

Hill, M.C., Banta, E.R., Harbaugh, A.W., and Anderman, E.R., 2000, MODFLOW-2000, The U.S Geological Survey modular ground-water model—User guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-184, 209 p.

Hirata, R., A. Vieira Suhogusof, A. Fernandes. 2007. Groundwater resources in the State of São Paulo, Brazil. En Vrba, J., A. Lipponen (Editors). Groundwater resources sustainability indicators. Groundwater Indicators Working Group UNESCO, IAEA, IAH. IHP-VI, Series on Groundwater N° 14. UNESCO.

Hiscock, K.M., Rivett, M.O. and Davison, R.M., 2002, Sustainable Groundwater Development. Published by The Geological Society; Special Publication No. 193; pp1-4.

- Housen-Couriel, Deborah, 1994. A comparison of legal regimes for the sharing of international waters.
- Hutson JL, Wagenet RJ, Niederhofer ME (1997) Leaching estimation and chemistry model: a process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Versions LEACHF and LEACHG (for simulating nitrogen and phosphorus transformations, cycling and transport). Research report R97-1, Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, New York.
- Hsieh, P.A., Barber, M.E., Contor, B.A., Hossain, M.A., Johnson, G.S., Jones, J.L., and Wylie, A.H., 2007, Ground-water flow model for the Spokane-Rathdrum Prairie aquifer, Spokane County, Washington, and Bonner and Kootenai Counties, Idaho: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5044, 77 p.
- IBWC, 2012. Minute 319. Interim international cooperative measures in the Colorado River basin through 2017 and extension of Minute 318 cooperative measures to address the continued effects of the April 2010 earthquake in the Mexicali Valley, Baja California.
- Izbicki, J.A., Christensen, A.H., Hanson, R.T., 1999, U.S. Geological Survey Combined Well-bore Flow and Depth-dependent Water Sampler: U.S. Geological Survey Fact Sheet 196-99, 2 p. (<http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/fs/fs19699>)
- Izbicki, J.A., Christensen, A.H., Newhouse, M.W., Smith, G.A., and Hanson, R.T., 2005, Temporal changes in the vertical distribution of flow and chloride in deep wells: Ground Water, Technical Note, Vol. 43, No. 3, pp. 1-14.
- Jimenez Espinosa, R., 2003, Casos reales de estudio y ejemplos de utilización de técnicas estadísticas y geoestadísticas en hidrogeología. En: Geoestadística y modelos matemáticos en Hidrogeología. Mateu J. e I. Morell (eds.), pp. 33-111.
- Johnson, T.D., and Belitz, K., 2009, Assigning land use to supply wells for the statistical characterization of regional groundwater quality: Correlating urban land use and VOC occurrence: Journal of Hydrology, Volume 370, Issues 1-4, May 30, 2009, Pages 100-108. Available at <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.056>.
- Kim, T., J.B. Valdés, and J. Aparicio. 2002. Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico, Water International 27 (3): 420–430.
- Kim, T., J.B. Valdés, and C. Yoo. 2006. A nonparametric approach for bivariate drought characterization using Palmer Drought Index, ASCE Journal of Hydrologic Engineering 11 (2): 134–143.
- Kolpin, D.W., 1997. Occurrence of selected herbicides and herbicide degradation products in Iowa's ground water, 1995. Ground Water 35(4): 679-688.

- Kulongoski, J., and Belitz, K., 2004, What is the Ground-Water Ambient Monitoring and Assessment program (GAMA)?: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2004-3088, 2p.
- Kumar, M., and Duffy, C.J., 2009, Detecting hydroclimatic change using spatio-temporal analysis of time series in the Colorado River basin, *J of Hydrology*, 374, pp. 1-15.
- Landon, M.K., Jurgens, B.C., Katz, B.G., Eberts, S.M., Burow, K.R., and Crandall, C.A., 2009, Depth-dependent sampling to identify short-circuit pathways to public-supply wells in multiple aquifer settings in the United States, *Hydrogeology Journal*, Volume 18, Number 3, May 2010, pp. 577-593.
- Lawrence, F., and Upchurch, S., 1982, Identification of recharge areas using geochemical factor analysis. *Groundwater* Vol. 26, No.6, pp. 680-687.
- Loague K., et al. (1998) A case study simulation of DBCP groundwater contamination in Fresno County, California. *J. of Cont. Hydrol.* 29:109-163.
- Major, D.C., Omojola, A., Dettinger, M.D., Hanson, R.T., Sanchez-Rodriguez, R., 2011, *Climate Change and Cities*, Cynthia Rosenzweig, William D. Solecki, Stephen A. Hammer, and Shagun Mehrotra eds., Chapter 5 - Climate change, water and wastewater, 294 p., Cambridge University Press, Cambridge MA. (<http://www.cambridge.org/us/catalogue/catalogue.asp?isbn=9781107004207>).
- Malvarez, A. I. y R. F. Bó. 2000. Identificación de Indicadores Biológicos para la Detección de Condiciones Hidrológicas en Sistemas de Humedales. *Cuaternario y Ciencias Ambientales*. Publicación Especial N° 4 de la Asociación Geológica Argentina, *Revista de Cuaternario y Ciencias Ambientales* 1:37-43.
- McDougal & Schlei, 1958. The hydrogen bomb tests in perspective: Lawful measures for security.
- Mechlem, Kerstin, 2009. "Moving ahead in protecting freshwater resources: The International Law Commission's Draft Articles on Transboundary Aquifers".
- Moyer, D.L., Anderholm, S.K., Hogan, J.F., Phillips, F.M., Hibbs, B.J., and Witcher, J.C., 2011, Knowledge and Understanding of Dissolved Solids in the Rio Grande—San Acacia, New Mexico, to Fort Quitman, Texas, and Proposed Plan for Future Studies and Monitoring: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report SIR 2011-xxx, 60p.
- Murat V., A. Rivera, J. Pouliot, M. Miranda-Salas, and M. M. Savard, 2004. Aquifer vulnerability mapping and GIS: A proposal to monitor uncertainty associated with spatial data processing. *Geofísica Internacional* Vol. 43, pp. 551-565.
- Myres Smith- McDougal & Schlei, 1955. The Hydrogen Bomb Tests in Perspective: Lawful Measures for Security, 64 *Yale L.J.* 648,661 (1955).
- NAWQA, 2010, <http://water.usgs.gov/nawqa/>

- Nemani, R., Votava, P., Roads, J., White, M., Thornton, P. and Coughlan, J. 2002. Terrestrial observation and prediction system: Integration of satellite and surface weather observations with ecosystem models. Proceedings of the 2002 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Toronto, Canada.
- Nemani, R.R., M.A. White, Lars Pierce, Petr Votava, Joseph Coughlan and S.W. Running. 2003. Biospheric monitoring and ecological futurecasting, Earth Observation Magazine, 12 (2): 6-8.
- Nemani, R., Votava, P., Michaelis, A., White, M., Melton, F., Milesi, C., Pierce, L., Golden, K., Hashimoto, H., Ichii, K., Johnson, L., Jolly, M., Myneni, R., Tague, C., Coughlan, J., and Running, S., 2007, Terrestrial Observation and Prediction System (TOPS): Developing ecological nowcasts and futurecasts by integrating surface, satellite and climate data with simulation models: NASA white paper (<http://ecocast.arc.nasa.gov/topwp>), 13p.
- NOAA (2001) <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/>. Cited 12 June 2001.
- Organización Meteorológica Mundial (2012): Glosario Hidrológico Internacional.
- Organization of American States (2007): Transboundary Diagnostic Analysis – TDA. Environmental Protection and Sustainable Development of the Guarani Aquifer System Project. Montevideo. 249 p. [Spanish Language].
- Organization of American States (2007): University Fund: Advances in knowledge to sustainable management. Environmental Protection and Sustainable Development of the Guarani Aquifer System Project. AMORE, L. (Coord.). BNWPP, ALHSUD. Montevideo. 176 p. [Portuguese and Spanish Languages].
- Organization of American States (2009): Project on “Sustainable Management of the Water Resources of the La Plata Basin with respect to the Effects of Climate Variability and Change”. Buenos Aires. Project Document. 59 p. <http://www.cicplata.org/marco/>
- Organization of American States (2009): Strategic Action Program – SAP. Environmental Protection and Sustainable Development of the Guarani Aquifer System Project. Brasília. 409 p.
- [\[http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20100223172013\\_PEA\\_GUARA\\_NI\\_Ing.pdf\]](http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20100223172013_PEA_GUARA_NI_Ing.pdf)
- Paris, M., 2005, Análisis Estadístico Multivariado: Métodos y Aplicaciones en Hidrología Subterránea, Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos (Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. Argentina). 251pp. Inédita.
- Paris, M., Tujchneider, O., Pérez, M., y D’Eli, M., 2011, Identificación De Indicadores De Calidad Del Agua Subterránea con Métodos Estadísticos Multivariados: VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea Salta, Argentina, 3p.

- Puri & Arnold, 2002, Challenges to management of transboundary aquifers: The ISARM Programme: IInd International Conference, Sustainable Management of transboundary waters in Europe, Miedzyzdroje, April 2002.
- Puri, S. and A. Aureli (ed.), 2009. Atlas of Transboundary Aquifers, Global maps, regional cooperation and local inventories, UNESCO-IHP, Paris. <http://www.isarm.net/publicatrions/323>
- Quebec, 2009. Cadre légal et réglementaire pour les eaux souterraines: Loi ur l'eau <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/protection/index.htm>.
- Rao PSC, Alley WM (1993) Pesticides, In: Alley WM (ed) Regional ground-water quality, Van Nostrand Reinhold, New York, New York, pp 345-382
- Rebouças, A.C. and Amore, L. The Guarani Aquifer System (2002). IN: Brazilian Groundwater Review, 16. Brazilian Groundwater Association - ABAS. p. 103-110. [Portuguese Language].
- Rivera et al., 2009, ISARM: Working group on regional strategy for the assessment and management of the transboundary aquifer systems of the Americas: Final Report, Miami, USA, August, 2009.
- Robins, N.S., Jones, H.K., and Ellis, J., 1999, An Aquifer Mangement Case Study – The Chalk of the English South Downs. Water Resources Mangement. DOI: 10.1023/A:1008101727356, p. 205-218.
- Ross M et al. (2004) Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: a case study from the St. Lawrence Lowlands, Canada. *Geofísica Internacional* 43(4):591-602.
- Savenije, H. H. G., and van der Zaag, P., 2000. "Management of shared river basins."
- Schmid, W., and R.T. Hanson. 2007. Simulation of Intra- or Trans-Boundary Water-Rights Hierarchies using the Farm Process for MODFLOW-2000. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management* 133, no. 2: 166-178.
- Schmid, Wolfgang, and R.T. Hanson. 2009. The Farm Process Version 2 (FMP2) for MODFLOW-2005 - Modifications and Upgrades to FMP1. U.S. Geological Survey Techniques in Water Resources Investigations, Book 6, Ch. A32.
- Schürch M, Kozel, R, Jemelin L (2007) Hydrogeological mapping in Switzerland. *Hydrogeol. J.* 15:799-808.
- Senay, G.B., Budde, M., Verdin, J.P., and Melesse, A.M., 2007, A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields: *Sensors*, V. 7, pp. 979-1000.
- SGM-MX (Servicio Geológico de México), 2010, Actividades Hidrogeológicas Del Acuífero Conejos-Medanos, Estado de Chihuahua, Primera Etapa: Comisión

- Internacional de Límites y Aguas en México y los Estados Unidos Sección Mexicanos, v.p.
- Sindico Francesco, 2010. "The Copenhagen Accord and the future of the international climate change regime", 1.1 Revista Catalana de Dret Ambiental (2010), pp.1-24.
- Singh, 1995, Computer models of watershed hydrology.
- Slack, J.R., Landwehr, J.M., 1992, Hydro-climatic data network (HCDN); a U.S. Geological Survey streamflow data set for the United States for the study of climate variations, 1874-1988: U.S. Geological Survey Open File Report 92-129, 193p.
- Solanes, Miguel- Gonzalez Villarreal, Fernando, 1992. "The Dublin Principles: Institutional and Legal arrangements for integrated water resource management" (this contribution specifically considers the relationship between the Dublin principles, IWRM and water law).
- Tesoriero AJ, Voss FD (1997) Predicting the probability of elevated nitrate concentrations in the Puget Sound Basin: implications for aquifer susceptibility and vulnerability. *Ground Water* 35(6):1029-1039.
- Tratado de la Cuenca del Plata, 1969.
- Tujchneider, O., París, M., Perez, M., and D'Elia, M., 2011a, Possible effects of climate change on groundwater resources in the central region of Santa Fe Province, Argentina: Groundwater – Surface Water Interaction: VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea Salta, Argentina, 3p.
- Tujchneider, O., Perez, M., París, M., and D'Elia, M., 2011b, Yrenda – Toba – Tarijeño Transboundary Aquifer System, South America: Groundwater – Surface Water Interaction: VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea Salta, Argentina, 3p.
- U.S. National Research Council, 1993, Ground water vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty. National Academy Press, Washington, D.C., 204p.
- UNESCO/OEA, 2007. Montreal, 5th COORDINATION WORKSHOP Montreal, Canada September 17–21, 2007 Final report.
- UNESCO, 2008. Marco legal e institucional en la gestión de los sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas. Serie UNESCO /OEAISARMAméricas, **libro 2**.
- UNESCO 2009. Reporte de Miami

UNESCO, 2010. Aspectos socioeconómicos, ambientales y climáticos de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas. **Libro 3** phi-vii/serie ISARM Américas n° 3.

UNESCO 2010a. Reporte de Quito, Ecuador.

UNESCO 2010b. Reporte de San José de Costa Rica.

UNESCO 2011. Reporte de Medellín, Colombia.

UNESCO 2012. Reporte de Rio de Janeiro.

Valdes, J., and Maddock III, T., 2010, Conjunctive Water Management in the US Southwest, Chapter 14, *in* Water and Sustainability in Arid Regions, Graciela Schneier and Madanes Marie-Francoise Courel (eds.), Springer Press, 24p.

van Stempvoort D, Ewert L, Wassenaar L (1992) AVI: a method for groundwater protection mapping in the Prairie Provinces of Canada. Prairie Provinces Water Board, Regina, Canada.

Vrba J, Zaporozec A (eds) (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Contributions to Hydrology 16, H. Heise Publishing, Hannover, Germany.

Vrba, J., A. Lipponen (Editors). 2007. Groundwater resources sustainability indicators. Groundwater Indicators Working Group UNESCO, IAEA, IAH. IHP-VI, Series on Groundwater N° 14. UNESCO.

Webb, R.H., McCabe, G.J., Hereford, R., and Wilkowske, C., 2004, Climatic Fluctuations, Drought, and Flow in the Colorado River: U.S. Geological Survey Fact Sheet FS04-3062, 4p.

Weiss, Edith Brown, 1991. "In Fairness to Future Generations and Sustainable Development" (ASIL Award) American University International Law Review 8, no. 1 (1991): 19-26.

Weissmann GS et al., 2002. Dispersion of groundwater age in an alluvial aquifer system. Water Resources Research 38(10):1198-1213.

Wilde, F.D., Radtke, D.B., Gibs, J., and Iwatsubo, R.T., 1998, Preparations for water sampling, National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. A1, [variously paged].

Winograd, M., 1995a, Environmental Indicators for Latin America and the Caribbean: Toward Land-Use Sustainability, GASE in collaboration with IICA/GTZ, OAS and WRI, Washington, D.C.

Winograd, M, 1995b, Marco Conceptual para el desarrollo y uso de indicadores ambientales y de sostenibilidad para la toma de decisiones en Latinoamérica y el Caribe. Proyecto CIAT/UNEP, CIAT, Cali. Columbia, 50p.

- Winograd, M., et al., 1998, Atlas de Indicadores Ambientales y de Sostenibilidad para Latinoamérica y el Caribe, Versión 1, CIAT/PNUMA.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., and Alley, W.M., 1998, Ground water and Surface water a single resource: U.S. Geological Survey Circular 1139, 79p.
- Wolf, T., A., 1999."Water and Human Security." AVISO: An Information Bulletin on Global Environmental Change and Human Security. Bulletin #3, June 1999. Ph.D.
- Zinn, B.A., and Konikow, L.F., 2007a, Potential effects of regional pumpage on groundwater age distribution: Water Resources Research, V. 43, W06418, doi:10.1029/2006WR004865, 17p.
- Zinn, B.A., and Konikow, L.F., 2007b, Effects of intraborehole flow on groundwater age distribution: Hydrogeology Journal DOI 10.1007/s10040-006-0139-8.
- Zogorski JS et al. (2006) Volatile organic compounds in the nation's ground water and drinking-water supply wells.U.S. Geological Survey Circular 1292

## GLOSARIO DE TÉRMINOS SELECCIONADOS

**Adaptación al cambio climático** – La adaptación al calentamiento global y el cambio climático es una respuesta al cambio climático, que busca reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos a los efectos del cambio climático.

**Áreas de servicio de agua** – Una región definida por un sistema formal de abastecimiento de agua para el servicio de la entrega, gestión y protección de los recursos hídricos.

**Balance hidrológico** – Balance de agua basado en el principio de que durante un cierto intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua.

**Base de datos geográfica** – Una base de datos geográfica es una base de datos espaciales diseñados para almacenar, consultar y manipular la información geográfica y los datos espaciales de baja dimensionalidad. Es un tipo especializado de base de datos espaciales a menudo con optimizaciones para 2 y 3 dimensiones, datos raster y distancia euclídea.

**Bases de datos** – Una base de datos es una colección organizada de datos para uno o más fines, por lo general en forma digital. Los datos suelen estar organizados para modelar los aspectos relevantes de la realidad de una manera que apoye los procesos que requieran esta información.

**Cambio climático** – Cambio significativo observado en el clima de una región persistente durante muy largos periodos de tiempo, **decadal** o más largos.

**Ciclo hidrológico** – Sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, mar y aguas continentales, condensación del agua en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación.

**Conductividad hidráulica** – Propiedad combinada de un medio poroso y saturado y del fluido que lo atraviesa, que determina la relación, llamada ley de Darcy, entre el caudal específico y el gradiente hidráulico que lo origina.

**Contaminantes antropogénicos** –La contaminación humana o antropogénica se origina en las actividades humanas que se desarrollan diariamente, como son las industriales, mineras, agropecuarias, artesanales y domésticas y es más grave por su naturaleza y la gran variedad de contaminantes que genera.

**Cuencas transfronterizas** – Las cuencas hidrográficas que atraviesan las fronteras internacionales y / o nacionales en los que se comparte la propiedad transfronteriza de los recursos, la administración o la explotación de un recurso natural ("activo") y la distribución y disponibilidad de los cuales está vinculado entre los países.

**Descarga de acuíferos /aguas subterráneas** – Descarga de aguas subterráneas es la tasa de flujo volumétrico de agua subterránea a través de un acuífero expresado como un flujo perpendicular a un área específica.

**Disponibilidad de agua** - Un volumen de agua que se encuentra disponible de manera sostenible. La disponibilidad de agua es una función no sólo de la cantidad y calidad del agua en un sistema de cuenca o acuífero, sino también de las estructuras físicas, las leyes, los reglamentos y los factores socioeconómicos que controlan su demanda y utilización.

**Disponibilidad de agua subterránea** – La disponibilidad de agua subterránea es una función de almacenamiento del acuífero y la conectividad con las fuentes de agua superficiales que representan recarga para la reposición y la descarga de la captura. El volumen medio anual de agua en el largo plazo fijado por cada uno de los países que comparten el SAT, que puede ser extraída de un acuífero (SAT) de una manera sostenible, sin disminuir sus reservas almacenadas o la calidad del agua, y sin causar efectos transfronterizos perjudiciales.

**El almacenamiento de las aguas subterráneas** – Almacenamiento de agua subterránea es el agua existente durante largos períodos bajo la superficie terrestre.

**El uso conjunto** – El uso y la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas para maximizar el suministro confiable y minimizar el daño a la cantidad o calidad del recurso.

**Geoindicadores ambientales** – Componentes ambientales medibles de la geología, geoquímica, geomorfología que se pueden utilizar para controlar los cambios en el entorno sujeto al desarrollo humano o a cambios ambientales naturales.

**Geoindicadores de desarrollo** – Componentes medibles de la geología, geoquímica, geomorfología que se pueden utilizar para realizar un seguimiento de los cambios en el desarrollo dentro de un área definida, como una cuenca transfronteriza o de la cuenca que está sujeta al desarrollo humano o a cambios ambientales naturales.

**Hundimiento del terreno (subsistencia)** – La subsistencia es el movimiento de una superficie (por lo general, la superficie de la Tierra), ya que se desplaza hacia abajo con respecto a un punto de referencia tales como el nivel del mar debido a los procesos tectónicos, pérdida de fuerzas de flotación de la disminución en las presiones de agua, gas o petróleo, o de la compactación de sedimentos infraconsolidados. El opuesto de subsistencia es levantamiento, lo que resulta en un aumento en la elevación de estas tectónicas o cambios en las presiones de fluido del subsuelo.

**Intrusión de agua salina** – Intrusión de agua salada es el movimiento del agua salina en los acuíferos de agua dulce. Muy a menudo, es causada por el bombeo de agua subterránea de los pozos costeros, o de construcción de canales de navegación o canales en campos petroleros. Los canales proporcionan conductos para el agua salada para ser introducidos en ciénagas de agua dulce. La intrusión de agua salada también puede ocurrir como el resultado de un proceso natural, como una marejada de un huracán. Intrusión de agua salada se produce en casi todos los acuíferos costeros, donde se encuentran en la continuidad hidráulica con agua de mar.

**La contaminación natural** – Contaminantes orgánicos o inorgánicos que se producen de forma natural en el acuífero o sistema de flujo de agua superficial relacionado.

**La zona no saturada** – La parte de la zona no saturada de la Tierra entre la superficie terrestre y la parte superior de la zona freática, es decir, la posición en la que las aguas subterráneas (el agua en los poros del suelo) están a presión atmosférica. La zona vadosa se extiende desde la parte superior de la superficie del suelo a la mesa de agua donde el agua en la zona no saturada tiene una cabeza de presión inferior a la presión atmosférica, y es retenido por una combinación de la adhesión (aguas subterráneas funiculares), y la acción capilar (aguas subterráneas capilares).

**Las imágenes de satélite** – Las imágenes de satélite se componen de fotografías u otros datos digitales de la Tierra o en otros planetas hechos por medio de los instrumentos electrónicos de los satélites artificiales.

**Los distritos de riego** – Una cooperativa, corporación pública autónoma creada como una subdivisión del gobierno del Estado, con límites geográficos definidos, organizados y que poseen poder tributario para obtener y distribuir el agua para el riego de las tierras dentro del distrito; creado bajo la autoridad de una legislatura del Estado, con el consentimiento de una fracción designada de los propietarios o de los ciudadanos.

**Los modelos numéricos** – Programas informáticos creados para hacer aproximaciones numéricas de las ecuaciones que representan los procesos físicos que representan el uso y el movimiento del agua, reacciones químicas, y otros procesos.

**Marco hidrogeológico** – Marcos hidrogeológicos son modelos de marcos geológicos 3D donde una agregación de "elementos" geológicos fundamentales, que se sabe están presentes en una cuenca, son asignados propiedades hidrológicas. Los elementos geológicos representan partes fundamentales de la arquitectura estratigráfica o estructural del sistema que son capaces de ser modelado cuantitativamente, son comunes a muchas cuencas, y pueden controlar el uso y el movimiento de las aguas subterráneas.

**Modelo conceptual** – Simulación de las relaciones, las entradas y salidas y usos del agua, geología, los recursos minerales, el uso del suelo u otros aspectos de una cuenca hidrográfica o cuenca de agua subterránea.

**Modelo de simulación** – La aplicación de un modelo numérico a una ubicación específica que utiliza los atributos de una cuenca o las aguas subterráneas de cuencas para simular el uso y el movimiento de agua.

**Modelo hidrogeológico** –Un modelo hidrológico representa un modelo numérico que está especialmente diseñado para representar los procesos físicos relacionados con el uso y el movimiento del agua a través del marco geológico de una cuenca.

**Modelo hidrológico** – La escorrentía media de aguas subterráneas por unidad de superficie de un acuífero o cuenca hidrogeológica.

**Protección ambiental** – Protección de la calidad del medio ambiente y la cantidad de los flujos de agua de los cambios debidos a la introducción de factores de desarrollo humano o de la pérdida de hábitat y características de los recursos hídricos relacionados.

**Protección de acuíferos** – La protección del acuífero de los contaminantes antropogénicos y de la movilización de contaminantes naturales provenientes de fuentes superficiales o subsuperficiales.

**Proveedores de agua** – Una utilidad pública, compañía de agua mutua, distrito de agua del condado o municipio que suministra agua potable a clientes.

**Recursos hídricos** – Recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable.

**Recursos subterráneos** – La distribución de los recursos hídricos que fluyen o almacenados debajo de la superficie terrestre dentro de una cuenca que se puede utilizar para fines ambientales o humanos.

**Recursos superficiales** – La distribución de los recursos hídricos que fluyen o almacenados en la superficie terrestre dentro de una cuenca que se puede utilizar para fines ambientales o humanos.

**Redes de datos** – Una red de datos es un proceso de comunicación electrónico configurado para transmitir sólo datos que permite la transmisión ordenada y receptiva de los datos, tales como cartas, hojas de cálculo y otros tipos de documentos.

**Rendimiento sostenible** – La extracción de los recursos de agua por unidad de tiempo que no exceda de la tasa de reposición o cause el agotamiento de almacenamiento o captura de descarga.

**Sistemas acuíferos transfronterizos** – Sistemas acuíferos transfronterizos son caminos naturales subterráneos de flujo de agua subterránea dentro de una o varias cuencas hidrográficas, atravesados por una frontera internacional y/o nacional o local, de manera que el agua pueda fluir en el subsuelo a través de los ríos y la escorrentía en la superficie de un lado de la frontera hacia el otro. En muchos casos el acuífero podría recibir la mayoría de su recarga en un lado, y la mayoría de su descarga se produciría en el otro lado. El sistema de flujo subterráneo en la frontera misma se puede visualizar para incluir movimiento del agua en los sistemas de flujo regional y local.

**Sostenibilidad**– La medida de la capacidad de seguir reponiendo y utilizando agua u otros recursos.

**Transmisividad** – Caudal a través de una sección de acuífero de anchura unidad bajo un gradiente hidráulico unitario. Se expresa como el producto de la conductividad hidráulica por el espesor de la porción saturada de un acuífero.

**Variabilidad del clima** – Variable relativa al ciclo hidrológico y el clima como por ejemplo nivel de aguas (altura), caudal o precipitación.

**Vulnerabilidad del agua subterránea** – La vulnerabilidad de las aguas subterráneas a las reducciones en la cantidad o calidad del uso del agua y el movimiento de los componentes humanos o naturales de un sistema de flujo local o regional.

**Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación** – La posible contaminación de las aguas subterráneas a partir de fuentes naturales o antropogénicas que degradan la calidad del agua para usos humanos o naturales.

**Vulnerabilidad específica** – La vulnerabilidad específica de los recursos de agua para una reducción en la cantidad o calidad relacionada con una tensión específica o constituyente del recurso.

**Vulnerabilidad intrínseca** – Una vulnerabilidad específica de los recursos de agua para una reducción en la cantidad o calidad relacionada con una limitación interna o un constituyente dentro del recurso.

## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AVI	Método del Índice de Vulnerabilidad del Acuífero
DRASTIC	Índice de vulnerabilidad de acuíferos que significa: La profundidad al agua, recarga, los medios de comunicación del acuífero, los medios de comunicación del suelo, topografía, impacto de los medios de la zona no saturada y conductividad hidráulica del acuífero.
EUA	Estados Unidos de América
GAMA	Monitoreo y evaluación ambiental de las aguas subterráneas en California
GPS	Sistemas de Posicionamiento Geoespacial
InSAR	Radar de apertura sintética interferométrico
ISARM	Del ingles: <b>I</b> nternationally <b>S</b> hared <b>A</b> quifer <b>R</b> esources <b>M</b> anagement
LANDSAT	Multiespectrales Landsat Scanner (MSS) y temática de datos Mapper (TM)
LEACHM	Modelo de Estimación de lixiviación y Química
Mex	México
MODIS	Moderada-Resolution Imaging Spectroradiometro
MTBE	(methyl tertiary-butyl ether)
NAWQA	Evaluación de la Calidad Nacional del Agua
OEA	Organización de Estados Americanos
PHI	Programa Hidrológico Internacional
PRZM	Elevación de parámetros en el modelo de regresiones pendientes independiente del sistema climático de mapas, Grupo PRISMA Climático
SAT	Sistemas de acuíferos transfronterizos
SIG	Sistema de Información Geográfica
TOPS	Observación Terrestre y el Sistema de Predicción
UNESCO	Las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
VOCs	Volitile Compuestos Orgánicos

## ANEXOS

### Anexo 7-A: Colaboradores

#### **Ofelia Tujchneider- Argentina**

Doctora en Geología. (Summa cum Laude). Miembro de la Carrera del Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Profesora Titular Gestión de Recursos hídricos Subterráneos, cursos de grado y posgrado. Directora del Grupo de Investigaciones Geohidrológicas. FICH – UNL. Directora de Proyectos y Programas de Investigación, tesis de Maestría y Doctorado. Miembro de Programas UNESCO-GEF-WB-FAO. Ha publicado trabajos en publicaciones periódicas y reuniones científicas y es coautora de libros de la especialidad. Premio a la Excelencia Humana e Institucional; de la Cámara de Diputados de la prov. de Santa Fe; del H. Senado de la Nación Argentina; Del Vicegobernador de la prov. de Santa Fe; de la sociedad Argentina de Estudios Geográficos GAEA Bicentenario 2010; de la Universidad Nacional del Litoral; etc.

#### **Julio Kettelhut, - Brasil**

Ingeniero Civil; Representante del Gobierno brasileño en diversos foros internacionales relacionados con la gestión de los recursos hídricos; Ex Coordinador Nacional del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (GEF / OEA) ha ocupado varios cargos gerenciales gubernamentales relacionados con la gestión de los recursos hídricos en la Secretaría de recursos Hídricos y Medio Ambiente Urbano del Ministerio de Medio Ambiente. Ha participado en la negociación y redacción de la Ley de Aguas de Brasil y la Ley de la Agencia Nacional del Agua y ha coordinado el grupo de trabajo responsable de proponer regulaciones en la Ley de Aguas de Brasil.

#### **Nelson da Franca –Brasil**

Dr. Nelson da Franca es actualmente un Consultor en Recursos Hídricos de la UENSCO. Fue el Especialista Principal de Recursos Hídricos en la Unidad de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Organización de los Estados Americanos. Recibió su Ph.D. de la Universidad de Estrasburgo en Francia. Antes de unirse a la OEA en 1992, el Dr. da Franca trabajó en la División de Ciencias del Agua de la UNESCO en París desde 1984 hasta 1990.

#### **Luiz Amore– Brasil**

Desarrolla proyectos de la Cooperación Sur-Sur brasileña en Recursos Hídricos como Asesor Internacional de la Agencia Nacional de Aguas, desde 2011. Fue Secretario General para la ejecución Proyecto para la Protección y Desarrollo Sostenible del Acuífero Guaraní (2003 al 2009), interactuando con los Gobiernos da Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay así como la Organización de dos Estados Americanos, Banco Mundial y Fondo Mundial para el Medio Ambiente. Es Vicepresidente de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH).

**Alfonso Rivera – Canadá**

Jefe hidrogeólogo del Servicio Geológico de Canadá. Creador y director del programa nacional de agua subterránea de la Secretaría de Recursos Naturales de Canadá, de 2003 a 2012 hidrogeólogo físico, egresado de la Escuela de Minas de París, Francia, especializado en modelado de aguas subterráneas, acoplados hidromecánicos y procesos de transporte de solutos, exploración del agua subterránea, y gestión de los recursos hídricos. Fue el primer presidente de la Comisión Nacional Ad-Hoc sobre aguas subterráneas en Canadá para el período 2000-2003; es profesor adjunto en la Universidad Laval y la Universidad de Quebec. Trabajó en Francia, Suiza, Alemania y España durante 14 años antes de mudarse a Canadá.

**Omar Vargas- Colombia**

Subdirector de Hidrología-IDEAM (Colombia). Geólogo-Especialista en recursos hidráulicos. Coautor de Estudio Nacional del Agua 2010, Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua, El agua subterránea en Colombia: Una visión general, Zonificación y codificación hidrográfica e hidrogeológica en Colombia. Docente e Investigador en temas hidrológicos e hidrogeológicos.

**Marcela Espinoza Nissim - Chile**

Es Jefe del Departamento de Aplicación Legislativa en la Dirección de Fronteras y Límites, del Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. Integra el Grupo de Trabajo del Protocolo sobre Recursos Hídricos Compartidos, Adicional al Tratado sobre Medio Ambiente entre Chile y Argentina, y otros equipos de trabajo, nacionales e internacionales relacionadas con recursos hídricos transfronterizos. En el ámbito académico, se ha desempeñado como Profesora en la asignatura de Integración Física Regional en la Academia Diplomática de Chile (2004 – 2009).

**Mario Arias - Costa Rica**

Geólogo de formación, realizó sus estudios de posgrado en la Universidad Pierre et Marie Curie, en París, Francia. Labora como docente - investigador en la Universidad de Costa Rica, desarrollando la temática de Gestión del Recurso Hídrico y ejerciendo diversos puestos administrativos de dirección. Es autor de varios artículos publicados a nivel nacional e internacional y de gran cantidad de trabajos técnicos. Actualmente se desempeña como director del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas de esa casa de enseñanza.

**Rodrigo Calvo Porras - Costa Rica**

Master en Hidrogeología de la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica e Ing. Topógrafo de esa Universidad. Ha trabajado por más de veinte años en el Área de Auscultación de Obras del Instituto Costarricense de Electricidad y actualmente es su coordinador. Es profesor de Licenciatura en la Universidad de Costa Rica y ha participado desde el 2003 como representante de Costa Rica en los talleres que lleva a cabo la OEA, dentro del Programa ISARM Américas “Acuíferos Transfronterizos de las Américas”, auspiciados por la UNESCO.

**Randy Hanson – Estados Unidos**

Hidrólogo ha encabezado la investigación en el área de Hidrología por más de 34 años en el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), estudiando y desarrollando metodologías para el manejo integral de cuencas. Su investigación incluye a la integración de modelos hidrológicos, de modelos del clima y técnicas de apoyo para la toma de decisiones.

**William. M. Alley - Estados Unidos**

Fue jefe de la Oficina de Aguas Subterráneas del Servicio Geológico de EE.UU desde 1993 hasta enero de 2014. Fue miembro del Consejo Directivo de la división de científicos e ingenieros de la Asociación Nacional de Aguas Subterráneas del 2006-2009, editor asociado de Ground Water® en el período 1998-2005, copresidente de la Cumbre del Agua Subterránea 2007, y miembro del Comité de Nominaciones desde 2006 hasta el presente.

**Alyssa Dausman - Estados Unidos**

Hidróloga, trabaja en el Centro Integrado de Ciencia de Florida, Servicio Geológico de EE.UU: estudios de Agua y Restauración, Ft. Lauderdale, Florida. Desde julio de 2000-presente trabaja como hidróloga en la modelación de aguas subterráneas de variable densidad y es jefe de proyectos de múltiples proyectos de investigación.

**Fulgencio Garavito- Guatemala**

MSc. Ing. Recursos Hidráulicos con especialidad en Hidráulica. Especializaciones con diplomados profesionales: Hidrogeología, Hidrología, Climatología y Agrometeorología. Actualmente es el Encargado de Investigaciones Hidrogeológicas del Instituto Nacional de Sismología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH). Catedrático de varios cursos en Escuelas de Postgrado de las Facultades de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Ha colaborado con Organismos Nacionales y con Organismos Internacionales a nombre del INSIVUMEH en distintos proyectos.

**Rubén Chávez-Guillen - México**

Obtuvo el título de Ingeniero Civil y cursó la maestría en Hidráulica. Ha desempeñado cargos en el sector público y ahora ocupa el de Gerente de Aguas Subterráneas en la Comisión Nacional del Agua. Fue profesor de licenciatura y posgrado en la Universidad Autónoma de México, impartió cursos cortos, seminarios y conferencias sobre diversos temas de Geohidrología en otras universidades, y ha publicado numerosos artículos en esta materia. Asimismo, ha participado como representante de México, en los talleres que lleva a cabo la OEA, dentro del Programa ISARM Américas “Acuíferos Transfronterizos de las Américas”, auspiciados por la UNESCO.

**Jaime Alejandro Vences Mejía- México**

Licenciado en Derecho (UNAM); Subgerente de planeación de Consejos de Cuenca en CONAGUA; Especialista sobre manejo integrado de Cuencas Hidrológicas; Co-Autor del libro "Hacia un posicionamiento de Gobernanza del Agua en México", CONAGUA/COLMEX/ANEAS/IMTA; Integrante del grupo de las Américas que desarrolló el posicionamiento continental respecto del eje "Buena gobernanza para la GIRH", en el VI foro Mundial del Agua en Marsella.

### **Rigoberto López – Nicaragua**

Ingeniero agrónomo, con maestría en gestión ambiental. Ha trabajado como: i) Coordinador del Proyecto Gestión Integrada de los Recursos Hídrico y Desarrollo Sostenible de la Cuenca del río San Juan y su Zona Costeras (PROCUENCA-SAN JUAN, MARENA). Financiado por el FMAM – OEA, ii) Docente de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, y de la Universidad Nacional Agraria, iii) Especialista en gestión de cuencas hidrográficas, dirección de cuencas hídricas /MARENA.

### **José Raúl Pérez- República Dominicana**

Ingeniero Civil. Posee un Diploma en Ingeniería de Costas. Actualmente se desempeña como Asesor Técnico de Cooperación Internacional del Instituto Nacional Dominicano de Recursos Hidráulicos (INDRHI). En el pasado fue Gerente de Planificación del INDRHI y fue Maestro en Ingeniería Hidráulica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

### **Lourdes Batista - Uruguay**

Ingeniera Agrónoma. Trabajó en gestión y planificación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la Dirección Nacional de Hidrografía del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Actualmente, trabaja en gestión y administración de los recursos hídricos, con énfasis en aguas subterráneas, en la Dirección Nacional de Aguas del Ministerio de Vivienda Ordenamiento, Territorial y Medio Ambiente. Asimismo, participa en la creación y puesta en funcionamiento del Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas (Ce.Re.G.A.S.) en Uruguay.

### **Fernando Decarli - Venezuela**

Técnico en Geología y Minas, Lic. en Geografía, Máster en Tecnología Hidrogeológica, Diplomado en manejo de Aguas Subterráneas, Certificado en Hidrología Isotópica y Empleo de Trazadores. Actualmente es el coordinador de Hidrología Subterránea en el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). Ha participado y liderado en programas asociados a la evaluación de las aguas subterráneas en el país. Ha sido tutor académico e instructor de cursos en Hidrología Subterránea. También fue coordinador nacional en proyectos en aguas subterráneas aplicando técnicas nucleares.

## Anexo 7-A: Cursos propuestos en la Universidad de Costa Rica

Cursos propuestos en los tres niveles de capacitación que se está implementado en la Universidad de Costa Rica, en la temática de Gestión Integrada del Recurso Hídrico.

### **Cursos impartidos en la modalidad de Educación Continua**

- Cultura del agua
- Principios de gestión integrada del recurso hídrico
- Política hídrica nacional
- Introducción al manejo de cuencas hidrográficas
- Legislación hídrica
- El agua superficial
- El agua subterránea
- Mediciones de caudal
- Calidad del agua
- Protección del recurso hídrico
- Herramientas para el manejo comunitario del recurso hídrico

### **Curso impartidos en la modalidad de Diplomado**

- Ciclo propedéutico
- Herramientas informáticas
- Introducción a la gestión integrada del recurso hídrico
- Climatología básica y cambio climático
- Fundamentos de hidrología e hidráulica
- Ordenamiento territorial
- Principios de hidrogeología
- Principios de administración
- Calidad del recurso hídrico
- Organización y participación comunitaria

### **Curso básicos impartidos en la modalidad de Maestría**

- Gestión integrada del recurso hídrico
- Ciclo hidrológico
- Ecología de ambientes acuáticos
- Ordenamiento territorial
- Manejo y control de la calidad del agua
- Salud y comunicación en la gestión integrada
- Valoración económica del recurso hídrico
- El agua en las políticas públicas
- Taller de investigación
- Preparación del trabajo final de graduación

### **Cursos optativos impartidos en la modalidad de Maestría**

- Climatología y cambio climático
- Gestión de cuencas hidrográficas
- Impacto ambiental sobre los recursos hídricos
- Instrumentos de negociación y resolución de conflictos
- Sistema de información geográfica aplicado a la gestión del recurso hídrico

### **Aprovechamiento sostenible del recurso hídrico**

## LISTA DE CUADROS

CUADRO 6-1 Modelos de simulación hidrológicos.....	119
CUADRO 6-2 Vulnerabilidad de un acuífero con diferentes unidades hidroestratigraficas .....	124
CUADRO 6-3 Métodos para evaluación de la vulnerabilidad.....	127
CUADRO 6-4 La cuenca del Río Colorado compartida por México y los Estados Unidos .....	135
CUADRO 7-1 Caso de cooperación, colaboración y participación social de las aguas subterráneas, México. ....	161
CUADRO 7-2Capacitación en la temática en Gestión Integrada del Recurso Hídrico en la Universidad de Costa Rica .....	171
CUADRO 7-3 Capacitación en la temática en Gestión Integrada del Recurso Hídrico en la Universidad de Costa Rica .....	172

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Sistemas Acuíferos Transfronterizos (SAT) en las Américas en 2009 .....	18
Figura 4.2 Numero de acuíferos, por país, caracterizados por la encuesta. ....	26
Figura 4.3 Resultados de los acuíferos con geometría definida.....	27
Figura 4.4 Resultados de los acuíferos con parámetros hidrogeológicos .....	27
Figura 4.5 Resultados de los acuíferos que cuentan con modelos conceptuales .....	27
Figura 4.6 Resultados de los acuíferos que cuentan con modelos matemáticos de predicción.....	28
Figura 6.1 Etapas de evaluación de la disponibilidad de agua subterránea de un SAT.....	107
Figura 6.2 Diagrama de elementos de un modelo conceptual de desarrollo sostenible para un SAT (Rivera et al., 2009; modificado y traducido de Hiscok et al., 2002).....	110
Figura 6.3 Grafico que muestra la diversidad potencial de tipos de datos y categorías incluidas en la base de datos geoespacial centralizada (traducido de Faunt et al., 2009). ....	112
Figura 6.4 Diagrama de los componentes seleccionados dentro de un sistema hidrológico regional transfronterizo (modificado y traducido de Puri y Arnold, 2002). ....	113
Figura 6.5 Diagrama ilustrando el proceso de evaluación del recurso que combina recolección de datos, modelo conceptual, modelo numérico y análisis relacionado (modificado de ASTM, 1993).....	118
Figura 6.6 Diagrama que muestra los componentes de caudal y uso de la tierra que – - pueden incidir en la vulnerabilidad del agua subterránea (traducido de Ebers et al., 2005).....	122
Figura 6.7 Probabilidades predictivas de detectar perclorato bajo condiciones naturales en aguas subterráneas en una concentración mayor que el umbral de cuatro concentraciones (Fram y Belitz, 2011). ....	129
Figura 6.8 Mapa deSAT-9N en la Cuenca del Río Colorado .....	135
Figura 6.9 Mapa del acuífero transfronterizo a lo largo de la frontera internacional del Valle Imperial, EUA y el Valle Mexicali, MX.....	136
Figura 6.10 Sección transversal esquemática que muestra los efectos potenciales de revestimiento de canales.....	136
Figura 6.11 La frontera de un País, Estado o Provincia coincide con un río importante o un lago principal; el acuífero aluvial está conectado con el río; en este caso hay poco flujo transfronterizo.....	139
Figura 7.1 Localización del Sistema Acuífero Guaraní (extraído de Puri y Aureli, 2009). ....	174
Figura 7.2 Marco de Cooperación Regional .....	177

## LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Acuíferos transfronterizos identificados en las Américas .....	17
Tabla 4.2 Niveles de conocimiento de los SAT de las Américas.....	25
Tabla 4.3 Resumen de la información de niveles de conocimiento de los SAT .....	26
Tabla 5.1 Aspectos Institucionales .....	31
Tabla 5.2 Sistemas acuíferos transfronterizos de América del Norte.....	37
Tabla 5.3 Sistemas Acuíferos Centroamericanos y del Caribe. ....	48
Tabla 5.4 Sistemas Acuíferos Transfronterizos de América del Sur .....	61
Tabla 5.5: Evidencias de Derecho Internacional Consuetudinario para los SAT (Eckstein, 2010).....	89
Tabla 7.1 Elementos claves en la implementación de la estrategia .....	155