

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS



EN LA POLÍTICA
NACIONAL DE
LOS RECURSOS
HÍDRICOS



Serie
Capacitación
en Gestión de
los Recursos
Hídricos



Administración



Educación



Diversidad

República Federativa de Brasil

Jair Bolsonaro

Presidente de la República

Ministerio del Desarrollo Regional

Daniel Ferreira

Ministro

Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento - Brasil

Directorio Colegiado de la ANA

Veronica Sánchez da Cruz Rios (Directora-Presidente)

Vitor Saback

Maurício Abijaodi

Ana Carolina Argolo

Filipe de Mello Sampaio Cunha

AGENCIA NACIONAL DE AGUA Y SANEAMIENTO - BRASIL
MINISTERIO DE DESARROLLO REGIONAL

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA POLÍTICA NACIONAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

————— **Serie** —————
**Capacitación en Gestión
de los Recursos Hídricos**
————— **Volumen 5** —————

Brasília – DF

ANA

2022

Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Edifício Sede, Bloco M
Código Postal: 70.610-200 – Brasília/DF
Teléfono: (61) 2109-5400 / 5252
Enlace web: <https://www.gov.br/ana/pt-br>

Comité de Edición

Joaquim Guedes Corrêa Gondim Filho (coordinador)
Humberto Cardoso Gonçalves
Felipe de Sá Tavares
Nazareno Araújo (secretario-ejecutivo)

Equipo editorial

Adriana Niemeyer Pires Ferreira
Fabricio Bueno da Fonseca Cardoso
Fernando Roberto de Oliveira
Henrique Pinheiro Veiga
Letícia Lemos Moraes
Márcia Teresa Pantoja Gaspar
Didier Gastmans
Dora Atman
Roberto Eduardo Kirchheim
Thiago Gil Barreto Barros
Vagney Aparecido Augusto

Organización

Pilar Carolina Villar

Autores

Pilar Carolina Villar
Ricardo Hirata
José Luiz Albuquerque
Ana Maciel de Carvalho

Proyecto gráfico y edición

Guilherme Resende

Supervisión editorial

Jorge Thierry Calasans
Renata Rozendo Maranhão
Vivianne Graça de Melo

Traducción

Henrique Trentini, *Global Languages*
Maria Isabel Zattar, *Global Languages*

Disponible también

en: <https://www.gov.br/ana/pt-br>

Tiraje: Versión digital

Todos los derechos reservados.

Se permite la reproducción de los datos e información contenidos en esta publicación, siempre que se cite la fuente.

Esta publicación cuenta con la cooperación de la UNESCO en el marco del Proyecto 586RLA2001 “Cooperación Sur-Sur para el fortalecimiento de la gestión integrada y el uso sostenible de los recursos hídricos en el contexto de los países de América Latina y el Caribe y la Comunidad de Países de Lengua Portuguesa (CPLP)”, cuyo objetivo es contribuir al fortalecimiento de la gestión integrada y el uso sostenible de los recursos hídricos en los países de América Latina y el Caribe y la Comunidad de Países de Lengua Portuguesa (CPLP).

Los nombres y la presentación del material a lo largo de este libro no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la UNESCO con respecto a la condición jurídica de ningún país, territorio, ciudad, región o sus autoridades, ni la delimitación de sus fronteras o límites.

Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no reflejan necesariamente las de la UNESCO ni comprometen a la Organización.

Catalogación en la fuente: Biblioteca/CEDOC

A265I Agência Nacional de Aguas y Saneamiento (Brasil).
Las aguas subterráneas en la Política Nacional de los Recursos Hídricos / Agência Nacional de Aguas y Saneamiento; Pilar Carolina Villar ; Ricardo Hirata ; José Luiz Albuquerque ; Ana Maciel de Carvalho. – Brasília : ANA, 2022.

222 p. : il. (Capacitación em gestão de los recursos hídricos ; v. 5)

ISBN: 978-65-88101-36-0

1. Aguas subterráneas - gestión. 2. Aguas subterráneas - calidad.
3. Acuíferos transfronterizos. 4. Derecho de uso. 5. Gobernanza en la gestión de acuíferos I. Título. II. UNESCO.

CDU 556.388(81)

FIGURA 1 – CICLO DEL AGUA	27
FIGURA 2 – VOLUMEN DE AGUA Y MEDIA ANUAL DE LOS CAUDALES EN EL CICLO HIDROLÓGICO	28
FIGURA 3 – PRINCIPALES SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROPORCIONADOS POR LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	33
FIGURA 4 – SISTEMAS ACUÍFEROS BRASILEÑOS AFLORANTES	38
FIGURA 5 – PERFIL DE USUARIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BRASIL	41
FIGURA 6 – DISTRIBUCIÓN DE LOS MUNICIPIOS BRASILEÑOS (TOTAL Y POR TAMAÑO DE LA POBLACIÓN), SEGÚN EL TIPO DE FUENTE DE SUMINISTRO	42
FIGURA 7 – DISTRIBUCIÓN DE ACUÍFEROS FRACTURADOS, SEDIMENTARIOS Y CÁRSTICOS EN BRASIL	49
FIGURA 8 – FUNCIONAMIENTO DE UN ACUÍFERO	50
FIGURA 9 – EL MARCO GEOLÓGICO COMO ELEMENTO BÁSICO PARA DEFINIR EL TERRITORIO DE LA CUENCA Y EL ALMACENAMIENTO DE AGUA	54
FIGURA 10 – (A) MODELO CONCEPTUAL PARA RÍOS EFLUENTES; (B) MODELO CONCEPTUAL PARA RÍOS INFLUYENTES; (C) MODELO CONCEPTUAL PARA RÍOS INFLUYENTES; (D) MODELO DE FLUJO DIRECTO CONCEPTUAL	57
FIGURA 11 – FUNDAMENTOS, OBJETIVOS, DIRECTRICEZ, HERRAMIENTAS DE GESTIÓN Y LA ARQUITECTURA INSTITUCIONAL DE LA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS	82
FIGURA 12 – MATRIZ Y FUNCIONAMIENTO DEL SINGREH	85
FIGURA 13 – AGENDA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA ANA	92
FIGURA 14 – INSTRUMENTOS DIRECTOS E INDIRECTOS PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	98
FIGURA 15 – MAPA DE CONCESIONES MINERAS DE AGUA MINERAL Y POTABLES DE MESA DEL TERRITORIO BRASILEÑO	104

FIGURA 16 – POLÍTICAS PÚBLICAS, TIPOS DE PLANES, ÁREAS GEOGRÁFICAS Y ENTIDADES COORDINADORAS EN EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN BRASIL	116
FIGURA 17 – DIRECTRICES PARA LA ELABORACIÓN DE PLANES HIDROGRÁFICOS DE RECURSOS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	122
FIGURA 18 – AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS PLANOS DE CUENCA, BASADO EN LAS RESOLUCIONES DEL CNRH	123
FIGURA 19 – CONCEPTO DE PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE POZOS	126
FIGURA 20 – PASOS DEL PROCEDIMIENTO PARA CLASIFICAR LOS CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS, DEFINIDAS POR LA RESOLUCIÓN N° 91/2008	131
FIGURA 21 – ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS Y CONCESIÓN DE DERECHOS DE USO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	135
FIGURA 22 – COBRO POR EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN BRASIL – COMITÉS HÍDRICOS ESTATALES	141
FIGURA 23 – OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	161
FIGURA 24 – SECCIÓN GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DEL ESTADO DE SÃO PAULO CON LA SECUENCIA DE SISTEMAS ACUÍFEROS	169
FIGURA 25 – ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS EN EL TERRITORIO BRASILEÑO	171
FIGURA 26 – EL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ Y SUS ZONAS DE GESTIÓN	173

TABLA 1 – PRINCIPALES RESOLUCIONES EMITIDAS POR CNRH DIRECTAMENTE RELACIONADAS CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	89
TABLA 2 – CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS MINERALES SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	105
TABLA 3 – CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES MINERALES CON RELACIÓN A LOS GASES Y TEMPERATURA	107
TABLA 4 – CLASES DE CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS, SEGÚN LOS USOS PREDOMINANTES	128
TABLA 5 – NORMAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE CLASES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	129
TABLA 6 – ¿POR QUÉ TENEMOS TANTOS POZOS IRREGULARES Y CÓMO CAMBIAR ESTA SITUACIÓN?	138
TABLA 7 – PRINCIPALES DISTINCIONES ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS	185

LISTA DE SIGLAS

ABAS	ASOCIACIÓN BRASILEÑA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
ANA	AGENCIA NACIONAL DE AGUA Y SANEAMIENTO - BRASIL
ANM	AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA
ANVISA	AGENCIA NACIONAL DE VIGILANCIA SANITARIA
APA	ÁREAS DE PROTECCIÓN DEL ACUÍFERO
BDNAC	BASE DE DATOS NACIONAL DE ÁREAS CONTAMINADAS
CAF	BANCO DE DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA
CCH	COMITÉ DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
CEREGAS	CENTRO REGIONAL PARA LA GESTIÓN DE ÁGUAS SUBTERRÁNEAS
CERH	CONSEJO ESTATAL DE RECURSOS HÍDRICOS
CNARH	REGISTRO NACIONAL DE USUARIOS DE RECURSOS HÍDRICOS
CNRH	CONSEJO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS
CONAMA	CONSEJO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE
CPRM	COMPAÑÍA DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS MINERAIS
CS	COEFICIENTE DE SOSTENIBILIDAD
DNPM	DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUCCIÓN MINERAL
FAO	FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS
GAC	GESTIÓN DE ÁREAS CONTAMINADAS
GEF	FONDO GLOBAL PARA EL MEDIO AMBIENTE
GIRH	GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
GWP	GLOBAL WATER PARTNERSHIP

IBGE	INSTITUTO BRASILEÑO DE GEOGRAFÍA Y ESTADÍSTICA
IWRM	INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT
LC	LEY COMPLEMENTARIA
LEBAC	LABORATORIO DE ESTUDIOS DE CUENCAS
LQP	LÍMITE DE CUENTIFICACIÓN PRATICABLE
MDR	MINISTERIO DE DESARROLLO REGIONAL
MMA	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE
MME	MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
ODM	OBJETIVOS DE DESARROLLO DEL MILENIO
ODS	OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE
OEA	ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS
PAB	PROGRAMA AGUA BUENA
PAD	PROGRAMA AGUA DULCE
PEC	PROYECTO DE ENMIENDA A LA CONSTITUCIÓN
PEI	PLANES DE IRRIGACIÓN
PERH	PLAN ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS
PNAS	PROGRAMA NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
PNRH	POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS
PPA	PLAN PLURIANUAL
PPP	PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE POZOS
PRA	PROGRAMA ESTATAL DE REGULARIZACIÓN AMBIENTAL
PSA	PAGOS POR SERVICIOS AMBIENTALES
PSAG	PROYECTO SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ
PUB	PRECIO UNITARIO BÁSICO
RHN	RED HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL
RIMAS	REDE INTEGRADA DE MONITOREO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
RM	REGIONES METROPOLITANAS
RNQA	RED NACIONAL DE MONITOREO DE CALIDAD DE LAS AGUAS
RPD	RECARGA POTENCIAL DIRECTA
RPE	RESERVA POTENCIAL EXPLOTABLE
SAG	SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ
SE	SERVICIOS DE ECOSISTEMAS
SGB	SERVICIO GEOLÓGICO DE BRASIL
SIAGAS	SISTEMA DE INFORMACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
SINGREH	SISTEMA NACIONAL DE GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS
SINIMA	SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE MEDIO AMBIENTE
SISNAMA	SISTEMA NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE
SNIRH	SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE RECURSOS HÍDRICOS
SNIS	SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN DE SANEAMIENTO
SNSH	SECRETARÍA NACIONAL DE SEGURIDAD HÍDRICA
SRHU	SECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS Y AMBIENTE URBANO
STJ	SUPERIOR TRIBUNAL DE JUSTICIA
UNESP	UNIVERSIDAD ESTATAL PAULISTA
VI	VALOR DE LA INVESTIGACIÓN
VMP	VALOR MÁXIMO PERMITIDO
VO	VALOR ORIENTADOR
VP	VALOR DE PREVENCIÓN
VRQ	VALOR DE REFERENCIA DE CALIDAD
ZA	ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA
ZC	ZONA DE CONTRIBUCIÓN
ZEE	ZONIFICACIÓN ECONÓMICA ECOLÓGICA

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	11
1 CONSIDERACIONES INICIALES.....	19
2 AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL CICLO HIDROSOCIAL.....	23
2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	26
2.2 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	33
2.3 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BRASIL Y SU IMPORTANCIA SOCIOAMBIENTAL.....	37
2.3.1 EL PERFIL DE LOS USUARIOS Y SU PAPEL EN LA SEGURIDAD HÍDRICA.....	40
2.3.2 LAS VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	42
2.4 QUÉ SON LOS ACUÍFEROS Y CÓMO FUNCIONAN.....	45
2.5 LAS AMENAZAS A LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS BRASILEÑOS.....	60
2.5.1 SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.....	60
2.5.2 REDUCCIÓN DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS DEBIDO A LA ALTERACIÓN DEL USO Y LA OCUPACIÓN DEL SUELO.....	64
2.5.3 CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	65
3 LA CONSTRUCCIÓN DE LA GOBERNANZA Y GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	69
3.1 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CONSTITUCIÓN FEDERAL DE 1988.....	77
3.2 POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS: NUEVA FORMA DE GESTIONAR LAS AGUAS.....	81
3.3 EL ARREGLO INSTITUCIONAL PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: EL SINGREH.....	82
3.3.1 EL MINISTERIO DE DESARROLLO REGIONAL (MDR).....	87
3.3.2 EL CONSEJO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH).....	88
3.3.3 EL DESEMPEÑO DE LA ANA EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	91



3.3.4 COMITÉS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS E INCLUSIÓN DE ACUÍFEROS EN LA GESTIÓN.....	94
3.4 LOS ESTADOS Y LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	97
3.5 LOS MUNICIPIOS Y SU PAPEL EN LA GESTIÓN DE LOS ACUÍFEROS.....	99
3.6 USUARIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y GESTIÓN HÍDRICA.....	101
3.7 AGUAS SUBTERRÁNEAS Y AGUAS MINERALES DEL BRASIL.....	103
 4 LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA.....	113
4.1 PLANES DE RECURSOS HÍDRICOS.....	115
4.1.1 PLAN NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH).....	117
4.1.2 PLANES ESTATALES DE RECURSOS HÍDRICOS (PERHS).....	119
4.1.3 PLANES DE RECURSOS HÍDRICOS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	120
4.2 INSTRUMENTOS DE GESTIÓN ESPECÍFICOS PARA AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	124
4.2.1 ÁREAS DE PROTECCIÓN DEL ACUÍFEROS (APA).....	124
4.2.2 ÁREAS DE RESTRICCIÓN Y CONTROL DE USO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	125
4.2.3 PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE POZOS (PPP).....	125
4.3 CLASIFICACIÓN DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA, SEGÚN USOS PREPONDERANTES.....	127
4.4 CONCESIÓN DEL DERECHO A UTILIZAR LOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	130
4.5 COBRO POR EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS: MEDIOS PARA PROMOVER LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	139
4.6 SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	142
4.6.1 SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH).....	143
4.6.2 REGISTRO NACIONAL DE USUARIOS DE RECURSOS HÍDRICOS (CNAH).....	143
4.6.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (SIAGAS).....	144
4.7 OTROS INSTRUMENTOS QUE CONTRIBUYEN A LA GOBERNANZA DE LAS AGUAS.....	145

5 LA GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.....	149
5.1 ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN DE LA CANTIDAD Y SOBRE EXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.....	151
5.1.1 RECARGA ARTIFICIAL Y MANTENIMIENTO DE ACUÍFEROS.....	153
5.2 ESTRATEGIAS PARA LA PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DE LOS ACUÍFEROS.....	154
5.2.1 GESTIÓN DE ÁREAS CONTAMINADAS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	156
5.3 LA GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO MEDIO DE GARANTIZAR EL DESARROLLO SOCIOECONÓMICO.....	160
5.3.1 LA NECESIDAD DE CONOCER EL PAPEL SOCIOECONÓMICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	163
5.4 INTEGRACIÓN DE LA SOCIEDAD EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: LA IMPORTANCIA DE LA PARTICIPACIÓN SOCIAL.....	165
5.5 COOPERACIÓN ENTRE LAS DIVERSAS ENTIDADES ADMINISTRATIVAS Y ATENCIÓN PRIORITARIA A LA ORDENACIÓN LOCAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	167
5.5.1 ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS E INTERESTATALES: EL CASO DEL ACUÍFERO GUARANÍ.....	170
5.6 EL MONITOREO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS.....	177
 6 APRENDIZAJES Y DESAFÍOS.....	 183
7 CONSIDERACIONES FINALES.....	195
REFERENCIAS.....	199

PRESENTACIÓN

La gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas está prevista en la Política Nacional de Recursos Hídricos, establecida por la Ley nº 9.433/1997, y es un elemento fundamental para garantizar la seguridad hídrica en el Brasil. A pesar de su invisibilidad natural y social, estas aguas son indispensables para mantener el caudal de los ríos y diversos ecosistemas, así como para garantizar el suministro de agua para diversos usos, como el abastecimiento de poblaciones vulnerables sin acceso al agua corriente. En este contexto, los miembros del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (Singreh) han estado trabajando para superar los retos de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Dada la importancia del tema, las Naciones Unidas (ONU) definieron el tema *Aguas subterráneas – Haciendo visible lo invisible para el Día Mundial del Agua 2022*. El objetivo de esta elección era explicar el papel vital de las aguas subterráneas en los sistemas de agua y saneamiento, la agricultura, la industria, los ecosistemas y la adaptación al cambio climático.

Consciente de la importancia del tema de las aguas subterráneas y en consonancia con los debates nacionales e internacionales sobre los recursos hídricos, la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento - Brasil (ANA) ha producido estudios y proyectos para difundir un mejor conocimiento y vigilancia de los acuíferos brasileños.



La ANA también ha respondido a una creciente demanda de formación sobre este tema y, por tanto, ha ido produciendo materiales didácticos, como: la publicación *Gobernanza de las Aguas Subterráneas: Desafíos y Caminos*, así como este cuaderno de capacitación con el tema Aguas Subterráneas en la Política Nacional de Recursos Hídricos – una publicación hecha posible por la cooperación de ANA con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y la Agencia Brasileña de Cooperación (ABC).

El Cuaderno de Capacitación *Las Aguas Subterráneas en la Política Nacional de Recursos Hídricos* fue coordinado por una de las pioneras en el estudio de la legislación de aguas subterráneas en Brasil, la Profesora Pilar Carolina Villar, de la Universidad Federal de São Paulo (Unifesp). El profesor Ricardo Hirata, del Centro de Investigación de Aguas Subterráneas de la Universidad de São Paulo (CEPAS/USP) y dos investigadores del Instituto de Investigación Tecnológica (IPT), José Luiz Albuquerque y Ana Maciel de Carvalho, también contribuyeron a la publicación.

Debido a la calidad técnica de este cuaderno de capacitación y a la actualidad del tema de las aguas subterráneas, esta publicación también tiene versiones en portugués e inglés para que la información contenida en la publicación llegue a un público cada vez más amplio.

¡Disfrute de su lectura!

Directorio Colegiado de la ANA

La Agencia Nacional de Agua y Saneamiento (ANA) tiene como uno de sus deberes contribuir a la implementación de la Política Nacional de Recursos Hídricos y apoyar iniciativas dirigidas a la creación, mantenimiento y fortalecimiento del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (Singreh).

Este fortalecimiento busca contribuir a la descentralización y participación social en la gestión de los recursos hídricos, permitiendo así un espacio público para la negociación sobre el uso del agua, la construcción de pactos y el compromiso de los actores en la protección, recuperación y gestión de los recursos hídricos.

Ante este reto, la ANA ofrece una agenda estructurada de acciones formativas que contribuyen al fortalecimiento de las diversas entidades Singreh, especialmente los Consejos Estatales de Recursos Hídricos, los Órganos Estatales de Gestión de Recursos Hídricos, los Comités de Cuencas Hidrográficas y sus instituciones de apoyo, Entidades Delegadas y Oficinas de Apoyo.

Continuando con su desafiante iniciativa de desarrollar procesos continuos de educación y capacitación en recursos hídricos, la ANA presenta la segunda edición de la serie “Cuadernos de Capacitación” que abordará varios aspectos relacionados con los temas relevantes de la Política Nacional de Recursos Hídricos y Singreh.

Como novedad de esta segunda edición, los cuadernos traen una línea editorial e instructiva interactiva, con enlaces disponibles para la profundización de los contenidos, favoreciendo una mejor gestión del conocimiento sobre los temas abordados. Además, el desarrollo de los cuadernos tuvo como directriz el uso de los principios del lenguaje simple, adaptados a todos los públicos.



Otro cambio fue la reordenación temática de los Cuadernos, buscando facilitar la organización de la información y el conocimiento. Los 8 cuadernos¹ de la primera serie se reagruparon en 4 volúmenes. También presentamos un nuevo cuaderno sobre aguas subterráneas. Por lo tanto, la nueva serie se compone de 5 volúmenes de acuerdo con la siguiente lista:

Cuaderno 1: Comités de Cuencas Hidrográficas: qué es y qué hace

Cuaderno 2: Arreglos Institucionales Complementarios para la Gestión de los Recursos Hídricos

Cuaderno 3: Agencia del Agua: qué es, qué hace y cómo funciona

Cuaderno 4: Instrumentos de la Política Nacional de Recursos Hídricos

Cuaderno 5: Las Aguas Subterráneas en la Política Nacional de Recursos Hídricos

El Cuaderno 1 analiza una de las entidades de Singreh: el Comité de Cuenca Hidrográfica, que trata sobre el contexto histórico de su institución, las atribuciones y su funcionamiento. También se presenta la estructura orgánica de los Comités, el papel de cada uno de los elementos componentes (Plenario, Directoría, Secretaría, Cámaras Técnicas, Grupos de Trabajo, etc.).

El segundo Cuaderno aborda los Arreglos Institucionales Complementarios para la gestión de los recursos hídricos. Se presentan ejemplos fructíferos de

¹ Comité de cuencas hidrográficas: ¿qué es y qué hace? (volumen 1); Comité de cuencas hidrográficas: práctica y procedimiento (volumen 2); Alternativas organizativas para la gestión de los recursos hídricos (volumen 3); Agencia del Agua: ¿qué es, qué hace y cómo funciona? (volumen 4); Planes de recursos hídricos y estructura de los cuerpos de agua (volumen 5); Concesión del derecho a utilizar los recursos hídricos (volumen 6); Cobro por la utilización de los recursos hídricos (volumen 7); y Sistemas de información sobre la ordenación de los recursos hídricos: conocer para decidir (volumen 8).

ordenación de los recursos hídricos a escala local, que pasan por ejemplos de gestión de los embalses en el Semiárido, las aguas subterráneas y los arreglos institucionales para la ordenación de los recursos hídricos en las cuencas fronterizas y transfronterizas.

El tercer Cuaderno se centra en otra entidad Singreh: la Agencia del Agua o Agencia de la Cuenca. Se presentan las competencias, los requisitos previos para la creación, los posibles arreglos institucionales para la constitución, el contrato de gestión en la política de recursos hídricos y otros temas relacionados. En este volumen se tratarán las Entidades Delegadas.

El cuarto Cuaderno aborda los Instrumentos de la Política Nacional de Recursos Hídricos, incluyendo:

- i. plan de recursos hídricos, una herramienta esencial en la implementación de las políticas hídricas. Se resaltarán la importancia no solo de la elaboración de los planes, sino de su seguimiento por parte del Comité de Cuencas Hidrográficas. Además, será necesario abordar los desafíos de su implementación, en la que el ejercicio de la gobernanza entre los diversos actores involucrados en este proceso es fundamental para lograr la efectividad de los objetivos planificados;
- ii. clasificación de las masas de agua en clases de acuerdo con los usos predominantes, profundizando en el concepto, su aplicación y especialmente los desafíos de la implementación de este instrumento;
- iii. concesión del derecho de uso de los recursos hídricos. Presenta una breve historia del instrumento, sus aspectos legales, el otorgamiento para los diversos fines de uso, entre otros. Además de la concesión, también presenta algunos aspectos de la fiscalización y el registro de los usuarios de los recursos hídricos;

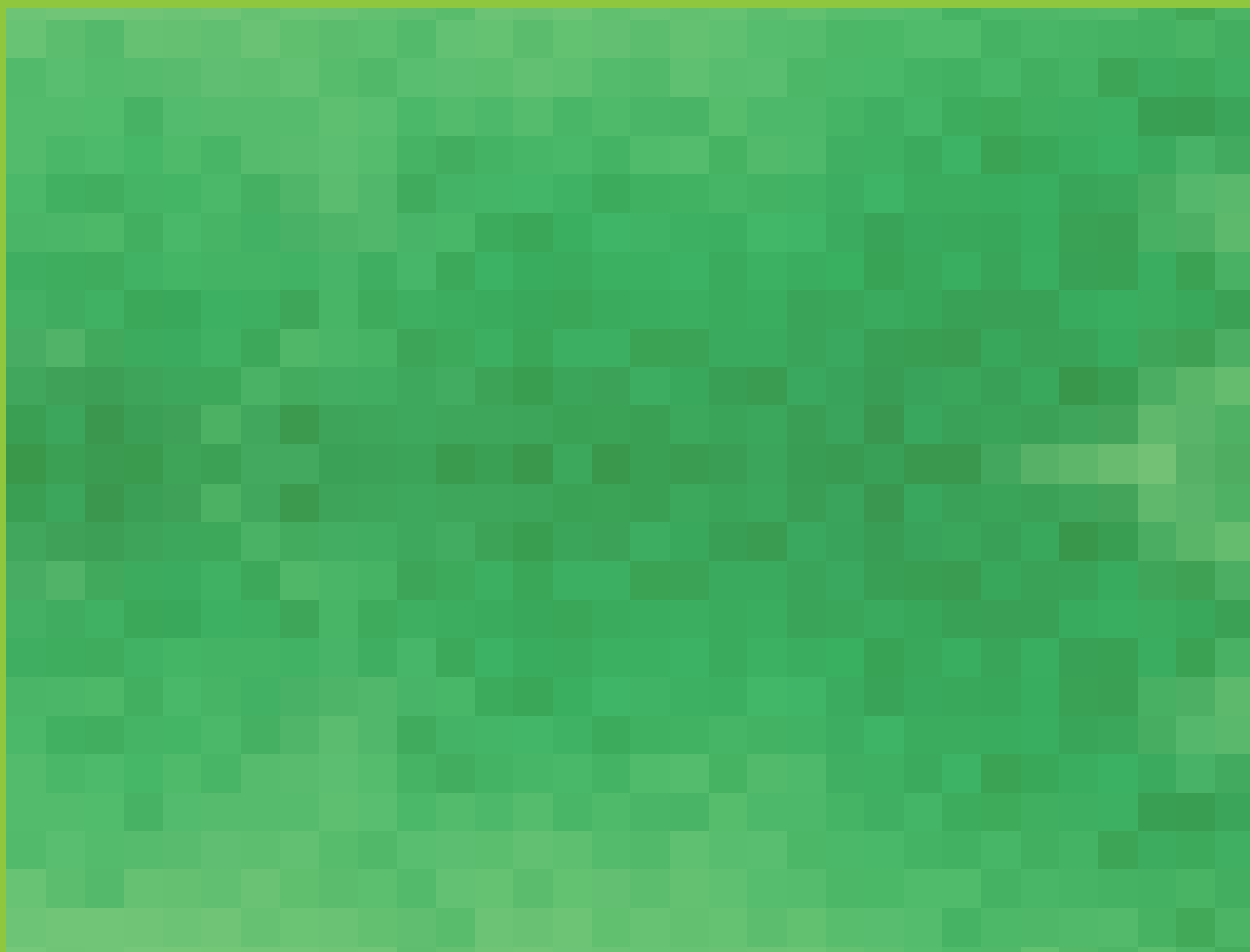
- iv. cobro por el uso de los recursos hídricos: la importancia del instrumento, los pasos para su implementación, los mecanismos y valores, así como las experiencias brasileñas en la implementación del cobro;
- v. sistema de información de recursos hídricos, un instrumento relevante para el avance de la gestión del agua, con énfasis en el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH).

El quinto Cuaderno aborda el tema de las aguas subterráneas, correspondiente a otro esfuerzo por fomentar la reflexión sobre la gestión de los acuíferos, sintetizando el material producido en el libro *Gobernanza de las aguas subterráneas: caminos y desafíos*, con un enfoque más simple y directo. Su principal objetivo es presentar las aguas subterráneas a la sociedad, identificando su importancia y demostrando cómo promover su gobernanza y gestión integrada.

Cabe señalar que esta nueva serie “Cuadernos de Capacitación” no termina en los 5 volúmenes mencionados anteriormente. La serie pretende incorporar otros temas considerados relevantes para la gestión de los recursos hídricos, como saneamiento, seguridad de presas, fiscalización, entre otros.

Con estas publicaciones, esperamos estimular la investigación y la capacitación de los interesados en la gestión de los recursos hídricos, especialmente los miembros de Singreh, fortaleciendo así todo el Sistema.

¡Disfrute de su lectura!



1

CONSIDERACIONES INICIALES



Foto: Ana Maciel/Banco de Imágenes ANA
Zona de fracturas con presencia de agua en el Couto de Magalhães de Minas-MG.

1 CONSIDERACIONES INICIALES

La gestión de los recursos hídricos establecida por la Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) tiene como directriz general la gestión integrada de las aguas dulces. A pesar de los desafíos, gradualmente, se perciben los esfuerzos de los organismos y entidades del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (Singreh) para promover la gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas.

La inclusión de las aguas subterráneas enfrenta múltiples desafíos, sin embargo, es fundamental garantizar la seguridad hídrica nacional. A pesar de su invisibilidad natural y social, estas aguas son indispensables para mantener el flujo base de ríos y diversos ecosistemas, además de asegurar el suministro de agua de múltiples tipos de usos, incluyendo poblaciones vulnerables, sin acceso a la red de agua canalizada.

La gestión integrada de los recursos hídricos requiere un escenario de gobernanza que permita la construcción de un nuevo pacto, con el fin de incluir a los actores públicos, privados y sociales. Las aguas subterráneas siguen siendo poco conocidas por una gran parte de la población, el Gobierno subestima su uso, la mayoría de los usuarios se encuentran en situación irregular y los órganos de Singreh dan prioridad a la gestión de las aguas superficiales. Este escenario socava la gobernanza de las aguas subterráneas y amenaza la disponibilidad hídrica nacional de un recurso que ya está intensamente explotado y cuya demanda aumenta debido a su calidad natural y resiliencia ante la recurrencia de períodos prolongados de sequía, que tienden a intensificarse con el cambio climático.

Así, este Cuaderno de Capacitación corresponde a otro esfuerzo para incentivar la reflexión sobre el manejo de los acuíferos, sintetizando el material producido en el libro *Gobernanza de las aguas subterráneas: caminos y desafíos*, con un enfoque más simple y directo. Su principal objetivo es presentar las aguas subterráneas a la sociedad, identificando su importancia y demostrando cómo promover su gobernanza y gestión integrada. Para ello, la estructura de este Cuaderno se divide en los siguientes capítulos: i) **Aguas subterráneas en el ciclo hidrosocial** – expone la dinámica de las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico y el funcionamiento de los acuíferos, así como destaca su función ecosistémica y las principales amenazas a este recurso; ii) **La construcción de la gobernanza y gestión de las aguas subterráneas** – define los conceptos de gobernanza, gobernabilidad y gestión, así como presenta los principales actores responsables de la inclusión de las aguas subterráneas en la política hídrica nacional; iii) **La gestión de las aguas subterráneas: de la teoría a la práctica** – presenta los principales instrumentos de gestión del agua y cómo se han aplicado a las aguas subterráneas; iv) **Gobernanza de las aguas subterráneas y el fortalecimiento de la gestión integrada de los recursos hídricos** – tiene como objetivo presentar las estrategias y desafíos que deben enfrentarse en la búsqueda de la gobernanza y la gestión integrada de las aguas subterráneas; v) **Aprendizaje y desafíos** – enumera las principales acciones y desafíos para construir una agenda de gestión de las aguas subterráneas; vi) **Consideraciones finales**; y vii) **Referencias**.

Se espera que este texto ayude a los diversos actores sociales a comprender la importancia de las aguas subterráneas y cómo se pueden utilizar los instrumentos de gestión del agua para fomentar la gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas.

2

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL CICLO HIDROSOCIAL



Foto: AdobeStock

2 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL CICLO HIDROSOCIAL

Las acciones humanas alteran la dinámica natural de los elementos que componen el ciclo hidrológico, modificando los patrones de disponibilidad de agua y su distribución territorial y temporal. Los seres humanos son agentes activos en los procesos de este ciclo, interfiriendo con el fin de aumentar o disminuir estos flujos naturales en la cuenca o fuera de ella (LINTON; BUDDS, 2014).

La circulación del agua está influenciada por las instituciones, infraestructuras y prácticas sociales de políticos, ciudadanos, empresarios, usuarios y consumidores. Dentro de esta idea, se ha fortalecido el concepto del *ciclo hidrosocial del agua*, que politiza la concepción biofísica de los procesos del ciclo hidrológico. El agua no se mueve solo a través de la lluvia, los poros de las rocas y las masas de aire, sino a través de una compleja red de aductoras, tuberías, pozos, plantas de tratamiento, cisternas, pivotes de riego, mangueras de jardín, fugas, derechos legales, estándares de calidad, redes de transporte, mercados y consumidores (BUDDS; LINTON; McDONNELL, 2014).

Por lo tanto, la disponibilidad de agua es un hecho natural pero también social que requiere los siguientes análisis: a) ¿quién y cómo se usa el agua?; b) ¿quién tiene acceso o control sobre el recurso hídrico?; c) ¿cómo influye el uso del agua en las relaciones de poder en el campo y en la sociedad?; d) ¿cómo su presencia o ausencia determina la conformación de una sociedad?; e) ¿cómo

interfieren los flujos financieros con el flujo de agua independientemente del ciclo hidrológico?; f) ¿cómo interfiere la sociedad con los elementos que componen el ciclo hidrológico?; g) ¿cuáles y quiénes son los beneficiarios de las infraestructuras hidráulicas? (LINTON; BUDDS, 2014).

En relación con las aguas subterráneas, estas representan la dimensión oculta del ciclo hidrológico y se subestiman en el ciclo hidrosocial. Por lo tanto, surge el desafío de entender cómo se produce su movimiento natural en el entorno subterráneo y cómo se relacionan con otras masas de agua y también cómo las acciones humanas interfieren con esta dinámica natural y viceversa. Para ello, en los siguientes apartados se explica la dinámica de estas aguas en el ciclo hidrológico, detallando el funcionamiento de los acuíferos y su importancia socioambiental para la prestación de diversos servicios ecosistémicos, incluyendo el suministro de agua para diversos tipos de usos.

2.1 El ciclo hidrológico y las aguas subterráneas

El agua está siempre en movimiento, circulando por las superficies (glaciares, *icebergs*, ríos, lagos, mares, etc.), por la atmósfera (nubes) o bajo tierra (acuíferos, acuitardos). Este movimiento cíclico, denominado *ciclo hidrológico* o *ciclo del agua*, está relacionado a los intercambios de energía entre la atmósfera, océano y continentes, sustentando el clima y gran parte de su variabilidad natural (OKI; ENTEKHABI; HARROLD, 2004; COCKELL *et al.*, 2011). La luz solar (radiación) y el calor del interior de la Tierra (emitido por reacciones nucleares radiactivas) son las fuentes de energía que promueven la transformación de los estados del agua (líquidos, sólidos y gaseosos) y, en consecuencia, su movimiento continuo en el planeta.

Las variaciones en la incidencia de la radiación solar; los cambios en la composición de la atmósfera y el agua del océano; los vientos y las corrientes

oceánicas; el volcanismo; el tipo, el patrón y la densidad de la cubierta vegetal; las variaciones en la distribución espacial y el número de seres vivos; y los tipos de suelo y subsuelo influyen en el funcionamiento de este ciclo (COCKELL *et al.*, 2011; GROTZINGER; JORDAN, 2013).



Figura 1 – Ciclo del agua

Fuente: USGS (2019).

La cantidad de agua en el planeta es constante, sin embargo, su distribución en la naturaleza ocurre de manera desigual y cíclica. Los mayores volúmenes se concentran en los océanos, mientras que el agua dulce representa sólo el 2,5% del total. La mayor parte de esta agua dulce (69,5%) se concentra en los glaciares, es decir, no está disponible; o subterránea, en forma de agua subterránea (30%). Las masas de agua superficiales representan solo el 0,3% del agua dulce. La Figura 2 muestra la distribución de estos volúmenes y la media anual de los flujos en el ciclo hidrológico global.

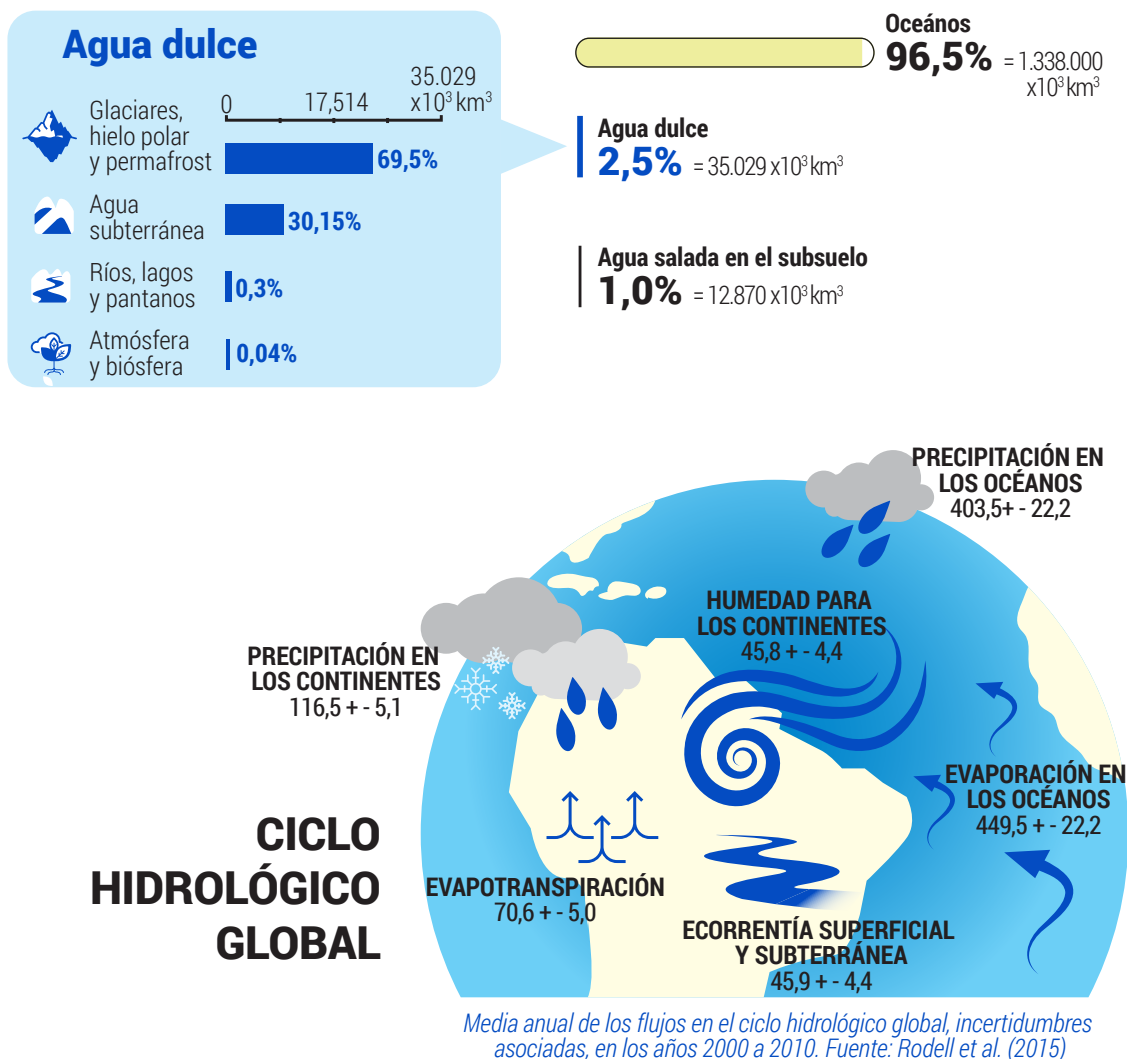


Figura 2 – Volumen de agua y media anual de caudales en el ciclo hidrológico

Fuente: Shiklomanov y Rodda (2003); Rodell et ál. (2015), adaptado por Dora Atman.

Estos datos demuestran que el agua subterránea es la principal fuente de agua disponible para la humanidad. Para comprender la dinámica del ciclo hidrológico global, es necesario comprender cómo se estructuran los principales procesos que regulan la disponibilidad de agua: i) evaporación; ii) evapotranspiración; iii) precipitación; iv) escorrentía superficial; v) escorrentía base; y vi) infiltración. Estos procesos forman los drenajes, que proporcionan recarga, descarga y percolación. Las definiciones de cada uno de estos términos se describen a continuación.



- i. **Evaporación:** es un tipo de vaporización que se produce en la superficie de un líquido a medida que pasa a la fase gaseosa (vapor). Es un fenómeno físico de transferencia de agua y energía inducida por el flujo de calor latente desde las superficies del agua a la atmósfera.
- ii. **Evapotranspiración:** es la eliminación de agua de la superficie a la atmósfera mediante la combinación de dos procesos: evaporación añadida a la transpiración vegetal. Por ejemplo, la evapotranspiración de la selva amazónica afecta la disponibilidad de agua de otras cuencas y regiones brasileñas. Este bosque libera a la atmósfera “20 mil millones de toneladas de agua por día”, superando el flujo que el río Amazonas vierte en el mar (17 mil millones de toneladas). El corte del bosque disminuye la evapotranspiración y, en consecuencia, la condensación, invirtiendo los flujos de humedad que van de tierra a mar, generando desiertos y reduciendo las precipitaciones en las regiones del Medio Oeste, Sudeste y Sur de Brasil (NOBRE, 2014, p. 13). Estas masas de aire húmedo se llaman ríos voladores, ya que se pueden equiparar con verdaderos “cursos de agua atmosféricos”.
- iii. **Precipitación:** es el proceso de condensación del vapor de agua atmosférica que se fusiona y “precipita” o cae sobre la superficie de la tierra. El agua añadida a la superficie de la Tierra desde la atmósfera se presenta en forma líquida (lluvia) o sólida (nieve o hielo). Las precipitaciones varían mucho en el espacio geográfico y en el tiempo.
- iv. **Escorrentía superficial:** se define por el flujo de agua que se produce en la superficie del suelo cuando está saturado de humedad o impermeable. El agua de las precipitaciones puede, sucesivamente, formar inundaciones, desagües (arroyos, riachuelos, ríos), lagos, etc. Este flujo puede ocurrir de manera difusa o concentrada, y formar flujos efímeros a lo largo de los valles. La escorrentía superficial depende de

la intensidad de la lluvia y las características de la superficie (como la pendiente, la topografía y el tipo de cubierta vegetal).

- **Drenaje superficial:** representan los cursos y flujos de aguas superficiales que forman arroyos, riachuelos, riveras y ríos. Pueden tener un carácter intermitente (cuando el agua fluye en sus cursos en períodos de lluvias y sequía), o perenne (cuando el flujo de agua permanece durante todo el año hidrológico y no se seca). Los cursos de agua intermitentes están formados por la escorrentía superficial y subterránea del agua de lluvia, mientras que los cursos de agua perennes también reciben los flujos subterráneos de los acuíferos.
- v. **Infiltración:** es el paso del agua desde la superficie hasta el interior del suelo. La capacidad de infiltración de un terreno depende de su topografía, cobertura vegetal, grado de humedad del suelo, propiedades fisicoquímicas e intensidad y duración de las precipitaciones.
- **Percolado:** proceso por el cual el agua se mueve verticalmente y hacia abajo a lo largo de la zona insaturada (vadosa o zona de aireación) después de la infiltración en suelos y rocas. La **zona no saturada** es la parte del subsuelo donde los espacios entre las partículas del suelo y las rocas se llenan de agua y aire (humedad del suelo). La percolación del agua en el suelo se produce cuando su volumen infiltrado es suficiente para forzar el desplazamiento descendente del agua.
 - **Recarga:** cuando el agua entra en la subsuperficie, se distribuye en los huecos en dos zonas principales: **zona no**



saturada y zona saturada. La recarga se produce cuando el agua que percola a través de la zona no saturada fluye hacia abajo y alcanza el acuífero o la superficie freática (zona saturada de agua). En la zona saturada, los espacios vacíos están completamente llenos de agua. El umbral entre estas dos zonas se llama *superficie freática* o nivel de agua subterránea. En la base de la zona no saturada hay una región húmeda llamada franja capilar. Esta región tiene un espesor variable y representa una transición de la zona no saturada a la zona saturada. Esto se debe a las fuerzas capilares que ascienden el agua del acuífero a los espacios vacíos de los suelos vecinos que se encuentran por encima. La recarga, por tanto, se produce cuando el agua que se filtra a través de la zona no saturada alcanza la parte superior del acuífero (zona saturada de agua).

La *infiltración*, el *percolado* y la *recarga* son porciones de agua difíciles de contabilizar. La infiltración tiende a ser mayor que el volumen percolado, que a su vez es mayor que el volumen de recarga. Esto se debe a que parte del agua queda atrapada o adsorbida en las partículas del suelo o de la roca a lo largo del recorrido, y otra parte se evapora en el proceso. Si la zona saturada es muy profunda y las tasas de precipitación o infiltración son bajas, la infiltración y la percolación pueden producirse a lo largo de las capas superficiales, pero la recarga será nula. Por lo tanto, los acuíferos no se suministran de manera homogénea, con áreas más favorables para el procesamiento de recarga, que pueden cambiarse con los cambios en la ocupación de la tierra. Es importante que la gestión de los recursos hídricos tenga en cuenta esta característica.

- **Descarga:** es el proceso de salida de agua de los acuíferos, donde las aguas subterráneas afloran y fluyen en la superficie (sitios de manantial) y, principalmente, a lo largo de

cursos de agua, como ríos, lagos u océanos. La descarga subterránea es responsable de la perpetuación de los ríos y la formación de manantiales.

- vi. **Escorrentía de base o flujo subterráneo:** es el movimiento del agua a lo largo de la zona saturada. El agua en el suelo y las rocas saturadas fluyen a través de vacíos, como poros, fracturas abiertas y otros vacíos dejados por la disolución de minerales. Estos espacios deben estar interconectados para que el agua pueda fluir. La fuerza de la gravedad y la presión de la columna de agua generan el movimiento de las aguas subterráneas. Su flujo siempre se produce en la dirección de la carga hidráulica más alta a la más baja, que es la suma de la carga de elevación más la carga de presión de la columna de agua en un punto dado en el depósito subterráneo. La carga hidráulica se mide mediante pozos de monitoreo, cuyos instrumentos distribuidos a lo largo de los embalses subterráneos, junto con el conocimiento del sistema hidrogeológico, permiten definir la dirección del flujo.

Contrariamente a las imágenes populares, en la mayoría de los casos las aguas subterráneas no forman ríos subterráneos o corrientes de agua¹, sino que llenan los poros y las fracturas de una manera similar a una esponja, que absorbe el agua y fluye lentamente. Además de su papel en el ciclo hidrológico, estas aguas proporcionan una serie de servicios ecosistémicos (MANOEL FILHO, 2008).

¹ Excepcionalmente, es posible encontrar algunas cuevas, conductos de lava y hielo o manantiales horizontales que se asemejan a las corrientes de agua.

2.2 Las aguas subterráneas y sus servicios ecosistémicos

Las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico proporcionan varios servicios ecosistémicos, ya que están vinculadas a los procesos que regulan el volumen, distribución y calidad del agua disponible en el planeta. El concepto de *Servicios Ecosistémicos (SE)* fue introducido por Ehrlich y Ehrlich (1981) y se define como los bienes y beneficios proporcionados gratuitamente por los ecosistemas a los seres humanos con el fin de promover su bienestar (BERGKAMP; CROSS, 2015). Su premisa es que los sistemas naturales generan la base del soporte de vida en el planeta. Las aguas subterráneas apoyan el SE esencial para la vida y el bienestar de la población y los ecosistemas (Figura 3).



Figura 3 – Principales servicios ecosistémicos proporcionados por las aguas subterráneas
Fuente: Griebler e Avramov (2015, p. 356).



Foto: AdobeStock
Poço Azul en Chapada Diamantina - BA.

Está claro que su importancia va mucho más allá del suministro de agua a los seres humanos. Entre sus múltiples funciones ecosistémicas destacan las siguientes: a) almacenamiento, regularización y perpetuación del ciclo hidrológico en el planeta; b) tratamiento del sistema suelo-acuífero y calidad de las aguas subterráneas; y c) mantenimiento de la vida y los ecosistemas y estabilidad geológica.



a) Regularización y perennización del ciclo hidrológico del planeta

Las aguas subterráneas actúan como reservas de agua para ríos y lagos, ya que contribuyen continuamente al mantenimiento del flujo superficial que sostiene gran parte de los cursos de agua. Las tasas de descarga de los acuíferos son más regulares que la distribución de las precipitaciones, lo que garantiza un caudal mínimo constante a los cursos de agua superficiales, proporcionando estabilidad a los sistemas hídricos. Por lo tanto, tienen una función reguladora del ciclo hidrológico en las cuencas hidrográficas e incluso en la escala del planeta. En Brasil, más del 90% de las cuencas hidrográficas tienen ríos alimentados por vertidos de aguas subterráneas (ANA, 2017a, p. 37) que los perpetúan, incluso en aquellos donde existen regímenes climáticos con períodos secos. Este servicio se extiende a los lagos, pantanos y manglares.

b) Tratamiento del sistema suelo-acuífero y la excelente calidad de las aguas subterráneas

El agua que se filtra al acuífero sufre un proceso similar a un filtro a lo largo de su trayectoria subterránea. Durante la infiltración y la percolación en los suelos, parte del agua y las sustancias disueltas son absorbidas por las raíces de las plantas y adsorbidas a las partículas sólidas. El agua, a lo largo del ciclo hidrogeológico, gana diferentes características químicas que varían según la proporción y el tipo de sólidos disueltos. La cantidad de químicos en las aguas subterráneas depende del clima en las áreas de recarga, las condiciones químicas de la zona vadosa y la geología del sistema de aguas subterráneas a través del cual fluye. La interacción del agua con las partículas y rocas del suelo suele permitir su enriquecimiento gracias a la disolución de minerales, cuyo proceso tiende a aumentar con el tiempo de interacción entre el agua-roca y la reactividad del propio material sólido. En muchos casos, el resultado de esta trayectoria hacia los puntos de descarga son aguas de excelente calidad y ricas en sales minerales. En algunos casos, sin embargo, la disolución de estos

minerales puede generar problemas de calidad del agua, incluyendo anomalías naturales que pueden comprometer su potabilidad.

c) Mantenimiento de la vida y los ecosistemas, y estabilidad geológica

El suministro de agua de los acuíferos es fundamental para el mantenimiento de los ecosistemas, especialmente en las zonas donde existe interacción entre las aguas subterráneas y las superficiales. Los vertidos de aguas subterráneas en las masas de agua superficiales contribuyen al mantenimiento de los flujos de agua superficial, la regulación de la temperatura del agua, el intercambio de nutrientes y otros parámetros hidroquímicos que influyen en el equilibrio de condiciones favorables para la vida de las especies animales y vegetales.

Las aguas subterráneas no muestran cambios repentinos en la temperatura o sus cualidades fisicoquímicas, por lo que la afluencia subterránea proporciona un hábitat estable para plantas y animales acuáticos. Además, la descarga de acuíferos es esencial para mantener lagunas costeras y manglares, ya que permite diluir la salinidad de las influencias marinas, distribuir nutrientes y regular las condiciones fisicoquímicas.

Incluso en los casos en que no hay afloramientos, las aguas subterráneas son relevantes para los ecosistemas. Por ejemplo, a pesar de la ausencia de cursos de agua y manantiales, es habitual encontrar una exuberante vegetación en los fondos de los valles. Esto se debe a que el nivel freático en un valle está más cerca de la superficie y el nivel del agua no fluctúa tanto. En ausencia de lluvias, el nivel del agua en las partes más altas se reduce mucho, pero en los valles puede no haber variación, ya que el agua infiltrada en lluvias anteriores todavía se está moviendo lentamente hacia ella (POETER *et al.*, 2020). Así, la vegetación tiene acceso al agua durante todo el año.



Estas aguas también sustentan extensos ecosistemas terrestres semiáridos y húmedos, sin espejos de agua, pero con vegetación de raíces profundas, que extraen la humedad directamente del nivel freático. En el cerrado hay varias especies que han desarrollado raíces profundas para absorber el agua de los acuíferos. Finalmente, hay toda una flora y fauna asociada a los manantiales hidrotermales, que son los lugares donde las aguas calientes y enriquecidas con minerales emergen de una larga trayectoria subterránea.

Además, contribuyen a la estabilidad geológica, ya que aseguran el mantenimiento de la estructura de los poros de las rocas, previniendo o reduciendo el riesgo de hundimiento de los ecosistemas terrestres o de cuevas.

2.3 Las aguas subterráneas en Brasil y su importancia socioambiental

A diferencia de las aguas superficiales, la presencia de aguas subterráneas y acuíferos no se observa con la mera observación del territorio. Identificarlas y determinar la cantidad y calidad de estas aguas requiere la disponibilidad de datos, mapas geológicos y modelos que contemplen la interacción entre roca y agua. Desde la década de 1980, se han realizado estudios para delimitar estas masas de agua, especialmente las producidas por el Servicio Geológico Brasileño (SGB-CPRM).

El número de acuíferos en Brasil sigue siendo incierto. La ANA (2013a) distribuyó las aguas subterráneas brasileñas en 181 acuíferos y sistemas acuíferos de afloramiento (Figura 4)². De ellos, 151 son acuíferos sedimentarios (mayor potencial productivo) y 26 son kársticos. El dominio fracturado (menor potencial productivo) se aglutinó en cuatro grandes bloques: Sistema Acuífero

² Para el SGB-CPRM, las unidades litológicas se organizaron en 202 unidades hidroestratigráficas o acuíferas, de las cuales 164 son unidades de afloramiento y 38 son unidades de no afloramiento (DINIZ *et al.*, 2014, p. 20).

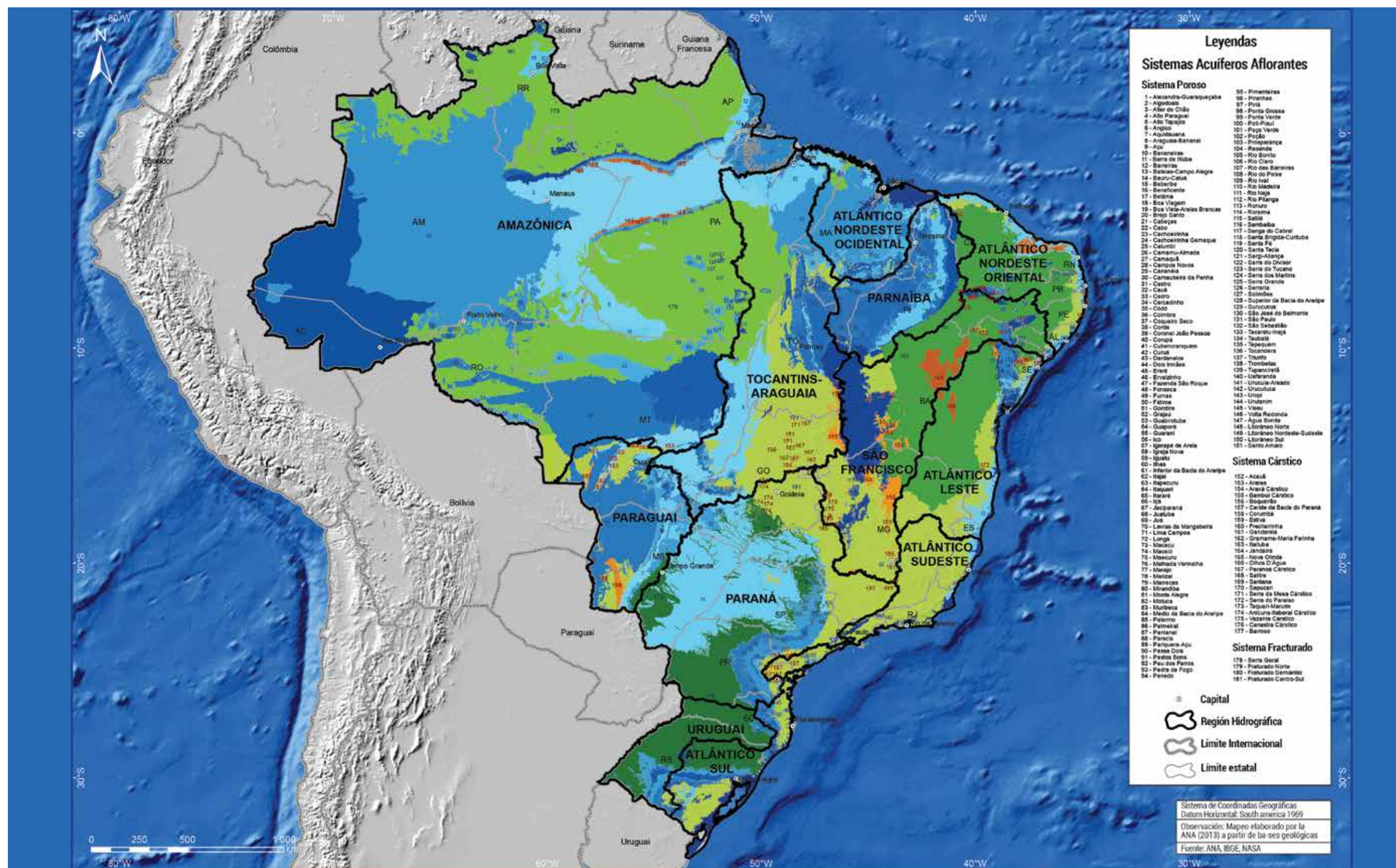


Figura 4 – Sistemas acuíferos brasileños aflorantes
Fuente: ANA (2013a).

Fracturado Semiárido, Sistema Acuífero Fracturado Norte, Sistema Acuífero Fracturado Centro-Sur y Acuífero Serra Geral (ANA, 2013a, pp. 54-56).

Se estima que Brasil tiene 1,1 billones de m³/año de reservas de agua subterránea (ANA, 2020, p. 8). A su vez, la disponibilidad sería de aproximadamente 14.650 m³/s, y la distribución y productividad de los acuíferos se producen de manera desigual en todo el territorio (ANA, 2020, p. 23).

En el contexto global, Brasil es el noveno mayor usuario de agua subterránea (Hirata et al., 2019, p. 47). Sin embargo, se desconocen las tasas de uso reales, ya que la mayoría de los usuarios no están regularizados. La ANA (2020) estima que hay alrededor de 2,4 millones de pozos en Brasil, sin embargo, el Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS) de SGB-CPRM registró solo 346.150 pozos en octubre de 2021. La base de datos suministrada por las Unidades Federativas, a su vez, registró solo 101.074 pozos (ANA, 2020). Para Hirata et al. (2019), este número sería superior a 2,5 millones de pozos tubulares, que tendrían una capacidad de extracción de alrededor de 17.580 Mm³/año (557 m³/s), cuyo volumen sería capaz de abastecer a toda la población brasileña durante un año (Hirata et al., 2019). Esta infraestructura de pozos tubulares representa una inversión aproximada de R\$ 75 billones en servicios de perforación y complementación y equipos de bombeo (HIRATA et al., 2019).

2.3.1 El perfil de los usuarios y su papel en la seguridad hídrica

Las aguas subterráneas son fundamentales para el suministro doméstico y público, los procesos industriales, la prestación de diversos tipos de servicios y la actividad agrícola. La Figura 5 muestra el perfil de los usuarios con base en las siguientes clasificaciones: agricultura y ganadería (pozos dedicados al riego o alimentación de animales); suministro doméstico (residencias urbanas); suministro público (proveedores de servicios de agua); industrial (pozos que abastecen industrias); uso múltiple (cumplen con más de un propósito,

principalmente la prestación de servicios urbanos); y otros (pozos para fines no enumerados en otras categorías, como el ocio). La oferta doméstica es la usuaria principal (30%), seguida por el uso agrícola (24%), la oferta pública urbana (18%), la oferta múltiple (14%), la oferta industrial (10%) y otras (4%) (HIRATA *et al.*, 2019).

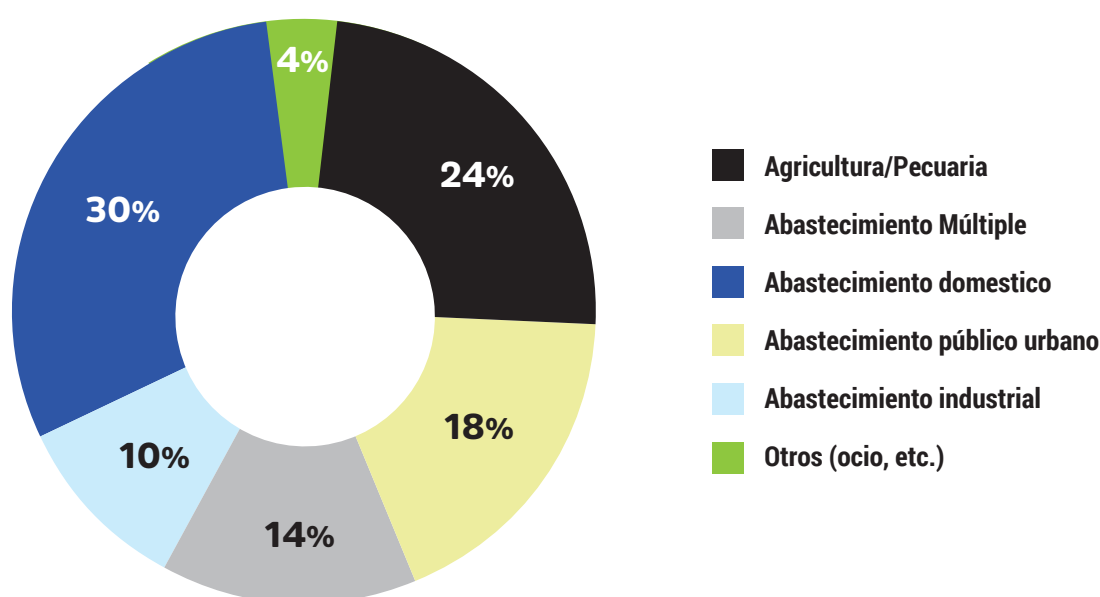


Figura 5 – Perfil de usuarios de aguas subterráneas en Brasil

Fuente: Hirata *et al.* (2019, p. 15).

Según datos de Hirata *et al.* (2019), del total de aguas subterráneas extraídas en el país (557 m³/s), solo el 10% (53 m³/s) atiende el suministro público de las ciudades a través de concesionarios y servicios municipales. Aunque estos flujos se reducen, el recurso es esencial para el suministro público de agua en ciudades desde pequeñas (<10.000 personas) hasta medianas (<100.000 personas). Casi la mitad de los municipios de menos de 10.000 habitantes dependen totalmente de las aguas subterráneas. Responden como la única fuente en el 36% de los municipios brasileños y complementariamente (sistemas mixtos) en el 16%. Por lo tanto, el 52% de las sedes municipales dependen en cierta medida de este recurso (Figura 6) (ANA, 2010).

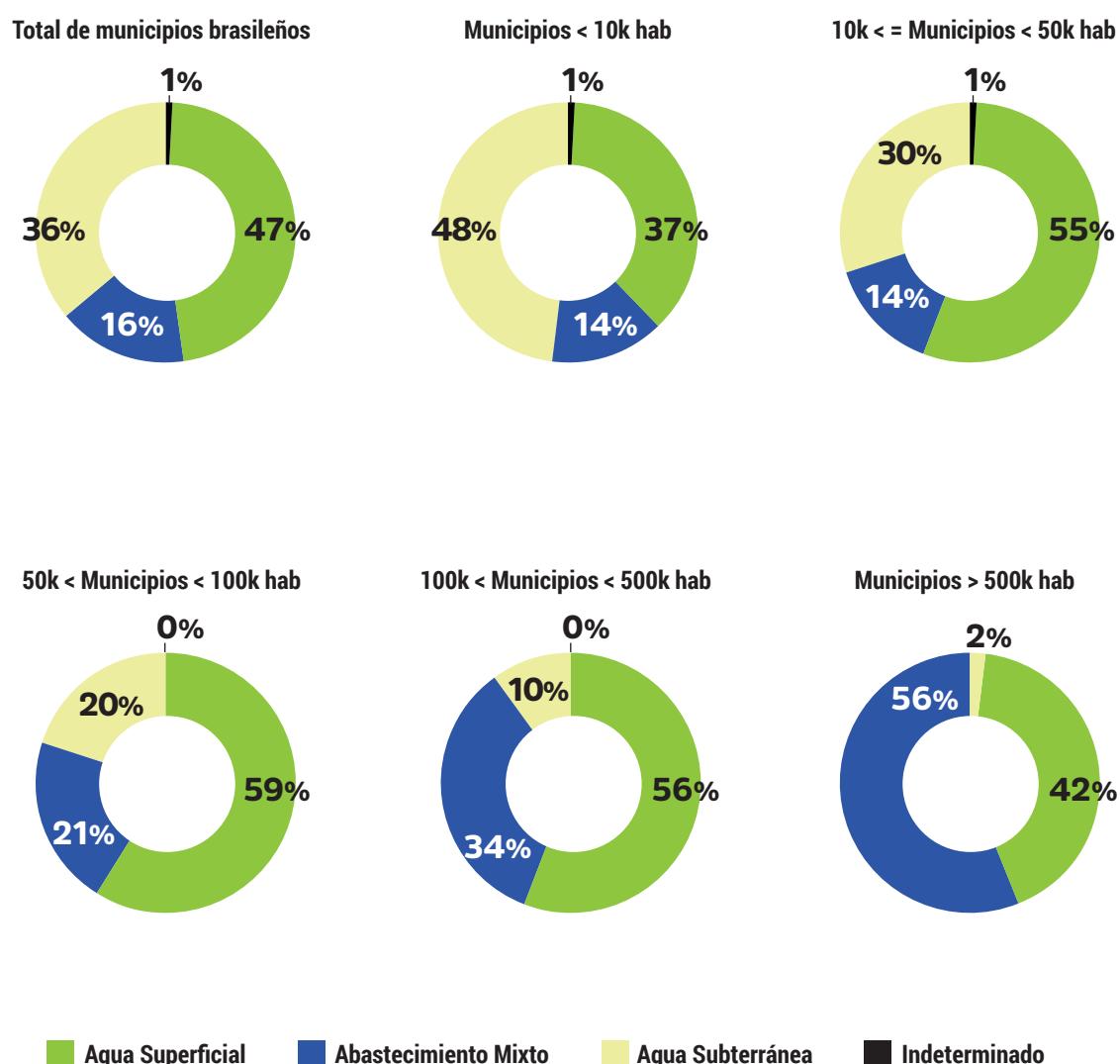


Figura 6 – Distribución de los municipios brasileños (tamaño total y población), según el tipo de fuente de abastecimiento

Fuente: Hirata *et al.* (2019).

En cuanto al uso urbano, los estados más dependientes son: São Paulo, Piauí, Ceará, Rio Grande do Sul, Bahía y Paraná. En cuanto al uso rural, el principal estado usuario es Minas Gerais, seguido de São Paulo, Bahía, Tocantins y Río Grande do Sul (HIRATA *et al.*, 2019). Aunque el Nordeste no aparece como un gran usuario rural, las aguas subterráneas son ampliamente utilizadas por las



poblaciones del Semiárido, incluidas las de acuíferos salobres, potabilizadas a través de tecnologías de filtrado.

La importancia del agua subterránea en el área rural aún es poco reconocida (ALY JÚNIOR, 2019). Según el Censo Agrícola del IBGE (2017), existen aproximadamente 3 millones de extracciones por pozos excavados y de manantial, además de 1,03 millones de propiedades rurales equipadas con al menos un pozo tubular. A pesar de su bajo caudal, los pozos excavados y de manantial son la principal fuente de agua en las regiones periféricas que no cuentan con red de agua, como los pueblos de montaña y sierras y las pequeñas propiedades rurales. Su uso para riego también debería aumentar debido a su calidad y menor susceptibilidad a la inestabilidad climática que amenaza la producción agrícola (HIRATA; VARNIER, 1998). En 2015, el mayor número de permisos válidos correspondió al sector de suministro urbano y rural, seguido por la industria (ANA, 2016). Al analizar, sin embargo, los flujos promedio capturados entre usuarios (relación del número de concesiones/flujo), el usuario principal fue la agricultura (48.6 m³/h), seguido por la industria (20.86 m³/h) y la oferta (17.89 m³/h) (ANA, 2016). Proporcionalmente, los usuarios rurales utilizan mayores cantidades de agua subterránea en relación con los demás, lo que demuestra la necesidad de más estudios sobre este tipo de uso (ALY JÚNIOR, 2019).

Las aguas subterráneas también son fundamentales para la industria, pues si bien en el conjunto de pozos de la Compañía de Investigación de Recursos Minerais (CPRM) representan solo el 10% de los usuarios, dentro del alcance de los usos otorgados constituyen el 25%, con un caudal medio ligeramente superior al de abastecimiento. Varias industrias utilizan esta fuente, incluso en áreas con infraestructura de red de agua, dada la ventaja de los costos y tener su propia fuente de agua (HIRATA *et al.*, 2019). Además, no se debe olvidar la industria de las bebidas y de las aguas minerales y potable de mesa, que también utilizan este recurso.

2.3.2 Las ventajas de la utilización de las aguas subterráneas

El uso del agua subterránea se ha intensificado en vista de la creciente demanda de recursos hídricos, la degradación de las fuentes de agua superficial y el aumento de los períodos de sequía, que tienden a afectar más al agua superficial (HIRATA; CONICELLI, 2012). Su uso tiene varias ventajas en relación con las aguas superficiales, tales como:

- buena calidad natural que, en la mayoría de los casos, sólo requiere cloración/ fluoración;
- los costos más bajos relacionados con la obtención de agua, la extracción, el mantenimiento y la explotación de la cuenca, en comparación con las fuentes de los sistemas de aguas superficiales;
- la autonomía de los pozos tubulares, que funcionan de forma automatizada y requieren poco mantenimiento;
- la exclusividad de disponer de una fuente de agua y su control de uso;
- el menor impacto ambiental de la abstracción subterránea. El pozo tubular profundo se considera de bajo impacto en comparación con la captación superficial, que implica plantas de tratamiento, aductoras y presas de agua;
- la facilidad y rapidez de la infraestructura necesaria para permitir la captación. El plazo de ejecución de un pozo es de días a semanas, en cambio, las presas y plantas de tratamiento de agua tardan años;



- la aplicación del sistema de extracción de aguas subterráneas puede llevarse a cabo gradualmente, racionalizando las inversiones en extracciones de agua;
- la no implicación de la expropiación de grandes superficies, que representan grandes gastos financieros;
- la posibilidad de una distribución sectorizada, con baterías de explotación, consistente en sistemas aislados o interconectados y a menudo próximos a la demanda, reduciendo la construcción de aductoras largas;
- la menor susceptibilidad a las condiciones climáticas, debido a que la capacidad de almacenamiento de los acuíferos hace que el flujo sea estable incluso en períodos de sequía.

2.4 Qué son los acuíferos y cómo funcionan

El acuífero es una “formación geológica capaz de acumular y transmitir agua a través de sus poros, fisuras o espacios resultantes de la disolución y el transporte de materiales rocosos” (art. 2º, I, Res. CNRH n° 202/2018). En la práctica, sólo se consideran acuíferos las unidades geológicas capaces de producir agua a través de pozos en condiciones económicamente viables. En hidrogeología³, las formaciones geológicas pueden clasificarse *según* su capacidad para almacenar y transmitir agua en tres categorías: *acuíferos*, *acuitardos* o *acuicludos*. Los acuicludos y acuitardos pueden relacionarse con los acuíferos en la medida en que delimitan su parte superior y/o su base. Sin embargo, tienen poca o ninguna capacidad para transferir agua, ya que se consideran impermeables o semipermeables. Los acuicludos son formaciones geológicas que contienen agua en su interior, pero sin capacidad de transmisión. Los acuitardos son

3 Hidrogeología: es el área de la geología que se ocupa de la distribución y el movimiento de las aguas subterráneas en el suelo y las rocas de la corteza terrestre.

formaciones semipermeables que pueden contener agua, pero su transmisión se produce muy lentamente, haciendo inviable la explotación económica.

La clasificación de las formaciones en una de estas categorías se produce a través de la evaluación de la capacidad de la roca o sedimento para transmitir agua, representada por el parámetro de conductividad hidráulica (o coeficiente de proporcionalidad de la Ley de Darcy⁴). La conductividad hidráulica en los acuíferos es igual o superior a 10^{-4} cm/s (u 8,64 cm/día), que representa la velocidad del flujo de agua.

Los acuíferos pueden clasificarse según el tipo de roca y la presión a la que están sometidos. Estas características influyen en la capacidad de almacenamiento de agua, la velocidad de flujo, las tasas de recarga y la vulnerabilidad a la contaminación.

En cuanto al tipo de roca, los acuíferos se pueden clasificar en tres categorías simplificadas: a) *granulares*; b) *fracturados*; y c) *kársticos*. Esta clasificación está relacionada con el origen de la roca o sedimento, su grado de consolidación y fractura o disolución.

- a. **Acuíferos granulares:** se componen de sedimentos o rocas sedimentarias. Conocidos como *acuíferos de porosidad primaria*, que se generan en el momento de la deposición de sedimentos y se distribuyen uniformemente, facilitando la extracción de agua. La porosidad total de los sedimentos no consolidados varía entre 25 y 40% para la grava, 25 y 50% para la arena y 35 y 50% para el limo (Freeze; Cherry, 1979). El aumento del tamaño de las partículas tiende a disminuir la porosidad de la roca. El grado de selección del grano, su esfericidad y la ocurrencia de la cementación también influyen en la porosidad.

4 La Ley de Darcy es una ecuación constitutiva fenomenológica que describe el flujo de un fluido a través de un medio poroso (DARCY, 1856). Cabral (2008, p. 77) explica esta ecuación de una manera didáctica.

- b. **Acuíferos fracturados:** están formados por rocas ígneas cristalinas, metamórficas e intrusivas, que son materiales geológicos de baja permeabilidad primaria, sin embargo, cuando se someten a esfuerzos tectónicos, se produce su fractura. Conocidos como *acuíferos de porosidad secundaria*, el agua se almacena a través de los huecos delimitados por estas fracturas en la roca, que tienen varias orientaciones y se conectan entre sí, formando un sistema o red de fracturas. Su porosidad es baja, pero la velocidad del flujo subterráneo puede ser alta, estando restringida a un pequeño porcentaje de fracturas, pero con buenos conductos. Estos acuíferos también pueden formarse en rocas sedimentarias de baja permeabilidad primaria, como esquistos, limos, piedras de barro, algunas calizas y areniscas cementadas (FREEZE; CHERRY, 1979; SINGHAL; GUPTA, 2010).



Foto: Érico Hiller/Banco de Imágenes ANA
Emergencia de acuífero fracturado en el área rural de Guaribas - Piauí.

- c. **Acuíferos kársticos:** se componen de rocas carbonatadas cartificadas que generan redes de conductos/cavidades a través de las cuales se transmite y reserva el agua. Su origen resulta del proceso de disolución de rocas solubles, como la piedra caliza, dolomita, cuarcita, arenisca con cementación de carbonato, etc. Se conocen como *acuíferos de porosidad terciaria* debido a la carcassificación, fenómeno que requiere mínimamente las siguientes condiciones: i) roca con capacidad química para disolverse; ii) agua ácida (solvente), resultante del contacto del agua de lluvia con dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, o en el suelo, capturando CO₂ de la materia orgánica; iii) gradiente hidráulico (diferencias en las cargas hidráulicas que permiten el flujo del solvente; y iv) discontinuidades en la roca (falla/fractura, plegamiento, plan de lecho o estratificación) que permiten el flujo del agua. Con el tiempo, las discontinuidades de la roca se amplían y progresivamente se desarrolla una estructura jerárquica, como un sistema o red de conductos kársticos. Si esta estructura kárstica está en la zona saturada de agua, se considerará el acuífero kárstico. El flujo subterráneo, por lo tanto, determina la estructura hidrogeológica del medio kárstico que, a su vez, crea un efecto de retroalimentación, modificando las condiciones de este flujo (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007)

La formación de estos acuíferos está relacionada con los procesos geológicos y geomorfológicos que ocurren en el continente. Según la ANA (2013b), los acuíferos y sistemas acuíferos sedimentarios emergen en el 53,8% del territorio nacional, fracturados en el 44,7% y los kársticos en sólo el 1,5% (Figura 7). Los acuíferos no se presentan de forma homogénea o uniforme en el territorio brasileño. Las rocas o paquetes sedimentarios que las componen y su exposición a diferentes climas hacen que cada una de ellas presente condiciones específicas de infiltración, percolación, caudales, almacenamiento y descargas de agua, lo que impacta en su producción y en la calidad de sus aguas.



Figura 7 – Distribución de acuíferos fracturados, sedimentarios y cársticos en Brasil

Fuente: Diniz *et al.* (2014, p. 25).

Entender la distribución de los tipos de roca en el territorio brasileño y la forma en que sus características influyen en el flujo de agua subterránea ayuda a distinguir los principales acuíferos del país, es decir, aquellos con mayor capacidad de almacenamiento y transmisión de agua. La relevancia de la roca como acuífero se define por sus propiedades fisicoquímicas, entre ellas: porosidad, permeabilidad (o conductividad hidráulica), las condiciones de ocurrencia (extensión, espesor y estructura) y la posibilidad técnica y económica de captación.

En cuanto a la presión de almacenamiento del agua a la que están sometidos, los acuíferos también se clasifican como: a) *libres* y b) *confinados* (Figura 8), aunque existen condiciones intermedias entre estos dos tipos, tales como acuíferos *semiconfinados*, *cubiertos* o *suspendidos*.

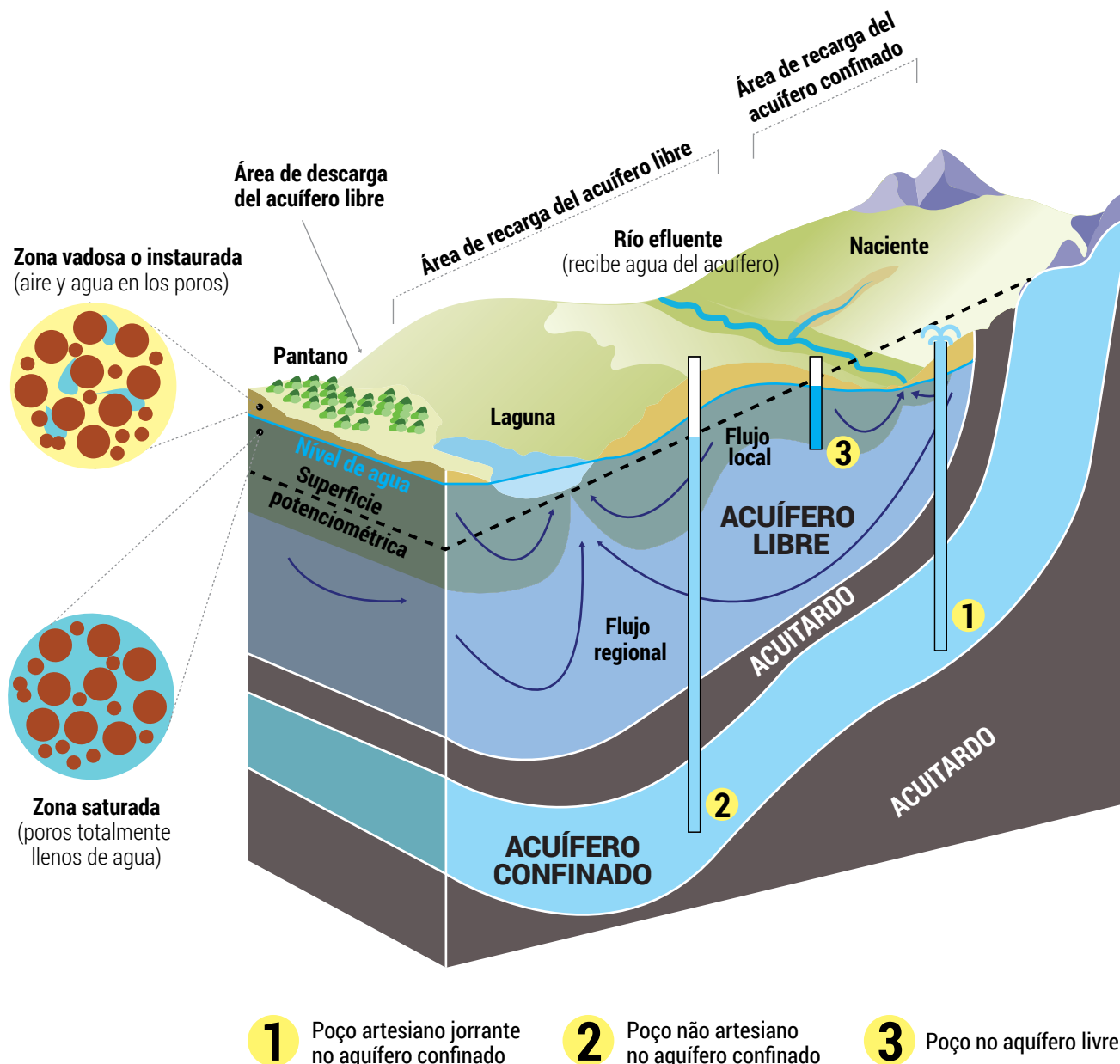


Figura 8 – Funcionamiento de un acuífero

Fuente: Cabral (2008), adaptación de Dora Atman.



En los acuíferos libres, el límite superior está formado por el nivel del agua, que corresponde a la parte superior de la zona saturada (superficie freática), en equilibrio y en las mismas condiciones de presión atmosférica. Los acuíferos confinados están delimitados en la base y en la parte superior por unidades no acuíferas (acuicludos) o rocas parcialmente impermeables (acuitardos), el agua se almacena a presión. En la situación intermedia se encuentran los acuíferos semi confinados, cuyas capas que los limitan tienen baja permeabilidad, condicionando que el agua cruce muy lentamente.

Como los acuíferos confinados o semi confinados están bajo presión, cuando son perforados por el pozo, el agua fluye y su nivel de agua piezométrico de equilibrio está por encima de la parte superior de la capa acuífera (reservorio) (Figura 8). En algunos casos, dependiendo de la topografía y la presión del acuífero, esta agua puede elevarse por encima de la superficie, formando pozos artesianos (chorreantes).

El agua subterránea fluye lentamente hacia las áreas más bajas cuando se filtra a través de la zona vadosa (Figura 8). Mientras que el flujo de agua superficial se desplaza por millas en pocos días, el flujo subterráneo avanza milímetros o centímetros por día. El movimiento de las aguas subterráneas se produce llenando los espacios vacíos y conectados de las rocas y un lento desplazamiento en la zona saturada. Esta diferencia en la velocidad de flujo permite que las aguas que se infiltraron hace decenas, cientos o incluso miles de años todavía estén en cámara lenta en el ambiente subterráneo. Por lo tanto, el acuífero se destaca más por su almacenamiento que por su alta producción en comparación con los ríos.

Los volúmenes almacenados en los acuíferos libres fluctúan estacionalmente o a lo largo de ciclos plurianuales, lo que demuestra que una parte de la lluvia incidente e infiltrada en la superficie llega al acuífero (recarga) y lo abandona (descarga) a lo largo del tiempo. *Debido a su tamaño y dinámica de recarga, incluso los acuíferos pequeños tienen aguas que pueden tener décadas e incluso miles de años.*



Foto: AdobeStock
Perforación de pozo artesiano.

Las fluctuaciones del volumen almacenado en los acuíferos configuran un equilibrio dinámico sostenido por las variaciones de las precipitaciones a lo largo de la estacionalidad climática y por los cambios internos en las tasas de recarga y descarga resultantes de las variaciones del gradiente hidráulico. Cuando el nivel del agua del acuífero aumenta con el tiempo como resultado del aumento de la recarga, existe naturalmente una tendencia a aumentar las tasas de salida de agua aumentando la descarga, por ejemplo, aumentando el flujo del caudal subterráneo que llega a los ríos. Por otro lado, cuando el nivel de agua del acuífero disminuye *debido a* la disminución en la recarga, hay una tendencia a reducir las tasas de descarga (por ejemplo, disminución en el flujo base de los ríos). Por lo tanto, con el tiempo geológico, el acuífero tiende a un estado de equilibrio dinámico, en el que las

tasas de descarga “mañana” serán proporcionadas por las tasas de recarga “hoy”.

La exploración por medio de pozos, por lo tanto, es una descarga impuesta a un sistema que anteriormente estaba en equilibrio dinámico. La intensidad de bombeo, el tiempo de explotación, el tamaño y las características hidráulicas del acuífero definirán las consecuencias de esta interferencia en las tasas de recarga, descarga y almacenamiento.



La dinámica hídrica de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica

La adopción de la cuenca hidrográfica por parte de la gestión hace de este espacio una referencia al análisis de las interacciones entre las aguas meteóricas, subterráneas, superficiales y costeras. La cuenca hidrográfica está compuesta por un marco geológico que proporciona los elementos iniciales para su análisis e influye directamente en la disponibilidad de agua. Este marco geológico se entiende aquí como un mosaico y/o una sucesión de rocas y material no consolidado que conforma el suelo y el subsuelo de una cuenca hidrográfica, a los que se asocian formas de relieve y variaciones topográficas, resultantes del desempeño, en tiempo geológico, de dinámicas internas (endógenas) y externas (exógenas).

El marco geológico puede consistir en varios tipos de rocas (ígneas, metamórficas o sedimentarias), con diferentes edades, composiciones y posibilidades de relación espacial (estratigrafía), así como estructuras geológicas (fracturas, fallas, pliegues, etc.). Los bloques de roca más antiguos y profundos, debido a la elevación, asociada a la meteorización y a la erosión, pueden acabar aflorando o siendo enterrados por secuencias sedimentarias más recientes, formadas en entornos geológicos diferentes. Las rocas con o sin cubierta, formadas por material y suelos no consolidados, tienen características de porosidad y permeabilidad (o conductividad hidráulica) que pueden facilitar o prevenir la percolación del agua de lluvia. El clima y sus variaciones en el tiempo geológico también son determinantes de la forma de ocurrencia y la dinámica de las masas de agua subterráneas, superficiales y costeras. Es él quien controla las características del ciclo y los balances hidrológicos que se establecen en una determinada cuenca hidrográfica. En una cuenca hidrográfica, por lo tanto, el marco geológico define la geometría de los acuíferos y sus relaciones con otras masas de agua superficiales (Figura 9). Las precipitaciones, a su vez, influyen en la cantidad de agua disponible para ser almacenada en los acuíferos.

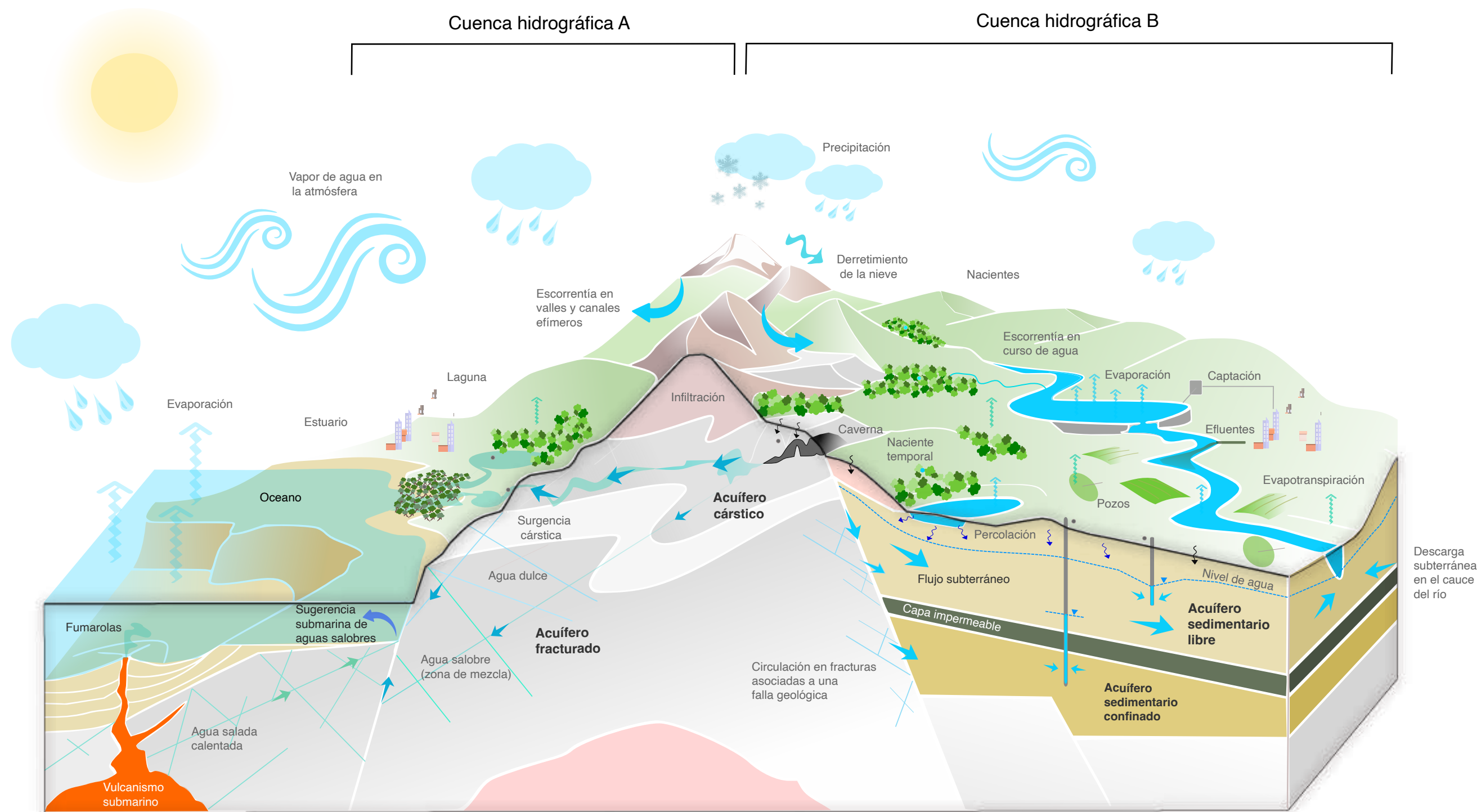


Figura 9 – El marco geológico como elemento básico para definir el territorio de la cuenca y el almacenamiento de agua

Fuente: preparado y proporcionado por Dora Atman.

Como se muestra en la Figura 9, la interacción entre el clima y el marco geológico determina la organización de los recursos hídricos. La lluvia es el principal mecanismo de entrada de agua a la cuenca, mientras que las rocas formarán los diferentes tipos de acuíferos y, junto con la topografía, serán decisivas en la definición del comportamiento de las aguas, que pueden discurrir superficialmente, infiltrarse con la escorrentía vertical y lateral del subsuelo o, incluso, ser absorbidas por las plantas y retornar al sistema a través de la evapotranspiración.

La escorrentía vertical del subsuelo abastece los flujos de agua subterránea, y parte de estos flujos genera manantiales e insumos en los drenajes de agua superficial y/o costera. De lo contrario, las masas de agua superficiales generan recargas a los acuíferos subyacentes. Las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas ocurren tanto en las partes aguas arriba como aguas abajo de una cuenca, dependiendo del marco geológico, las condiciones de lluvia y la topografía.

La interacción río-acuífero generalmente depende de la diferencia en la elevación de los niveles de agua en estos cuerpos hídricos. Si el aumento del nivel del agua en el acuífero es mayor que el aumento del agua en el río, este río recibe agua del acuífero y, por lo tanto, se conoce como *río efluente* (Figuras 10 A y D). En la situación opuesta, es decir, cuando la elevación del nivel del agua del acuífero es inferior a la del río, este río proporciona agua al acuífero, por lo tanto, será un *río influente* (Figuras 10 B y C). Por lo tanto, se observan dos situaciones de conexión hidráulica en la naturaleza, especialmente durante la estación seca: 1) *Río Perenne*, en el que existe una conexión entre la superficie freática y el río (Figuras 10 A y D), que garantiza el flujo durante todo el año, independientemente de los períodos de lluvia o sequía; y 2) *Río Intermittente*, en el que el río se desconecta de esta superficie, secándose en la estación seca (Figura 10 C) (HEALY, 2010; POETER *et al.*, 2020; WINTER *et al.*, 1999; WOESSNER, 2020).

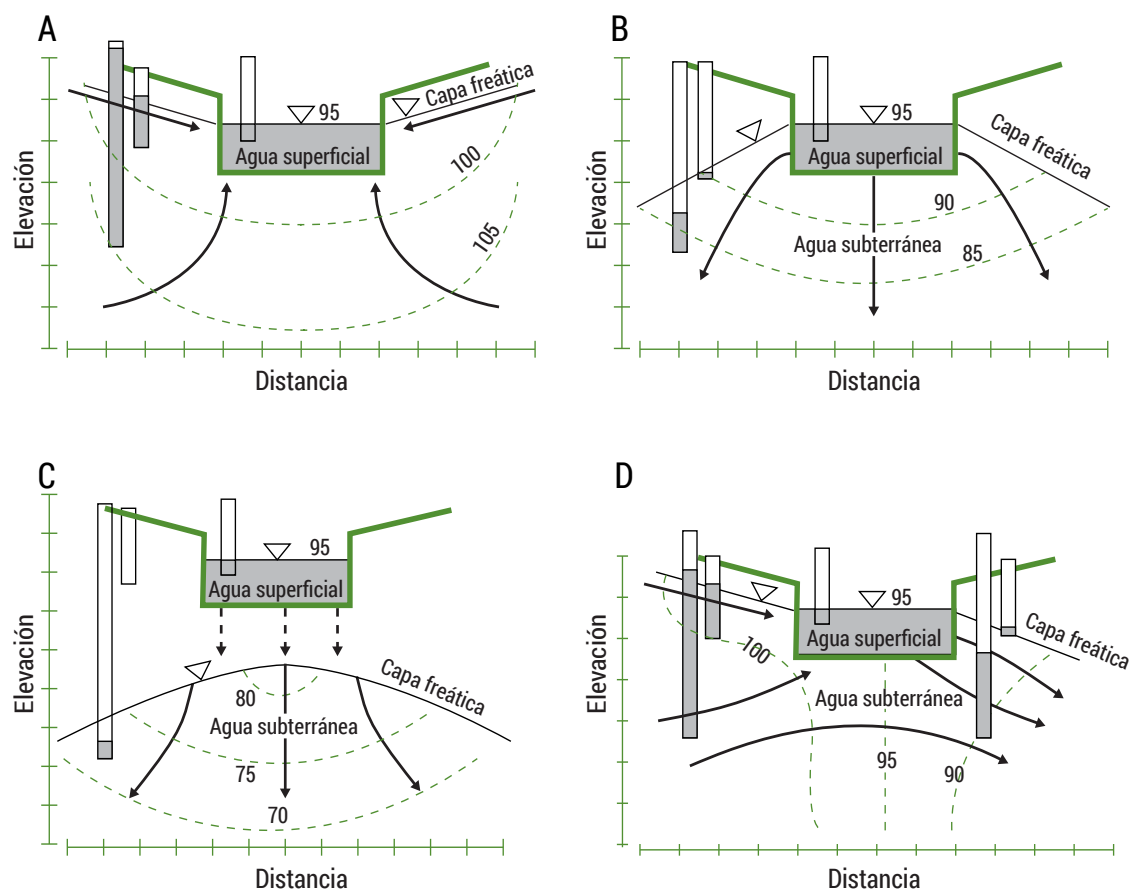


Figura 10 – (A) Modelo conceptual para ríos efluentes; (B) Modelo conceptual para ríos influentes¹; (C) Modelo conceptual para ríos influentes²; (D) Modelo conceptual de flujo directo

Fuente: Woesner (2020), adaptado por Didier Gastmans y Camila de Lima.

¹ Escenario en el que el aumento del nivel del agua que separa la zona saturada de la no saturada está conectado con el río; ² Escenario en el que el aumento del nivel del agua que separa la zona saturada de la no saturada está desconectado del río.

En terrenos cristalinos, es común que los manantiales aparezcan en las partes más altas del relieve y formen pequeños cursos de agua, que se unen con otros a medida que alcanzan las partes más bajas del drenaje, componiendo arroyos, riachuelos u otros cuerpos de agua más grandes. Por lo tanto, constituye una cuenca hidrográfica, cuyo patrón de drenaje es generalmente controlado por la estructuración de las rocas del sustrato geológico. A lo largo de esta trayectoria,

las descargas subterráneas se producen en los cursos de agua superficiales, que son responsables de su perennización. Las cuencas, cuyo marco geológico está formado por rocas poco permeables y con pronunciados gradientes topográficos, presentan una gran parte del caudal dependiente de la escorrentía superficial. Aunque las interacciones de los acuíferos con los cursos de agua son menores, deben tenerse en cuenta en la preparación del balance hídrico y los planes de ordenación, ya que pueden aportar contribuciones importantes.

Por otro lado, en las cuencas hidrográficas que drenan terrenos sedimentarios o llanuras aluviales, las interacciones con los acuíferos son de gran relevancia porque los ríos reciben grandes volúmenes de descarga subterránea, lo que los hace perennes en los periodos secos.

Entre la recarga y la descarga, el agua subterránea se mueve a lo largo de varios caminos, formando lo que se denomina una *red de caudal*, cuyas líneas pueden ajustarse a tres situaciones: *local*, *intermedia* y *regional* (Figura 8) (TÓTH, 1963).

- **Líneas de caudal locales:** drenan a zonas de descarga relativamente cercanas a los puntos donde se produjeron las recargas, generalmente apuntando a masas de agua superficiales (ríos y estanques). Este es el caso de las líneas de flujo originadas en áreas de recarga del Sistema Acuífero Guaraní (SAG).
- **Líneas de caudal intermedias:** presentan uno o más sistemas de flujo local entre su área de recarga y descarga.
- **Líneas de caudal de carácter regional:** son más profundas dentro de los acuíferos y tienen un tránsito de larga distancia con descargas a masas de agua superficiales, a saber: ríos, grandes cuerpos lacustres o incluso el océano. Las descargas de SAG en el cauce de los ríos Uruguay y Paraná son ejemplos concretos de líneas de flujo regionales.



Los flujos de agua subterránea deben considerarse en tres dimensiones, es decir, puede haber flujos superficiales y locales que se superpongan con los más profundos, que son los flujos regionales. Por lo tanto, es posible que existan flujos locales, intermedios y regionales en el mismo acuífero (Figura 8). Para cuantificar la disponibilidad hídrica integrada de la cuenca es importante entender la dinámica de estos flujos y estimar sus tasas de descarga.

Los sistemas acuíferos pueden incluso ser más grandes que las cuencas hidrográficas. Sus áreas de recarga ubicadas en una cuenca pueden favorecer los vertidos en ríos de otras cuencas (Figuras 8 y 9). Por lo tanto, el mismo acuífero puede participar en los flujos de más de una cuenca superficial (Figuras 8 y 9), así como proporcionar agua al mar. Si la descarga ocurre en el mar, el flujo de agua dulce del acuífero se opone al flujo de agua salada, estableciendo un límite dinámico entre estas aguas, que están separadas por una zona de mezcla.

Existe una conexión intrínseca entre las aguas superficiales y subterráneas, por lo que su evaluación debe hacerse desde un enfoque integrado y conjunto. Las aguas superficiales pueden convertirse en aguas subterráneas a través de la infiltración, mientras que las aguas subterráneas pueden convertirse en aguas superficiales a través de la descarga de acuíferos. Por lo tanto, es necesario comprender, en el espacio y en el tiempo, cómo se producen las relaciones de transferencia que regulan los volúmenes y las fluctuaciones del agua disponible para los ecosistemas. Este tema refuerza la idea de interacciones río-acuífero, como ocurre en el Sistema Acuífero Urucuia y la Cuenca del Río São Francisco (ANA, 2017a).

La extracción de aguas subterráneas a través de pozos modifica la condición hidráulica original del acuífero y la cuenca, lo que puede generar impactos positivos y negativos. En general, esta extracción genera beneficios sociales porque aumenta la disponibilidad regional de agua, permitiendo el desarrollo y suministro de comunidades que a menudo no tienen otra fuente de agua o que necesitan complementar la fuente superficial. Sin embargo, dependiendo de la magnitud de

los volúmenes extraídos, puede producirse una sobreexplotación del acuífero, lo que genera la reducción de los vertidos de acuíferos a las masas de agua superficiales o al mar, lo que culmina en efectos ambientales y económicos negativos.

2.5 Las amenazas a los recursos hídricos subterráneos brasileños

Los acuíferos también están sujetos a los impactos resultantes del uso excesivo del agua y las actividades humanas, que pueden causar problemas de sobreexplotación, reducción de la recarga o contaminación de las aguas subterráneas.

2.5.1 Sobreexplotación de los acuíferos

La extracción de agua de un acuífero genera su descenso y modificaciones en el flujo hidrodinámico de recarga y descarga y, en algunos casos, modificaciones en la geoquímica de sus aguas. Las consecuencias de la sobreexplotación no son inmediatamente perceptibles, sino que se acentúan con el tiempo, variando según las dimensiones del acuífero, su capacidad de almacenamiento y el escenario de uso. Las alteraciones hidráulicas y químicas de los acuíferos tardan años o décadas en ser percibidas por los usuarios o las Autoridades Públicas. Por lo tanto, es necesario monitorear las extracciones para evitar que generen externalidades, cuya recuperación es compleja, costosa y requiere mucho tiempo para revertir.

La sobreexplotación comprende varios fenómenos e impactos generados por la extracción o cambios en la recarga, que reducen la disponibilidad de agua, perjudicando a los usuarios o las funciones ambientales y sociales de las aguas subterráneas. La mera reducción de los niveles acuíferos no caracteriza una situación de sobreexplotación, sino que se materializa cuando los impactos de la extracción causan pérdidas financieras, ecológicas o sociales que no pueden ser compensadas por los beneficios de la explotación.



A diferencia de las aguas superficiales, no es posible observar visualmente los procesos que ocurren en el acuífero. Por lo tanto, el desafío de la gestión de los recursos de aguas subterráneas es medir y establecer cuándo se considerará que su explotación es lo suficientemente dañina para adaptarse a esta situación. En general, la sobreexplotación se entiende como cambios en el ciclo hidrológico que causan al menos uno o más de los siguientes impactos:

- a. reducción de los niveles acuíferos mediante la extracción de agua. La extracción de agua puede agotar el acuífero, es decir, crear una reducción tan pronunciada de los niveles potenciométricos que ya no se puede utilizar, bien por el excesivo desnivel hidráulico (altura manométrica) que deben superar las bombas de los pozos, bien por la reducción del espesor saturado del acuífero, que impide su bombeo, o incluso por la eliminación de las fuentes y manantiales naturales;
- b. reducción de la contribución del agua a las corrientes de base en las masas de agua superficiales. La disminución de los aportes de agua perjudica la disponibilidad de las aguas superficiales y los ecosistemas dependientes, como ríos, lagos, pantanos, charcas y manglares;
- c. aumento de los costos de explotación del agua debido a la disminución de los niveles dinámicos de los pozos y/o el reajuste de las obras de captación. En este caso, el origen puede ser: a) el desequilibrio entre la recarga del acuífero y su extracción a largo plazo (décadas); o b) la interferencia entre pozos, cuya proximidad provoca interferencias hidráulicas y fuertes inclinaciones. Los costos de extracción están más asociados con el bombeo, que requiere energía para llevar el agua del acuífero a la superficie, que con la propia obra;
- d. pérdida de pozos con menor profundidad o manantiales que impidan el acceso equitativo al agua. El uso de aguas subterráneas por parte

de pozos excavados o incluso tubulares poco profundos por parte de poblaciones pobres y socialmente vulnerables es una práctica común en zonas rurales o periurbanas. En muchos casos, son la única fuente de agua disponible para garantizar el agua y la seguridad alimentaria de estas poblaciones. Dependiendo de la hidráulica del acuífero, la instalación de pozos profundos de alta producción puede hacer que el nivel del agua baje y se seque en pozos y manantiales menos profundos. En la mayoría de los casos, el pozo más profundo está legalizado, sin embargo, su uso puede generar un problema de desigualdad social y perjudicar el principio de múltiples usos del agua. Los propietarios de los pozos que se han secado a menudo no correlacionan la pérdida del pozo con la sobreexplotación del acuífero;

- e. cesión de tierras. El uso de algunos acuíferos, como los asociados a sistemas kársticos o sedimentarios multicapa, puede crear hundimiento de la tierra, lo que impacta en las obras civiles, causando pérdidas sociales y económicas, como el colapso de edificios y la modificación de las corrientes de agua urbanas;
- f. introducción de agua contaminada o salina en el acuífero debido al bombeo excesivo o la reducción de la recarga. Las extracciones de agua de un acuífero o incluso la ocupación humana en la superficie alteran el ciclo hidrológico, modificando las tasas de recarga y las direcciones del flujo subterráneo. En algunos casos, estos cambios pueden traer agua de baja calidad a las áreas de uso del acuífero. Esto ocurre cuando los pozos de bombeo inducen el agua contaminada de los acuíferos o ríos de aguas subterráneas a entrar en el acuífero. La contaminación por la inducción de agua de baja calidad por bombeo debe enfrentarse con el control de la operación y explotación de pozos;



- g. intrusión salina en acuíferos costeros. En los acuíferos costeros, en equilibrio, hay un gradiente hidráulico que condiciona un flujo de agua dulce del continente al océano. Este flujo puede invertirse debido a las características de las variaciones de las mareas y el clima, por ejemplo, mezclando aguas dulces y saladas. Esta mezcla de aguas está condicionada por la dispersión hidrodinámica, y el agua dulce, menos densa, tiende a fluir más cerca de la superficie, mientras que el agua salada, más densa, avanza hacia el acuífero, formando una cuña salina (FEITOSA et al., 2008). La extracción excesiva de los acuíferos costeros permite el avance de la cuña de sal al continente, ya que el bombeo invierte las direcciones de flujo de estas aguas, causando desequilibrio hidrodinámico del sistema y comprometiendo la calidad de las aguas del acuífero.

La sobreexplotación puede afectar a parte de un acuífero o a todo el sistema. Debido a la baja velocidad del flujo subterráneo, la evaluación de sus efectos puede tardar años en manifestarse, aunque sus causas han ocurrido durante mucho tiempo. En el caso de los acuíferos fósiles, es decir, aquellos donde el retorno de agua en la porción explotada es mayor a decenas de miles de años, la sobreexplotación es inevitable, ya que la pérdida del nivel está determinada por el ritmo de extracción. Por lo tanto, es necesario planificar su uso, considerando si las ganancias socioeconómicas del agua extraída compensan el agotamiento del acuífero a largo plazo y su pérdida para las generaciones futuras.

En algunos casos, la recuperación del nivel freático resultante del abandono de pozos también puede generar impactos negativos. Al disminuir la extracción de agua subterránea, los niveles de agua pueden recuperarse a la situación original o incluso superarla, ya que las ciudades tienden a aumentar los niveles de recarga debido a las pérdidas de agua de la red de agua y alcantarillado. Muchos edificios, canales, túneles, galerías y la

red de metro tienen estructuras subterráneas que se construyeron cuando esas porciones estaban secas (zona no saturada), por lo que reanudar el nivel original requerirá drenaje de agua. Si los cimientos del edificio se construyeran sobre suelo seco, la reanudación del nivel freático provocaría su movimiento vertical, lo que impactaría en la estabilidad estructural, generando pérdidas sociales.

2.5.2 Reducción de la recarga de acuíferos debido a la alteración del uso y la ocupación del suelo

Los cambios en los patrones de cobertura del suelo urbano y rural interfieren directamente con la recarga, ya que influyen en la distribución de la lluvia, la temperatura, la escorrentía superficial, la evapotranspiración y la recarga del acuífero (TANG *et al.*, 2005). Las principales causas de estos cambios en la recarga del acuífero se correlacionan con los siguientes aspectos: a) sellado por superficies impermeables (JACOBSON, 2011); b) compactación (PITT *et al.*, 2003); y c) reducción de la cubierta arbórea (ANDJELKOVIC, 2001). Las áreas selladas están más presentes en el medio urbano e incluyen todas las áreas y edificios pavimentados que evitan la infiltración de agua. La compactación es la afectación de las propiedades físicas del suelo, de forma que disminuye su porosidad, y está causada, por ejemplo, por el movimiento de tierras o el paso de maquinaria pesada. La reducción de la cubierta vegetal de los árboles causa impactos relacionados con la pérdida de evapotranspiración, cambios en el albedo de la superficie terrestre, aumento de las temperaturas e intensificación de los procesos de erosión y desertificación (TANG *et al.*, 2005). Además, los bosques evitan perturbaciones en el suelo y sus raíces y ecosistemas asociados contribuyen a mejorar la porosidad del suelo (Artaxo, 2014; AZEVEDO, 2019). En las ciudades, eventualmente, puede haber compensación por la pérdida de recarga natural debido a fugas en la red de agua, alcantarillado y drenaje de aguas pluviales (Hirata; Foster; Oliveira, 2015).



2.5.3 Contaminación del suelo y las aguas subterráneas

La contaminación del suelo y los acuíferos se producen principalmente por el depósito incorrecto de efluentes y desechos sólidos, por la manipulación y el almacenamiento de sustancias peligrosas o por accidentes. La zona insaturada representa la primera línea natural de defensa contra la contaminación y tiene cierta capacidad para atenuar y eliminar contaminantes (FOSTER; HIRATA, 1988). Sin embargo, varias actividades generan cargas contaminantes que superan esta capacidad de retención y degradación de la zona insaturada, provocando la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas. Esta contaminación puede ser *puntual* o *difusa* (FOSTER; HIRATA, 1988):

- a. **puntual:** cuando la fuente de contaminación está restringida a un área pequeña. Esta característica facilita la identificación, monitoreo y remediación de impactos, ya que suele causar plumas de extensión reducida y con altas concentraciones. Son los casos típicos de vertederos y escombreras, depósitos subterráneos, lagunas de efluentes, pilas y depósitos de productos peligrosos, entre otros.
- b. **difuso o multipunto:** cuando la fuente de contaminación se extiende a través del territorio y los contaminantes se liberan escasamente, lo que dificulta su identificación porque no hay plumas de contaminación bien definidas. Ejemplos de este tipo de contaminación son: áreas agrícolas con aplicación de exceso de pesticidas y fertilizantes, o áreas urbanas sin red de alcantarillado y uso de tanques rudimentarios y sépticos, entre otros.

Las posibles fuentes de contaminación pueden estar relacionadas con actividades en la región urbana, periurbana o rural, incluidas las derivadas del proceso de urbanización, la eliminación de desechos sólidos y líquidos, la industria,

la minería, la agricultura y la ganadería. En principio, todas las actividades antrópicas que generan, manipulan o almacenan productos peligrosos pueden contaminar las aguas subterráneas. Dentro de estas actividades, sin embargo, hay aquellas que pueden causar mayores impactos o ocurrencias con mayor frecuencia (FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER *et al.*, 2002). En la gestión de las aguas subterráneas, es importante identificar, distinguir y clasificar estas actividades antropogénicas, permitiendo que los organismos públicos y la sociedad establezcan sus políticas.

Foster e Hirata (1988) y Foster *et al.* (2002) señalan que las actividades contaminantes no están necesariamente vinculadas a las grandes empresas. En algunos casos, las pequeñas empresas pueden incluso generar mayor preocupación, ya que manejan productos peligrosos sin los controles necesarios, siendo responsables de grandes impactos, como ocurrió en el Distrito Industrial de Jurubatuba (São Paulo). En esta región, una empresa con poco más de cientos de metros cuadrados generó una grave contaminación porque manejaba, sin el debido cuidado, solventes clorados, como desengrasante para la producción de baterías. Por lo tanto, el potencial contaminante de las actividades debe analizarse principalmente bajo dos aspectos: a) el tipo de producto producido, manipulado y almacenado; y b) si el ingreso al suelo se realiza con alguna carga hidráulica asociada, porque no hay manera de que un contaminante ingrese al acuífero si no es a través de un fluido.

Los contaminantes deben analizarse en función de su toxicidad, movilidad y persistencia en el subsuelo. Los disolventes clorados tienen estas características y, por tanto, son problemáticos. A su vez, el nitrógeno, aunque presenta baja toxicidad, tiene una ocurrencia amplia, lo que lo convierte en un desafío para la gestión. Está presente en los fertilizantes utilizados en la agricultura y en los efluentes domésticos que se infiltran en el acuífero, a través de fosas sépticas o rudimentarias y a través de fugas de la red de alcantarillado.



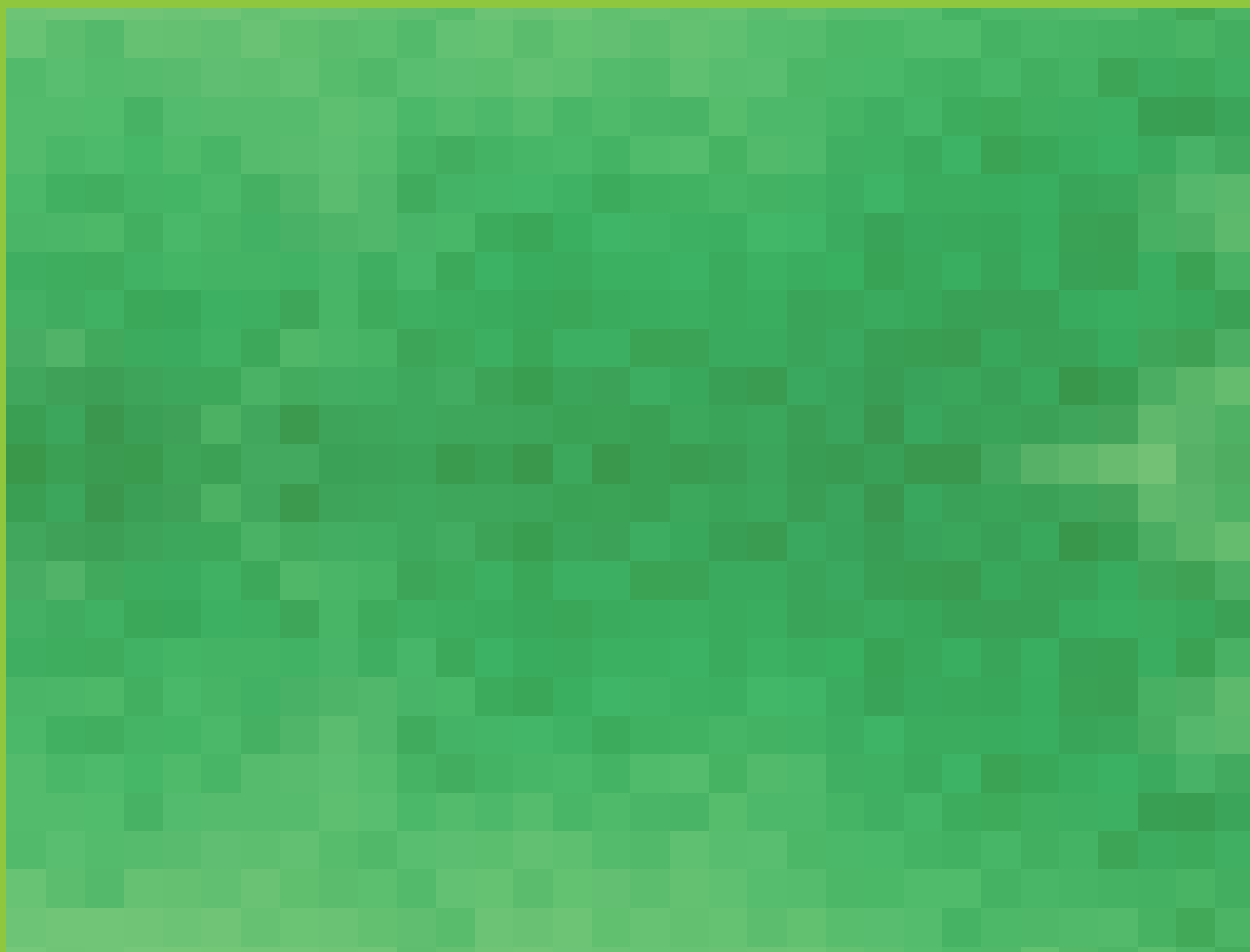
Brasil tiene una situación particularmente vulnerable en relación con la falta de aguas residuales sanitarias, ya que no se recoge el 39% de las aguas residuales generadas, con un 12% destinado a sistemas de tratamiento individual *in situ* (fosas sépticas) y un 27% liberado principalmente al suelo a través de tanques y sumideros rudimentarios (99%) o aguas superficiales (1%) (HIRATA *et al.*, 2019, ANA, 2017b, IBGE, 2008). En las áreas equipadas con infraestructura sanitaria, las redes de alcantarillado carecen de mantenimiento, lo que permite la fuga de volúmenes significativos que pueden superar el 10% del total de aguas residuales recolectadas (HIRATA *et al.*, 2019).

Aunque Brasil es un país con una fuerte actividad agrícola y utiliza una gran cantidad de fertilizantes inorgánicos y agrotóxicos, no hay estudios sistemáticos para evaluar los impactos o la ocurrencia de este tipo de contaminación, incluso en el ámbito académico. La aplicación de fertilizantes nitrogenados es la principal causa de contaminación agrícola en Norteamérica y Europa, cuyos datos reportan extensas áreas contaminadas.

Otro problema es que la construcción de pozos o extracciones ignora las normas técnicas, su ubicación es inadecuada (cerca de posibles fuentes de contaminación) o no reciben el mantenimiento adecuado, lo que puede conducir a la contaminación del acuífero. La diligencia técnica previene, por ejemplo, la contaminación microbiológica, que es muy común en pozos instalados cerca de las fosas. El pozo, por lo tanto, debe estar lejos de fuentes potencialmente contaminantes, recomendando la adopción de perímetros de protección, así como la realización frecuente de análisis químicos.

En Brasil, la información sobre la situación de las zonas contaminadas es escasa. En la Base de Datos Nacional de Áreas Contaminadas (BDNAC)⁵ sólo hay información de los Estados de Minas Gerais, Río de Janeiro y São Paulo.

5 El BDNAC fue establecido por la Res. Conama nº 420/2009. Para obtener más información, consulte: <http://ibama.gov.br/residuos/areas-contaminadas/banco-de-dados-nacional-sobre-areas-contaminadas-bdnac>.



3

LA CONSTRUCCIÓN DE LA GOBERNANZA Y GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS



Foto: AdobeStock

3 LA CONSTRUCCIÓN DE LA GOBERNANZA Y GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Dada la necesidad de regular el uso y proteger los acuíferos, se destacan los conceptos de *gobernanza* y *gestión de las aguas subterráneas*, especialmente desde finales del decenio de 2000. Una de las primeras y más citadas definiciones de la gobernanza del agua se estableció en un informe de la *Global Water Partnership*, que la definió como “el conjunto de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que existen para desarrollar y gestionar los recursos hídricos y la prestación de servicios de agua en diferentes niveles de la sociedad.” (Rogers; Hall, 2003, p. 7).

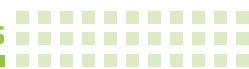
Desde entonces, han surgido varios conceptos y enfoques sobre la gobernanza del agua (RIBEIRO; JOHNSON, 2018). En esta profusión de literatura, la idea de gobernanza de las aguas subterráneas surgió como un aspecto específico y más restringido de la gobernanza del agua, lo que se justifica por los siguientes factores (Jarvis et al., 2005; Madani; Dinar, 2012; Villholth; Conti, 2018):

- importancia ecosistémica de las aguas subterráneas, ya que mantiene el flujo de base de ríos, manantiales y humedales;
- el principal reservorio de agua dulce disponible para las poblaciones del planeta;

- los recursos naturales más extraídos del subsuelo en Brasil y en el mundo;
- las tasas de extracción superan las de reposición en varios acuíferos;
- la contaminación, que en muchos casos hace inviable el acuífero debido a la complejidad técnica y los costos de la descontaminación;
- características específicas que dificultan su manejo, con énfasis en lo siguiente: a) invisibilidad natural y social de estas aguas; b) baja velocidad de flujo subterráneo; c) extensión de acuíferos; y d) dificultad para controlar el acceso;
- percepción cultural de que estas aguas están vinculadas al derecho a la propiedad de la tierra;
- políticas públicas que descuidan las aguas subterráneas y su relación con las aguas superficiales;
- desconocimiento sobre la situación de estas aguas y acuíferos.

El énfasis en la gobernanza de las aguas subterráneas contribuye a mejorar la gestión de los recursos y a buscar estrategias conjuntas y específicas entre los actores sociales en vista de las particularidades naturales y sociales de los acuíferos. Existen varias definiciones para la gobernanza de las aguas subterráneas. Megdal *et al.* (2014, p. 678) la define como:

la estructura que comprende las leyes, reglamentos y costumbres sobre el uso de las aguas subterráneas, así como los procesos de participación del sector público, el sector privado y la sociedad civil. Puede implicar acciones de coordinación administrativa y procesos de toma de decisiones entre los diferentes niveles jurisdiccionales. Esta estructura determina



fundamentalmente cómo se gestionan las aguas subterráneas y cómo se utilizan los acuíferos.

La gobernanza no se confunde con la gobernabilidad, ni con la gestión, aunque existen confusiones entre los términos. Las distinciones entre estos conceptos se centran en el número de actores involucrados y la amplitud de su alcance (VILLHOLTH; CONTI, 2018). *La gobernabilidad* es parte de la gobernanza, sin embargo, se restringe a la “dimensión estatal del ejercicio del poder” (GONÇALVES, 2005, p. 3), centrándose en los atributos del ejercicio del poder gubernamental y sus condiciones sistémicas, tales como: “el régimen político (ya sea democrático o autoritario), la forma de gobierno (ya sea parlamentario o presidencial), las relaciones entre poderes (mayor o menor asimetría, por ejemplo); los sistemas de partidos (ya sean multipartidistas o bipartidistas)” (DINIZ, 1999, pág. 196).

La gestión se centra en los actores con competencia para llevar a cabo acciones rutinarias dirigidas al diagnóstico, seguimiento y aplicación de instrumentos o leyes de gestión. Se centra en el desempeño de técnicos y gestores de agua dedicados a implementar las leyes (políticas) a través de acciones específicas. Según la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), el término *gestión de las aguas subterráneas* “comprende las actividades realizadas por agentes legítimos para desarrollar, utilizar y proteger de manera sostenible los recursos hídricos subterráneos.” (FAO, 2016, p. 17).

La gestión de los recursos hídricos corresponde a la ejecución de acciones estructurales y no estructurales orientadas al control de los sistemas hídricos (naturales o artificiales), con el fin de garantizar los beneficios sociales y cumplir con los requisitos ambientales. Las medidas estructurales requieren la construcción de estructuras, tales como: presas, aductoras, plantas de tratamiento de agua y alcantarillado, obras de contención de la erosión del suelo, recuperación de áreas contaminadas, eliminación de sedimentos de

cuerpos de agua, entre otros. Las medidas no estructurales son programas o actividades que no requieren obras, como la zonificación del uso y ocupación del suelo, acciones de educación ambiental, campañas para la legalización de pozos, etc. (GRIGG, 1996).

El alcance de la gobernanza es más integral e inclusivo, ya que incorpora el “conjunto de mecanismos y procedimientos para abordar la dimensión participativa y plural de la sociedad”, considerando las visiones no solo del gobierno (gobernanza), sino también de los científicos, usuarios, organizaciones no gubernamentales, sociedad civil y comunidades tradicionales (Villholth; CONTI, 2018). Por lo tanto, presupone: a) “ampliar y mejorar los medios de diálogo y administración del juego de intereses”; y b) dar al Estado mayor flexibilidad de acción, permitiendo la descentralización de funciones, transferencia de responsabilidades y expansión del “universo de actores participantes, sin renunciar a los instrumentos de control y supervisión.” (DINIZ, 1999, pág. 196).

El fortalecimiento de la idea de gobernanza genera un cambio en el paradigma de la gestión del agua, que ya no es un tema exclusivo de los órganos técnicos gubernamentales y comienza a buscar alianzas con otros actores, incluyendo diferentes enfoques, tales como: a) aprendizaje social; b) técnicas de negociación y mediación de conflictos; c) conocimiento tradicional; d) acciones de educación ambiental; e) creación o ampliación de oportunidades de participación de los usuarios y la sociedad civil, etc.

En este proceso, se estableció la idea de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (**GIRH**), definida por la *Global Water Partnership* (GWP, 2000, p. 22) como un “proceso que promueve el desarrollo y la gestión coordinada del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.” Este concepto tiene como objetivo

promover la integración horizontal de múltiples usos, así como la integración vertical entre los diversos niveles institucionales (local, estatal o provincial, nacional y transfronterizo).

Organismos internacionales, como la *Global Water Partnership*, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), además de las conferencias y ediciones internacionales del Foro Mundial del Agua, argumentan que este modelo es el más eficiente para asegurar la sostenibilidad en el uso del agua (VILLAR, 2015). Sus partidarios sostienen que los problemas del agua podrían ser resueltos por el GIRH, independientemente de las diferencias en las condiciones físicas, económicas, sociales y ambientales de los países (BISWAS, 2008). Sin embargo, advierten que su implementación requiere un contexto de gobernanza adecuado para promover efectivamente la buena gobernanza del agua (VILLAR, 2015).

- Por lo tanto, los procesos para lograr una buena gobernanza e implementar la GIRH en la práctica son desafiantes y complementarios. El GIRH alienta a la legislación y a las instituciones del agua a adoptar los siguientes principios: cuenca hidrográfica como unidad de gestión espacial; participación de los actores sociales; mecanismos de financiamiento; monitoreo; desarrollo de sistemas de información. Además, fomenta la adopción de las siguientes estrategias de gestión (Villar, 2015):
- la determinación de las funciones del Estado en relación con otros actores y la regulación de la propiedad y las responsabilidades de los usuarios y los proveedores de agua;
- crear asociaciones entre el gobierno, el sector empresarial, la comunidad y las organizaciones voluntarias;

- la prescripción legal de las entidades de gestión pública y sus respectivas competencias;
- la búsqueda de formas de garantizar el uso sostenible del recurso;
- análisis de la situación de los recursos hídricos;
- la creación de consorcios de actores implicados en el proceso de toma de decisiones, con representación de los sectores de la sociedad y equilibrio de género;
- organización de sistemas de asignación de agua, extracción de agua, permisos de eliminación de aguas residuales y bases de datos;
- gestión de los recursos hídricos basada en las cuencas hidrográficas;
- estructuras organizativas a nivel de cuenca y subcuenca para permitir la toma de decisiones al nivel más bajo posible;
- preparación de planes por parte del GIRH basados en un enfoque multisectorial y la participación de las partes interesadas.

En el caso específico de las aguas subterráneas, la GIRH llama la atención sobre los siguientes puntos que deben ser abordados por la gestión:

- las aguas superficiales y subterráneas no pueden gestionarse por separado o independientemente de los ecosistemas relacionados (KENNEDY *et al.*, 2009);

- la gestión de las aguas subterráneas requiere observar el equilibrio entre la extracción y la recarga de las aguas subterráneas, y hacer una planificación del uso a medio y largo plazo (KENNEDY *et al.*, 2009);
- la gestión de las aguas subterráneas debe monitorear el impacto del riego y las tarifas subvencionadas para el uso de la energía y el agua, que, aunque deseables desde un punto de vista socioeconómico, pueden estimular la sobreexplotación del acuífero (FOSTER; AIT-KADI, 2012);
- la gestión de las aguas subterráneas debe incluirse en las políticas de urbanización debido al impacto del uso y la ocupación del suelo y la ausencia o insuficiencia de servicios de saneamiento (FOSTER; AIT-KADI, 2012);
- la escala espacial de la cuenca necesita ajustes para promover la gestión de los acuíferos (FOSTER; AIT-KADI, 2012).

Desde la década de 1990, varios países, incluido Brasil, han cambiado sus marcos legales e institucionales para implementar la GIRH e incorporar sus herramientas en la escala de cuenca fluvial (MIRANDA; REYNARD, 2020). Las siguientes sesiones describen el marco político institucional brasileño que guía la implementación de este proceso y su relación con las aguas subterráneas.

3.1 Las aguas subterráneas en la Constitución Federal de 1988

La Constitución Federal de 1988 representa un hito en la gestión de las aguas subterráneas, ya que transformó radicalmente su naturaleza jurídica. Estas aguas se regían por el Código de Aguas (Decreto n° 24.643/1934) que, en general, las enmarcaba como *aguas privadas* (art. 8°), garantizando su libre uso para los propietarios de los terrenos donde se encontraban (art. 96). Las

únicas excepciones a este tratamiento fueron los casos de manantiales que: a) formaban las cabeceras de un río (*caput fluminis*) debido a la abundancia de su caudal, según lo previsto en el art. 2º, apartado “e” del Decreto nº 24.643/1934; o b) estaban situados en terrenos públicos (TOVAR, 1955).

La Constitución Federal de 1946 tornó públicas todas las aguas superficiales, pero no mencionó las subterráneas. Sólo de la Constitución Federal de 1988 se hicieron públicas todas las aguas subterráneas, lo que se incluyó expresamente en su art. 26, inc. I. Por lo tanto, el dominio de las aguas se dividió entre la Unión y los estados:

Art. 20. Los activos de la Unión son:

III – los lagos, ríos y cualesquiera corrientes de agua en las tierras bajo su dominio, o que bañen a más de un Estado, sirvan de límites con otros países, o se extiendan o provengan de territorio extranjero, así como de tierras marginales y playas fluviales;

IX – recursos minerales, incluidos los del subsuelo;

Art. 26. Entre los bienes de los Estados figuran los siguientes:

I – Aguas superficiales o subterráneas, fluidas, emergentes y en depósito, salvo, en este caso, de conformidad con la ley, las que resulten de obras de la Unión.

Las aguas asignadas a la Unión en el inc. III de la Constitución, se limitan a las aguas superficiales (lagos, ríos y arroyos) que reúnan las siguientes condiciones: “límitrofes con Estados u otro país, o ubicados en más de un Estado o País.” (MILARÉ, 2020, p. 1154). A los Estados, a su vez, el art. 26 cede aguas superficiales no comprendidas en el art. 20, inc. I, y las aguas subterráneas, sin restricción territorial para el dominio de los recursos de aguas subterráneas

(MILARÉ, 2020). No obstante, algunas aguas subterráneas también pueden clasificarse como *recursos minerales* y estar sujetas al control de la Unión en virtud de la legislación minera.

Las aguas subterráneas pertenecen a los Estados (CAMARGO; RIBEIRO, 2009; FERNANDES, 2019; VILLAR; GRANZIERA, 2020). La Carta Magna extinguió las aguas municipales y privadas. Este entendimiento fue corroborado por la Ley n° 9.433/1997, que clasificó el agua como bien de dominio público (art. 1º, inc. I), por lo tanto, el derecho de propiedad ya no se aplica a los recursos hídricos, cuyo uso está condicionado a la regulación estatal. La mayoría de las disposiciones del Código de Aguas se volvieron incompatibles con el régimen de dominio establecido por la Constitución Federal y con el régimen de aguas de la Ley n° 9.433/1997.

La jurisprudencia del Tribunal Superior de Justicia (STJ) indicó la posibilidad de aguas subterráneas federales (STJ, 2016a; 2016b). Esta interpretación se dio en acciones que discutían la legalidad de actos del Poder Público que, apoyados por decretos estatales o por el art. 45 de la Ley n.º 11.445/2007, pretendían prohibir pozos sin otorga, como fuente alternativa de agua en áreas con una red de suministro de agua. Esta posición no quita el dominio estatal de las aguas subterráneas, porque se pronunció en acciones judiciales que no discutían el dominio de estas aguas, ni contaban con la participación de los Estados y la Unión.

Ese tema fue ampliamente discutido en el debate del Proyecto de Enmienda a la Constitución (PEC) N° 43/2000, cuyo objetivo era transferir al dominio federal aguas subterráneas que excedieran los límites estatales o que fueran compartidas con otros países. La ANA y varios Comités de Cuenca se opusieron al PEC porque creen que el manejo de los acuíferos debe priorizar la escala local. La PEC 43/2000 fue retirado del trámite legislativo por cuestiones de mérito, porque según la Comisión de Constitución, Justicia y Ciudadanía la propuesta era contraria al modelo descentralizado y no contribuiría a la mejora de la Política Nacional de Recursos Hídricos (CASAGRANDE; ABREU, 2010, p. 4).



Además de definir el dominio de las aguas, la Constitución Federal de 1988, en el art. 21, inc. XIX, determinó la obligación de la Unión “de establecer el sistema nacional de gestión de los recursos hídricos y definir los criterios para otorgar el derecho a utilizarlo”. 22, inc. IV, a su vez, otorgó a la Unión la competencia privativa para legislar sobre el derecho de aguas (VILLAR; GRANZIERA, 2020). Esos mandatos constitucionales allanaron el camino para la promulgación de la Ley nº 9.433/1997, que sienta las bases de la gobernanza hídrica en el país. Por lo tanto, la gestión de las aguas subterráneas por los estados está condicionado a la observancia de los supuestos contenidos en la legislación federal de aguas. Cabe señalar también que el dominio de los estados no interfiere con la capacidad de la Unión para entablar negociaciones sobre acuíferos transfronterizos (art. 21, inc. I, de CF/88), tanto es así que Brasil celebró, con Argentina, Paraguay y Uruguay, el Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní, cuyos supuestos deben ser obedecidos por los Estados.



3.2 Política Nacional de Recursos Hídricos: nueva forma de gestionar el agua

La Ley n° 9.433/1997, denominada Política Nacional de Recursos Hídricos, se compone de 57 artículos divididos en cuatro títulos: Título I – De la Política Nacional de Recursos Hídricos; Título II – Del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (Singreh); Título III – De las Infracciones y Sanciones; y Título IV – De las Disposiciones Generales y Transitorias. Sus dispositivos se refieren al agua en general, sin diferenciar las aguas superficiales de las subterráneas.

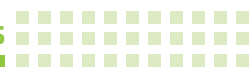
Este diploma transformó la gestión de los recursos hídricos, que era regida por el Código de Aguas (Decreto n° 24.643/1934), siendo fundamentada en una visión centralizadora, privatizadora y utilitaria, centrada principalmente en el uso del potencial hidráulico, sin preocupación por la conservación del agua (POMPEU, 2006; MILARÉ, 2020). La Ley n° 9.433/1997 elaboró un modelo de gobernanza basado en la gestión descentralizada, integrada y participativa (BARBI; JACOBI, 2007), que incorporaba las principales directrices del modelo de gestión integrada de los recursos hídricos.

La ley adoptó la cuenca hidrográfica como una unidad de gestión, permitió la participación de actores sociales, atribuyó valor económico al agua, determinó las organizaciones responsables de la gestión y estableció instrumentos para guiar el aprovechamiento, uso y protección del agua. Además, estableció que la gestión del agua debe integrar aspectos de cantidad y calidad, así como tener en cuenta los múltiples usos de los recursos hídricos, la gestión ambiental, el uso de la tierra, la planificación territorial y la relación con los sistemas estuarinos y las zonas costeras. La Figura 11 muestra sus fundamentos, objetivos, lineamientos, herramientas de gestión y marco institucional.

FUNDAMENTOS (art.1º)
<ul style="list-style-type: none"> • bien de dominio público; • recursos naturales limitados, dotados de valor económico; • uso prioritario para el consumo humano y la alimentación animal en situaciones de escasez; • uso múltiple de las aguas; • cuenca hidrográfica como unidad territorial para la aplicación del PNRH y el rendimiento de Singreh; • gestión descentralizada y participativa (Poder Público, usuarios y comunidades).
OBJETIVOS (art. 2º)
<ul style="list-style-type: none"> • garantizar la disponibilidad de agua necesaria para las generaciones actuales y futuras, en normas de calidad adecuadas a sus respectivos usos; • utilización racional e integrada de los recursos hídricos; • prevención y defensa contra fenómenos hidrológicos críticos; • fomentar y promover la extracción, preservación y uso del agua de lluvia.
DIRECTRICES GENERALES DE ACCIÓN (art. 3º)
<ul style="list-style-type: none"> • la gestión sistemática de los recursos hídricos, sin dissociar los aspectos cuantitativos y cualitativos; • adecuación de la gestión de los recursos hídricos a la diversidad física, biótica, demográfica, económica, social y cultural de las distintas regiones del país; • la integración de la gestión del agua con la gestión medioambiental; • articulación de la planificación del agua con la de los sectores usuarios y con la planificación regional, estatal y nacional; • articulación de la gestión del agua con el uso de la tierra; • la integración de la gestión de las cuencas fluviales con la de los sistemas estuarinos y las zonas costeras.
INSTRUMENTOS DE GESTIÓN (art. 5º)
<ul style="list-style-type: none"> • planes de Recursos Hídricos; • clasificación de las masas de agua en clases, según los usos predominantes del agua; • concesión de derechos de uso de los recursos hídricos; • tarificación del uso de los recursos hídricos; • Sistema de Información sobre Recursos Hídricos.
SINGREH (art. 33º)
<ul style="list-style-type: none"> • Consejo Nacional de Recursos Hídricos; • Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento; • Consejos de Recursos Hídricos de los Estados y del Distrito Federal; • Comités de Cuencas Hidrográficas; • autoridades públicas federales, estatales, de DF y municipales cuyas competencias estén relacionadas con la gestión de los recursos hídricos; • Agencias de Agua.

Figura 11 – Fundamentos, objetivos, lineamientos, herramientas de gestión y la arquitectura institucional de la Política Nacional de Recursos Hídricos

Fuente: Brasil (Ley nº 9.433/1997).



La Ley n° 9.433/1997 no trajo directrices específicas para las aguas subterráneas, ni definió el concepto y el alcance de la ordenación integrada ni cómo conciliar la territorialidad de la cuenca fluvial con la de los acuíferos, ni especificó cómo aplicar los instrumentos de ordenación a las particularidades de las aguas subterráneas ni cómo establecer una coordinación con otras administraciones, como las de medio ambiente, saneamiento, desarrollo territorial, costero, municipal, estatal y nacional. Al establecer, sin embargo, Singreh, se creó un aparato institucional capaz de adaptar y poner en funcionamiento la gestión a las particularidades de los recursos de aguas subterráneas.

Aunque su aplicación ha priorizado los recursos superficiales, existe un esfuerzo institucional gradual para incluir las aguas subterráneas. El Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), en el art. 3° de la Resolución n° 202/2018, definió que la gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas debe considerar los siguientes aspectos básicos:

- i. delimitación de las zonas de recarga y contribución de los acuíferos a los ríos conectados directamente;
- ii. estimación de la contribución de los acuíferos al caudal de base de los ríos;
- iii. estimación de la recarga y de las reservas explotables y renovables;
- iv. estimación de la disponibilidad integrada de aguas subterráneas y superficiales para los diversos usos;
- v. las redes de monitoreo hidrometeorológico e hidrogeológico necesarias.

3.3 El arreglo institucional para la protección de las aguas subterráneas: el Singreh

La implementación de la política hídrica es conducida por Singreh, que se materializa a través de un conjunto de agencias y entidades que actúan en la gestión de los recursos hídricos en Brasil, con jerarquías y atribuciones específicas, de acuerdo con su escala de acción (Figura 12). Sus objetivos se definen en el art. 32 de la Ley n° 9.433/97:

- coordinar la gestión integrada del agua;
- arbitrar administrativamente los conflictos relacionados con los recursos hídricos;
- aplicar la Política Nacional de Recursos Hídricos;
- planificar, regular y controlar el uso, la preservación y la recuperación de los recursos hídricos;
- promover la tarificación del uso de los recursos hídricos.

Debido a la división del dominio del agua, Singreh se divide en dos niveles de competencia: federal y estatal. Esta arquitectura político-administrativa se compone de tres categorías de órganos que se dividen según su naturaleza y área de trabajo (Granziera, 2015):

- *órganos colegiados*: Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH); Consejos de Recursos Hídricos de los Estados y del Distrito Federal y Comités de Cuencas Hidrográficas;
- *organismos y entidades de gestión y control*: Agencia Nacional de Agua y Saneamiento - Brasil (ANA), Agencias de Agua, agencias y entidades

de las autoridades públicas federales, estatales, del Distrito Federal y municipales, cuyas competencias se relacionan con la gestión y control de los recursos hídricos;

- *organizaciones civiles de recursos hídricos*: (a) consorcios y asociaciones intermunicipales de cuencas hidrográficas; (b) asociaciones regionales, locales o sectoriales de usuarios de recursos hídricos; (c) organizaciones técnicas y de enseñanza e investigación con interés en el área de los recursos hídricos; (d) organizaciones no gubernamentales con el objetivo de defender intereses difusos y colectivos de la sociedad; (e) otras organizaciones reconocidas por el Consejo Nacional o por los Consejos Estatales de Recursos Hídricos.

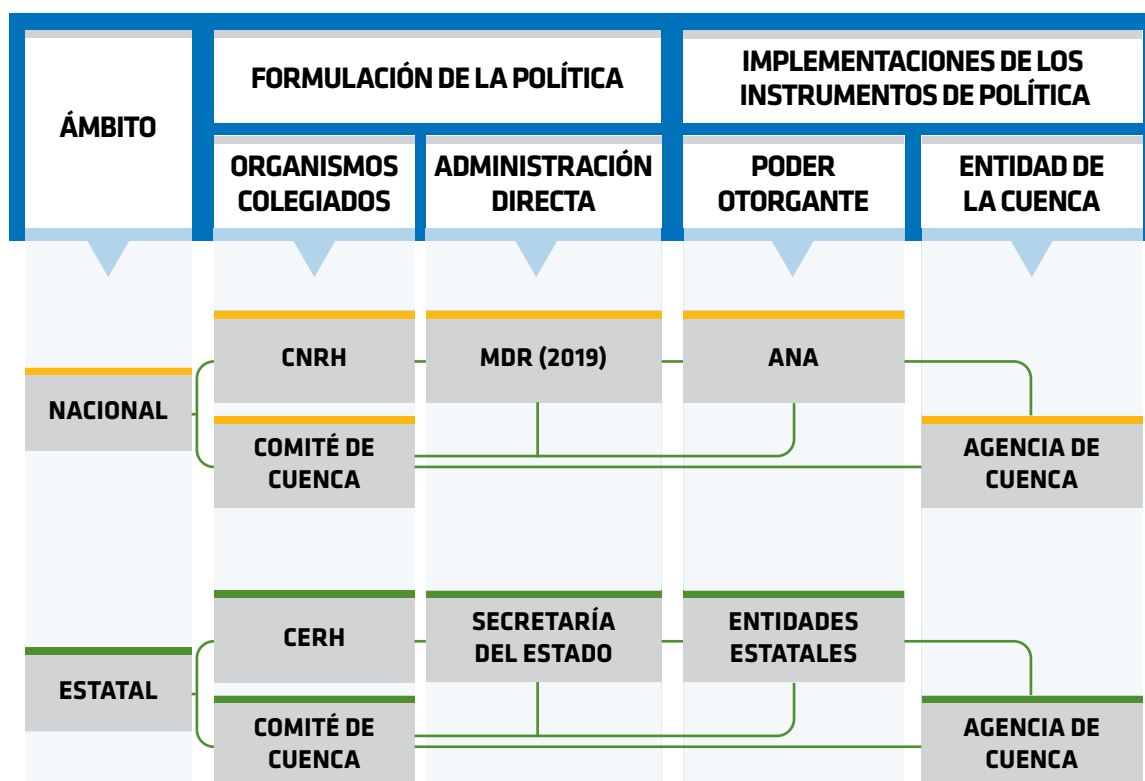


Figura 12 – Matriz y funcionamiento de Singreh*

Fuente: Villar y Granziera (2020, p. 48).

(*) La composición, naturaleza jurídica y atribuciones específicas de cada órgano o entidad se detallarán en los siguientes puntos.

Estos organismos se encargan de promover la gestión integrada del agua y de conciliar la territorialidad de los acuíferos y de la cuenca hidrográfica. Si los acuíferos superan los límites de la cuenca, estos organismos promoverán “la normalización de directrices y criterios para la recopilación de datos y la preparación de estudios hidrogeológicos necesarios para la identificación y caracterización de la cuenca hidrogeológica” (art. 4° de Res. CNRH n° 15, de 11 de enero de 2001). Los Comités de Cuenca Hidrográfica “procurarán el intercambio y sistematización de los datos generados para la perfecta caracterización de la cuenca hidrogeológica” (art. 4°, párrafo único).

En el caso de los acuíferos transfronterizos o interestatales, el Singreh es responsable de promover la integración de “agencias gubernamentales federales, estatales y del Distrito Federal que tienen competencias en la gestión de aguas subterráneas.” De existir conflictos en este proceso, los Consejos de Recursos Hídricos de los Estados y del Distrito Federal son los encargados de resolverlos en primera instancia, y en última instancia el CNRH (art. 5°, § 1° de la Res. CNRH n° 15/2001). En el caso de los acuíferos transfronterizos, deben tenerse en cuenta los acuerdos entre la Unión y los países del acuífero.

Además, el Sistema Nacional y los Sistemas Estatales y del Distrito Federal de Gestión de Recursos Hídricos deben guiar a los municipios a: i) promover la gestión integrada de las aguas subterráneas para seguir los planes de recursos hídricos; ii) proteger las áreas de recarga de acuíferos; y iii) fomentar la adopción de prácticas de reutilización y recarga artificial (Res. CNRH n° 15/2001).

Las aguas subterráneas son administradas por los sistemas estatales de recursos hídricos, los cuales, a su vez, integran un sistema nacional dotado de infraestructura institucional y normativa que guía la gestión estatal. Los estados son responsables de organizar la gestión de las aguas subterráneas, así como de controlar y supervisar su uso y calidad. Sin embargo, sus políticas deben estar en consonancia con la política nacional del agua y sus reglamentos.

Tradicionalmente, la gestión del uso (cantidad) es llevada a cabo por las agencias estatales de recursos hídricos, mientras que los aspectos de calidad son analizados por las agencias ambientales estatales, establecidas por el Sistema Ambiental Nacional (Sisnama). Los organismos que conforman la estructura nacional de Singreh juegan un papel importante en la dirección y coordinación de esta gestión, como se verá a continuación.

3.3.1 El Ministerio de Desarrollo Regional (MDR)

Con base en la Ley n° 13.844/2019, el Ministerio de Desarrollo Regional (MDR) es responsable de la política nacional de recursos hídricos, con competencia en las siguientes políticas nacionales: a) desarrollo regional; b) desarrollo urbano; c) protección y defensa civil; d) seguridad hídrica; e) riego; f) saneamiento; y g) planificación territorial. Por lo tanto, pasó a ser responsable de la elaboración de planes, programas, proyectos y acciones para la gestión de los recursos hídricos, infraestructura y garantía de la seguridad hídrica, riego, protección y defensa civil y gestión de riesgos y desastres, vivienda, saneamiento, movilidad y servicios urbanos (art. 29).

La Secretaría Nacional de Seguridad Hídrica (SNSH) es la principal responsable de la política hídrica y tiene las siguientes competencias: a) coordinar la formulación, revisión, implementación, monitoreo y evaluación de la Política Nacional de Seguridad Hídrica de la Política Nacional de Recursos Hídricos y sus instrumentos; b) formular políticas, planes y estándares y definir estrategias sobre la gestión integrada de los recursos hídricos, incluidas las aguas fronterizas y transfronterizas; c) coordinar la preparación y revisión de planes, programas y proyectos nacionales relacionados con las aguas subterráneas y monitorear el desarrollo de sus acciones, de acuerdo con el principio de gestión integrada de los recursos hídricos; y d) ejercer la función de Secretaría Ejecutiva del Consejo Nacional de Recursos Hídricos (art. 19, del Decreto n° 10.773/2021). La SNSH está compuesta por el Departamento de Obras Hídricas y Apoyo a Estudios sobre Seguridad Hídrica (Departamento de Proyectos

Estratégicos y Departamento de Recursos Hídricos y Revitalización de Cuencas Hidrográficas) (art. 2°, II, b del Decreto n° 10.773/2021), cuyas facultades están previstas, respectivamente, en los arts. 20, 21 y 22 del Decreto n° 10.773/2021.

En el caso específico de los acuíferos, el Departamento de Obras Hídricas y Apoyo a los Estudios sobre Seguridad Hídrica es el responsable de apoyar la ejecución de las obras de perforación de pozos y monitorear la implementación de las acciones de los proyectos dirigidos a ampliar el suministro de agua. El Departamento de Proyectos Estratégicos, a su vez, debe promover la elaboración de estudios y propuestas de la Política Nacional de Seguridad Hídrica y sus instrumentos y monitorear, supervisar y fiscalizar las acciones dirigidas al uso estratégico del agua y los recursos del suelo. El Departamento de Recursos Hídricos y Revitalización de Cuencas Hidrográficas es responsable de: a) coordinar, apoyar y monitorear la implementación de la Ley n° 9.433./1997 y el Plan Nacional de Recursos Hídricos; b) apoyar a los Estados y al Distrito Federal en la implementación de políticas y sistemas de manejo estatal; c) apoyar técnicamente la constitución y operación de comités de cuencas hidrográficas; d) proponer lineamientos para el manejo de los acuíferos fronterizos y transfronterizos; e) preparar planes, programas y proyectos relacionados con los recursos hídricos, incluyendo las aguas subterráneas; f) ejercer la Secretaría Ejecutiva de la CNRH; y g) articular la gestión de los recursos hídricos con el uso de la tierra.

3.3.2 El Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH)

Vinculado a la estructura MDR, el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) es el órgano consultivo y deliberativo nacional de Singreh. Su función es “promover la articulación de los planes nacionales, regionales, estatales y de los sectores usuarios elaborados por las entidades” que integran Singreh y “formular la Política Nacional de Recursos Hídricos”, en los términos de la Ley n° 9.433/1997 (art. 2° de la Ley n° 9.984/2000). Sus poderes se encuentran en el art. 1° del Decreto n° 10.000/2019 y su Reglamento Interno, aprobado

por Resolución CNRH n° 215, de 30 de junio de 2020. El CNRH es responsable de establecer directrices complementarias para la implementación de la Ley n° 9.433/1997, habiendo editado varias resoluciones destinadas a orientar la aplicación de los instrumentos de gestión de las aguas subterráneas (Tabla 1).

Resolución CNRH n° 15/2001	Establece directrices generales para la gestión de las aguas subterráneas
Resolución CNRH n° 16/2001	Prevé la concesión del derecho de uso de los recursos hídricos
Resolución CNRH n° 22/2002	Establece lineamientos para la inserción de aguas subterráneas en los instrumentos de los Planes de Recursos Hídricos
Resolución CNRH n° 29/2002	Define lineamientos para otorgar el uso de recursos hídricos para el uso de recursos minerales
Resolución CNRH n° 48/2005	Establece criterios generales para el cobro por el uso de los recursos hídricos
Resolución CNRH n° 76/2007	Establece directrices generales para la integración entre la gestión de los recursos hídricos y la gestión de las aguas minerales, termales, gaseosas, potable de mesa o de baño
Resolución CNRH n° 91/2008	Establece procedimientos generales para la clasificación de los cuerpos de agua superficial y subterránea
Resolución CNRH n° 92/2008	Establece criterios y procedimientos generales para la protección y conservación de las aguas subterráneas en el territorio brasileño
Resolución CNRH n° 107/2010	Establece directrices y criterios a adoptar para la planificación, implementación y operación de la Red Nacional de Monitoreo Integral Cualitativo y Cuantitativo de Aguas Subterráneas
Resolución CNRH n° 126/2011	Aprueba directrices para el registro de usuarios de recursos hídricos y para la integración de bases de datos relacionadas con el uso de recursos hídricos superficiales y subterráneos
Resolución CNRH n° 153/2013	Establece criterios y directrices para la implementación de la Recarga Artificial de Acuíferos en el territorio brasileño

Resolución CNRH n° 184/2016	Establece directrices y criterios generales para la definición de derivaciones y extracciones de recursos hídricos superficiales y subterráneos, y vertidos de efluentes en masas de agua y acumulaciones de volúmenes de agua de escasa expresión, considerados insignificantes, que son independientes de otorgar el derecho de uso de los recursos hídricos, y hace otras disposiciones.
Resolución CNRH n° 202/2018	Establece directrices para la gestión integrada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos que contemplen la articulación entre la Unión, los estados y el Distrito Federal con miras a fortalecer dicha gestión.

Tabla 1 – Principales Resoluciones emitidas por CNRH directamente relacionadas con las aguas subterráneas

Fuente: Villar y Granziera (2020).

Estos actos normativos nacionales guían a los estados y a los Comités de Cuenca Hidrográficas (CCH) en el proceso de aplicación de los instrumentos de gestión del agua a las aguas subterráneas y establecen directrices y acciones de gestión. Este es el caso de la implementación de la red integrada de monitoreo o las directrices generales para la recarga artificial y el intercambio de datos entre los organismos estatales de recursos hídricos y la Agencia Nacional de Minería. El CNRH cuenta con la Cámara Técnica de Integración con la Gestión Ambiental y Territorial (art. 9º, inc. IV del Decreto 10.000/2019), que se encarga de proponer acciones para la inserción de aguas subterráneas en la gestión del agua y sustituyó a la Cámara Técnica de Aguas Subterráneas.

El CNRH también tiene competencia para actuar en la resolución de conflictos entre Estados relacionados con las aguas superficiales y subterráneas. Este papel de mediación se destaca en el caso de conflictos sobre el uso de acuíferos interestatales o transfronterizos o que involucran la relación de los acuíferos con los ríos federales.



3.3.3 El desempeño de la ANA en aguas subterráneas y la gestión integrada de los recursos hídricos

La Agencia Nacional de Agua y Saneamiento - Brasil (ANA), originalmente llamada Agencia Nacional de Agua, fue creada por la Ley Federal n° 9.984, de 17 de julio de 2000. La Ley Federal n° 14.026, de 15 de julio de 2020, cambió su nombre original y amplió su lista de competencias, las cuales se encuentran previstas en los arts. 4° y 4°-A de la Ley n° 9.984/2000. El art. 1° de la Ley n° 9.984/2000 define la ANA de la siguiente forma:

una entidad federal que implementa la Política Nacional de Recursos Hídricos, que forma parte del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (Singreh) y es responsable de establecer estándares de referencia para la regulación de los servicios públicos de saneamiento y establece reglas para su desempeño, su estructura administrativa y sus fuentes de recursos.

Miembro de Singreh, la ANA es una autarquía en régimen especial, con autonomía administrativa y financiera. En 2019 se vinculó al MDR (Decreto n° 9.666/2019). Sus funciones son aplicar, en el ámbito de sus competencias, la Política Nacional de Recursos Hídricos y establecer normas de referencia para la regulación de los servicios públicos de saneamiento, así como promover la gestión de las aguas bajo el dominio de la Unión.

Con respecto a las aguas subterráneas, la ANA busca apoyar la gestión estatal y fortalecer la gestión integrada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, con énfasis en la relación río-acuífero. Su desempeño en el área de aguas subterráneas es principalmente a través de la implementación de la Agenda de Acción para la Gestión Integrada de los Recursos de Agua Superficial y Subterránea, en adelante, la Agenda de Aguas Subterráneas, cuyas funciones están previstas en el Programa Nacional de Aguas Subterráneas

(PNAS), incluido en el Plan Nacional de Recursos Hídricos. Esta agenda tiene como objetivo “proponer y ejecutar un conjunto de acciones que fortalezcan la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en Brasil.” Se estructura en cinco acciones principales que se dividen en varias actividades, como se muestra en la Figura 13:

ACCIONES	ACTIVIDADES
Promoción de la gestión integrada de los acuíferos conectados con los ríos federales	Diagnóstico de acuíferos conectados con ríos federales
	Preparación de evaluaciones para la gestión integrada
	Propuesta de marcos regulatorios y asignaciones
Elaboraciones de evaluaciones hidrogeológicas	Identificar y preparar estudios en acuíferos de zonas urbanas suministrados por AS
	Identificar y desarrollar evaluaciones hidrogeológicas en acuíferos interestatales y transfronterizos
	Elaborar portafolio para soluciones de suministro con AS en áreas con vulnerabilidad hídrica por eventos críticos
Sistematización de datos y seguimiento de AS	Operar y mantener el Sistema de Aguas Subterráneas SAS/SHRH
	Planificar y coordinar la Red Nacional de Monitoreo Integrada
	Cualitativo y Cuantitativo de Aguas Subterráneas
Apoyo a la elaboración de planes de recursos hídricos en el tema AS	Elaborar el diagnóstico de Aguas subterráneas en los planes de recursos hídricos
	Implementar las acciones previstas en los planes de recursos hídricos para AS
Capacitación	Planificación específica del desarrollo de capacidades en la gestión integrada
	Implantación de formación específica en gestión integrada

Figura 13 – Agenda de Aguas Subterráneas de ANA

Fuente: ANA (2015a, p. 12).

ANA se ha destacado en la expansión del conocimiento hidrogeológico a través de la cartografía de acuíferos y en la realización de estudios hidrológicos o proyectos piloto orientados a promover la gestión integrada río-acuífero. Además, impulsó estudios en acuíferos vitales para el abastecimiento de las siguientes Regiones Metropolitanas (RM): Maceió, Natal, Belém, Ilha de São Luís y Manaus.

En vista de su trabajo en la preparación de planes de recursos hídricos en cuencas hidrográficas bajo el dominio de la Unión, la ANA incluyó, de manera pionera, el enfoque integrado de aguas fluviales y acuíferas en los planes de cuenca del Río Doce, del Río Grande, del Río Paranapanema y del Río Paraguay. La Agencia actúa en estrecha coordinación con los órganos estatales de gestión de los recursos hídricos, los comités de cuenca y los agencias de cuenca, con miras a preparar esos planes.

La ANA también tiene la competencia de organizar, implementar y administrar el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH) (art. 4º, XIV de la Ley nº 9.984/2000). Asimismo, coordina y planifica la Red Nacional de Monitoreo Integral Cualitativo y Cuantitativo de las Aguas Subterráneas, según Resolución CNRH nº 107/2010.

En 2019, en asociación con el SGB-CPRM, la ANA inició un proyecto piloto en acuíferos con alta escurrimiento de base, con miras a la operación conjunta de puntos de monitoreo de la Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (RIMAS), de manera integrada con la Red Hidrometeorológica Nacional (RHN). El primer piloto contempla el Sistema Acuífero Urucuia, con unos 75 puntos operando juntos. Actualmente, RIMAS cuenta con 400 puntos de monitoreo, distribuidos en 24 acuíferos y 20 estados (GENARO; PEIXEINHO; MOURÃO, 2019).

Otro aporte de la ANA a las aguas subterráneas está relacionado con la creación del Programa Productor de Agua⁶. Este programa se lleva a cabo en asociación

6 Para obtener más información, consulte el sitio web del Programa Productor de Agua: <https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-produtor-de-agua>.

con varias instituciones donde se llevan a cabo proyectos locales de Pagos por Servicios Ambientales (PSA), que adoptan prácticas de reforestación y plantación de conservación para aumentar la permeabilidad del suelo y recuperar o aumentar el flujo de agua de los manantiales. La ANA incluso ha desarrollado una metodología (OLIVEIRA *et al.*, 2021) para identificar las áreas más favorables en las cuencas fluviales con el fin de implementar prácticas de conservación con el fin de maximizar la recarga.

El Servicio Geológico del Brasil (SGB-CPRM) es una empresa pública vinculada al Ministerio de Minas y Energía, con funciones de servicio geológico (véase la Ley federal nº 8.970/1994). Aunque no es un órgano integrante del Singreh, SGB-CPRM es un socio importante de la ANA en la recopilación de datos geológicos sobre aguas subterráneas. La institución cuenta con la mayor colección de datos geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos del país. Además, opera parte de la Red Hidrometeorológica Nacional (RHN) para la ANA y la Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (RIMAS). También es responsable del Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS), que tiene un gran número de pozos en Brasil. Esta colección consiste en información catalogada a través de fichas de pozos proporcionadas por instituciones públicas y privadas, gestores y usuarios de aguas subterráneas. Este es un registro que no es válido a los efectos de verificar la regularidad del uso del agua.

3.3.4 Comités de Cuencas Hidrográficas e inclusión de acuíferos en la gestión

Los Comités de Cuencas Hidrográficas son órganos colegiados con atribuciones normativas, deliberativas y consultivas, vinculados al Poder Público y subordinados a los respectivos Consejos de Recursos Hídricos (Res. CNRH nº 5/2000), y forman parte de los sistemas nacionales y estatales de gestión de los recursos hídricos. Si su área de operación es un río federal, están vinculados



al Consejo Nacional de Recursos Hídricos; y en el caso de ríos estatales, están vinculados al Consejo Estatal de Recursos Hídricos.

Es un órgano político que se materializa a través de la construcción de un foro de discusión entre el Poder Público, los usuarios y la sociedad civil, por lo tanto, no tienen personalidad jurídica. Estos órganos colegiados se caracterizan como la instancia más importante de participación local, integración de la planificación y gestión del agua (VILLAR; GRANZIERA, 2020). Ley n° 9.433/1997, en el art. 38, y la Resolución CNRH n° 5/2000 define sus principales competencias:

- promover el debate sobre cuestiones relacionadas con los recursos hídricos y articular el desempeño de las partes interesadas;
- arbitrar, en primera instancia administrativa, los conflictos relacionados con los recursos hídricos;
- aprobar el Plan de Recursos Hídricos de la cuenca;
- supervisar la aplicación del Plan de Recursos Hídricos de la cuenca y sugerir las medidas necesarias para alcanzar sus objetivos;
- proponer a la CNRH y a los Consejos Estatales de Recursos Hídricos las acumulaciones, derivaciones, captaciones y lanzamientos de escasa expresión, con el fin de eximir la obligación de concesión de derechos de uso de los recursos hídricos, según sus dominios;
- establecer los mecanismos de tarificación del uso de los recursos hídricos y sugerir los importes a cobrar;



- hacer compatibles los planes de cuenca de los cursos de agua afluentes con el Plan de Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica de su jurisdicción;
- aprobar las propuestas que le presente su respectiva agencia de Aguas;
- someter obligatoriamente a la audiencia pública los planes de recursos hídricos de la cuenca hidrográfica;
- desarrollar y apoyar iniciativas en materia de educación medioambiental;
- aprobar sus estatutos.

El CCH es competente para aprobar y monitorear la implementación de los planes de cuenca. Por lo tanto, debe verificar que el instrumento de planificación incorporó las aguas subterráneas, observando las directrices del CNRH, con énfasis en las Resoluciones 22/2002, 92/2008 y 202/2018. Además, el CCH es responsable de determinar los volúmenes considerados insignificantes y establecer los valores de la recolección de recursos de aguas subterráneas.

La Ley n° 9.433/1997, en su art. 37, establece que los CCHs pueden tener como área de operación: a) “la totalidad de una cuenca hidrográfica” (inc. I); b) “subcuenca hidrográfica del curso de agua principal de la cuenca, o afluente de este afluente” (inc. II); o c) “grupo de cuencas o subcuencas hidrográficas contiguas” (inc. III). La cuenca hidrográfica se refiere precisamente al “espacio geográfico delimitado por la respectiva cuenca, cuya escorrentía superficial converge a su interior, siendo capturado por la red de drenaje que le concierne.” (ANA, 2015, p. 7). Aunque esta unidad territorial se centra en las aguas superficiales, esto no impide la gestión de los acuíferos, especialmente debido a la idea de una gestión integrada de los recursos hídricos y la contribución de los acuíferos a las masas de agua superficiales.



Dado que la cuenca hidrográfica no siempre converge con la de los acuíferos, los CCHs deben desarrollar acuerdos de cooperación interinstitucional para construir una gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas. Por lo tanto, la Res. CNRH n° 15/2001, art. 4°, párrafo único, determinó que en el caso de acuíferos subyacentes a dos o más cuencas hidrográficas, corresponde a los CCHs buscar el intercambio y la sistematización de los datos generados para la perfecta caracterización de la cuenca hidrogeológica.

En general, los CCHs enfrentan dificultades para insertar agua subterránea en sus discusiones. Esto, en gran parte, se debe a una acción más centrada en los recursos hídricos superficiales, la falta de conocimiento sobre las aguas subterráneas y el personal especializado o el bajo compromiso social. Los programas e iniciativas de educación ambiental y capacitación técnica dirigidos a las aguas subterráneas pueden ayudar a transformar esta realidad.

3.4 Lo Estados y gestión de las aguas subterráneas

Los estados y el Distrito Federal son responsables de: a) definir las políticas estatales para los recursos hídricos que incluyen el agua subterránea; b) establecer la infraestructura institucional de los Sistemas Estatales de Gestión de Recursos Hídricos; c) llevar a cabo la implementación de los instrumentos de gestión del agua previstos en la Ley n° 9.433/1997; y d) promover estudios sobre acuíferos (FERNANDES, 2019).

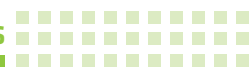
La gestión estatal del agua debe observar las normas nacionales relacionadas con el Derecho de Aguas, que es competencia exclusiva de la Unión (art. 22, inc. IV, de CF/88) (FERNANDES, 2019; VILLAR; GRANZIERA, 2020). La Ley n° 9.433/1997, el CNRH y el Consejo Nacional del Medio Ambiente - Conama establecen o regulan los instrumentos de gestión aplicables a las aguas subterráneas que deben incorporarse a las políticas estatales, así como recomiendan la realización de varios estudios técnicos dentro de las cuencas hidrográficas.

La Figura 14 muestra que los instrumentos de gestión del agua se pueden dividir en dos categorías: los dedicados al agua en general y los específicos al agua subterránea. Además de estos, la gestión del agua también está influenciada por la aplicación de instrumentos de otras políticas públicas que pueden contribuir a la gestión de los acuíferos. Los estados y el Distrito Federal juegan un papel fundamental en la aplicación de estos instrumentos, además de estimular a los municipios a considerar los acuíferos en la planificación territorial municipal.



Figura 14 – Instrumentos de gestión directa e indirecta de las aguas subterráneas

Fuente: Villar e Hirata (2022, p. 5).



Los estados y el Distrito Federal son responsables de la gestión de las aguas subterráneas, incluso en el caso de los acuíferos interestatales y transfronterizos. Este hecho subraya la importancia de que las políticas y sistemas estatales de recursos hídricos actúen en conjunto, especialmente para promover el monitoreo de los acuíferos, el intercambio de información y las medidas de gestión que protegen las áreas de recarga y el caudal subterráneo, cuando se comparten.

También es necesaria una mayor articulación entre los sistemas federal y estatal, algo que ya ocurre en el caso del agua superficial a través de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RNQA) y el Programa de Estímulo para la Divulgación de Datos de Calidad del Agua – Programa Qualiágua (Resolución ANA n° 643/2016).

3.5 Los Municipios y su papel en la gestión de los acuíferos

Aunque no hay aguas municipales, las entidades municipales son actores sociales importantes en la gestión del agua, ya que forman parte de los CCHs y tienen competencias específicas para temas directamente relacionados con la gestión del agua. Así pues, los municipios tienen competencia administrativa exclusiva para prestar servicios públicos de interés local (art. 30, V, de CF/88), que incluye la organización y prestación de servicios de saneamiento, ya sea directamente o bajo un régimen de concesión o permiso. Además, tienen competencia exclusiva para promover el ordenamiento territorial mediante la planificación y el control del uso, la parcelación y la ocupación de terrenos urbanos (art. 30, VIII, de CF/88) y competencia legislativa exclusiva en asuntos de interés local (art. 30, I, de CF/88).

El municipio podrá establecer varias restricciones al uso y ocupación de la tierra con el fin de proteger los acuíferos con base en los instrumentos previstos en el art. 4° del Estatuto de la Ciudad (Ley n° 10.257/2001), con

especial énfasis en el plan maestro, la zonificación municipal y la creación de espacios territoriales protegidos. Ejemplos de este tipo de restricciones administrativas son: a) adopción de parámetros ambientales más estrictos para la ocupación de áreas de recarga; b) prohibición de la instalación de actividades o empresas potencialmente contaminantes en áreas de recarga; c) imposición de mayores porcentajes de área verde o tecnologías que contribuyan a asegurar la permeabilidad del suelo; d) estímulo a la adopción de prácticas de reutilización de agua; o e) creación de unidades de conservación en áreas de recarga.

En este sentido, la Resolución CNRH n° 15/2001 determina que los organismos Singreh deben proponer a los municipios mecanismos de incentivo para la protección de los acuíferos y la adopción de prácticas de reutilización y recarga artificial del agua (art. 6°, párrafo único). Además, el ordenamiento territorial municipal debe cumplir con los lineamientos contenidos en los planes de cuenca para contribuir a la gestión integrada del agua y del suelo (art. 6°).

El art. 23 del CF/88 asigna la competencia administrativa común en materia de medio ambiente, que permite a los municipios disponer de acciones destinadas a proteger el medio ambiente y combatir la contaminación en cualquiera de sus formas; preservar los bosques, la fauna y la flora; promover la mejora de las condiciones básicas de saneamiento; registrar, supervisar y supervisar la concesión de derechos de investigación y explotación de los recursos hídricos y minerales en sus territorios (véase el art. 23 de CF/88). Ya la Ley Complementaria (LC) n° 140/2011, en el art. 9°, XIV, “a” y “b”, regulan la competencia municipal para la concesión de licencias ambientales de actividades que causen o puedan causar impacto ambiental local. Sin embargo, sin el apoyo de estas entidades administrativas, difícilmente habrá una buena gestión de los acuíferos.



3.6 Usuarios de aguas subterráneas y gestión hídrica

El uso de las aguas subterráneas se realiza a través de pozos o manantiales. Los principales usuarios de aguas subterráneas (mayores volúmenes extraídos) utilizan los pozos tubulares⁷, beneficiándose exclusivamente de estas aguas, cuyo uso está bajo su control. Sin la participación de estos usuarios, no es posible lograr el uso racional e integrado de los recursos hídricos ni garantizar la disponibilidad de agua para las generaciones presentes y futuras.

Los usuarios de aguas subterráneas tienen las siguientes responsabilidades: a) obtener los permisos necesarios para perforar el pozo y utilizar las aguas subterráneas (por ejemplo, licencia de perforación de pozos, concesión de derechos de uso u otros documentos que acrediten su uso exento o considerado insignificante); b) contratar compañías de perforación adecuadas que sigan las normas técnicas; c) registrar los pozos; d) operar y mantener el pozo de acuerdo con las normas técnicas, con el fin de protegerlo de contaminantes; e) Monitorear la calidad y cantidad de agua, manteniendo un bombeo dentro de los parámetros técnicos recomendados y los términos de la concesión; f) mantener la información necesaria sobre el perfil y operación del pozo; g) dotar a la extracción de agua subterránea de dispositivos que permitan la recolección de agua, mediciones de nivel, flujo y volumen capturado, con el fin de realizar monitoreo cuantitativo y cualitativo; h) recolectar las cantidades adeudadas caso este implementado el cobro por el uso del agua en la cuenca; e i) tapar los pozos abandonados o improductivos, según las instrucciones del órgano gestor de los estados. Además, los usuarios pueden adoptar soluciones tecnológicas que permitan

⁷ Los pozos se dividen en dos categorías principales: i) pozos tubulares, popularmente llamados artesianos o semi-artesianos, y ii) pozos excavados, que reciben varios nombres, según la región de Brasil. El pozo tubular es una perforación cilíndrica y vertical realizada mediante máquinas, recubiertas con material aditivo de PVC o acero en forma de tubos y filtros. El pozo artesiano es un pozo tubular en el que el agua fluye por encima de la superficie del suelo de forma natural, sin la ayuda de bombas.



ahorrar u optimizar el uso de los recursos hídricos, así como contribuir al proceso de inspección, denunciando o guiando a los propietarios no regulados (VILLAR; GRANZIERA, 2020).

En el caso de aguas subterráneas clasificadas como minerales, termales, potable de mesa o para fines de baño, destacan las siguientes obligaciones: a) obtener autorización de investigación y ordenanza minera de la Agencia Nacional de Minería - ANM con el fin de explorar el potencial de las aguas subterráneas relacionadas con las características de agua mineral, termal, potable de mesa o para fines balnearios; b) cumplir con los términos contenidos en la autorización de investigación y ordenanza minera emitida por la ANM; c) proteger y conservar las fuentes de agua mineral y utilizarlas de acuerdo con los preceptos técnicos; d) establecer perímetros de protección de las aguas minerales; e) observar los requisitos de la agencia estatal de gestión de recursos hídricos para este tipo de empresas en relación con la concesión, registro o autorizaciones de perforación (VILLAR; GRANZIERA, 2020, p. 129).

Desafortunadamente, la mayoría de los usuarios de aguas subterráneas son irregulares, es decir, no cumplen con las obligaciones legales y técnicas relacionadas con la perforación, construcción y operación de pozos. El incumplimiento de las obligaciones legales para el uso de los recursos hídricos puede generar responsabilidad civil, penal y administrativa, de conformidad con el art. 14, § 1° de la Ley n° 6.938/81 y art. 225, § 3° de la Constitución Federal. Existe jurisprudencia en los Tribunales Estatales que: a) autoriza el taponamiento de pozos que no tienen permiso de uso o no pueden acreditar su situación de dispensa de ese instrumento; b) obliga a los contaminadores o propietarios a remediar áreas contaminadas; y c) condena a los usuarios irregulares de aguas minerales a pagar indemnizaciones a la Unión, como compensación económica por el uso de un recurso federal sin la debida autorización (VILLAR; HIRATA, 2022; VILLAR; GRANZIERA, 2020).



3.7 Aguas subterráneas y aguas minerales del Brasil

Las aguas minerales y potables de mesa se extraen de fuentes naturales o subterráneas (ASSIRATI, 2018). Se caracterizan como “aguas subterráneas especiales” y “distintas del agua común por diferentes etapas de mineralización” (QUEIROZ; PONTES, 2015, p. 15). Toda el agua mineral es subterránea, sin embargo, no todas las aguas subterráneas son minerales (HIRATA *et al.*, 2019). Su extracción es intensa, clasificándose como el recurso mineral más explorado en el subsuelo brasileño (HIRATA *et al.*, 2019).

Brasil es el quinto mercado de agua embotellada más grande del mundo (ASSIRATI, 2018). En 2017, la composición de las bebidas fue de 21,9 billones de litros, mientras que los usos del baño consumieron 82,2 billones de litros en las 83 concesiones existentes distribuidas en los “estados de Goiás (con el 92,7% del volumen declarado utilizado), Santa Catarina (2.5%), São Paulo (2.0%), Mato Grosso do Sul (1.4%), Paraná (1.3%), Río Grande do Sul y Pernambuco (con menos del 1% cada uno).” (ASSIRATI, 2018, p. 2). En total, hay más de mil áreas de extracción de aguas minerales y de agua potable de mesa, de las cuales el 48% se ubican en la región Sudeste (QUEIROZ; PONTES, 2015). Estas aguas también están estrechamente vinculadas al turismo, ya sea con fines medicinales o termales. Aunque se carece de estudios sobre su papel económico, se construyeron importantes complejos turísticos a partir de su explotación, como el caso de Araxá (MG), Poços de Caldas (MG), Río Quente (GO), Caldas Novas (GO), Olimpia (SP), Águas de Lindoia (SP), Santo Amaro da Imperatriz (SC), Gramado (RS), entre otros. La Figura 15 muestra las concesiones mineras de agua mineral o potable de mesa en Brasil.

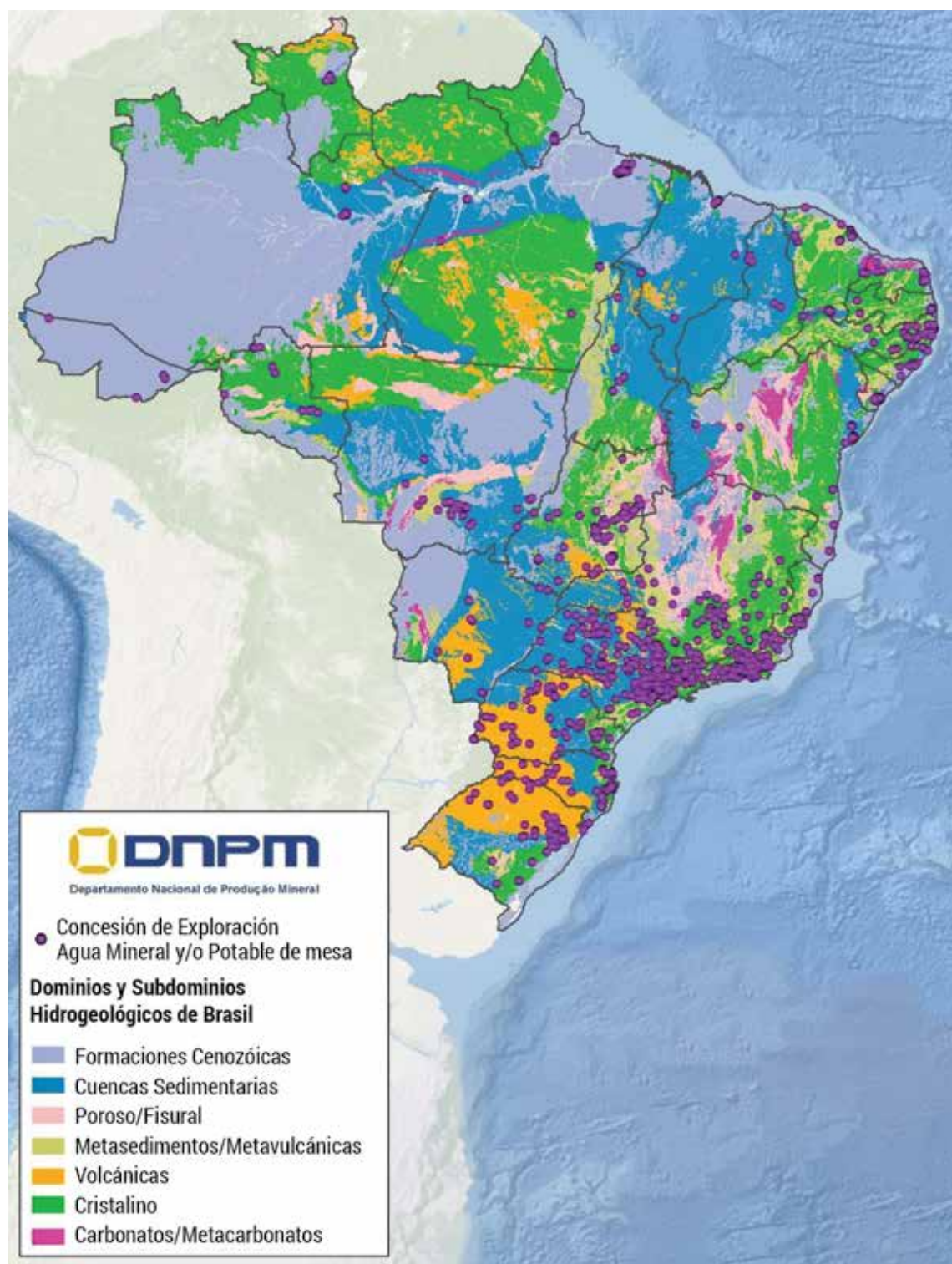


Figura 15 – Mapa de concesiones mineras de agua mineral y potable de mesa en el territorio brasileño

Fuente: Queiroz y Pontes (2015, p. 27).

La definición de agua mineral y agua potable de mesa se encuentra, respectivamente, en los arts. 1° y 3° del Código de Aguas Minerales (Decreto-Ley n° 7.841, de 8 de agosto de 1945):

Art. 1°. Las aguas minerales son aquellas provenientes de fuentes naturales o de fuentes captadas artificialmente que tienen una composición química o propiedades físicas o fisicoquímicas distintas de las aguas comunes, con características que les dan una acción medicinal.

Art. 3°. Se entenderá por “agua potable de mesa” el agua de composición normal procedente de fuentes naturales o de fuentes captadas artificialmente que cumplan únicamente las condiciones de potabilidad para la región.

El agua mineral tiene una acción medicinal, mientras que el agua potable de mesa solo cumple con los requisitos de potabilidad. Las aguas minerales se clasifican en 12 grupos según su composición química (Tabla 2). Las fuentes minerales se clasifican de acuerdo con los gases presentes y la temperatura (Tabla 3).

Clasificación	Caracterización según composición química
Radíferos	Sustancias radiactivas disueltas, lo que les da radiactividad permanente
Alcalino-bicarbonatados	Compuestos alcalinos equivalentes a al menos 0.200 gramos de bicarbonato de sodio por litro
Alcalino-terrosos	Compuestos alcalinotérreos equivalentes a al menos 0,120 gramos de carbonato de calcio por litro
a) alcalino-terrosos cálcicos	Al menos 0,048 g de catión Ca en forma de bicarbonato de calcio por litro
b) alcalino-terrosos magnesianos	Al menos 0,30 g de catión Mg en forma de bicarbonato de magnesio por litro

Clasificación	Caracterización según composición química
Sulfatadas	Al menos 0,100 gramos por litro de anión sulfato (SO_4^{2-}) combinado con los cationes sodio (Na^+), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{2+})
Sulfurosas	Al menos 0,001 gramos de anión de azufre (S) por litro
Nitradas	Al menos 0,100 gramos por litro de anión nitrato (NO_3^-) de origen mineral
Cloradas	Al menos 0,500 gramos de cloruro de sodio por litro
Ferruginosas	Al menos 0,005 gramos de catión de hierro (Fe) por litro
Radioactivas	Radón disuelto (Rd)
a) débilmente radiactivas	Contenido de radón de entre cinco y diez unidades de Mache por litro a 20 °C y 760 mm Hg de presión
b) radioactivas	Contenido de radón entre 10 y 50 unidades de Mache por litro a 20° C y 760 mm Hg de presión
c) fuertemente radiactivas	Contenido de radón superior a 50 unidades Mache por litro a 20 °C y 760 mm Hg de presión
Toriativas	Contenido de toronio (un isótopo de radón) en disolución, equivalente en unidades electrostáticas a dos unidades de Mache por litro, como mínimo
Carbógenas	200 mililitros de dióxido de carbono (CO_2) disuelto libre a 20°C y 760 mm Hg de presión por litro
Oligominerales	No alcanzan los límites establecidos en la legislación, pero han acreditado acción farmacológica acreditada por estudios sujetos a la supervisión y aprobación del Comité Permanente de Crenología.

Tabla 2 – Clasificación de las aguas minerales según sus características químicas

Fuente: Brasil (Decreto-ley nº 7.841/1945).

Clasificación de las fuentes en cuanto a los gases		Caracterización
Fuentes radiactivas	a) débilmente radiactivas	Al menos un caudal gaseoso de 1 litro por minuto (lpm) con un contenido de radón de entre 5 y 10 unidades Mache por litro de gas espontáneo a 20 °C y 760 mm Hg de presión
	b) radiactivas	Al menos 1 lpm con un caudal gaseoso de entre 10 y 50 unidades de Mache por litro de gas espontáneo a 20 °C y 760 mm Hg de presión
	c) fuertemente radiactivas	Al menos un caudal gaseoso de 1 l.p.m., con un contenido de radón de más de 50 unidades de Mache, por litro de gas espontáneo, a 20° C y 760 mm Hg de presión
Fuentes Toriativas		Como mínimo, un caudal gaseoso de 11.p.m., con un contenido de toronio de emergencia equivalente en unidades electrostáticas a dos unidades de Mache por litro
Fuentes sulfurosas		Aquellos que han definido el desprendimiento en la emergencia de gas sulfuro
Clasificación de las fuentes por temperatura		Caracterización
Fuentes frías		temperatura por debajo de 25°C
Fuentes hipotermas		temperatura entre 25 y 33°C
Fuentes mesotérmicas		temperatura entre 33 y 36°C
Fuentes isotérmicas		temperatura entre 36 y 38°C
Fuentes hipertérmicas		temperatura superior a 38°C

Tabla 3 – Clasificación de las fuentes minerales en términos de gases y temperatura
Fuente: Brasil (Decreto-ley nº 7.841/1945).

Aunque las aguas minerales o las potables de mesa sean subterráneas, están clasificadas como recursos minerales en el Código de Aguas Minerales. Cuando se clasificaron como recursos minerales, su dominio fue asignado a la Unión, con base en el art. 20, inc. IX, de la Constitución Federal de 1988⁸. En este

8 Art. 20. Los bienes de la Unión son: IX - recursos minerales, incluidos los del subsuelo.

sentido, el Decreto n° 9.406, de 12 de junio de 2018 determina que corresponde a la Unión “organizar la administración de los recursos minerales, la industria de producción mineral y la distribución, comercio y consumo de los productos minerales”, así como formular “políticas públicas para la investigación, minería, procesamiento, comercialización y uso de los recursos minerales” (art. 3°). El uso comercial de estos recursos requiere un régimen de autorizaciones sucesivas para la investigación y concesión minera, establecido por el Código de Minería (Decreto-ley n° 227/1967, que dio nueva redacción al Decreto-ley n° 1.985/1940).

La autorización de investigación y minería, inspección y regulación del comercio de estas aguas se realiza a través de la Agencia Nacional de Minería (ANM), establecida por la Ley Federal n° 13.575/2017 y vinculada a la Secretaría de Minas y Energía (MME). La ANM asumió todas las funciones del extinto Departamento Nacional de Producción Mineral (DNPM) (véase el art. 32).

El Código de Aguas Minerales permite que cualquier agua subterránea sea clasificada como recurso mineral, desde que se cumpla con las normas impuestas por la ANM y los requisitos de potabilidad de la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria (Anvisa). De esta manera, el aprovechamiento de las propiedades de las aguas minerales, termales y gaseosas para fines de embotellado o uso balneario, o el embotellado de las aguas potables de mesa, están bajo la tutela de la Unión.

El agua subterránea se clasifica como depósito de agua mineral si cumple con los siguientes requisitos: a) se utiliza para los fines especiales previstos en la legislación mineral; b) cumple con los requisitos de calidad necesarios; y c) lleva a cabo el procedimiento administrativo con la ANM, solicitando la autorización de la concesión de investigación y minería, los cuales son obligatorios para quienes deseen explotar este potencial balneario o de llenado (BOSON, 2002; CAUBET, 2009; QUEIROZ; PONTES, 2015).



La autorización de investigación es el momento en que se produce el primer contacto entre el solicitante y la ANM, definiéndose como “la ejecución de los trabajos necesarios para la definición del yacimiento, su evaluación y la determinación de la viabilidad de su uso económico” (art. 2º, inc. V, de la Res. CNRH 76/2007). A su vez, la concesión de ordenanza minera para aguas minerales, termales, gaseosas, potable de mesa o destinadas a fines balnearios se define como el “acto administrativo por el que se concede al interesado el derecho al uso industrial de depósitos de agua mineral, termal, gaseosa, potable de mesa o destinada a fines balnearios” (art. 2º, inc. VI, de la Res. CNRH 76/2007).

Por otro lado, si el uso de las aguas subterráneas se destina a fines generales, tales como suministro, riego o uso industrial, están sujetas al régimen jurídico de los recursos hídricos estatales, que requiere las siguientes formalidades: a) el otorgamiento del derecho de uso de los recursos hídricos o prueba de su exención (por ejemplo, declaración de uso insignificante); b) inscripción en el registro de usuarios; y c) cobro por el uso del agua, si se implementa en la cuenca. El otorgamiento del derecho de uso de las aguas subterráneas debe cumplir con las prioridades de los planes de recursos hídricos y esta extracción se contabiliza en el balance hídrico de la cuenca.

La explotación de los depósitos de agua mineral puede afectar la gestión de los recursos hídricos, interfiriendo con la disponibilidad de aguas subterráneas y superficiales, sin embargo, esto generalmente no se contabiliza en el balance hídrico de la cuenca. Para superar este problema, se emitió la Resolución CNRH n° 76/2007, que “establece directrices generales para la integración entre la gestión de los recursos hídricos y la gestión del agua mineral, termal, gaseosa, potable de mesa o destinada a fines balnearios”. Esta resolución reconoció “la necesidad de la integración y la acción articulada entre los organismos y entidades, cuyas competencias se refieren a los recursos hídricos, la minería y el medio ambiente.” Para facilitar este procedimiento, el art. 3º de la Res. CNRH n° 76/2007 recomienda que los

órganos de gestión de aguas y minerales compartan información y definan conjuntamente el contenido y los estudios técnicos de los procedimientos administrativos implicados. La información que debe compartirse se refiere al menos a:

- I. títulos de derechos mineros para la investigación o extracción de agua mineral, termal, gaseosa, potable de mesa o destinada a fines balnearios para su inclusión en el Sistema de Información sobre los Recursos Hídricos y consideración por los organismos de gestión de los recursos hídricos;
- II. actos administrativos relacionados con el uso de los recursos hídricos, tales como: concesiones de derechos de uso, manifestaciones previas y autorizaciones para la construcción de pozos para su inclusión en el sistema de información de recursos minerales y consideración por el órgano de gestión de recursos minerales;
- III. la zona objeto de una solicitud de investigación con fines minerales, termales, gaseosos, potable de mesa o destinada a fines balnearios;
- IV. el área o perímetro de protección de la fuente establecido por el órgano de gestión de los recursos minerales, para que sea considerado por los órganos de gestión de los recursos hídricos;
- V. las áreas de restricción y control establecidas por el órgano competente de gestión de los recursos hídricos o previstas en los planes de recursos hídricos, para que sean consideradas por el órgano de gestión de los recursos minerales;
- VI. el seguimiento cuantitativo y cualitativo disponible en los órganos gestores;

- VII.** a las necesarias para la formulación de planes de recursos hídricos y la realización de comités de cuencas hidrográficas (art. 3°, párrafo único).

Además, el órgano gestor de los recursos minerales debe observar los actos y usos habilitantes inscritos en el órgano gestor de los recursos hídricos en el momento del análisis de la “solicitud de autorización para investigación de agua mineral, termal, gaseosa, potable de mesa o destinada a fines balnearios” (art. 6°). El órgano gestor de los recursos hídricos, por su parte, en el momento del análisis de la solicitud de concesión del derecho de uso de los recursos hídricos, debe observar “la información contenida en los requisitos de investigación, permisos de investigación y decretos de extracción para aguas minerales, termales, gaseosas, potable de mesa o destinadas a fines de baño” (art. 7°).

A pesar de representar un paso positivo, su operacionalización enfrenta limitaciones en la promoción de la coordinación de la gestión federal del agua mineral con el manejo estatal de las aguas subterráneas (SERRA, 2009; SCALON, 2011; VILLAR; GRANZIERA, 2020). La Res. CNRH n° 76/2007 determina que se observa la información otorgada por los órganos de dirección, sin embargo, estas no están vinculadas a su decisión. Esto representa un problema porque como explican Villar y Granziera, (2020, p. 115):

Las aguas minerales, termales, gaseosas, potable de mesa y destinadas al baño son recursos minerales, pero también son recursos hídricos que integran el balance hídrico de la cuenca y constituyen uno de los múltiples usos del agua. De hecho, estas aguas tienen una naturaleza jurídica especial, ya que forman parte del campo de acción de dos sistemas jurídicos, el mineral y de los recursos hídricos.

Idealmente, estos usuarios deben someterse tanto a estándares mineros como de recursos hídricos, ya que tienen naturalezas complementarias (FERREIRA



Foto: AdobeStock
Parque das Águas, ubicado en la ciudad de Caxambu - MG.

JÚNIOR, 2007). Los decretos de extracción garantizan al explorador del yacimiento el derecho de acceso al recurso mineral (agua mineral, termal, gaseosa, potable de mesa o destinada al baño). La concesión del derecho de uso de los recursos hídricos, a su vez, asegura que esta explotación esté sujeta a control socioambiental (FERREIRA JÚNIOR, 2007).

Sobre la base del dominio estatal de las aguas subterráneas y las competencias concurrentes y comunes, los Estados pueden establecer normas que exijan la necesidad de conceder permiso de derecho de uso de aguas subterráneas clasificadas como minerales, termales, gaseosas, potable de mesa y destinadas a usos balnearios (FERREIRA JÚNIOR, 2007). Además, pueden someter su extracción a recolección, algo que sucede, por ejemplo, en el estado de Ceará. Este requisito está justificado en vista del art. 12, inc. II de la Ley nº 9.433/1997, que condiciona toda “extracción de agua de acuíferos subterráneos” a la concesión del derecho de uso. La ley utiliza el término genérico *agua* y no *recursos hídricos subterráneos*.

En Brasil, aunque el tema todavía está poco explorado, ya existen conflictos relacionados con el uso de las aguas subterráneas y minerales, como es el caso de Caldas Novas y Río Quente en el estado de Goiás (ANDRADE; ALMEIDA, 2012) o, aún, en los balnearios hidro minerales del Circuito del Agua, de Minas Gerais (Caxambu, São Lourenço, Cambuquira y Lambari) (BORGES, 2006).

4

LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA



Foto: Eduardo Gomes de Assis/Banco de imágenes ANA
Surgimiento de acuíferos kársticos en la Cuenca del Pacuí en
la frontera de Montes Claros con Coração de Jesus - MG.

4 LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA

La Política Nacional de Recursos Hídricos estableció varios instrumentos para la gestión del agua dulce. El propósito de este capítulo es presentarlos y demostrar cómo se aplican a las aguas subterráneas.

4.1 Planes de Recursos Hídricos

Los planes de recursos hídricos estaban previstos en la Ley n° 9.433/1997 y constituyen el principal instrumento para la “construcción de consenso en la cuenca hidrográfica” (PORTO; PORTO, 2008, pág. 51). Su aplicación va más allá de la planificación tradicional, ya que incorpora procesos participativos que reúnen a las autoridades públicas, la sociedad civil y los agentes económicos (PORTO; PORTO, 2008). La ley los define como planes maestros que tienen por objeto “sustanciar y orientar la aplicación de la Política Nacional de Recursos Hídricos y la ordenación de los recursos hídricos” (art. 6° de la Ley n° 9.433/1997).

La implementación de estos planes se realiza en tres escalas de acción: nacional, estatal y de cuenca hidrográfica (art. 8° de la Ley n° 9.433/1997). La Figura 16 resume los tipos de planes según la política (nacional o estatal), su alcance geográfico y las entidades colegiadas responsables de aprobar la planificación de los recursos hídricos en Brasil.

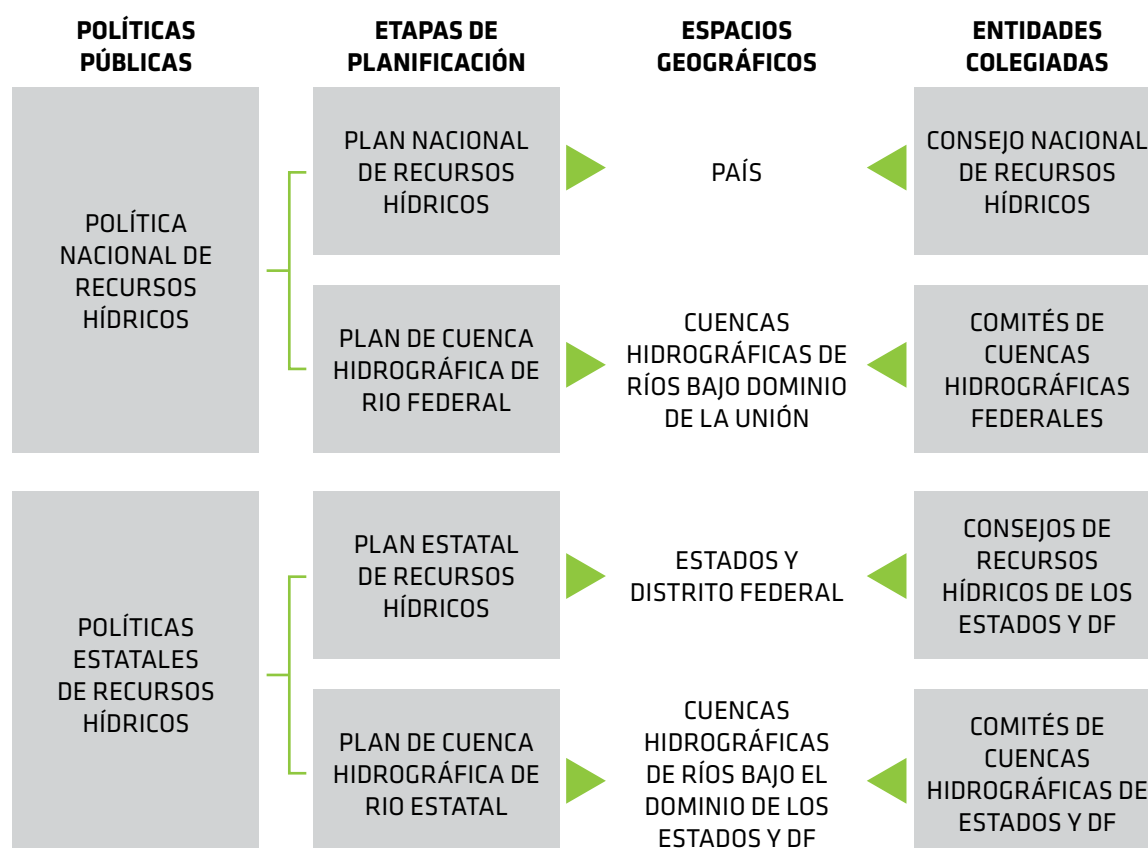


Figura 16 – Políticas públicas, tipos de planes, áreas geográficas y entidades coordinadoras en el proceso de planificación de los recursos hídricos en Brasil

Fuente: Lanna, Pereira y Hubert (2002, p. 110).

En la misma cuenca hidrográfica pueden coexistir varias escalas de planes de recursos hídricos: federales, estatales, de cuencas estatales o de cuencas interestatales. Así, tenemos: a) el Plan Nacional de Recursos Hídricos; b) los Planes Estatales de Recursos Hídricos; y c) los Planes de Cuencas Hidrográficas, que se subdividen en dos categorías según el tipo de cuenca: a) Planes de Cuencas Hidrográficas, bajo dominio federal; y b) Planes de Cuencas Hidrográficas de Ríos, bajo dominio estatal (LANNA; PEREIRA; HUBERT, 2002). Cada uno de estos planes incorpora acuíferos correlacionados con su escala de acción en la cuenca.



4.1.1 Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH)

El primer Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) fue aprobado en 2006 (Res. CNRH n° 58, de 30 de enero de 2006), vigente hasta 2020 y revisiones periódicas cada cuatro años, en adelante PNRH 2006-2020. Desde su inicio, en dos exámenes se han establecido las prioridades para los ciclos 2012-2015 y 2016-2020. La vigencia de este último ciclo se pospuso a diciembre de 2021 (Res. CNRH n° 216, de 11 de septiembre de 2020). La Secretaría Nacional de Seguridad Hídrica (SNSH), vinculada al MDR, con el apoyo técnico de la ANA y en conjunto con la CNRH, han discutido el nuevo Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH 2022-2040), cuya función es orientar la elaboración de los Planes Plurianuales (PPAs) federales, estatales o distritales y sus respectivos presupuestos anuales.

La estructura del PNRH 2006-2020 se compone de cuatro volúmenes: i) Panorama y estado de los recursos hídricos en Brasil (v. 1), que se ocupa del diagnóstico de las aguas; ii) Aguas para el futuro: escenarios para 2020 (v. 2), que describe los escenarios de referencia para la planificación; iii) Directrices (v. 3); y iv) Programas Nacionales y Objetivos (v. 4) (art. 1° de la Res. CNRH n° 58/2006).

Paralelamente al PNRH 2006-2020, la ANA elabora anualmente el informe titulado *Panorama de los Recursos Hídricos en Brasil*. Este informe sirve como subsidio para varias acciones gubernamentales que incluyen el monitoreo del PNRH 2006-2020, el monitoreo del Plan Plurianual del gobierno federal o el análisis del Sistema de Cuentas Económicas Ambientales del Agua. El informe también resume datos clave sobre las aguas superficiales y subterráneas en el país.

PNRH 2006-2020 tiene varios programas y subprogramas que se detallan en su volumen 4. En total, se prevén siete programas nacionales: Programa I – Estudios Estratégicos de Recursos Hídricos; Programa II – Programa de Desarrollo

Institucional del GIRH en Brasil; Programa III – Desarrollo e Implementación de Instrumentos de Gestión de Recursos Hídricos; Programa IV – Desarrollo tecnológico, capacitación, comunicación y difusión de información en el GIRH; Programa V – Programa de Articulación Intersectorial, Interinstitucional e Intrainstitucional de Gestión de Recursos Hídricos; Programa VI – Programa de Uso Múltiple y Gestión Integrada de Recursos Hídricos; Programa VII – Programas Sectoriales enfocados en Recursos Hídricos, además de seis programas regionales. El agua subterránea está incluida en los subprogramas y acciones prioritarias de estos programas, y es parte del Programa Nacional de Agua Subterránea (Programa VIII) que, aunque tiene cobertura nacional y transfronteriza, se incluyó en el componente de los programas regionales de recursos hídricos.

El Programa VIII se dividió en tres subprogramas: i) Ampliación del Conocimiento Hidrogeológico Básico; ii) Desarrollo de Aspectos Institucionales y Legales; y iii) Capacitación, Comunicación y Movilización Social (CARDOSO, 2009). De acuerdo con el *Plan Nacional de Recursos Hídricos: prioridades 2012-2015*, cada región hidrográfica definió acciones prioritarias para las aguas subterráneas, como la implementación de redes de monitoreo, elaboración de mapas hidrogeológicos, registro de usuarios, protección de áreas de recarga, desarrollo de estudios técnicos, etc. (BRASIL, 2011). Se espera que las acciones establecidas como prioridades en PNRH 2006-2020 se mantengan en PNRH 2022-2040. Un ejemplo es la ampliación de la Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas, cuyo objetivo era una expansión del 100%, lo que no fue posible debido a limitaciones presupuestarias. A pesar de ello, la Red se amplió de 369 a 409 pozos. Parte de estos pozos de monitoreo comenzaron a ser operados conjuntamente entre SGB-CPRM y ANA, con la inclusión de estos datos piezométricos en la Red Hidrometeorológica Nacional (RHN), lo que contribuye a promover la gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas, permitiendo análisis de la relación acuífero y fluvial, como fue el caso del Sistema Acuífero Urucuia y el Río São Francisco.



4.1.2 Planes Estatales de Recursos Hídricos (PERHs)

Los Planes Estatales de Recursos Hídricos (PERH) tienen jurisdicción limitada al ámbito de cada Estado Miembro y al Distrito Federal, y depende de ellos describir la situación de los recursos hídricos bajo el dominio estatal o distrital. Su principal objetivo es orientar el manejo de las aguas a través de lineamientos y criterios a escala estatal o distrital, con el fin de contemplar las necesidades expresadas en los planes de cuenca. Su elaboración, actualización e implementación es responsabilidad de los órganos que integran los Sistemas Estatales de Gestión de Recursos Hídricos, según lo previsto en la legislación estatal.

Cada Estado, con base en su Política Estatal de Recursos Hídricos, establece los lineamientos y criterios para la elaboración de PERH, con el fin de contemplar los siguientes aspectos:

- directrices, objetivos, criterios y objetivos de la gestión hídrica estatal;
- las prioridades financieras en el fomento de los programas regionales de gestión de los recursos hídricos;
- estrategias para la coordinación de las cuestiones intercuenas;
- diagnóstico y monitoreo de la macro situación de los recursos hídricos en el estado (disponibilidad, calidad, demanda, usos y conflictos);
- programas, proyectos y acciones estatales para los recursos hídricos;
- lineamientos para la aplicación de instrumentos de gestión de recursos hídricos dentro de las cuencas hidrográficas estatales.

Debido al dominio estatal de las aguas subterráneas, los PERH son partes clave en la estimulación de la gestión de los acuíferos. Entre la información que debe ser cubierta por el instrumento se encuentran: a) datos sobre la disponibilidad, demanda y calidad de las aguas subterráneas; b) propuesta de áreas para la explotación de estas aguas o medidas de protección, tales como áreas de restricción al uso de aguas subterráneas; c) identificación de puntos prioritarios para el monitoreo; d) estimulación de mecanismos de coordinación entre CCHs que comparten el mismo acuífero; y e) definición de programas estatales específicos para aguas subterráneas, etc.

4.1.3 Planes de Recursos Hídricos de Cuencas Hidrográficas

Esta es la principal herramienta de gestión prevista por las políticas de recursos hídricos y se aplica a cuencas hidrográficas pequeñas, medianas y grandes. También se denomina *Plan Maestro del Agua*, *Plan Maestro de Recursos Hídricos*, *Plan Integrado de Recursos Hídricos* y *Plan de Cuenca Hidrográfica* – la denominación más común de la implementación de las Políticas Estatales de Recursos Hídricos que comenzó en 1991 (São Paulo, 1991), así como la edición de la *Política Nacional de Recursos Hídricos*.

Los planes de recursos hídricos de las Cuenca Hidrográficas se pueden definir como:

[...] instrumentos de gestión de los recursos hídricos a largo plazo, previstos en la Ley n° 9.433, de 1997, con un horizonte de planificación compatible con el período de implementación de sus programas y proyectos, que tienen por objeto apoyar y orientar la implementación de las Políticas Nacionales, Estatales y Distritales de Recursos Hídricos y la gestión de los recursos hídricos dentro de las respectivas cuencas hidrográficas. (art. 2° de la Resolución CNRH n° 145/2012).



Este documento establece la planificación estratégica de la gestión del agua, y su disposición legal y reglamentaria se encuentra en la Ley n° 9.433/1997 y en varias Resoluciones de la CNRH, destacando los artículos 10 al 13 de la Resolución de la CNRH n° 145/2012, que establecen sus etapas y contenido mínimo: i) Diagnóstico de la situación de los recursos hídricos; ii) Pronóstico; y iii) Plan de acción (Figura 17). El proceso de planificación debe incluir las directrices de otros planes de recursos hídricos (nacionales, estatales u otros planes de cuenca hidrográfica que eventualmente se superpongan). La Resolución CNRH n° 145/2012 presenta la estructura mínima de los planes, sin embargo, dentro del ámbito de competencia complementaria y común, los estados pueden incorporar elementos adicionales.

El Plan Hidrográfico de Recursos Hídricos de Cuencas Hidrográficas debe contener el programa de acción plurianual, cuyo periodo de uso habitual es de 12 años. Este documento establece el programa de inversiones (corto, mediano y largo plazo), el cual debe contener: i) el nombre de la acción planificada; ii) la clasificación en líneas programáticas de la colegiada administradora; iii) el objetivo establecido; iv) el plazo (año) de ejecución; v) el área de cobertura de la acción; vi) la prioridad de ejecución; vii) la previsión del responsable de la ejecución; viii) el ejecutor de la acción; ix) el costo estimado de la acción; y x) las fuentes de los recursos financieros necesarios. Las Resoluciones CNRH n° 15/2001, 22/2002, 92/2008, 145/2012 y 202/2018 determinan la información básica que los Planes de Cuenca deben incorporar sobre los acuíferos (Figura 18). Sin estos análisis, la explotación de los acuíferos pone en peligro la disponibilidad de agua superficial y subterránea, causando daños al medio ambiente y a los usuarios.



Figura 17 – Directrices para la elaboración de Planes de Recursos Hídricos de Cuencas Hidrográficas

Fuente: CNRH (Resolución n° 145/20120).

Contenido mínimo de los Planes de Cuenca para las Aguas Subterráneas (AS)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Caracterización especial ▶ Cómputo de las AS en el balance hídrico. ▶ Estimativa de las recargas y descargas y de las reservas explotables. ▶ Caracterización física, química y biológicas de las AS. ▶ Medidas de uso y protección de acuíferos.
Monitoreo de cantidad y calidad, con resultados presentados en mapas	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Red de monitoreo de los niveles de agua de los acuíferos y su calidad ▶ Densidad de los puntos de monitoreo. ▶ Frecuencia de monitoreo de los parámetros.
Acciones potencialmente impactantes y protección o mitigación, incluyendo medidas de emergencia	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Descripción y previsión de la estimación de presiones socioeconómicas y ambientales sobre la disponibilidad. ▶ Estimación de las fuentes puntuales y difusas de la contaminación. ▶ Evaluación de las características y usos del suelo ▶ Análisis de otros impactos de la actividad humana relacionada a las AS.
Acciones potencialmente impactantes y protección o mitigación, incluyendo medidas de emergencias	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Áreas de Protección Máxima ▶ Perímetros de Protección de Pozos ▶ Áreas de restricción y control de uso de AS. <ul style="list-style-type: none"> ■ Disponibilidad de RH considerando la descarga de base de los ríos. ■ Riesgo de inestabilidad geométrica y el uso de ocupación del suelo. ■ Sostenibilidad de la explotación en áreas costeras.
Evaluaciones hidrológicas integradas	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Delimitación de las áreas de recarga y de contribución de los acuíferos para los ríos directamente conectados. ▶ Contribución de los acuíferos para el caudal de base de los ríos. ▶ Recarga y reservas explotables y renovables. ▶ Disponibilidad hídrica integrada subterránea y superficial para los diversos usos.

Figura 18 – Aguas subterráneas en los Planes de Cuenca, sobre la base de las Resoluciones del CNRH

Fuente: CNRH (Resoluciones n° 15/2001, 22/2002, 92/2008, 145/2012 y 202/2018).

Los Planes de Cuenca son instrumentos fundamentales para insertar los acuíferos en la gestión y permitir el uso conectivo de las aguas subterráneas y superficiales. El uso conjunto de estas aguas optimiza las reservas de agua debido a la capacidad de almacenamiento de los acuíferos que pueden proporcionar agua en períodos de sequía y ser ahorrados en períodos de lluvia, con el fin de permitir su recarga o incluso fomentarla a través de mecanismos de recarga (FOSTER; STEENBERGEN, 2011). Los Planes de Cuencas Interestatales han buscado la interacción de las aguas a través de los Planes Integrados de Recursos Hídricos, sin embargo, aún queda un largo camino por recorrer ante la falta de datos o problemas relacionados con la implementación de instrumentos de manejo.

4.2 Instrumentos de gestión específicos para las aguas subterráneas

La Resolución Conama n° 396/2008 determina que las agencias ambientales, junto con las agencias de gestión de recursos hídricos, establezcan Áreas de Protección de Acuíferos, Perímetros de Protección de Pozos de Suministro y Áreas de Restricción y Control de Aguas Subterráneas (arts. 20 y 21). La Resolución CNRH n° 22/2002 expresa que los planes de cuenca deben prever medidas para el uso y la protección de los acuíferos (art. 3, VI). La Res. CNRH n° 92/2008, a su vez, establece la definición de zonas de protección de acuíferos, áreas de restricción y control, y perímetros de protección de pozos basados en estudios hidrogeológicos (art. 2, I, II y III).

4.2.1 Áreas de Protección del Acuíferos (APA)

Las Áreas de Protección del Acuíferos (APA) están destinadas a proteger las zonas de recarga del acuífero, sin embargo, dado que presuponen restricciones sobre el uso y la ocupación de la tierra, el instrumento no se ha utilizado, inclusive se indaga si este podría aplicarse sin el apoyo de los municipios, que tienen competencia exclusiva para la planificación territorial municipal.



4.2.2 Áreas de Restricción y Control del Uso de Aguas Subterráneas

Las áreas de restricción y control de aguas subterráneas son medidas excepcionales y temporales destinadas a restringir el uso o la extracción de agua en situaciones en las que existe un compromiso en la calidad o cantidad de agua subterránea. Según la Res. CNRH n° 92/2008 (art. 4°), la agencia estatal de gestión de recursos hídricos, en conjunto con la agencia ambiental, puede establecer estas áreas mediante la aprobación del CCH y el Consejo Estatal de Recursos Hídricos, siempre que esté técnicamente justificado por la necesidad de protección, conservación y recuperación de: i) manantiales de abastecimiento; ii) ecosistemas amenazados por la degradación de las aguas subterráneas; iii) áreas vulnerables a la contaminación; iv) áreas contaminadas; o v) áreas *sujetas* o identificadas como sobreexplotación.

El principal objetivo de estas medidas es corregir las distorsiones en el uso de los acuíferos que puedan comprometer la calidad o la cantidad de agua. Su implementación es un proceso complejo que requiere la articulación del Poder Público, colegiados, gestores y usuarios, así como el monitoreo de la evolución de la situación del acuífero. Varios Estados reglamentaron y aplicaron este instrumento, como el Estado de São Paulo, que, mediante la Resolución CRH n° 052, de 15 de abril de 2002, reglamentó las directrices y procedimientos para la definición de esas esferas.

4.2.3 Perímetros de Protección de Pozos (PPP)

Los Perímetros de Protección de Pozos (PPP) están destinados a proteger la extracción de agua subterránea y han sido regulados por varios estados. La legislación minera exige que las aguas clasificadas como minerales o de consumo de mesa establezcan áreas o perímetros de protección, según lo establecido en los arts. 12 y 13 del Código de Aguas Minerales y la Ordenanza DNPM n° 231/1998.

Proteger el entorno de los pozos de suministro público es una estrategia eficiente para minimizar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas suministradas a la población (NAVARRETE; GARCÍA, 2003). Esta protección se basa en el control de actividades que tienen potencial contaminante y la aplicación de restricciones al uso de la tierra en áreas de recarga acuífera que contribuyen al pozo. Cuanto más cerca de la cuenca, más restrictivas son las medidas adoptadas, siendo esta área protegida denominada Perímetro de Protección de Pozos (PPP) (Figura 19).

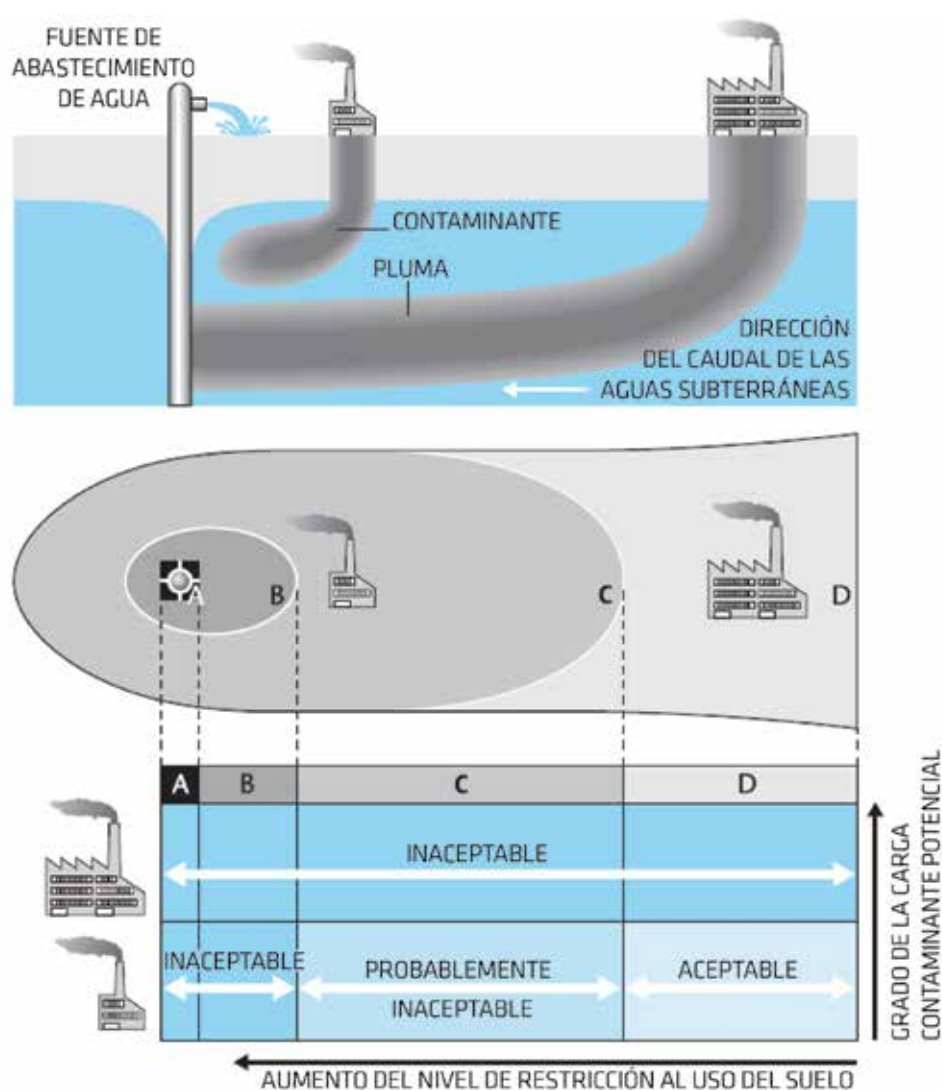


Figura 19 – Concepto de Perímetro de Protección de Pozos

Fuente: Foster *et al.* (2006, p. 9).



Cada pozo perforado define una Zona de Contribución (ZC) específica, que es el área en la que toda la recarga del acuífero contribuye al pozo, en función de las diferentes características del acuífero (permeabilidad, porosidad, espesor y recarga) y las condiciones constructivas y operativas del pozo (profundidad de penetración en el acuífero, caudal y tiempo de operación). Por lo tanto, los PPP se establecen en el ZC del pozo (FOSTER *et al.*, 2006).

La delimitación de los perímetros de protección se basa en diferentes criterios, siendo los más utilizados: a) distancia longitudinal a partir del pozo; o b) tiempo recorrido por el agua en el acuífero hasta llegar al pozo (llamado *tiempo de tránsito*). Existen varias metodologías para la delimitación de los perímetros de protección, cuya elección también depende de la cantidad y calidad de los datos existentes, la importancia de la captura para la oferta de la población atendida y los recursos financieros disponibles. Además de las bases técnicas, la implementación de áreas de protección de pozos debe ser un proceso participativo con los usuarios y la sociedad en general. Por ejemplo, en el Estado de São Paulo, la legislación exige que las PPP se basen en estudios y sean aprobadas por el Consejo Estatal de Recursos Hídricos.

4.3 Clasificación de masas de agua subterránea, según usos preponderantes

La clasificación de las masas de agua en clases, de acuerdo con los usos predominantes del agua para acuíferos, está regulada por la Resolución Conama n° 396/2008 y la Resolución CNRH n° 91/2008. El art. 29 de la Resolución Conama n° 396/2008 determina que la clasificación de las masas de agua subterránea debe considerar al menos los siguientes aspectos:

- I. la caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica;
- II. la caracterización de la vulnerabilidad y los riesgos de contaminación;
- III. el registro de los pozos existentes y en explotación;

- IV. el uso y la ocupación de la tierra y su historia;
- V. la viabilidad técnica y económica de la clasificación;
- VI. la localización de posibles fuentes de contaminación;
- VII. la calidad natural y las condiciones de calidad de las aguas subterráneas.

Sobre la base de estos criterios, las aguas subterráneas se clasifican en clases, tal como se definen en el art. 3° de la Resolución Conama n° 396/2008 (Tabla 4).

Clases	Usos
Clase Especial	Aguas de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de los mismos destinados a la conservación de ecosistemas en unidades de protección integral y aquellas que contribuyen directamente a los tramos de cuerpos de aguas superficiales enmarcadas como una clase especial.
1	Aguas acuíferas, conjunto de acuíferos o porción de los mismos, sin alteración de su calidad por actividades antropogénicas, y que no requieren tratamiento para ningún uso predominante por sus características hidrogeoquímicas naturales.
2	Aguas de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de los mismos, sin alterar su calidad por actividades antropogénicas, y que pueden requerir un tratamiento adecuado, dependiendo del uso predominante, debido a sus características hidrogeoquímicas naturales.
3	Aguas de los acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de los mismos, con alteración de su calidad por actividades antropogénicas, para las cuales no es necesario tratamiento debido a estas alteraciones, pero que pueden requerir un tratamiento adecuado, dependiendo del uso predominante, debido a sus características hidrogeoquímicas naturales.
4	Aguas de acuíferos, conjunto de acuíferos o porción de acuíferos, con alteración de su calidad por actividades antropogénicas, y que sólo pueden ser utilizadas, sin tratamiento, para el uso predominantemente menos restrictivo.
5	Aguas de los acuíferos, conjunto de acuíferos o parte de los mismos, que pueden ser alterados en su calidad por actividades antropogénicas, destinadas a actividades que no tienen requisitos de calidad para su uso.

Tabla 4 – Clases de clasificación de las aguas subterráneas, segundos usos preponderantes
Fuente: Conama (Resolución n° 396, de 3 de abril de 2008).

De acuerdo con la Resolución Conama n° 396/2008, las aguas subterráneas clasificadas en la Clase Especial deben “mantener sus condiciones naturales de calidad” (art. 5°). Los estándares de las clases 1 a 4, a su vez, se basan en

los Valores de Referencia de Calidad (VRQ) y los Valores Máximos Permitidos (VMP) para cada uso predominante (art. 4°), observando los Límites Prácticos de Cuantificación (LQPs) presentados en el Anexo I de la Resolución Conama n° 396/2008. Los VRQ deben ser definidos por el organismo competente, que podría ser Conama o los organismos estatales, sin embargo, tales normas aún no se han definido. La Tabla 5 muestra los estándares para cada clase:

Clases	Usos
Clase especial	Debe mantener sus condiciones naturales de calidad.
1	Presenta, para todos los parámetros, VRQ inferiores o iguales a los Valores Máximos Permitidos (VMPr+) de los usos preponderantes (art. 7° de la Res. Conama n° 396/2008).
2	Presenta, en al menos uno de los parámetros, un Valor de Referencia de Calidad (VRQ) superior a su respectivo Valor Máximo Permitido más Restrictivo (VMPr+) de los usos preponderantes (art. 8° de la Res. Conama n° 396/2008).
3	Debe cumplir con el Valor Máximo Permitido más Restrictivo (VMPr+) entre los usos preponderantes para cada uno de los parámetros, excepto cuando se trate de una condición natural del agua (art. 9° de la Res. Conama n° 396/2008).
4	Debe cumplir con los Valores Máximos Permitidos menos Restrictivos (VMPr-) entre los usos preponderantes para cada uno de los parámetros, excepto cuando se trate de una condición natural del agua (art. 10 de Res. Conama n° 396/2008).
5	No contará con condiciones y estándares de calidad, de acuerdo con los criterios utilizados en la Resolución Conama n° 396/2008 (art. 11).

Tabla 5 – Normas para la clasificación de las aguas subterráneas

Fuente: Conama (Resolución n° 396, de 3 de abril de 2008).

El procedimiento para la clasificación de las masas de agua superficial y subterránea está definido por la Resolución CNRH n° 91/2008 y se divide en las siguientes etapas: i) diagnóstico; ii) pronóstico; iii) propuesta de metas relacionadas con las alternativas de clasificación; iv) deliberación del Comité y del Consejo de Recursos Hídricos; y v) ejecución del programa de clasificación (Figura 20).

Las tres primeras etapas son de carácter técnico, lo que requiere la participación social a través de consultas públicas, reuniones técnicas, talleres y otros (art. 3°, § 2°, de la Resolución CNRH n° 91/2008). El proceso de edición de las deliberaciones y la ejecución del programa marco, a su vez, tiene un carácter más político/de toma de decisiones, que debe ser conducido por el CCH, junto con su Agencia Técnica (COSTA *et al.*, 2019, p. 45). Hasta ahora, este instrumento no se ha utilizado para las aguas subterráneas.



Foto: AdobeStock

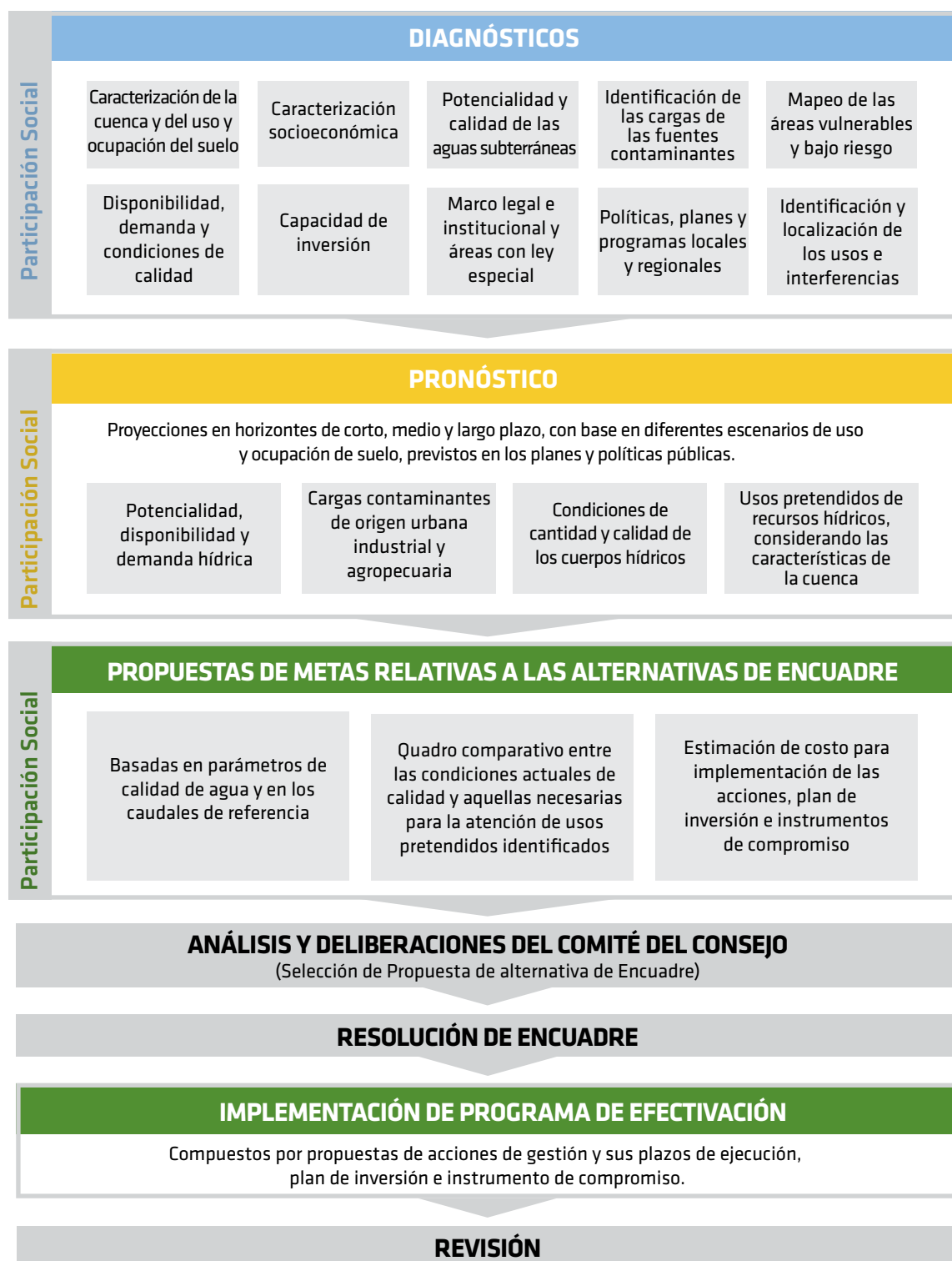


Figura 20 – Pasos del procedimiento para enmarcar masas de agua superficiales y subterráneas, definido por la Resolución n° 91/2008

Fuente: CNRH (Resolución n° 91, de 5 de noviembre de 2008).

4.4 Concesión del derecho a utilizar los recursos de aguas subterráneas

La concesión del derecho de uso de los recursos hídricos se definió como “el acto administrativo por el cual la autoridad otorgante concede al concesionario, con anterioridad o a través del derecho de uso de los recursos hídricos, por un plazo determinado, en los términos y condiciones expresados en el acto respectivo, considerando la legislación específica vigente” (art. 1° de la Resolución CNRH n° 16/2001). Este instrumento permite conciliar el carácter público del agua con su uso particular, a través del rol de gestión de los estados (ANA, 2007).

“La función de la concesión será la de repartir el agua disponible entre las demandas existentes o potenciales para que se generen los mejores resultados para la sociedad” (LANNA, 2000, p. 89). Las prioridades para la concesión del permiso deben incluirse en los Planes de la Cuenca Hidrográfica (art. 7°, VIII, de la Ley n° 9.433/1997), aprobada por el CCH.

Este instrumento es un reflejo del poder de policía del Estado, ya que regula el uso de los recursos hídricos a través de la concesión de una autorización formal al usuario que pretenda utilizarlos de forma privada, por un período determinado y de acuerdo con las condiciones establecidas (PORTO; PORTO, 2008). Su plazo máximo es de 35 años, contados a partir de la fecha de publicación del acto administrativo respectivo (art. 16 de la Ley n° 9.433/1997). No obstante, este plazo podrá ser prorrogado por la autoridad otorgante siempre que se respeten las prioridades establecidas en los Planes de la Cuenca Hidrográfica (art. 6°, § 1° de la Res. CNRH n° 16/2001).

Su concesión no implica la disposición del agua, sino más bien un derecho de uso (art. 18 de la Ley n° 9.433/1997). La concesión tiene como objetivo equilibrar la disponibilidad hídrica con la demanda, permitiendo al poder Público controlar el uso del agua con el fin de garantizar los objetivos de la gestión y, al mismo tiempo, garantizar el acceso del usuario al agua (LEAL, 1998). Es un instrumento de “control



cuantitativo y cualitativo de los usos del agua” y una condición para el “ejercicio de los derechos de acceso al agua” (Ley n° 9.433/1997, art. 11). Los usos que dependen de la concesión se enumeran en el art. 12 de la misma ley federal:

Art. 12. Los derechos de los siguientes usos de los recursos hídricos están sujetos a la concesión del Poder Público:

- I. derivación o captación de una parte del agua existente en un cuerpo de agua para el consumo final, incluido el suministro público, o la aportación del proceso de producción;
- II. extracción de agua del acuífero subterráneo para consumo final o insumo del proceso productivo;**
- III. vertido en un cuerpo de aguas residuales y otros residuos líquidos o gaseosos, tratados o no, con fines de dilución, transporte o eliminación final;
- IV. el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico;
- V. otros usos que cambien el régimen, la cantidad o la calidad del agua en un cuerpo de agua. (BRASIL, 1997).

La ley incluía expresamente la necesidad de otorgar el derecho de uso para la extracción de agua de acuíferos (art. 12, inc. II). Debido al dominio estatal de las aguas subterráneas, los estados y el Distrito Federal serán responsables de regular este instrumento, observando siempre las normas nacionales. Además de la extracción de agua por pozos, algunos estados, en base al art. 12, inc. V, requieren este instrumento para casos de bajada de aguas subterráneas en edificios y obras civiles o para bajar el nivel de agua en actividades mineras (en este caso, ver Resolución CNRH n° 29/2002). En estas situaciones, el foco no



está en el uso, sino en los efectos que estas actividades pueden generar en el acuífero o en las aguas en general.

En virtud de la competencia privativa de la Unión para legislar en el ámbito del agua, este instrumento sólo puede ser objeto de renuncia en los casos previstos en el art. 12, párrafo 1º de la Ley nº 9.433/1997:

§ 1º. Independientemente de la concesión por parte del Poder Público, tal como se define en el reglamento:

- I. el uso de los recursos hídricos para satisfacer las necesidades de los pequeños centros de población, distribuidos en las zonas rurales;
- II. las derivaciones, las captaciones y los lanzamientos considerados insignificantes;
- III. las acumulaciones de volúmenes de agua considerados insignificantes. (BRASIL, 1997).

En tales casos, se renuncia a la solicitud de concesión del derecho de uso, sin embargo, los Estados imponen otras limitaciones administrativas, tales como: inscripción en el registro de pozos o usuarios y obtención de un documento que acredite el carácter de uso exento o insignificante. Corresponde a los CCHs estatales proponer pautas y criterios para establecer los usos considerados insignificantes para las aguas subterráneas y luego a los CERH aprobarlos. En ausencia de determinación de estos criterios por parte del CCH o la ausencia de esta entidad, la autoridad otorgante estatal hace la definición de manera provisional (ver Resolución CNRH nº 184/2016).

Los volúmenes considerados insignificantes pueden variar entre cuencas o en regiones específicas de una cuenca. Su definición debe analizar los siguientes

criterios: a) el “porcentaje de la referencia volumétrica de una determinada porción de acuífero como límite individual de captación”; b) el “límite porcentual del compromiso colectivo cuantitativo de porciones de acuífero”; y c) el “efecto acumulativo, en el mismo cuerpo de agua, de todas las derivaciones, captaciones, liberaciones o acumulaciones de volúmenes de agua de escasa expresión, considerados insignificantes” (art. 6° de la Res. CNRH n° 184/2016).

La concesión del derecho de uso de las aguas subterráneas debe “evitar el compromiso cualitativo y cuantitativo de los acuíferos y de las masas de aguas superficiales conectadas a ellos” (art. 3°, inc. III de la Res. CNRH n° 15/2001). Para ello, la decisión debe basarse en los estudios hidrogeológicos descritos en la Resolución CNRH n° 92/2008 (art. 2°) (Figura 21).

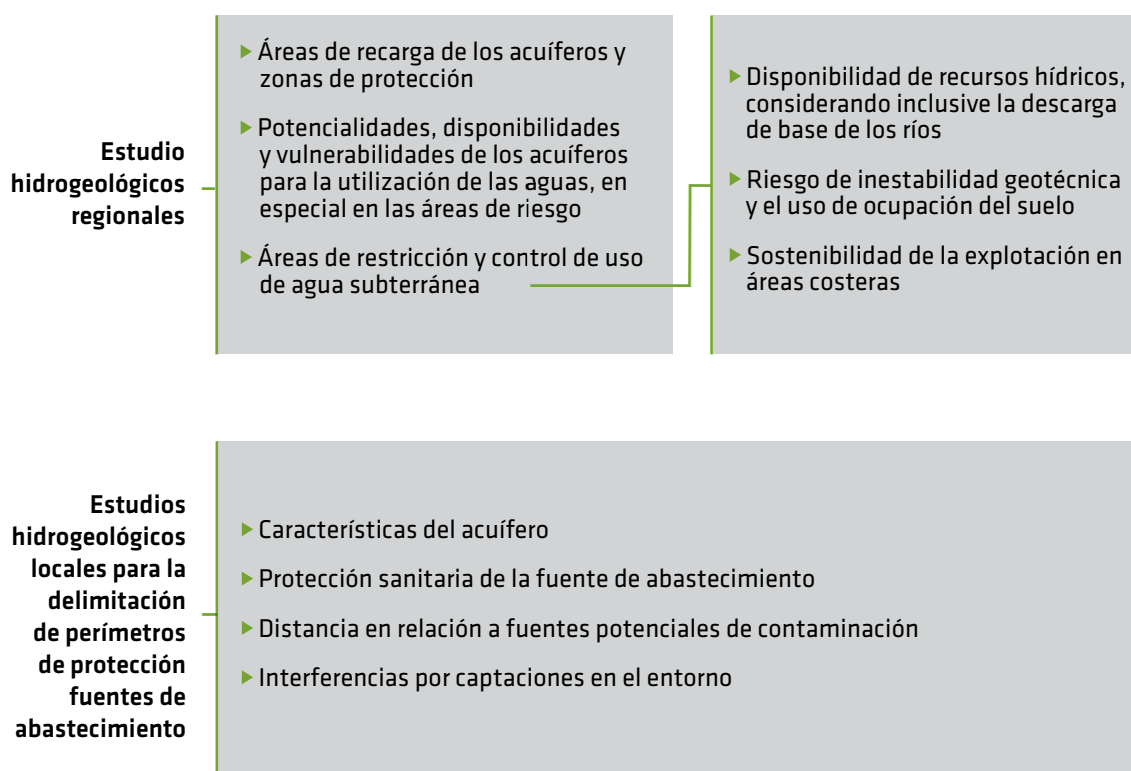


Figura 21 – Estudios hidrogeológicos y concesión del derecho de uso de las aguas subterráneas

Fuente: CNRH (Resolución n° 92/2008), adaptada por los autores.

La concesión del derecho de uso de las aguas subterráneas debe tener en cuenta los siguientes criterios: a) características de los acuíferos; b) necesidades de los usuarios; c) posibilidad de interferencia entre pozos y niveles máximos de drenajes permitidos; d) riesgo de intrusión salina; e) manejo de la demanda entre usuarios de aguas subterráneas y superficiales; y f) articulación con el manejo del suelo (Costa et al., 2011).

El principal desafío para su implementación, sin embargo, se refiere a la baja adherencia de los usuarios al instrumento. La mayoría absoluta de los pozos son ilegales o irregulares. Los pozos ilegales “son aquellos cuya perforación y uso de aguas subterráneas no está soportado por la ley, por lo tanto su existencia está prohibida y, en consecuencia, si el interesado solicitara una solicitud de otorgamiento, ésta sería denegada.” (VILLAR; HIRATA, 2021). A su vez, los pozos irregulares “son aquellos cuya perforación y uso de aguas subterráneas está soportado por la ley, pero se requiere el cumplimiento de ciertos procedimientos o se imponen restricciones o condiciones para este uso, que no han sido cumplidas por el propietario del pozo.” (VILLAR; HIRATA, 2021).

La ilegalidad dificulta la aplicación de otros instrumentos, como la preparación de planes de cuenca y la tarificación de su uso. Lamentablemente, en el caso de los usos legalizados, la mayoría de las subvenciones se otorgan sin las evaluaciones hidrológicas necesarias o no se basan en metodologías apropiadas. La ANA (2013b, p. 64) recomienda que el cálculo de la disponibilidad de agua subterránea se guíe por los conceptos de:

- **Recarga Potencial Directa (RPD):** es “una porción de la precipitación media anual que se infiltra y llega efectivamente a los acuíferos libres, constituyendo así la reserva renovable o regulatoria”.



Foto: AdobeStock

- **Coeficiente de Sostenibilidad (CS):** porcentaje máximo recomendado para explotar la RPD, con el fin de evitar efectos adversos sobre el acuífero o disminución de los caudales base de ríos interconectados.
- **Reserva Potencial Explorable Estimada (RPE):** corresponde a la porción de la RPD indicada por el CS.

El estado de Mato Grosso do Sul utiliza esta metodología para delimitar los volúmenes disponibles para la concesión. Sin embargo, existen otras formas de determinar estos valores, tales como: a) flujo promedio del acuífero; b) porcentaje del flujo del pozo; c) flujo base del drenaje superficial; d) flujo de seguridad; e) reducción disponible; y f) análisis cualitativo de los datos de prueba de bombeo (Campos; Correa, 2013).

La precariedad de la aplicación de este instrumento pone en peligro los objetivos de la política de aguas. Sin control de uso, no hay forma de garantizar la disponibilidad de agua para las generaciones presentes y futuras o el uso racional e integrado, mucho menos prevenir y mitigar los eventos hidrológicos críticos resultantes del uso inadecuado del agua (VILLAR, 2016). La Tabla 6 resume las principales razones de la ilegalidad de los pozos y propone acciones para combatir esta práctica.

Actores sociales	Factores facilitadores	Acciones de mitigación
Usuarios	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de conocimientos sobre las aguas subterráneas en relación con los aspectos técnicos y jurídicos; • No ver problemas o consecuencias en el uso de las aguas ilegalmente; • No conocen los beneficios de tener el pozo regularizado; • No existen incentivos o compensaciones financieras o de servicio que hagan que la regularización del pozo sea atractiva para el usuario; • No hay voluntad del usuario de pagar las cuotas de financiación sin ver una devolución de este pago. • Resistencia a aceptar el pago de la tarifa de alcantarillado proporcional al volumen de agua recolectada en el pozo; • Hay un entendimiento de que tener un pozo no regulado es una ofensa menor y no daña a la sociedad o al medio ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hacer que los usuarios sean conscientes de la necesidad y los beneficios de la regularización de pozos. • Proporcionar información técnica y de disponibilidad de agua subterránea consistente para ayudar al usuario en la prospección y captación del recurso. • Ofrecer compensación por uso regularizado. Por ejemplo, a través de la orientación técnica operativa, sobre la bomba y la eficiencia energética, la calidad del agua, etc. • Buscar formas de incluir al propietario del pozo como socio en la gestión de las aguas subterráneas.
Órganos Gestores	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de voluntad política para fiscalizar y controlar los pozos; • Ausencia de tradición institucional y estabilidad organizacional; • Conocimientos y datos limitados sobre el comportamiento de los acuíferos; • Registros de pozos inconsistentes e información insuficiente sobre la disponibilidad de agua subterránea para ayudar a los usuarios o promover una buena gestión; • Baja capacidad operativa de campo, lo que perjudica la fiscalización efectiva; • Rara vez hay sanciones para los pozos irregulares, en muchos casos sólo se requiere llevar a cabo la regularización; • Los gestores o la sociedad no consideran que las aguas subterráneas sean una prioridad; • Los procesos de concesión son a menudo complejos, burocráticos y requieren mucho tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar inspecciones efectivas, identificar pozos irregulares, promover la regularización y aplicar la ley y sus sanciones; • Utilizar la fiscalización y la aplicación de sanciones de manera ejemplar, incluyendo la divulgación de estas acciones para demostrar la acción del Estado; Crear programas de regularización de pozos, especialmente en áreas de uso intenso, indicios de sobreexplotación y conflictos entre usuarios vecinos.

Actores sociales	Factores facilitadores	Acciones de mitigación
Perforadoras	<ul style="list-style-type: none"> • La omisión de la obligación de conceder y los riesgos y consecuencias derivados de la falta de autorización; • Conocimientos limitados sobre hidrogeología para comprender los impactos del uso irregular; • Hay perforadores que actúan sin registro en el organismo de control de la actividad (CREA) o cuyo técnico responsable dedica menos tiempo del mínimo establecido; • Falta de cooperación entre los órganos de gestión y control de la actividad de perforación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer una relación entre el órgano gestor de los recursos hídricos y la crea, incluido el intercambio de datos. • Realizar la inspección y control efectivo de la actividad de perforación de pozos. • Concienciar a los perforadores para que realicen solo simulacros autorizados y de acuerdo con las normas técnicas.

Tabla 6 – ¿Por qué tenemos tantos pozos irregulares y cómo cambiar esta situación?

Fuente: Foster, Hirata y Custodio (2021), adaptación de Antonio Luiz Pinhatti.

4.5 Cobreo por el uso de los recursos hídricos: medios para promover la gestión de las aguas subterráneas

El cobro por el uso de los recursos hídricos está previsto en el art. 5º, inc. IV de la Ley nº 9.433/1997. El art. 19 de dicha ley y la Resolución CNRH nº 48/2005 definen que sus objetivos son:

- I. reconocer el agua como un bien público limitado, dotado de valor económico, y dar al usuario una indicación de su valor real;
- II. fomentar la racionalización del uso del agua y su conservación, recuperación y gestión sostenible;
- III. obtener recursos financieros para financiar estudios, proyectos, programas, obras e intervenciones, contemplados en los Planes de Recursos Hídricos, promoviendo beneficios directos e indirectos a la sociedad;

- IV. estimular la inversión en descontaminación, reutilización, protección y conservación, así como el uso de tecnologías limpias y que ahorren agua, de acuerdo con la clasificación de las masas de agua en clases de usos predominantes; y,
- V. inducir y estimular la conservación, manejo integrado, protección y recuperación de los recursos hídricos, con énfasis en áreas inundables y recarga de acuíferos, manantiales y bosques ribereños, a través de compensaciones e incentivos a los usuarios. (CNRH, Resolución n° 48/2005, art. 2°.).

Este instrumento económico y de control se basa en los principios del contaminador pagador y del usuario pagador, y los importes recaudados tienen carácter de precio público, al tratarse de una contraprestación pagada por el uso de bienes públicos (Granziera, 2015; Villar; Granziera, 2020). El cobro puede ser federal o estatal, dependiendo del dominio sobre el recurso hídrico y el área del comité en cuestión. En el caso de los CCHs interestatales, el cobro se aplicó a las siguientes cuencas: el río Paraíba do Sul; los ríos Piracicaba, Capivari y Jundiá; el río São Francisco; el río Doce; el río Paranaíba; y el río Verde Grande (ANA, 2019).

Debido al dominio estatal de las aguas subterráneas, las Unidades Federativas son responsables de regular y hacer cumplir el cobro. Con base en la legislación, de manera participativa, los CCHs establecen los mecanismos de recolección y sugieren los montos a ser aprobados por el Consejo Estatal de Recursos Hídricos (CERH). En algunos estados, además de esta aprobación, es necesario un decreto gubernamental para permitir la recolección efectiva, que se limita a los usos otorgados (VILLAR; GRANZIERA, 2020).

La mayoría de los estados, desafortunadamente, no implementaron el cobro de forma plena (Figura 22). Los estados con una alta tasa de explotación de aguas subterráneas y dotados de CCH enfrentan dificultades para aplicar la recolección, como es el caso de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato

Grosso, Mato Grosso do Sul y Goiás. Además, cuando se aplica, la situación de no regularidad de los pozos afecta su eficacia.

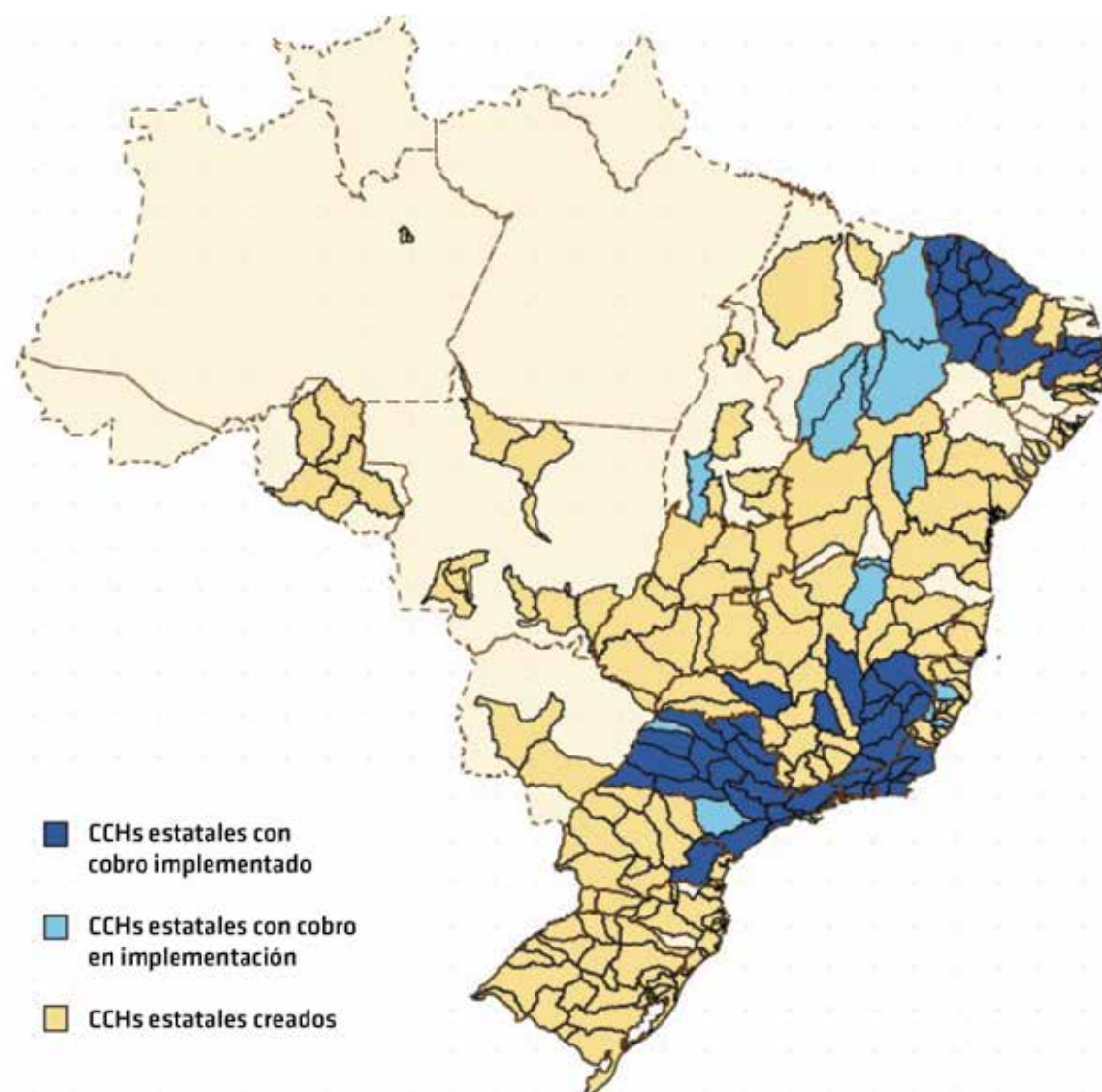


Figura 22 – Cobro por el uso de los recursos hídricos en Brasil – Comités Hídricos Estatales
Fuente: ANA (2019, p. 26).

El Precio Unitario Básico (PUB) aplicado al cobro de captación de aguas subterráneas varía, en promedio, entre R\$ 0,01 y R\$ 0,02 por metro cúbico, variando según el tipo de uso y captación. Destaca el caso de Ceará, que cobra una cantidad

específica de R\$ 0,85 por metro cúbico para la extracción de aguas minerales (ver Comunicación n° 01/2021/GECOM/DIAFI/ COGERH, del 16/02/2021). El PUB no es el precio final pagado por el usuario, obtenido a partir de fórmulas matemáticas que aplican varios coeficientes de ponderación a este valor. A pesar de la aplicación de estos coeficientes, los precios cobrados son bajos y no necesariamente estimulan el uso racional de los recursos hídricos (OCDE, 2015). La aplicación de la recolección es fundamental para la gestión del agua, ya que contribuye a la implementación de varios programas y proyectos dirigidos a mejorar la gestión del agua, además de fortalecer la gestión integrada del agua.

4.6 Sistemas de Información y las aguas subterráneas

Los Sistemas de Información son esenciales para instruir el proceso de toma de decisiones. La aplicación de los instrumentos de gestión de los recursos hídricos, previstos en la Ley n° 9.433/1997, depende de la disponibilidad de datos para evaluar las condiciones de las cuencas hidrográficas y sus respectivos acuíferos (PORTO; PORTO, 2008). Los sistemas de información sobre los recursos hídricos pueden ser nacionales o estatales. En el caso de las aguas subterráneas, se pueden destacar tres sistemas de información: el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH), el Registro Nacional de Usuarios de Recursos Hídricos (CNARH), que es un subsistema del SNIRH, y el Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS). Los dos primeros están bajo la tutela de la ANA, siendo que el SNIRH busca agrupar información general sobre los recursos hídricos, mientras que el CNARH se enfoca en el uso de los recursos hídricos. Ya el SIAGAS opera independientemente de los sistemas coordinados por la ANA y se configura como una base de datos de pozos que recoge información sobre sus aspectos constructivos, geológicos e hidrogeológicos.

La Moción CNRH n° 38, de 7 de diciembre de 2006, recomendó la adopción del SIAGAS por la ANA y los órganos estatales de gestión, las secretarías de



los gobiernos estatales y los usuarios de los recursos de aguas subterráneas, como base nacional compartida para el almacenamiento, la manipulación, el intercambio y la difusión de información sobre las aguas subterráneas. Además de estos sistemas de información relacionados con el agua, destacan el Sistema Nacional de Información sobre el Medio Ambiente (SINIMA) y el Sistema Nacional de Información de Saneamiento (SNIS). La Moción CNRH n° 39, de 7 de diciembre de 2006, recomendaba la integración de todos estos sistemas.

4.6.1 Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH)

El SNIRH está previsto en los arts. 5º, inc. VI, y 25 a 27 de la Ley n° 9.433/1997, y tiene por objeto “la recolección, el tratamiento, el almacenamiento y la recuperación de información sobre los recursos hídricos y los factores que intervienen en su gestión” (art. 25). La ANA es responsable de la organización, implementación y gestión de este sistema que está dirigido a las entidades del Singreh, los usuarios, la comunidad científica y la sociedad en general⁹. Los datos almacenados proporcionan la base para la preparación de los Planes de Recursos Hídricos e incluyen información sobre: división hidrográfica, cantidad y calidad del agua, usos del agua, disponibilidad de agua, eventos hidrológicos críticos, planes de recursos hídricos, regulación e inspección de los recursos hídricos y programas dirigidos a la conservación y gestión de los recursos hídricos.

4.6.2 Registro Nacional de Usuarios de Recursos Hídricos (CNARH)

El CNARH fue establecido por la Res. ANA n° 317, de 26 de agosto de 2003, con el objetivo de “conocer la demanda de uso del agua en el país para apoyar la implementación de los instrumentos de las políticas nacionales y estatales de recursos hídricos, y la inspección de usos e interferencias en los recursos hídricos” (art. 1º, § 2º). El Registro materializa un “registro de usuarios de recursos hídricos, usos e interferencias regularizados por los Estados y la

⁹ Se puede acceder a este sistema en: <https://www.snirh.gov.br/>.

Unión" (art. 1, § 1°), que forma parte de SNIRH. Desarrollado por la ANA, junto con las autoridades de gestión de recursos hídricos, CNARH permite a los estados insertar sus bases de datos relacionadas con los usos de los recursos hídricos con el fin de establecer usuarios y usos, en función de diferentes territorialidades (local, regional o nacional). Los organismos o entidades que gestionan los recursos hídricos y los otorgantes estatales y de la Unión son responsables de insertar el registro, los usos y las interferencias de los usuarios, más los actos de regularización.

La Res. CNRH n° 126/2011 estableció los lineamientos para el registro de usuarios de recursos hídricos y para la integración de bases de datos relacionadas con los usos de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Para este registro se clasifican como usuarios: "las personas físicas o jurídicas, de derecho público o privado, que hagan uso o interfieran en los recursos hídricos, que puedan o no ser concesionados, en los términos del art. 12, de la Ley n° 9.433, de 1997, y de las normas estatales vigentes" (art. 3°, inc. III, de la Res. CNRH n° 126/2011)¹⁰.

4.6.3 Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS)

SIAGAS fue creado antes de la política de agua, en 1996, por el SGB-CPRM, y constituye la principal recopilación de información sobre pozos en Brasil. Su base de datos se basa en información proporcionada por los órganos de gestión de los recursos hídricos, empresas de perforación y usuarios de aguas subterráneas. Sus principales objetivos son: recolectar, almacenar y poner a disposición datos e información hidrogeológicos georreferenciados con el fin de apoyar la elaboración de mapas hidrogeológicos y contribuir a satisfacer las demandas de datos de los usuarios y administradores de recursos hídricos o áreas relacionadas. El Sistema proporciona una base de datos que contribuye a: a) apoyar con la investigación de datos técnicos, estudios y proyectos de

10 El sistema puede consultarse en: <http://www.snirh.gov.br/cnarh-histo/publico/index.jsf>.



hidrología e hidrogeología desarrollados por el Estudio Geológico del Brasil; b) almacenar la base de datos nacional sobre pozos, disponible para el público en general; y c) apoyar la gestión del agua a través de información técnica sobre el uso y las características de las aguas subterráneas y los pozos registrados. El Sistema está dotado de mecanismos que facilitan la recolección, consistencia y almacenamiento de datos hidrogeológicos, actuando en articulación con órganos de gestión estatales y empresas socias (públicas y privadas)¹¹.

4.7 Otros instrumentos que contribuyen a la gobernanza de las aguas

La idea de la gestión integrada de los recursos hídricos presupone no sólo políticas específicas para el uso y la utilización de los recursos hídricos, sino también la coordinación de las políticas relacionadas con el uso y la ocupación del territorio y la protección del medio ambiente. La centralidad del agua para las actividades económicas, los ecosistemas y la calidad de vida humana hace de esta sustancia una variable importante en la aplicación de los instrumentos de gestión de otras políticas públicas, especialmente las relacionadas con el medio ambiente, el saneamiento, la agricultura y el desarrollo urbano.

La Política Nacional del Medio Ambiente (Ley Federal n° 6.938/1981), la Política Agrícola (Ley Federal n° 8.171/1991), el Sistema Nacional de Unidades de Conservación de la Naturaleza (Ley Federal n° 9.985/2000), la Política Urbana (Ley Federal n° 10.257/2001), la Política Federal de Saneamiento (Ley Federal n° 11.445/2007), la Política Nacional de Cambio Climático (Ley n° 12.187/2009), la Política Nacional de Residuos Sólidos (Ley Federal n° 12.305/2010), la Resolución Conama n° 420/2009 (áreas contaminadas), el “Nuevo Código Forestal” (Ley Federal n° 12.651/2012) y la Política Nacional de Riego (Ley Federal n° 12.787/2013) son ejemplos de leyes nacionales que proporcionan instrumentos de gestión relacionados con la gestión hídrica.

¹¹ Se puede acceder al sistema en el sitio web: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>.

Los Estados y municipios, en la medida de sus competencias, deben regular e implementar estos instrumentos, a fin de incluir aspectos relacionados con el agua (aguas superficiales y subterráneas) y la promoción de la seguridad hídrica. Según Villar e Hirata (2022), los principales instrumentos de gestión que pueden influir, positiva o negativamente, en las aguas son:

- plan maestro;
- legislación relativa a la subdivisión, el uso y la ocupación del suelo;
- zonificación ambiental;
- concesión de licencias medioambientales a actividades potencialmente contaminantes;
- licencia o autorización administrativa para sondeo y perforación de pozos;
- zonificación ecológica económica (ZEE);
- unidades de conservación;
- programa estatal de regularización ambiental (PRA);
- zonas permanentes de conservación y reserva legal;
- sistema de información medioambiental;
- planes sobre el cambio climático;
- planes de residuos sólidos;



- planes de gerenciamiento de residuos sólidos;
- gestión de las zonas contaminadas;
- notificación de zonas contaminadas;
- planes de saneamiento;
- sistema de información sobre los servicios públicos de saneamiento;
- programas de recuperación de manantiales;
- programa para la gestión adecuada de los residuos animales;
- planes de riego (PEI);
- zonificación agroecológica (ZA);
- sistema de información de riego.

Estos instrumentos tienen el potencial de promover la gestión de las aguas subterráneas en la medida en que orientan y optimizan el desempeño de los usuarios, protegen las aguas o elementos relacionados con el ciclo hidrológico, imponen restricciones o limitan el uso y ocupación del suelo o condicionan la implementación de actividades potencialmente contaminantes o usuarios de recursos naturales. Sin embargo, el Gobierno tiene dificultades para elaborar o aplicar esos instrumentos de planificación de manera eficaz y efectiva. Es el caso de los Planes Estatales de Riego, Zonificación Agroecológica y Zonificación Económica Ecológica. La situación es particularmente preocupante porque Brasil se encuentra entre los diez países con mayor superficie equipada para riego, siendo la agricultura el principal usuario en términos cuantitativos

(ANA, 2021). Otro problema es la relación de los acuíferos con la planificación territorial municipal, ya que no es habitual que los municipios incorporen la protección de las áreas de recarga o consideren la vulnerabilidad de los acuíferos en la aplicación de los instrumentos de política urbana.



Foto: Eduardo Gomes de Assis/Banco de imágenes ANA
Surgimiento de acuíferos kársticos en la cuenca del Pacuí
en la frontera de Montes Claros com Coração de Jesus - MG.

5

LA GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS



Foto: AdobeStock

5 LA GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La gobernanza de las aguas subterráneas y el fortalecimiento de la gestión integrada presupone la participación de varios actores, la superación de los cuellos de botella legales e institucionales, así como la adopción de estrategias para proteger su cantidad y calidad. Por lo tanto, este capítulo pretende presentar las principales acciones recomendadas para la construcción de este proceso de gobernanza de las aguas subterráneas y la implementación efectiva de la gestión integrada de los recursos hídricos.

5.1 Estrategias para proteger la cantidad y la sobreexplotación de los acuíferos

La principal característica de los acuíferos es el gran almacenamiento de agua, por lo que se pueden permitir extracciones de volúmenes superiores a la recarga siempre y cuando se compensen en el futuro. Los acuíferos, por lo tanto, pueden ser utilizados como una “cuenta de ahorro”, que requiere una planificación a largo plazo, con reglas claras de explotación, basadas en estudios técnicos y monitoreo a través de una red de monitoreo integrada, además del compromiso

de los usuarios para cumplir con los compromisos acordados. Las extracciones en los acuíferos no deben reducirse a una simple aritmética de entradas y salidas, que ignora la capacidad de almacenamiento del acuífero o el hecho de que las extracciones pueden inducir una mayor disponibilidad de agua subterránea (FOSTER *et al.*, 2006). Ignorar estas consideraciones significa perder la oportunidad que ofrecen los acuíferos de proporcionar más agua o de regular el equilibrio entre la producción y la demanda, especialmente en períodos de sequías prolongadas y sequías.

El desarrollo de la planificación a largo plazo se ve obstaculizado por las escasas inversiones en estudios, que permitirían una evaluación precisa del potencial de los acuíferos. Además, el problema de la sobreexplotación está asociado con el alto número de pozos irregulares o desconocidos, lo que dificulta el establecimiento de un programa realista de manejo de los recursos hídricos.

La gestión adecuada de las extracciones y el uso de un acuífero, un sistema acuífero o una parte específica de un acuífero, debe consistir principalmente en la identificación de áreas críticas, es decir, aquellas en las que el uso de las aguas subterráneas es más intenso o el desempeño de sus servicios ecosistémicos son esenciales. Esto permitirá la planificación de acciones de uso de aguas subterráneas y, sobre todo, permitirá a los gerentes identificar prioridades entre áreas críticas.

Los métodos de identificación de áreas críticas deben basarse en: a) cartografías hidrogeológicas del reconocimiento de acuíferos y sus características hidráulicas, sustentadas por un registro de pozos, con pruebas y datos hidráulicos; b) identificación de áreas ecológicamente frágiles y dependientes del flujo subterráneo (pantanos, ríos y manglares); c) registro de núcleos urbanos dependientes de aguas subterráneas para suministro público y privado; d) registros de conflictos entre usuarios; e) inventario de áreas con registro de grandes pérdidas de niveles potenciométricos del acuífero, reportadas por compañías



de perforación de pozos, usuarios u operadores de sistemas de suministro de agua; y f) historia de reducción de flujo en ríos, drenajes y pantanos secos o pérdida de manantiales y lagos.

Desde la identificación y caracterización de áreas críticas es necesario transformar este conocimiento en acciones institucionales, políticas y legales. Normalmente, la acción más frecuente es la creación de áreas de restricción y control de aguas subterráneas, cuyo objetivo es limitar los volúmenes capturados o nuevas perforaciones. Esta estrategia está prevista en la legislación de varios estados brasileños y en el extranjero, habiendo sido utilizada, por ejemplo, en el caso de Ribeirão Preto (SP).

El éxito de esta medida depende de la participación del poder Público y de los usuarios. Los órganos de gestión deben vigilar la evolución de los niveles de agua de los acuíferos, hacer participar a los usuarios en el proceso de establecimiento de objetivos y formas de asignación de agua y vigilar el cumplimiento. Para cumplir con estas obligaciones, es necesario construir asociaciones entre los diversos niveles de gobierno (local, estatal y federal). Los usuarios, a su vez, deben comprometerse a reducir la financiación para alcanzar los objetivos, vigilar sus pozos y colaborar con el Poder Público para recuperar el acuífero. Otra medida para recuperar un acuífero es la adopción de mecanismos para la recarga artificial del acuífero.

5.1.1 Recarga artificial y mantenimiento de acuíferos

En Brasil, la recarga artificial no se utiliza como política pública, aunque está prevista en la Res. CNRH n° 153/2013. Esta ley define la recarga como “la introducción no natural de agua en un acuífero, por intervención humana planificada, mediante la construcción de estructuras diseñadas para este fin” (art. 2°). La estructura de los mecanismos de recarga puede ser construida por el gobierno o por los usuarios o por modelos mixtos entre el Poder Público y los usuarios. Sus principales objetivos son: almacenar agua, estabilizar

o elevar los niveles de agua en los acuíferos, compensar los efectos de sobreexplotación de los acuíferos, controlar la intrusión salina o controlar la subsidencia del suelo (art. 4°).

En su art. 3°, la Res. CNRH n° 153/2013 determina que la recarga artificial se puede desplegar desde la superficie o en profundidad. En la superficie, la infiltración se produce a través de presas, dispersión de agua, canales, zanjias o la combinación de estos métodos. A profundidad, el agua se inyecta directamente a través de los pozos. La literatura también señala la posibilidad de recargar en profundidad en la zona insaturada a través de cajas de infiltración (rellenas o recubiertas), zanjias de recarga, drenajes subterráneos o galerías de drenaje (SEWRPC, 2006).

Según la bibliografía, el agua inyectada en el acuífero puede deberse a la lluvia, a masas de agua superficiales, a otros acuíferos o a su reutilización. Es importante asegurarse de que estas aguas no pongan en peligro la calidad del agua del acuífero. Por lo tanto, cualquier esquema de recarga artificial debe estar precedido por estudios técnicos, así como la construcción de sistemas piloto a pequeña escala y monitoreo cualitativo y cuantitativo. El organismo estatal de gestión de los recursos hídricos es el responsable de autorizar la recarga artificial de los acuíferos, la cual estará condicionada a “realizar estudios que acrediten su viabilidad técnica, económica, sanitaria y ambiental” (CNRH, Resolución n° 153/2013, art. 5°).

5.2 Estrategias para la protección de la calidad de los acuíferos

Las estrategias para la protección de la calidad del agua del acuífero no deben disociarse de las destinadas a la cantidad. Los programas de concesión de uso de agua deben considerar la calidad del recurso y el peligro de contaminación, con el fin de evitar problemas y riesgos para la salud de los



usuarios o facilitar la identificación de áreas contaminadas en el acuífero. En general, la prevención contra la pérdida de calidad de los recursos hídricos se centra en dos estrategias distintas: a) acciones dirigidas a proteger el acuífero en su conjunto; y b) acciones para proteger las fuentes de agua para el suministro público (FOSTER *et al.*, 2002).

La protección del acuífero se debe principalmente al control del uso y ocupación del suelo, con el fin de evitar la generación de cargas contaminantes o que lleguen al acuífero (zona saturada). Por lo tanto, se requiere la aplicación de instrumentos que restrinjan ciertos usos en áreas de recarga o incluso autorizaciones y permisos de uso que consideren la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, así como la aprobación de procedimientos de gestión de peligros para prevenir o mitigar accidentes que puedan generar contaminación. La legislación brasileña ha establecido varios instrumentos a este respecto, como la concesión de licencias ambientales, la zonificación ambiental y las leyes municipales sobre el uso y la ocupación de la tierra.

La prevención de la contaminación se puede lograr reduciendo el peligro de contaminación de un área (FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER *et al.*, 2002). El peligro se define como la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero a su degradación. Así, el mayor peligro se presenta cuando existen altas cargas contaminantes en zonas de alta vulnerabilidad, como los afloramientos de un acuífero libre, sedimentario, arenoso y permeable. En contraste, el menor peligro se asocia con el caso en el que existe una carga contaminante reducida o inexistente, ubicada en un área de baja vulnerabilidad (FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER *et al.*, 2002).

El mapeo de la vulnerabilidad del acuífero es una estrategia de manejo que permite priorizar recursos para acuíferos con mayor vulnerabilidad. Otro enfoque de gestión es la protección de las fuentes de agua más importantes,



como las utilizadas para el suministro público o los usuarios más sensibles a la cuestión de la calidad, como los hospitales, las clínicas de salud y las escuelas. En este caso, las principales estrategias son: a) definir Perímetros de Protección de Pozos o Fuentes (PPP), y b) evitar que se instalen fuentes potenciales de contaminación en las cercanías (CARVALHO; HIRATA, 2012; FOSTER *et al.*, 2002).

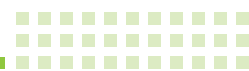
5.2.1 Gestión de áreas contaminadas y aguas subterráneas

En el caso de contaminación de aguas subterráneas, es necesario recurrir a la Gestión de Áreas Contaminadas (GAC), que es un procedimiento regulado por la Res. Conama n° 420/2009 y por las leyes estatales. El término contaminación se define en el art. 6º, inc. V, de la Resolución Conama n° 420/2009 como:

la presencia de productos químicos en el aire, el agua o el suelo, resultantes de las actividades humanas, en concentraciones tales que restrinjan el uso de este recurso ambiental para los usos actuales o previstos, definidos sobre la base de la evaluación del riesgo para la salud humana, así como para los activos que deben protegerse, en un escenario de exposición estandarizada o específica; [...].

Desde la perspectiva del GAC, la degradación adquiere relevancia legal cuando excede los parámetros de contaminación previamente establecidos por la ley. Según la Res. Conama n° 420/2009, este procedimiento se guía por los Valores Orientadores (VO), los cuales se subdividen en las siguientes categorías:

Valor de Referencia de Calidad (VRQ): es la concentración de una sustancia dada que define la calidad natural del suelo, determinándose en base a la interpretación estadística de análisis fisicoquímicos de muestras de diversos tipos de suelos (art. 6º, XXII);



Valor de Prevención (VP): es la concentración de valor límite de una sustancia dada en el suelo, de manera que sea capaz de sostener sus funciones principales, según el art. 3º (art. 6º, XXIII);

Valor de investigación (VI): es la concentración de una sustancia dada en el suelo o en las aguas subterráneas por encima de la cual existen riesgos potenciales, directos o indirectos, para la salud humana, considerando un escenario de exposición estandarizado (art. 6º, XXIV).

La caracterización de la contaminación, por lo tanto, presupone la existencia de ciertas concentraciones en el suelo o las aguas subterráneas que, de acuerdo con la legislación, generarían un riesgo potencial o efectivo para la salud humana o los ecosistemas. Una vez verificada esta situación, se hace obligatorio adoptar una serie de medidas para restringir el uso del suelo y las aguas subterráneas, así como para recuperar y remediar el área contaminada. La Resolución Conama n° 420/2009 regula las VO, sin embargo, los estados deben regular el GAC, definiendo sus procedimientos, el organismo competente para llevarlo a cabo y los Valores de Referencia de Calidad (VRQ), además de poder establecer VO más restrictivos.

La protección de las aguas subterráneas debe guiarse por la prevención, ya que los daños suelen ser irreversibles y pueden hacer inviable el uso del agua. Además, el costo de recuperación o remediación es superior al de las acciones para evitarlo. En el Estado de São Paulo, varias demandas han discutido si la recuperación de áreas contaminadas debe guiarse por los criterios de las VO o por el deber de reparación ambiental completa. Las cuestiones fundamentales de este debate jurídico se centran en el análisis coste-beneficio promovido por GAC frente a los daños ambientales y la capacidad técnica para descontaminar un acuífero, es decir, ¿cuál sería una recuperación aceptada desde un punto de vista ambiental, económico y social? Lamentablemente, existen limitaciones tecnológicas y/o económicas que impiden la reparación



integral del daño, es decir, restaurar las características geoquímicas naturales del acuífero. En muchos casos, incluso con grandes inversiones y la aplicación de las mejores técnicas disponibles, los niveles de contaminación sólo pueden reducirse.

El enfoque prioritario del GAC en Brasil es: a) identificación del área contaminada; b) evaluación del riesgo para la salud humana y ambiental; y c) finalización del proceso de rehabilitación. La lógica de este procedimiento es establecer metas para la limpieza del suelo o acuífero y llevar a cabo su rehabilitación con el fin de devolver a la sociedad a un entorno que ofrezca un nivel de riesgo tolerable. Por lo tanto, se entiende como un área contaminada que ofrece un nivel de riesgo por encima de la tolerada y no solo una alteración físico-química o biológica del entorno en comparación con las cualidades naturales originales.

Habida cuenta de los costos medioambientales y sociales de las zonas contaminadas, los organismos medioambientales deberían buscar la protección preventiva del suelo y los acuíferos mediante las siguientes medidas:

- establecer normas de calidad medioambiental para el suelo, el aire y el agua, así como para las emisiones contaminantes;
- concesión de licencias y fiscalización de posibles fuentes de contaminación, sobre la base de normas jurídicas preestablecidas;
- incentivos para el desarrollo y la aplicación de las mejores prácticas tecnológicas destinadas a reducir o eliminar las emisiones contaminantes.

A partir de la identificación de áreas con probabilidad de contaminación, el GAC impone una secuencia de procedimientos y estudios con el fin de caracterizar y probar tal situación y actuar en la remediación del problema. El inicio de este



procedimiento se produce a través de una *evaluación preliminar*. El estudio tiene por objeto “encontrar pruebas, indicios o hechos que permitan sospechar la existencia de contaminación en la zona” mediante la recopilación de información histórica y visitas al lugar (art. 6º, inc. II, Res. Conama n° 420/2009). A partir de él, se elabora el plan de investigación confirmatoria.

La *investigación confirmatoria*, a diferencia de la evaluación preliminar, requiere la recolección de muestras de suelo y agua subterránea, y otras técnicas invasivas o no invasivas (como la geofísica). El objetivo de esta investigación es confirmar o no la existencia de contaminación. Este reconocimiento se realiza comparando los resultados de los análisis químicos de suelos y agua con los VO y referencia de calidad, establecidos por la agencia ambiental.

Una vez confirmada la contaminación, se realiza una *investigación detallada*, cuyo objetivo es “comprender la dinámica de la contaminación en los entornos físicos afectados y la identificación de escenarios específicos de uso y ocupación del suelo, receptores de riesgo existentes, vías de exposición y vías de entrada” (art. 6º, inc. IX de la Res. Conama n° 420/2009). En esta etapa se establece el nivel y límites de degradación (mapeo de las extensiones de la pluma contaminante), además de la cuantificación de la masa presente y la dinámica de transporte de estas sustancias. Esta actividad permitirá evaluar el grado de riesgo al que están expuestas las personas y el medio ambiente. Una vez definida la zona contaminada y los riesgos existentes, se inicia el proceso de rehabilitación de la zona, el cual debe incluir un *plan de intervención*. Con la aprobación de la agencia ambiental, se inicia la implementación de la remediación de suelos y acuíferos. Si la remediación cumple con sus objetivos, se inicia el *programa de monitoreo*, cuyo objetivo es asegurar que se logren efectivamente las metas acordadas. Si el informe de monitoreo encuentra cumplimiento de las metas, el área será declarada por la agencia ambiental como *rehabilitada para el uso declarado*.

5.3 La gobernanza de las aguas subterráneas como medio de garantizar el desarrollo socioeconómico

La extracción de aguas subterráneas ha contribuido al desarrollo social y económico, además de garantizar la seguridad hídrica y alimentaria en diversas partes del planeta a lo largo de los siglos. El uso de las aguas subterráneas se remonta a los pueblos de la antigüedad, que desarrollaron técnicas para su uso y garantizar una fuente de suministro de calidad. Las civilizaciones antiguas construyeron sistemas de acueductos para transportar agua desde los manantiales hasta los asentamientos (DEMING, 2020). El registro más antiguo de pozos se encuentra en la región de *Atlit Yam*, Israel (año 8.000 a.C.) (Galili; NIR, 1993). Desde el año 5.000 a.C., los chinos han perforado pozos profundos con palos de bambú (REBOUÇAS, 2006), mientras que los persas desarrollaron sistemas de túneles subterráneos horizontales, llamados *qanats*, que se extendieron por los países participantes en las antiguas rutas comerciales (VILLAR, 2015). Con la colonización española, el sistema de *qanats* fue llevado a Hispanoamérica, siendo utilizado hasta el día de hoy en países como Chile, México y Perú (PALERM, 2002; 2004 y 2020).

El crecimiento de la población y el consumo, la degradación de las reservas superficiales, los avances en el campo del conocimiento de la hidrogeología y las técnicas de perforación de pozos han fomentado y ampliado el uso de estas aguas desde la década de 1950 (UN/WWAP, 2003; VILLAR, 2015). El agua subterránea, por lo tanto, ha sido, es y será siempre una fuente importante de agua para la humanidad. A pesar de su importancia, la percepción de la dependencia de la población y los beneficios resultantes de su explotación solo se han destacado en la literatura desde la década de 2000 (VILLHOLTH; CONTI, 2018).

Las aguas subterráneas fueron consideradas por los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) como la forma más rápida y barata de alcanzar los objetivos de acceso al agua y lucha contra el hambre (LLAMAS; MARTINEZ-Cortina, 2002). Su importancia se reafirmó en los Objetivos de Desarrollo Sostenible

(ODS) (GUPPY *et al.*, 2018). Estos recursos son esenciales para garantizar los objetivos establecidos en los ODS, especialmente el ODS-6, que se ocupa del acceso universal al agua potable, el saneamiento y la higiene. Debido a la transversalidad del agua, las reservas subterráneas son fundamentales para todos los ODS, con énfasis en los ODS-1, ODS-2, ODS-3, ODS-5, ODS-8, ODS-9, ODS-10, ODS-11, ODS 12 ODS-13 y ODS-15 (Figura 23). Estas aguas contribuyen a la lucha contra la pobreza, a la seguridad alimentaria, hídrica y sanitaria de miles de personas, especialmente en las zonas rurales y en las zonas áridas y semiáridas. Además, son menos susceptibles a la variabilidad climática, lo que permite fomentar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, e incluso pueden generar energía geotérmica en algunas regiones.



Figura 23 – Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Fuente: Naciones Unidas Brasil (2021).

El ODS-6 enfatiza la necesidad de cumplir con los objetivos internacionales relacionados con la expansión del acceso al agua y el saneamiento. En el caso de Brasil, cabe destacar el Programa Agua Dulce (PAD), que promueve el desarrollo socioeconómico y el acceso al agua de las poblaciones más vulnerables de la región semiárida a través de acuíferos salobres. Este Programa corrigió

los errores de manejo de su predecesor, el Programa Agua Buena (PAB), y buscó reutilizar los pozos salobres abandonados.

El PAB fue implementado por el Ministerio de Medio Ambiente/Secretaría de Recursos Hídricos y Medio Ambiente Urbano (MMA/SRHU) a finales de 1990, con el objetivo de instalar desalinización en pozos salobres o salinos en áreas consideradas críticas. Sin embargo, el Programa enfrentó varios problemas de implementación, como fallas en el destino de los efluentes salinos, que contribuyeron a la desertificación y la erosión del suelo en las áreas cercanas a las cuencas, y causaron su cierre. Además, la falta de mantenimiento preventivo o la mala gestión de los sistemas de desalinización provocó la pérdida de calidad del agua, provocando la desactivación de parte de los equipos (AZEVEDO, 2015).

A su vez, el PAD es una iniciativa del Gobierno Federal, promovida por el MDR en asociación con varios actores gubernamentales y sociales, que tiene como objetivo promover la seguridad hídrica a través de la instalación y gestión de pequeñas plantas desalinizadoras en el Semiárido Nordeste, permitiendo el uso de acuíferos salobres o salinos. Los efluentes generados se desechan en tanques de contención o se reutilizan para otros usos, como el riego de la agricultura biosalina. El Programa cuenta con la participación efectiva de las comunidades y municipios a través de “acuerdos de gestión compartida”, que establecen los derechos y deberes de los actores sociales y las diferentes instancias de gobierno involucradas en la gestión. El PAB y el PAD demuestran que incluso las aguas subterráneas salobres y los acuíferos con bajos flujos pueden ayudar a elaborar estrategias para garantizar la seguridad hídrica de las poblaciones, especialmente en el contexto de la escasez de regiones semiáridas. El proceso de desalinización de estas aguas es más sencillo que el aplicado a las aguas marinas y no requiere grandes infraestructuras. Además, pueden contribuir a la seguridad alimentaria, ya sea manteniendo cultivos de subsistencia o reutilizando sus efluentes.



5.3.1 La necesidad de conocer el papel socioeconómico de las aguas subterráneas

En Brasil, existe una falta de estudios que analicen la dimensión social de las aguas subterráneas, como su papel en el desarrollo socioeconómico, especialmente de los grupos vulnerables o relacionados con las relaciones de género. La gobernanza debe incluir en la gestión, esta masa de personas que utilizan manantiales, pozos excavados o pozos con pequeños caudales. La mayoría de las veces, estos usos no están regularizados, aunque pueden ser legalizados y clasificados como *exentos* o *insignificantes*. La gestión del agua necesita crear espacios para estos *usuarios sociales*, previstos en el art. 12, § 1° de la Ley n° 9.433/1997, por tratarse de un contingente completamente desconocido y cuya subsistencia depende de las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas pueden y deben ser utilizadas como una forma de garantizar el suministro, sin embargo, su explotación debe basarse en maximizar los beneficios sociales generados y la sostenibilidad, ya sea a través de extracciones compatibles con la recarga, la elaboración de planes de extracción a largo plazo o la adopción de mecanismos que contribuyan a promover la recarga. La explotación incontrolada puede causar daños, que culminan incluso en el agotamiento del acuífero. En general, la mayoría de los acuíferos brasileños tienen una condición de exploración adecuada, pero ya existen registros de situaciones nacionales preocupantes, como el caso de Ribeirão Preto (SP), Recife (Petelet-Giraud *et al.*, 2017), São José do Rio Preto (SP) (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015) y Acuífero Urucuia. La literatura internacional trae varios casos de advertencia sobre las pérdidas económicas causadas por la explotación insostenible de este recurso.

La pérdida del acuífero perjudica la calidad de vida y los medios de subsistencia de toda una comunidad, sin embargo, los efectos de la caída de los niveles hidráulicos no llegan por igual a los usuarios. Los grandes usuarios son más

resilientes, ya que pueden perforar pozos más profundos o buscar otras fuentes de agua. Los pequeños usuarios, por otro lado, son los primeros en perder su acceso al agua, y su capacidad financiera para obtener otra fuente es limitada, lo que incluso puede comprometer su permanencia en el sitio.

Los efectos de la sobreexplotación pueden generar impactos que van mucho más allá de los usuarios del agua. La ciudad de Yakarta, Indonesia, es uno de los ejemplos más emblemáticos de las consecuencias negativas de la explotación descontrolada. La disminución del acuífero y el hundimiento, junto con el régimen de los movimientos y el aumento del nivel del mar, amenazan la viabilidad de una megalópolis mundial. Debido a las tasas de hundimiento de la ciudad, el Presidente de Indonesia ha determinado un plan para transferir la infraestructura de la capital del país a la ciudad de Penajam en la isla Kalimantan. Este proceso generará pérdidas económicas millonarias, estimadas en alrededor de US\$ 32,7 billones, e incalculables pérdidas socioambientales. (KLAAS *et al.*, 2018).

Por lo tanto, la gobernanza de las aguas subterráneas debe incluir acciones para reconocer que: a) no es posible pensar en la gestión de las aguas subterráneas sin tener en cuenta la gestión de las aguas superficiales y el suelo; b) el perfil de los usuarios de las aguas subterráneas es muy variado, ya que incorpora desde grandes usuarios económicos hasta usos de subsistencia; c) *los usuarios sociales* deben incorporarse al proceso de gestión, ya que son los primeros en verse perjudicados por la degradación; d) la gestión de las aguas subterráneas, especialmente en áreas críticas, requiere una planificación que busque alternativas económicas con un menor consumo de agua; e) no hay soluciones rápidas a los problemas asociados con la degradación o el agotamiento de los acuíferos, y el proceso de recuperación puede durar muchas décadas y requerir altos costos; y f) la prevención de la degradación de los acuíferos es siempre la mejor alternativa.



5.4 Integración de la sociedad en la gestión de las aguas subterráneas: la importancia de la participación social

La participación social es un elemento central de la gobernanza del agua y la gestión integrada de los recursos hídricos. Además de ser una forma de aumentar la eficiencia, puede clasificarse como un derecho fundamental, previsto en el orden constitucional brasileño (PRETTY, 1995; MELO; SCHIER, 2017). Hay varias definiciones para el proceso relacionadas con la capacidad de los actores sociales para interactuar con agencias gubernamentales, líderes políticos y organizaciones responsables de la creación o implementación de políticas públicas, así como su participación en estas políticas. La participación puede presuponer la participación directa o indirecta (representación) de las partes interesadas en el proceso de toma de decisiones sobre políticas, planes o programas relacionados con las múltiples dimensiones del agua (QUICK; BRYSON, 2016).

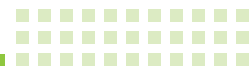
La gestión del agua reúne a un número representativo de partes interesadas o actores sociales, que son todas aquellas personas, grupos u organizaciones que pueden influir o verse afectados por decisiones políticas que involucran la protección o el uso del agua (QUICK; BRYSON, 2016). Entre los actores involucrados en el manejo de los acuíferos, se destacan: empresas de perforación de pozos; usuarios de pozos profundos; comunidades o individuos que dependen enteramente del pozo o manantial para su subsistencia; universidades e institutos de investigación; Ministerio Público; asociaciones técnicas profesionales, principalmente las relacionadas con la Ingeniería y la Geología, y organizaciones no gubernamentales relacionadas con los recursos hídricos, especialmente la Asociación Brasileña de Aguas Subterráneas (ABAS). La participación social en la gestión de las aguas subterráneas promueve los siguientes beneficios:

- fomenta la comprensión y alienta la adopción de buenas prácticas en la gestión de las aguas subterráneas (por ejemplo, técnicas apropiadas

para construir el pozo y definir su ubicación, adopción de PPP, etc.) (GARDUÑO; VAN STEENBERGEN; FOSTER, 2010);

- contribuye a la implementación de acciones de gestión, ya que las decisiones que no incluyen a los propietarios de los pozos difícilmente se implementarán, especialmente con las limitaciones del poder Público en la promoción de la fiscalización (GARDUÑO, VAN STEENBERGEN; FOSTER, 2010);
- crea la oportunidad para que los usuarios negocien entre sí y con el gobierno metas de gestión que tengan en cuenta los impactos socioambientales de la protección del acuífero (EMERSON; NABATCHI; BALOGH, 2012);
- permite la construcción de acuerdos de cooperación para la ejecución de actividades relacionadas con la gestión, tales como monitoreo, inspección y fiscalización (GARDUÑO, VAN STEENBERGEN; FOSTER, 2010);
- facilita la coordinación de las decisiones relacionadas con el agua y la ordenación del territorio, contribuyendo, inclusive, a la reducción de las contradicciones entre las políticas (GARDUÑO, VAN STEENBERGEN; FOSTER, 2010);
- contribuye a que individuos, grupos y comunidades locales tengan voz en el diseño de la gestión del agua, con el fin de proteger su extracción de aguas subterráneas, que en muchos casos es la más vulnerable porque son manantiales y pozos excavados (QUEVAUVILLER, 2016).

La legislación brasileña incorpora varios niveles de participación en el ejercicio de la gobernanza hídrica, como los procesos de consulta en la elaboración del Plan Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040, las discusiones realizadas en el



ámbito de los CCHs o los Acuerdos de Gestión Compartida del Programa Agua Dulce. A pesar de ello, las políticas públicas enfrentan dificultades para promover la participación de la sociedad y los usuarios de las aguas subterráneas, ya que no pueden motivarlos a participar en el proceso de obtención de *información*, desarrollo de políticas y estrategias para el manejo o implementación de estas políticas (Piyapong ET *al.*, 2019). Esto, en gran parte, se debe a los siguientes aspectos: a) falta de información y conocimientos técnicos y sociales sobre el tema; b) carácter extremadamente técnico que se le da al debate sobre las aguas subterráneas; y c) no regularización del uso.

Este escenario hace que el agua subterránea sea un tema restringido a los técnicos y de menor importancia en la gestión hídrica. También favorece la explotación irregular que “se da de forma ajena a la disponibilidad hídrica local, no respeta el derecho de uso de terceros y evita que se hagan conocer sus impactos en el suministro público, usuarios otorgados y propietarios de pozos para uso exento.” (VILLAR, 2016, p. 92). La implementación de programas de Educación Ambiental y capacitación en aguas subterráneas son fundamentales para cambiar esta realidad.

Desafortunadamente, la participación social en las aguas subterráneas es un tema poco explorado en Brasil. Los enfoques de las ciencias sociales podrían contribuir a fomentar el debate sobre el desarrollo y la aplicación de metodologías e instrumentos destinados a fomentar la difusión de conocimientos, la participación social o la mediación y la negociación en el proceso de gestión del acuífero.

5.5 Cooperación entre las diversas entidades administrativas y atención prioritaria a la ordenación local de las aguas subterráneas

Brasil es un país federativo que “instituye la división de responsabilidades y la autonomía entre los gobiernos federales, estatales y municipales.” (GRANJA; WARNER, 2006, p. 1101). La existencia de competencias comunes y concurrentes apunta a un federalismo de cooperación e integración, que se refleja en la

política hídrica y en la organización del Sistema Nacional de Recursos Hídricos, conformado por sistemas nacionales, estatales, regionales y locales. La Ley n° 9.433/1997 también adopta una gestión participativa y descentralizada a través de la cuenca hidrográfica y puesta en práctica por los CCHs. De esta manera, el modelo de gestión del agua en Brasil se guía por el federalismo y el principio de subsidiariedad, que determina que las decisiones, legislativas o administrativas, deben tomarse al nivel político más bajo posible, es decir, por aquellos que están cerca de las decisiones definidas, tomadas y ejecutadas (GRANJA; WARNER, 2006).

La cuenca hidrográfica como territorio de gestión del agua no debe confundirse con la división clásica de las entidades administrativas: Unión, estados, Distrito Federal y municipios, pero trasciende los límites administrativos clásicos, porque su territorialidad se ajusta en función de aspectos físico-naturales. Aunque se establecen límites legales, subdividiéndolos en porciones más pequeñas como una forma de facilitar la gestión, no se puede ignorar que el sistema de agua es uno. Por lo tanto, se creó una territorialidad de decisión que requiere la construcción de acuerdos cooperativos e integradores entre todas estas entidades administrativas y, en algunos casos, incluso con otros países, de acuerdo con la escala de la cuenca o acuífero, o debido a la correlación entre estas masas de agua (GRANJA; WARNER, 2006).

Los acuíferos se insertaron en esta gestión por cuencas, aunque su territorialidad no siempre converge con ella. A pesar de ello, la cuenca sigue siendo el mejor territorio para gestionarla, ya que sus principales servicios ecosistémicos y los impactos del uso de sus aguas o suelo se producen en la territorialidad de la cuenca. Como se puede observar en la Figura 24, en la misma cuenca existen varios acuíferos superpuestos, los cuales tienen territorialidades completamente diferentes, aunque pueden interactuar entre sí y con la cuenca. Dado el escenario de aplicación de la Ley n° 9.433/1997, pensar en la creación de una territorialidad específica para cada acuífero sería un reto de gestión complicado



para un país que ni siquiera ha podido implementar plenamente la gestión de cuencas hidrográficas.

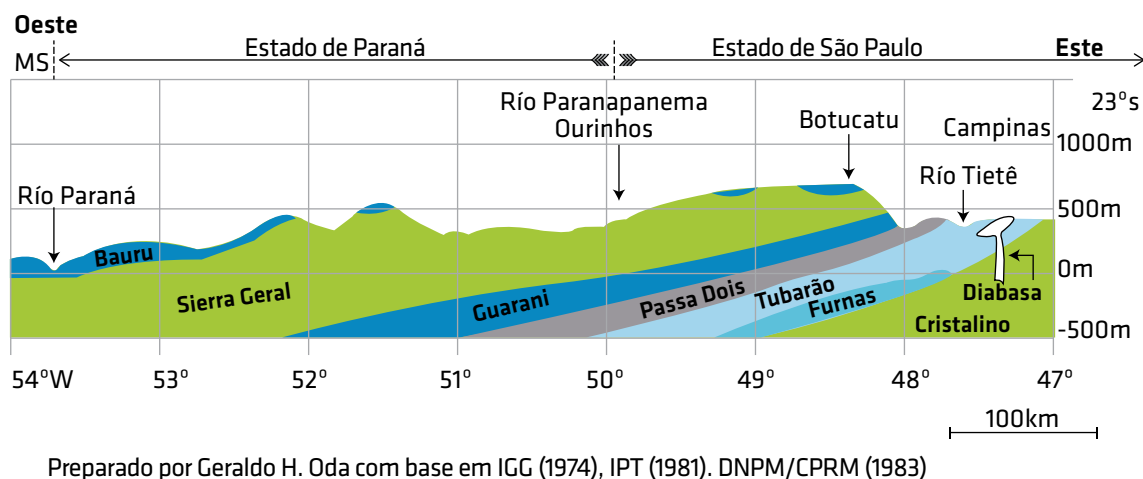


Figura 24 – Sección geológica esquemática del Estado de São Paulo con la secuencia de sistemas acuíferos

Fuente: São Paulo (2014, p. 29).

La CNRH estableció las principales directrices para orientar el desempeño de las unidades federales, municipios y CCHs en el manejo conjunto de cuencas y acuíferos, sin embargo, existe una falta de estudios para analizar *cómo* o *si* esto se hizo. Además, sería importante que el CNRH y los Consejos Estatales determinaran áreas prioritarias para el control de las extracciones acuíferas que puedan tener efectos más allá de la cuenca en la que se lleva a cabo la gestión. Esta definición ayudaría a estimular la cooperación entre las entidades administrativas y los órganos de Singreh. Dichas acciones de cooperación podrían incluir: a) estudios y monitoreo conjuntos; b) adopción de metodologías conjuntas para determinar la disponibilidad de agua y controlar las extracciones; c) creación de salas de situación para acuíferos; o d) idealización de acuerdos intercuenas o internacionales. La experiencia del Sistema Acuífero Guaraní es un buen ejemplo de la importancia de coordinar acciones a las diversas escalas de gestión.



Foto: AdobeStock

5.5.1 Acuíferos transfronterizos e interestatales: el caso del Acuífero Guaraní

La Res. CNRH n° 202/2018, en el art. 2°, define así los acuíferos transfronterizos e interestatales:

III - acuífero interestatal: acuífero distribuido en los territorios de al menos dos estados, o entre un estado y el Distrito Federal;

IV - acuífero transfronterizo: acuífero compartido por Brasil con al menos un país fronterizo vecino.

Brasil tiene varios acuíferos interestatales y/o transfronterizos. En total, el país cuenta con 11 acuíferos transfronterizos (Figura 25): Amazonas, Aquidauana, Boa Vista, Bauru-Caiuá, Roraima, Pantanal, Permo-Carbonífero, Costeiro, Litorâneo, Serra Geral y Guaraní.

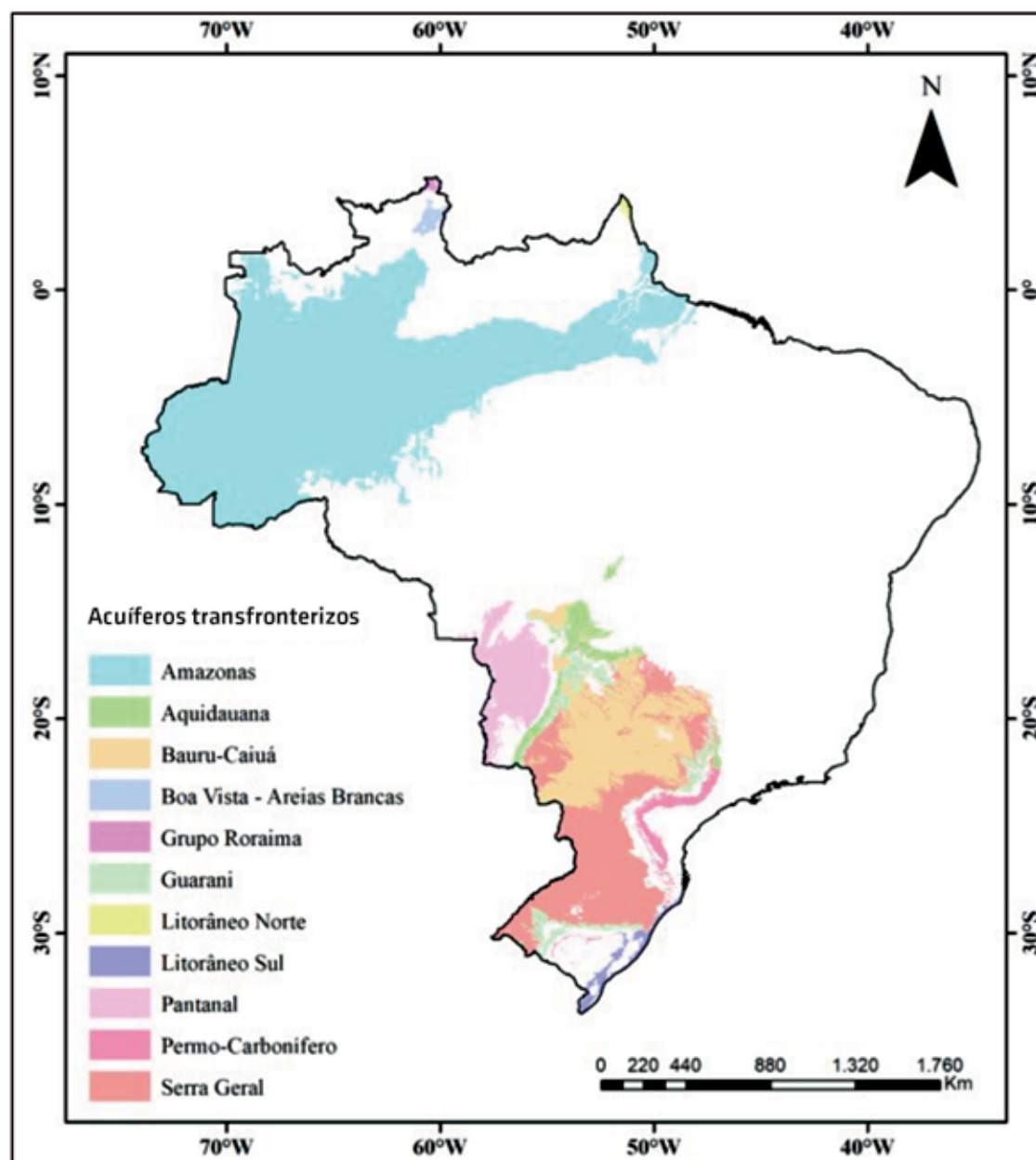


Figura 25 – Acuíferos transfronterizos en el territorio brasileño

Fuente: ANA (2017, p. 1), adaptado y proporcionado por Felipe Nincao.

Entre estos acuíferos, el más conocido es el Sistema Acuífero Guaraní (SAG), que está superpuesto por otros dos acuíferos transfronterizos: el Serra Geral y el Bauru-Caiuá. El área total del SAG es de 1.087.879 km², y comprende el territorio de Argentina (225.500 km²), Brasil (735.918 km²), Paraguay (71.700 km²) y Uruguay (45.000 km²) (OAS, 2009, p. 62) (Figuras 25 y 26). Brasil posee



Foto: Roberto Eduardo Kirchheim/Banco de Imágenes ANA
Nascente na região de Rurópolis-PA.

la mayor parte del acuífero (61,65%), donde también puede ser clasificado como un acuífero interestatal, ya que se extiende a través de ocho estados: Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina y São Paulo (OAS, 2009). Es un acuífero sedimentario y confinado al 90% del territorio, con áreas de afloramiento correspondientes sólo a 124.650 km² (LEBAC/Unesp, 2008).

Contrariamente a las imágenes populares, el SAG no es una estructura uniforme, como una esponja o un lago/río subterráneo. Por el contrario, las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero son bastante heterogéneas (Figura 26), presentando áreas de afloramiento y regiones cubiertas por basaltos de diversos espesores (OAS, 2009; BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). El tiempo de residencia de las aguas puede ser de meses o más de cientos de miles de años. La presencia de aguas antiguas y recientes demuestra diferencias en el flujo de recarga e impacta en las características geoquímicas del agua, que presenta áreas de excelente calidad y otras con alta salinidad o anomalías naturales (OAS, 2009, p. 66; BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011).

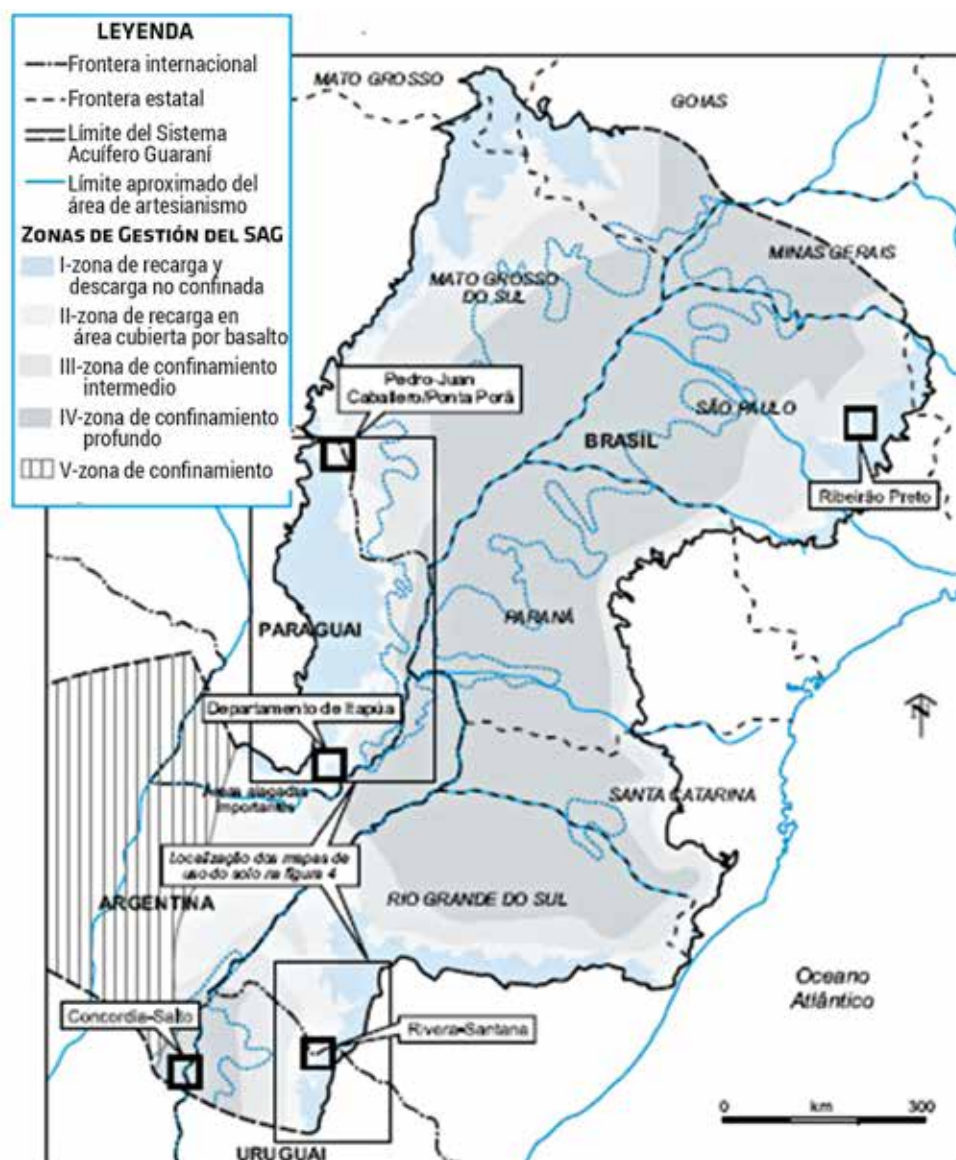


Figura 26 – El Sistema Acuífero Guaraní y sus zonas de gestión

Fuente: Foster *et al.* (2009, p. 11), adaptado de Tito Lívio Barcellos Pereira.

La Figura 26 ilustra esta heterogeneidad al proponer cinco zonas de manejo que demuestran la necesidad de enfoques de planificación distintos (FOSTER *et al.*, 2009):

- i. **zona de recarga y descarga no confinada:** el acuífero emerge en la superficie, por lo que las aguas se reponen continuamente, contribuyendo

a los recursos hídricos superficiales. Por otra parte, es frágil a la contaminación;

- ii. **zona de recarga en un área cubierta por basaltos:** la recarga se produce a través de fracturas de basalto, siendo considerablemente menor que la zona de afloramiento. Es necesario seguir estudiando la conexión con los recursos de superficie;
- iii. **zona de contención intermedia:** la zona está cubierta por los basaltos de la formación Serra Geral, por lo tanto, no hay recarga significativa. Las aguas tienen un tiempo de residencia de más de 10.000 años y su extracción equivaldría a la minería del acuífero. El riesgo de contaminación antropogénica es muy bajo. Existe la posibilidad de problemas de calidad del agua debido al tiempo de residencia y la falta de renovación. En algunas zonas, el contenido de sales disueltas, incluidos el flúor y el arsénico, puede comprometer su potabilidad;
- iv. **zona de confinamiento profundo:** similar a la zona III, sin embargo, la capa de basalto que confina el acuífero supera los 400 metros. El costo de extracción hace inviable la explotación, excepto para el uso hidrogeotérmico;
- v. **zonas de confinamiento con alta salinidad:** además del confinamiento, las aguas de esta región tienen una alta salinidad y pueden utilizarse para fines hidrogeotérmicos o después de tratamientos, si son económicamente viables.

Aunque esta división sugiere cierta homogeneidad, existen heterogeneidades que sólo pueden ser evaluadas localmente. En el municipio de Ribeirão Preto (SP), por ejemplo, es posible encontrar las zonas I, II y III con distancias que van desde unos pocos kilómetros. Además, considerando el tiempo de residencia



de las aguas, la mayoría de los impactos terminan teniendo efectos locales. La sobreexplotación de Ribeirão Preto puede comprometer el acuífero en las ciudades que lo rodean, sin embargo, no influye en la explotación de otros países o estados brasileños.

Esta situación ilustra que, aunque las formaciones geológicas se extienden más allá de los límites nacionales, el flujo de agua subterránea tiene características locales, por lo tanto, “los efectos transfronterizos actuales y potenciales del SAG están restringidos a un rango estrecho de no más de unas pocas decenas de kilómetros, dependiendo de las condiciones hidrodinámicas locales y específicas” (OAS, 2009, p. 18). Por lo tanto, sólo habría problemas transfronterizos en el SAG si hubiera una explotación intensa y extensa de las aguas subterráneas en las zonas fronterizas.

La lógica de los caudales locales se mantiene en los estados brasileños. Por lo tanto, desde el punto de vista de la cooperación interestatal, es importante delimitar las áreas con exploraciones extensas e intensas cerca de las fronteras interestatales. La definición de zonas en las que pueden producirse daños a los flujos subterráneos interestatales o entre cuencas contribuiría a promover acciones conjuntas entre las cuencas y los Estados. El Plan Nacional de Recursos Hídricos y los Planes Estatales de Recursos Hídricos desempeñan un papel destacado en la promoción de esta cooperación.

El SAG ha logrado la notable hazaña de darse a conocer a la sociedad y fomentar acciones para el agua subterránea, aunque no existen problemas transfronterizos y la sobreexplotación se limita a puntos específicos (HIRATA; FOSTER, 2020; HIRATA; KIRCHHEIM; MANGANELLI, 2020). En gran medida, esto se justificó por la realización del Proyecto de Protección Ambiental y Gestión Integral Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (también conocido como Proyecto del Sistema Acuífero Guaraní – PSAG), entre 2003 y 2009. Este proyecto internacional contó con la participación de países del acuífero y el apoyo de varias organizaciones,



especialmente el Banco Mundial, la Organización de los Estados Americanos (OEA) y el Fondo Global para el Medio Ambiente (GEF) (VILLAR, 2015; SINDICO; HIRATA; MANGANELLI, 2018). El SAG será el objetivo de un nuevo proyecto internacional de mediano tamaño llamado Programa Estratégico de Acción para el Acuífero Guaraní: Viabilizando las Acciones Regionales ¹², organizado por los estados, el GEF y el **Banco de Desarrollo de América Latina** (CAF).

El fin del PSAG estimuló la firma del Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní y la creación del Centro Regional de Gestión de Aguas Subterráneas (CeReGAS). El Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní fue firmado por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay el 2 de agosto de 2010, y entró en vigor en noviembre de 2020. Este Acuerdo fue el primero diseñado específicamente para un acuífero en América Latina y un ejemplo de diplomacia preventiva, ya que no hubo conflictos sobre el uso de aguas subterráneas (VILLAR; RIBEIRO, 2011). La entrada en vigor del Acuerdo permite a los Estados profundizar en el proceso de cooperación, así como llama la atención sobre la necesidad de establecer la Comisión para el Acuífero Guaraní, determinando sus facultades y competencias para cumplir con los principios y objetivos del pacto (VILLAR, 2020).

El CeReGAS surgió de la necesidad de establecer una oficina regional de articulación dedicada a promover la cooperación en aguas subterráneas frente al cierre de la infraestructura institucional del PSAG. En 2014, se celebró el Acuerdo entre el Gobierno de la República Oriental del Uruguay y la UNESCO, con el objetivo de su creación como Centro de Categoría II de la UNESCO. Su propósito es promover capacidades científicas y técnicas que contribuyan a la gobernanza de los acuíferos.

12 Para obtener más información, consulte el sitio web: <https://www.thegef.org/project/implementation-guarani-aquifer-strategic-action-program-enabling-regional-actions>.



5.6 El monitoreo de los recursos hídricos subterráneos

El monitoreo de las aguas subterráneas se realiza mediante el seguimiento de los parámetros hidráulicos y/o biofísico-químicos en el tiempo y el espacio con diversos objetivos, que pueden incluir la caracterización inicial de un acuífero o el diseño de estrategias para su protección o rehabilitación. Así, diferentes objetivos impondrán diferentes programas de monitoreo, los cuales deberán considerar: i) ubicación del punto a monitorear; ii) densidades de los puntos monitoreados y perfil constructivo de los pozos o características hidrogeológicas del punto de agua; iii) frecuencia de medición; iv) parámetros de análisis; v) datos a recolectar y vi) definición en cuanto a su forma de organización y verificación, entre otros.

Para evaluar aspectos de cantidad (disponibilidad de recursos) o calidad (contaminación natural y antropogénica), el monitoreo de las aguas subterráneas presenta una restricción fundamental: la baja capacidad de los pozos de monitoreo o pozos de producción de agua (utilizados para el monitoreo) para caracterizar los fenómenos que ocurren en el acuífero.

Los fenómenos que actúan sobre un acuífero, como la contaminación, generan plumas específicas que apenas llegan a más de 1-2 km de la fuente causal. Los pozos de monitoreo estático (a diferencia de los pozos de bombeo) solo pueden identificar la pluma que les llega si pasa a pocos metros del pozo, de lo contrario no se identificará. Por esta razón, los estudios de áreas contaminadas tienen una alta densidad de pozos (entre decenas y cientos de pozos por hectárea). Otra característica de las plumas contaminantes es que son entidades tridimensionales, es decir, es casi seguro que existe estratificación de la calidad del agua del acuífero, es decir, si el filtro del pozo no está ubicado frente a la pluma, no se detectará.

El monitoreo asociado con la caracterización de eventos de contaminación a partir de fuentes puntuales está bien desarrollado en Brasil. Y, aunque se requiere un gran número de pozos para determinar los límites de las plumas contaminantes, existen varios procedimientos estandarizados para realizarlo, tales como tecnologías de perforación de pozos, instalación de pozos multinivel e instalación de equipos de recolección de muestras de agua.

Sin embargo, cuando la vigilancia de la calidad del agua entraña fuentes difusas y multipunto, la zona afectada es muy extensa y requiere una alta densidad de pozos para reconocer el alcance de los daños al acuífero. En la práctica, este monitoreo deja de ser asertivo o genera costos muy elevados. Generalmente, la contaminación de este tipo provoca plumas muy heterogéneas en términos de concentración, lo que dificulta la interpretación de los datos.

En muchos estudios regionales, la caracterización de la contaminación del acuífero se realiza por pozos tubulares de producción de agua, es decir, aquellos en los que el posicionamiento de los filtros tiene en cuenta únicamente la producción del acuífero. Los pozos tubulares son estructuras verticales que conectan varios niveles de agua en el mismo acuífero, mezclándose en sus aguas interiores de diferentes edades y calidad química. A menudo, esta mezcla de aguas termina enmascarando la contaminación más superficial del acuífero, dejando importantes plumas indetectables.

El monitoreo de la cantidad presenta los mismos problemas, y es importante monitorear el nivel potenciométrico en el tiempo, lo que requiere mediciones periódicas y sistemáticas para evaluar las variaciones a largo plazo, como los cambios en la recarga debido al cambio climático o para identificar problemas de sobreexplotación. En este último caso, los pozos de monitoreo tendrían que instalarse en las áreas donde se encuentran los pozos de extracción de agua. De esta manera, la interpretación de los datos debe aislar aquellos que surjan de la interferencia hidráulica de una cuenca cercana o de una detracción



regional, que debe ser cuantificada. Esta cuantificación no se obtiene mediante mediciones mensuales o incluso semestrales, comunes a los programas de monitoreo regional, sino que requiere monitoreo piezométrico por hora o al menos diario, requiriendo la instalación de transductores de presión y varios pozos en la misma región.

La mayor limitación del monitoreo es la caracterización regional, cuando el objetivo es identificar la sobreexplotación o contaminación de carácter disperso derivada de la actividad agrícola y urbana. Algunos estados han implementado redes regionales de monitoreo de calidad con monitoreo semestral de sus aguas. La red de São Paulo, por ejemplo, sigue la geoquímica de 316 puntos activos de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas (CETESB, 2020). Considerando que cada pozo monitorea lo que ocurre en un radio de 200 m, el área total evaluada por cada pozo es de 0,13 km². Por lo tanto, la red está monitoreando solo el 0,02% del área estatal (~41 km²). Se encontró que existe una relación entre las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas y la ocupación del suelo en un radio de km del pozo, lo que indica que la red de pozos en lugar de monitorear el estado de São Paulo analiza la situación cercana a los 316 pozos ubicados en diferentes contextos de urbanización (PILEGGI *et al.*, 2021). Estos números dan la dimensión de la baja asertividad de las redes regionales de calidad del agua y la necesidad de repensar las redes regionales de este tipo y con este enfoque.

Para superar las limitaciones del monitoreo regional, es necesario tener claros los objetivos previstos. La red de São Paulo es eficiente en mostrar cómo las ciudades modifican la calidad del agua en el tiempo, en series históricas largas, pero limitada en la verificación de los impactos sobre las unidades acuíferas en su conjunto.

La Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (RIMAS) del Servicio Geológico de Brasil es más regional y amplia, ya que tiene como objetivo monitorear la evolución de los niveles en áreas naturales alejadas de la ocupación

humana, junto a las Estaciones Meteorológicas. Pretende rastrear la evolución de los niveles potenciométricos a lo largo del tiempo, indicando, por ejemplo, las variaciones esperadas por el cambio climático global. Por lo tanto, incluso con muchos menos pozos, la caracterización de *background* y la evolución de los niveles hidráulicos durante un largo período determina la precisión de la escala y la técnica para el objetivo previsto.

La RIMAS es una red automática de registros horarios de niveles de agua que verifica sus variaciones naturales con el fin de estimar la recarga, los parámetros hidráulicos y el cálculo del balance hídrico, así como para monitorear la variación del nivel del agua causada por la explotación del agua o la ocupación del suelo (MOURÃO; PEIXINHO, 2012). Su operación y mantenimiento son realizados por el Servicio Geológico Brasileño/Compañía de Investigación de Recursos Minerales (SGB/CPRM). Parte de las RIMAS funciona de manera integrada con la Red Hidrometeorológica Nacional (RHN), en asociación con la ANA, y se produce, por ejemplo, en la zona del acuífero de Urucuia (al oeste de Bahía) y en las cuencas de los ríos Verde Grande y Carinhanha (frontera entre Bahía y Minas Gerais).

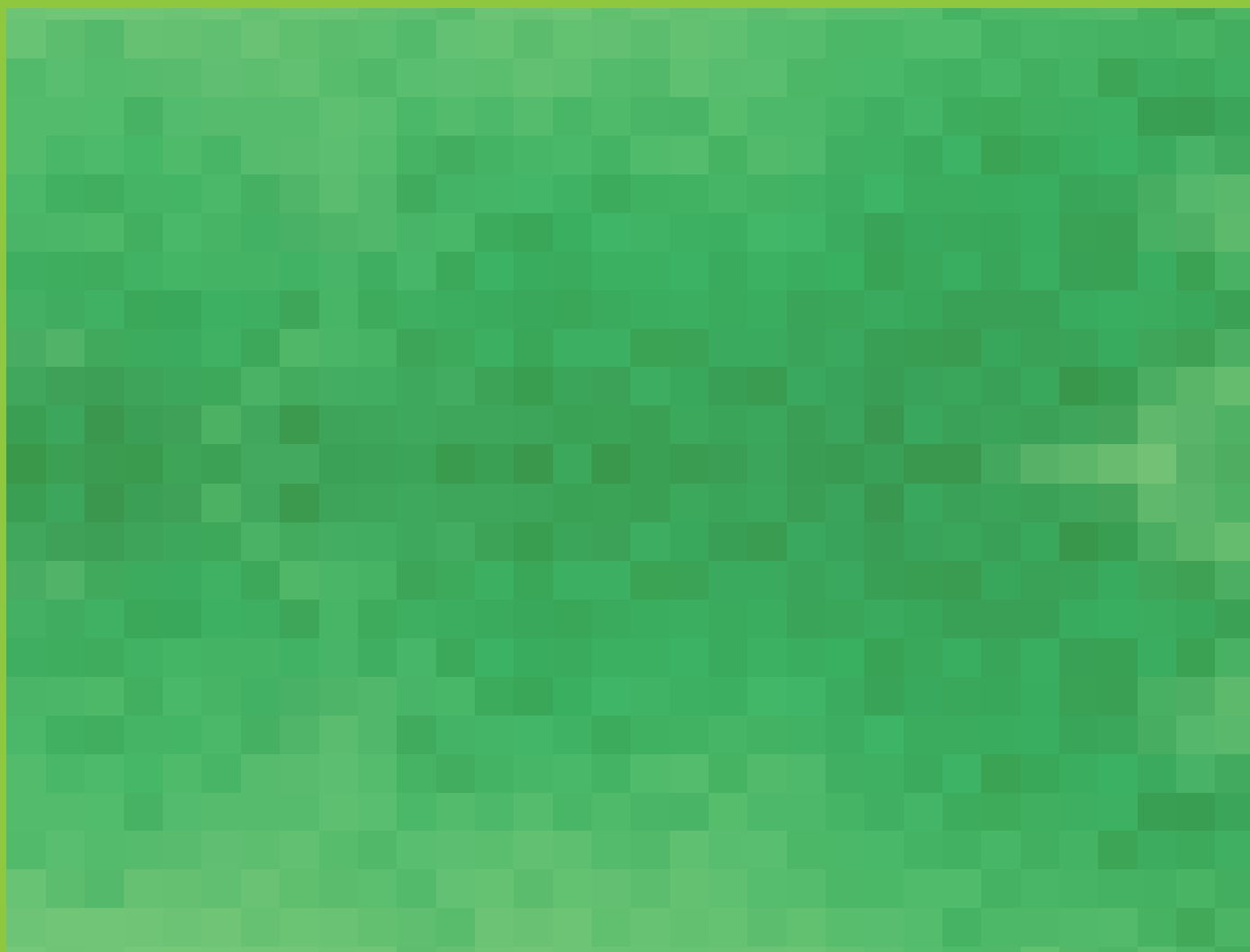
Superar la baja asertividad de los pozos de monitoreo en las redes regionales es un desafío, especialmente cuando hay pocas inversiones. Existen alternativas que utilizan diferentes estrategias. Una de ellas es complementar la red regional de calidad con los resultados de la red de vigilancia de la salud en las ciudades abastecidas de agua subterránea. La legislación exige que los puntos de la red de agua de una ciudad sean monitoreados periódicamente y que la información se envíe a las agencias de salud. Si se analizaran sistemáticamente los parámetros indicadores de contaminación regional (incluyendo conductividad eléctrica, cloruro, amonio y nitrato) y los puntos de muestreo asociados a los pozos productores identificados, existiría una extensa red de miles de puntos, en los que las variaciones en la concentración de los elementos a lo largo del tiempo podrían indicar la degradación del acuífero o parte del mismo.



Los datos contenidos en los informes de construcción de pozos tubulares podrían ayudar en el monitoreo. Por esta razón, las compañías de perforación de pozos deben estar obligadas a entregar esta información, así como la fecha de perforación, el nivel del terreno, el nivel estático y dinámico, además del flujo del pozo y su profundidad total.



Foto: AdobeStock



6

APRENDIZAJES Y DESAFÍOS



Foto: AdobeStock
Lagoa da Serra, ubicado en la ciudad de Rio da Conceição - Tocantins.

6 APRENDIZAJES Y DESAFÍOS

La gobernanza del agua en Brasil centró sus esfuerzos en un componente del ciclo hidrológico: las aguas superficiales. El Poder Público tiene dificultades para introducir las aguas subterráneas y los acuíferos en la gestión, mientras que la integración con las aguas de estuario y costeras sigue al plan de debates, y ni siquiera se discute la de las aguas meteóricas. La integración de las aguas superficiales y subterráneas es el primer paso hacia la gestión integrada de los recursos hídricos. Este tipo de gestión exige acciones conjuntas que contemplen este movimiento cíclico del agua, además de acciones específicas que consideren las particularidades de cada dimensión, bajo pena de que la sociedad pierda oportunidades sociales, ecológicas y económicas. La Tabla 7 muestra las principales distinciones entre aguas superficiales y subterráneas.

ASPECTO	AGUAS SUBTERRÁNEAS Y ACUÍFEROS	AGUAS SUPERFICIALES Y RESERVORIOS
Almacenamiento	Grande	Pequeño y mediano
Área de recursos	Relativamente sin restricciones	Restringido a los cuerpos de agua
Velocidad del flujo	Muy bajo	Media y alta
Tiempo de residencia	Generalmente décadas/siglos	Generalmente semanas/meses
Propenso a las sequías	Baja	Alta

Tabla 7 – Principales distinciones entre aguas superficiales y subterráneas

Fuente: Tuinhof *et al.* (2006, p. 2).

PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN	BAJO Y LOCALIZADO	ALTA
Evaluación del recurso	Alto costo e incierto	Bajo costo y cierto
Impactos de la extracción	Largo y disperso	Inmediato
Calidad del agua	Generalmente buena	Variable
Vulnerabilidad a la contaminación	Protección familiar variable	Sin protección
Persistencia de la contaminación	Generalmente extrema	Generalmente transitoria

Tabla 7 (Continuación)– Principales distinciones entre aguas superficiales y subterráneas
Fuente: Tuinhof *et al.* (2006, p. 2).

Las aguas subterráneas no son un recurso accesorio de las aguas superficiales, por el contrario, mantienen la disponibilidad de agua superficial. Además, el escenario de cambio climático o crisis hídricas intensifica el uso de estas aguas, que son fundamentales para el suministro público, los usos económicos y los grupos vulnerables. Por último, su tiempo de residencia hace que parte de ellas no se considere un recurso renovable, lo que requiere un debate sobre la prioridad de su uso, la forma de maximización y la garantía para las generaciones futuras.

La falta de conocimientos sobre las aguas subterráneas y los acuíferos o sobre sus usos y su papel estratégico constituye una amenaza para los recursos hídricos (subterráneos y superficiales), los ecosistemas, los seres humanos y las generaciones futuras. Además, se pierde la oportunidad de estimular el desarrollo de áreas que podrían verse favorecidas por este potencial hídrico. El Brasil se enfrenta a sequías cada vez más frecuentes, una disminución del caudal fluvial y la disponibilidad de agua en los embalses, lo que puede poner en peligro el agua, la energía, los alimentos y la seguridad económica. Este escenario aumenta el uso de acuíferos, ya sea para el suministro animal y humano, industrial o de riego. En este contexto, existen tres problemas centrales que amenazan las aguas subterráneas (CONTI, 2017):

- a. **Falta o ineficiencia de la gestión y control de las extracciones de acuíferos.** Las extracciones desordenadas generan pérdidas socioambientales y pueden comprometer la única fuente de agua disponible, especialmente en el caso de poblaciones vulnerables.
- b. **Falta o ineficiencia de acciones para mantener la calidad del acuífero o recuperarlo.** Las actividades antropogénicas pueden contaminar los acuíferos y hacer inviables importantes reservas de agua.
- c. **Falta de planificación estratégica en la gestión de los acuíferos que incorpore las presiones derivadas de la relación global-local y local-global.** El cambio climático, la pérdida de grandes bosques y el mercado internacional crean nuevas realidades de la oferta y la demanda de aguas subterráneas a las que hay que hacer frente. De acuerdo con la estructura de esta planificación, las aguas subterráneas pueden utilizarse como estrategia de adaptación y mitigación o degradación.

La solución de estos problemas se realiza a través de una gobernanza guiada por el conocimiento, la coordinación interinstitucional y la participación de los múltiples actores (institucionales y sociales) involucrados en el uso y gestión de los recursos hídricos y en la planificación territorial, ambiental y socioeconómica. Las particularidades de las aguas subterráneas refuerzan la importancia de la gobernanza, especialmente en vista de la necesidad de avanzar más allá de las acciones sectorizadas de gestión y participación de los usuarios.

El conocimiento hidrogeológico existente en Brasil es incipiente en vista de las necesidades impuestas por la gestión de los recursos hídricos, sin embargo, sólo a través de él es posible *visualizar* los acuíferos. Las aguas subterráneas se mueven a través de estructuras geológicas heterogéneas y complejas, lo que dificulta el acceso a la información y la formación de procesos de toma de

decisiones participativos y fundamentados. La invisibilidad y el desconocimiento también resultan de los conflictos entre los usuarios y entre los sectores de los recursos hídricos, el medio ambiente, la agricultura, el saneamiento, la minería y el desarrollo económico. Los usuarios no correlacionan que las pérdidas en la productividad de los pozos o su contaminación puedan ser causadas por terceros que utilicen los pozos de manera incorrecta (o irregular) o por la proximidad de actividades capaces de contaminar el suelo y los acuíferos. Sin entender las causas de estos problemas, no hay presión social contra el Poder Público gestor (VILLAR, 2016; CONICELLI *et al.*, 2021).

En Brasil, los instrumentos de mando y control son la base de la gestión del agua, sin embargo, muestran limitaciones en el caso de los recursos hídricos subterráneos. La fuerte evidencia es el alto grado de pozos no regularizados. Si el incumplimiento de la ley, en sí mismo, es un problema, otro es el desconocimiento de la existencia del número real de pozos. En Brasil, el 90% de las captaciones es privado y solo el 10% abastece redes públicas urbanas (HIRATA *et al.*, 2019). La mayoría de las captaciones son invisibles a las políticas públicas y los estados no tienen idea de la dimensión económica y el papel socioambiental de estas aguas.

Esta fuente se vuelve cada vez más popular para la oferta de diversas actividades en el campo y en la ciudad debido a la facilidad de exploración, que se basa en los siguientes puntos: bajo costo de exploración; velocidad en la perforación de pozos (en algunos casos en menos de una semana); nuevas tecnologías asociadas con la operación de pozos, permitiendo que las extracciones operen de manera casi autónoma; y disponibilidad en prácticamente todo el territorio brasileño. El pozo es la solución donde está el problema, sin aductoras.

En este contexto, la gobernanza debe construir conjuntamente las respuestas a las siguientes preguntas: ¿Cómo proteger un recurso invisible desconocido por la sociedad? ¿Quién extrae estas aguas y cómo controlar

esta extracción para conciliar el uso individual con los intereses colectivos? ¿Cómo estimular acciones para proteger los acuíferos? ¿Cómo revelar y equiparar los conflictos existentes mediante el uso? No hay respuestas correctas a estas preguntas, porque en cada acuífero, dentro del contexto de la propia cuenca hidrográfica, existe la necesidad de un proceso de gobernanza que defina cómo se utilizará frente a los servicios socioeconómicos y ecosistémicos que se realizan.

El Poder Público y los órganos de gestión de los recursos hídricos tienen un papel fundamental en este proceso, sin embargo, es necesario movilizar a otros actores e interesados. La buena gobernanza ofrece una forma más holística de avanzar en relación con los desafíos que enfrenta la gestión de las aguas subterráneas. Mucho más que agua superficial, el agua subterránea es rociada en cientos a miles de extracciones en un solo lugar. Por lo tanto, no habrá una gestión adecuada si los usuarios no son conscientes de sus responsabilidades y derechos y, sobre todo, si no participan en este proceso. Por lo tanto, la gobernanza de las aguas subterráneas debe superar las siguientes debilidades:

- **Falta de conocimiento hidrogeológico y/o dificultad para incorporar este conocimiento en la aplicación de la gobernanza hídrica.** La hidrogeología juega un papel fundamental en la gobernanza de los acuíferos en la medida en que esta Ciencia es responsable de espacializar los acuíferos y determinar los aspectos centrales de la gestión, tales como: a) cuánta agua se puede otorgar; b) cómo la extracción impacta el acuífero y los recursos hídricos dependientes; c) cuál es la calidad del agua; d) cómo conservar el acuífero; y e) cómo recuperar un acuífero. En muchos casos, incluso con la existencia de datos que demuestran situaciones de riesgo, es difícil incorporar los acuíferos en las políticas públicas y los instrumentos de gestión.

- **Falta de estudios sobre las dimensiones sociales, económicas y políticas de la gobernanza, gestión, apropiación, uso y la importancia de las aguas subterráneas.**

El debate debe ir más allá de los temas técnicos de Geología e Ingeniería e incorporar temas como: arquitectura institucional y jurídica de la gobernanza de las aguas subterráneas; valor de estas aguas; relaciones sociales y estructuras de poder detrás de la lógica de la clandestinidad, el desconocimiento y la invisibilidad; procesos de participación social en relación con estas aguas; conflictos sociales y apropiación desigual de los recursos; estrategias de Educación Ambiental, etc.

- **Fragilidades institucionales y jurídicas para promover la gobernanza de las aguas subterráneas.**

Las instituciones encargadas de organizar la gestión de los recursos hídricos enfrentan problemas relacionados con la falta de recursos para promover estudios técnicos y campañas institucionales, así como dificultades operativas y técnicas para implementar instrumentos de gestión o acciones de inspección. Al mismo tiempo, la falta de regulación o sus limitaciones dificultan la implementación de la gestión y sus instrumentos, creando conflictos legales o simplemente impidiendo su operatividad.

- **Falta de coordinación horizontal y vertical¹³ entre los órganos gestores para la implementación de políticas públicas relacionadas con las aguas subterráneas.**

El federalismo brasileño y la división de competencias en el agua, el suelo, la exploración minera y el desarrollo económico requieren la coordinación entre los diversos sectores y escalas de gobierno para

13 La coordinación horizontal se produce entre “organizaciones y actores políticos y burocráticos que conforman el mismo nivel de gobierno”, mientras que la vertical se compone de “diferentes niveles de gobierno” (SOUZA, 2018, p. 16).

promover políticas eficaces para la gestión de las aguas subterráneas. A pesar de ello, faltan iniciativas para promover esta coordinación entre la Unión, los estados, el Distrito Federal y los municipios, así como para correlacionar los recursos hídricos subterráneos, el medio ambiente, la planificación del uso del suelo, las aguas minerales y las políticas sectorizadas, como el saneamiento, la agricultura y el desarrollo.

- **Falta de compromiso y participación de los usuarios en la gestión de las aguas subterráneas.**

Los usuarios de aguas subterráneas no participan proactivamente en la gestión y monitoreo del acuífero, por el contrario, la gran mayoría de ellos están al margen de esta gestión, ya que utilizan las aguas de manera no regulada. La legislación brasileña no fomenta la formación de organizaciones de usuarios, como ocurre en otros países, restringiendo el papel de los usuarios a la participación en colegiados (CCH, CERH y CNRH). La mayoría de las veces estos usuarios no participan o están subrepresentados.

- **Desconocimiento social sobre los acuíferos y las aguas subterráneas.**

La sociedad civil, los usuarios e incluso el Poder Público no promueven el debate sobre los acuíferos. En los órganos colegiados, las discusiones y las inversiones priorizan los recursos hídricos superficiales. La mayoría de las organizaciones no gubernamentales que operan en el sector se centran en las aguas superficiales. La falta de conocimiento sobre las aguas subterráneas impide la participación, ya que los actores sociales no entienden la importancia de gestionar el recurso o las consecuencias de no hacerlo. La falta de conocimiento no permite al colectivo establecer un sentido de relevancia, urgencia o prioridad para estas aguas.

En este sentido, la gobernanza, gobernabilidad y gestión de los recursos hídricos subterráneos pasa por la siguiente agenda mínima:

- reconocimiento regional de los acuíferos potenciales y sus principales funciones ecosistémicas mediante estudios que salgan de lo obvio e incorporan las diversas funciones que desempeñan las aguas subterráneas, incluida su importancia económica (cuantificarla) y ecológica (reconocerla);
- estudio sobre la relación de los acuíferos con otros cuerpos de agua, cuantificando los vertidos de aguas subterráneas en la perpetuidad de ríos, lagos, manglares y pantanos a partir del análisis de cuencas fluviales y la modelización numérica regional;
- identificación de áreas críticas de recursos de aguas subterráneas, es decir, aquellas con mayor uso del agua, tanto para el suministro público como privado, o aquellas en las que se identifica el mayor peligro de contaminación (en el sentido de FOSTER; HIRATA, 1988), desde el registro de posibles fuentes de contaminación y vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación;
- identificación de los actores involucrados en el uso y gestión de los recursos hídricos, tanto territoriales como ambientales;
- identificación de comunidades y grupos vulnerables que dependen de las aguas subterráneas;
- creación de grupos específicos de hidrogeología en los Comités de Cuenca Hidrográfica y otras instancias que contribuyan a reflexionar sobre el uso del agua en las cuencas, especialmente en áreas críticas. Estos grupos deberían definir un programa de inversiones concreto para determinar las esferas prioritarias y los estudios que busquen soluciones;

- Llevados a cabo los estudios hidrogeológicos básicos, los organismos de gestión de los recursos hídricos, especialmente los colegiados, deben establecer grupos interdisciplinarios para pensar en acciones estratégicas para una gestión comprometida con las necesidades de la sociedad y el medio ambiente, incluidas cuestiones como la equidad y la responsabilidad social;
- creación de líneas de investigación interdisciplinarias para promover las aguas subterráneas en universidades y centros de investigación, empresas privadas y consultoras, así como grupos organizados de la sociedad civil;
- llevar a cabo una formación técnica a varios niveles para diversos públicos, siempre en línea con las políticas de gestión de los recursos hídricos subterráneos y de gobernanza;
- promoción de iniciativas de Educación Ambiental y Comunicación Social sobre aguas subterráneas y acuíferos en escuelas, sindicatos, asociaciones vecinales, etc., priorizando áreas críticas con el fin de reducir la irregularidad de las extracciones y el riesgo de uso de aguas subterráneas contaminadas. Entidades como el CREA y Vigilancia Sanitaria deberían participar en estas iniciativas;
- inclusión de cláusulas contractuales para los proveedores de servicios de saneamiento, que prevean acciones de Educación Ambiental relacionadas con las aguas subterráneas, especialmente buscando identificar al usuario privado irregular, haciéndoles conscientes de la importancia del buen uso, protección y mantenimiento de su captación;
- la búsqueda de mecanismos de incentivo para promover la regularización de los pozos;

- promoción de organizaciones de usuarios que ayuden al Poder Público en el monitoreo y fiscalización de las aguas;
- fomentar las colaboraciones con universidades y centros de investigación, la OAB y el Ministerio Público con el fin de supervisar el progreso de las políticas públicas estatales relacionadas con las aguas subterráneas;
- integración de los sistemas de información relacionados con el agua, el medio ambiente y los sectores usuarios, dando mayor visibilidad a las aguas subterráneas;
- la inclusión de las aguas subterráneas en las políticas urbanas, de saneamiento, de riego y de residuos sólidos;
- producción de indicadores de aguas subterráneas que alimenten un proceso de comunicación con la sociedad sobre los avances y fallas en la gestión del agua, así como las acciones tomadas, considerando los cursos planificados, ejecutados y de largo plazo para mejorar el uso de los recursos hídricos, incluyendo los subterráneos.

7

CONSIDERACIONES FINALES



Foto: AdobeStock
Fervedouro Rio Sono - Jalapao - Tocantins.

7 CONSIDERACIONES FINALES

Después de más de dos décadas de su institución, la Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) aún no ha entrado en pleno funcionamiento desde el punto de vista institucional o desde la aplicación de instrumentos de gestión en varias cuencas del territorio brasileño. Este escenario impacta en la gestión del agua. Las aguas subterráneas han asumido un papel coadjuvante en la gestión, a pesar de su importancia en el mantenimiento de las aguas superficiales y los ecosistemas, y su carácter estratégico en el suministro público y privado, incluida la seguridad hídrica de los grupos sociales vulnerables.

Poco a poco, los organismos del Singreh buscan fomentar la inclusión de acuíferos y proporcionar pautas para la gestión del agua. Sin embargo, se carece de datos y monitoreo sobre cómo los estados -propietarios del dominio de recursos- han promovido esta gestión. La implementación de instrumentos de gestión del agua a nivel estatal enfrenta serias dificultades para incluir las aguas subterráneas. En muchos casos, el enfoque de los acuíferos en los planes de cuenca tiene lugar superficialmente, sin definir las áreas prioritarias para la gestión. Los pozos concesionados son la excepción, ya que la mayoría absoluta de los usuarios no están regularizados y no ven ningún beneficio en la legalización. Por otro lado, existe tolerancia del Poder Público en relación con esta situación ante las dificultades que enfrentan los órganos de dirección para promover la fiscalización. En muchos casos, se han otorgado permisos sin las evaluaciones hidrogeológicas necesarias para determinar el caudal explotable de los acuíferos a fin de protegerlos de la sobreexplotación. La clasificación de las masas de agua en clases, de acuerdo con los usos predominantes del agua

para acuíferos no salió del proyecto, incluso falta regulación de los Estados para su aplicabilidad. El cobro, a su vez, cuando existe, es ineficaz frente al escenario de no regularización de los pozos.

En general, el país cuenta con un marco jurídico-institucional capaz de promover la gestión integrada de los recursos hídricos, sin embargo, es necesario mejorar el entorno de gobernanza hídrica con el fin de mejorar: i) la coordinación entre las diferentes entidades administrativas y la gestión sectorizada (medio ambiente, saneamiento, desarrollo económico, planificación territorial, etc.); ii) la participación y el apoyo de los actores sociales, especialmente los propietarios de pozos y las empresas de perforación; iii) la capacitación de técnicos que trabajan en la gestión; iv) la promoción de conocimientos técnicos y sociales sobre el tema; y v) la inclusión efectiva de estas aguas en los instrumentos de gestión. A partir de esta gobernanza será posible fomentar una planificación estratégica de las aguas subterráneas que tenga en cuenta la relación entre sociedad y acuífero, y acuífero, río y ecosistemas.

8 REFERENCIAS

ALY JÚNIOR, O. **O valor da água subterrânea**. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Resolução nº 317, de 26 de agosto de 2003**. Dispõe sobre o Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH) para registro obrigatório de pessoas físicas e jurídicas de direito público ou privado usuárias de recursos hídricos. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2003/317-2003.pdf>.

ANA. Agência Nacional de Águas. Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil e fiscalização dos usos de recursos hídricos no Brasil.

Supervisão geral de João Gilberto Lotufo Conejo; coordenação geral de Francisco Lopes Viana e Gisela Damm Forattini. Brasília: ANA, 2007.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água – panorama nacional**. Brasília: Engecorps/Cobrape, 2010.

ANA. Agência Nacional de Águas. Sistemas aquíferos. Mapa das áreas aflorantes dos aquíferos e sistemas aquíferos do Brasil, escala 1:1.000.000. Hidrografia. **Atlas Geográfico de Recursos Hídricos do Brasil**. 2013a. Disponível em: <http://portal1.snirh.gov.br/atlasrh2013/>.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades-Piloto (escala 1:50.000)**. Hidrogeologia e modelo numérico de fluxo da PHA no Brasil, tomo I, v. III, 2015a. 330 p. Disponível em: <https://metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/api/records/07c7cf8f-6e81-4040-b405-8361f6b4cdf9>.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Portaria nº 149, de 26 de março de 2015**. Lista de Termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos. 2015b. Disponível em: http://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fquivos.ana.gov.br%2Fimpressa%2Fnoticias%2F20150406034300_Portaria_149-2015.pdf&cLen=131815&chunk=true.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório Técnico de séries históricas e outorgas vigentes em julho de 2016 emitidas pela ANA e Unidades da Federação**. 2016. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/a13c9093-34bd-403f-88db-6ffbad2069e6>.

ANA. Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua. Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada. 2017a.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno. Brasília: ANA, 2017b.

ANA. Agência Nacional de Águas. Atlas esgotos : despoluição de bacias hidrográficas / Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA. 2017c.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Cobrança pelo uso dos recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2019.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**: informe anual. Brasília: Ana, 2020.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília: ANA, 2021.

ANDJELKOVIC, I. Guidelines on non-structural measures in urban flood management. **International Hydrological Programme (IHP)**. Paris, France, 2001.

ANDRADE, A. M. de; ALMEIDA, L. de. Aquífero Termal de Caldas Novas: Monitoramento realizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 26, n. 1, 2012. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/25048>. Acesso em: 12 mar. 2022.

ARTAXO, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o antropoceno? **Revista da USP**, v. 103, n. 13, 2014.

ASSIRATI, D. M. Sumário mineral. **Águas minerais**. Agência Nacional de Mineração (ANM), 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/agua-mineral>.

AZEVEDO, A. C. Verso e reverso das Políticas Públicas de Água para o Semiárido Brasileiro. **Revista Política e Planejamento Regional**. Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, jul./dez. 2015, pp. 373-392. ISSN 2358-4556.

AZEVEDO, J. H. **Fluxos subterrâneos e recarga do Sistema Aquífero Alter do Chão em lateritos amazônicos**: estudo de caso em Porto Trombetas, Pará. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Universidade de Brasília, UnB. Brasília, 2019. 139p.

BARBI, F.; JACOBI, P. R. Democracia e participação na gestão dos recursos hídricos no Brasil. **Revista Katálýsis**. Florianópolis, v. 10, n. 2, jul./dez. 2007, pp. 237-244.

BERGKAMP, G.; CROSS, K. **Groundwater and Ecosystem Services: towards their sustainable use**. Switzerland: IUCN (The World Conservation Union), ISGWAS, 2015.

BISWAS, A. K. Integrated Water Resources Management: is it working? **International Journal of Water Resources Development**, v. 24, n. 1, 2008, pp. 5-22.

BRASIL. IBGE/PNSB 2008. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=o-que-e>

BORGES, G. B. C. Avaliação de Tecnologias para o Monitoramento de Recursos Hidrominerais: o caso do Sistema Aquífero São Lourenço em Minas Gerais/ Gilze Belém Chaves Borges.-- Itajubá,(MG): UNIFEI, 2006

BORGHETTI, N.; BORGHETTI, J. R.; ROSAFILHO, E. F. **A integração das águas: revelando o verdadeiro aquífero Guarani**. Curitiba: Edição da Autora, 2011.

BOSON, P. H. G. Quem é responsável pelas águas minerais? **Água de minas II**. 2002. Disponível em: <http://www.almg.gov.br/RevistaLegis/Revista34/patricia34.pdf>.

BRASIL (Constituição, 1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 7.841, de 08 de agosto de 1945.** Código de Águas Minerais. Disponible en: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1937-1946/del7841.htm.

BRASIL. **Lei nº Lei nº 9.433/1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponible en: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm.

BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. Disponible en: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recursos Hídricos.** Prioridades 2012-2015. Brasília: CNRH, 2011.

BRASIL. **Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018.** Regulamenta o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, a Lei nº 6.567, de 24 de setembro de 1978, a Lei nº 7.805, de 18 de julho de 1989, e a Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. Disponible en: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9406.htm.

BUDDS, J.; LINTON, J.; McDONNELL, R. The hydrosocial cycle. **Geoforum**, n. 57, 2014, pp. 67-169.

CABRAL, J. J. S. P. Movimento das águas subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A (Orgs.). **Hidrogeologia** – conceitos e aplicações. 3. ed. rev. e ampl. Curitiba: CPRM, 2008, pp. 77-91.

CAMARGO, E.; RIBEIRO, E. A proteção jurídica das águas subterrâneas no Brasil. *In*: RIBEIRO, W. C. **Governança da água no Brasil**: uma visão interdisciplinar. São Paulo: Annablume, FAPESP, CNPq, 2009.

CAMPOS, J. E. G.; CORREA, P. M. Critérios para determinação de vazões outorgáveis em mananciais subterrâneos: aplicação no Distrito Federal. São Paulo: UNESP, Geociências, v. 32, n. 1, 2013, pp. 23-32.

CARDOSO, I. Programa Nacional de Águas Subterrâneas – PNAS. **Meio Ambiente Brasil**. 2009. Disponível em: <https://sites.google.com/site/aabrasilma/Home/planos-de-acao/ds/dsrh/recursos-hidricos/programanacionaldeaguassubterraneas-pnas>.

CARVALHO, A. M.; HIRATA, R. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. **Geologia USP**, v. 12, n. 1, 2012, pp. 53-70. (Série Científica).

CASAGRANDE, R.; ABREU, K. **Parecer da Comissão de Constituição, Justiça e Cidadania (CCJ) nº 1.283, de 2010, sobre a Proposta de Emenda à Constituição nº 43, de 2000**. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=3910063&ts=1593983836886&disposition=inline>.

CAUBET, C. G. Os contextos normativos brasileiros em matéria de águas subterrâneas. *In*: RIBEIRO, W. C. (Org.). **Governança da água no Brasil**: uma visão interdisciplinar. São Paulo: Annablume, 2009.

CETESB. Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo: boletim 2020. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/publicacoes-e-relatorios/>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 5, de 10 de abril de 2000**. Estabelece diretrizes para a formação e funcionamento dos Comitês de Bacia Hidrográfica. Disponível em: <https://conexaoagua.mpf.mp.br/arquivos/legislacao/resolucoes/resolucao-cnrh-005-2000.pdf>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 15, de 11 de janeiro de 2001**. Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas. Disponível em: <https://www.sema.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2017/09/Resolu%C3%A7%C3%A3o-CNRH-n%C2%BA-15-de-2001.pdf>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 16, de 8 de maio de 2001**. Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=97757>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002**. Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/67-resolucao-n-22-de-24-de-maio-de-2002/file>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução CNRH nº 48, de 21 de março de 2005**. Estabelece critérios gerais para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/Legislacao/Resolucao_CNRH_n_048-2005.pdf.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 58, de 30 de janeiro de 2006**. Aprova o Plano Nacional de Recursos Hídricos, e dá

outras providências. Disponível em: <https://www.sema.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2017/09/Resolu%C3%A7%C3%A3o-CNRH-n%C2%BA-582006.pdf>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 76, de 16 de outubro de 2007**. Estabelece diretrizes gerais para a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/aguas-subterraneas/17-resolucao-n-76-de-16-de-outubro-de-2007/file>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução CNRH nº 91, de 5 de novembro de 2008**. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CNRH%20n%C2%BA%2091.pdf>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 92, de 5 de novembro de 2008**. Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro. Disponível em: <https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=107829>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 126, de 29 de junho de 2011**. Estabelece as diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para a integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-126-2011_114624.html.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 145, de 12 de dezembro de 2012**. Estabelece diretrizes para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e dá outras providências. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%20145.pdf>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 153, de 17 de dezembro de 2013**. Estabelece critérios e diretrizes para implantação de Recarga Artificial de Aquíferos no território Brasileiro. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/aguas-subterraneas/1715-resolucao-153-recarga/file>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 184, de 7 de dezembro de 2016**. Estabelece diretrizes e critérios gerais para definição das derivações e captações de recursos hídricos superficiais e subterrâneos... Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/1978-resolucao-n-184-de-07-de-dezembro-de-2016/file>.

CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 202, de 28 de junho de 2018**. Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplem a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56128847/do1-2018-12-20-resolucao-n-202-de-28-de-junho-de-2018-56128598.

COCKELL, C.; CORFIELD, R.; EDWARDS, N.; HARRIS, N. **Sistema Terra-Vida** – uma introdução. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 360 p.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para

o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acr.pdf>.

CONICELLI, B. P.; HIRATA, R.; GALVÃO, P.; ARANDA, N.; TERADA, R.; GUZMAN-GUTIERREZ, O. Groundwater governance: the illegality of exploitation and ways to minimize the problem. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, 2021, pp. 9-16.

CONTI, K. I. **Norms in Multilevel Groundwater Governance & Sustainable Development**. Faculty of Social and Behavioural Sciences (PhD thesis). Amsterdam Institute for Social Science Research (AISSR), 2017.

COSTA, D. A.; ASSUMPÇÃO, R. S. F. V.; AZEVEDO, J. P. S.; SANTOS, M. A. **Dos instrumentos de gestão de recursos hídricos** – o enquadramento como ferramenta para reabilitação de rios. Rio de Janeiro, v. 43, n. especial 3, dez. 2019, pp. 35-50.

COSTA, M. L. M.; RIBEIRO, M. M. R.; REGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T. Proposição de critérios de outorga para águas subterrâneas. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, jan./mar. 2011, pp. 105-113.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la Ville de Dijon**. Paris: Dalmont, 1856.

DEMING, D. The aqueducts and water supply of ancient Rome. **Groundwater**, v. 58, n. 1, Jan./Feb. 2020, pp. 152-161.

DINIZ, E. **Crise, reforma do Estado e governabilidade**. Brasil, 1985-1995. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1999. 228 p.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B. O.; SILVA, R. C.; FEIJÓ, P. T. L. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo**. Instruções Técnicas. Rio de Janeiro: CPRM, 2014. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Estudos-Hidrologicos-e-Hidrogeologicos/Mapa-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-756.html>.

EHRlich, P. R.; EHRlich, A. H. **Extinction**: the causes and consequences of the disappearance of species. New York: Random House, 1981.

EMERSON, K., NABATCHI, T.; BALOGH, S. An integrated framework for collaborative governance. **Public Adm Res Theory**, v. 22, n. 1, 2012, pp. 1-29.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global framework for action to achieve the vision on groundwater governance**. Rome, Italy, 2016.

FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (Eds.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.

FERNANDES, L. C. S. Panorama do arcabouço legal das águas subterrâneas do Brasil. **Revista de Direito Ambiental**, v. 94, 2019, pp. 339-378.

FERREIRA JÚNIOR, V. O. C. A gestão das águas minerais e subterrâneas à luz da Constituição Federal de 1988. **Revista de Doutrina da 4ª Região**. Porto Alegre, n.18, jun. 2007. Disponível em: https://revistadoutrina.trf4.jus.br/index.htm?https://revistadoutrina.trf4.jus.br/artigos/Edicao018/Valter_Junior.htm.

FOSTER, S.; AIT-KADI, M. Integrated Water Resources Management (IWRM): how does groundwater fit in? **Hydrogeology Journal**, n. 20, 2012, pp. 415-418.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas**. Una metodología basada en datos existentes. Lima, Peru: CEPIS – Technical Report (OPS/OMS/HPE), 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; CUSTODIO, E. Waterwells: why is legality not more attractive? **Hydrogeology Journal**, v. 29, 2021, pp. 1365-1368. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02319-x>.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection**. A guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Washington: The World Bank, 2002. 103 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Washington: Banco Mundial, 2006, 104 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. **The guarani aquifer initiative** – towards realistic groundwater management in a transboundary context. System. Briefing notes series. Note 15. The World Bank, GWMATE. 2009. Disponible en: <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/case-studies/americas-and-caribbean/transboundary.-groundwater-management-issues-for-guarani-aquifer-368-english.pdf>.

FOSTER, S.; STEENBERGEN, F. Conjunctive groundwater use: a 'lost opportunity' for water management in the developing world? **Hydrogeology Journal**, n. 19, 2011, pp. 959-962.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1979. 604 p.

GALILI, E.; NIR, Y. The submerged pre-pottery neolithic water well of Atlit-Yam, northern Israel and its palaeoenvironmental implications. **Holocene**, v. 3, n. 3, 1993, pp. 265-270.

GARDUÑO, H.; VAN STEENBERGEN, F.; FOSTER, S. **Stakeholder participation in Groundwater Management**. GW Mate Briefing Note Series. World Bank: Washington DC, USA, 2010.

GENARO, D. T.; PEIXINHO, F. C.; MOURÃO, M. A. A Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS): 10 anos de implementação e operação. Poster. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu-PR, 24 a 28 de novembro de 2019.

GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. **Methods in Kart Hydrogeology**. ed. Taylor & Francis, London, 2007.

GONÇALVES, A. F. O conceito de governança. XIV Congresso Nacional Conpedi. **Anais do XIV Congresso Nacional Conpedi**. Fortaleza, 2005. Disponível em: <http://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fwww.publicadireito.com.br%2Fconpedi%2Fmanaus%2Farquivos%2Fanais%2FXIVCongresso%2F078.pdf&clen=180447&chunk=true>.

GRANJA, S. I. B.; WARNER, J. A hidropolítica e o federalismo: possibilidades de construção da subsidiariedade na gestão das águas no Brasil? **Revista de Administração Pública**, v. 40, n. 6, dez./2006, pp. 1097-1121.

GRANZIERA, M. L. M. **Direito ambiental**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015.

GRIEBLER, C.; AVRAMOV, M. Groundwater ecosystem services: a review. **Freshwater Science**, v. 34, n. 1, Mar. 2015, pp. 355-367.

GRIGG, N. **Water resources management: principles, regulations and cases**. New York: McGrawHill, 1996. 540 p.

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 738 p.

GUPPY, L.; UYTENDAELE, P.; VILLHOLTH, K. G.; SMAKHTIN, V. **Groundwater and Sustainable Development Goals: analysis of interlinkages**. United Nations University Institute for Water, Environment and Health. Hamilton, Canada, 2018 (UNU-INWEH Report Series, Issue 04).

GWP. Global Water Partnership. **Integrated Water Resources Management**. TAC Background Papers n. 4. GWP. Stockholm, Sweden. 2000. Disponível em: http://www.gwp.org/Global/GWP-CACENA_Files/en/pdf/tec04.pdf.

HEALY, R. W. **Estimating Groundwater Recharge**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010. 244 p.

HIRATA, R.; FOSTER, S. Guarani Aquifer System: from regional reserves to local use. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 53, 2020, p. 91.

HIRATA, R.; FOSTER, S.; OLIVEIRA, F. **Águas subterrâneas urbanas no Brasil: avaliação para uma gestão sustentável**. São Paulo: Ed. da Fapesp e IGc-USP, 2015. 111 p.

HIRATA, R.; KIRCHHEIM, R.; MANGANELLI, A. Diplomatic advances and setbacks of the Guarani Aquifer System in South America. **Environmental Science & Policy**, v. 114, 2020, pp. 384-393.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2019.

HIRATA, R.; VARNIER, C. Águas subterrâneas e agronegócios. *In*: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, v. 10, 1998.

HIRATA, R.; CONICELLI, B. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, 2012, pp. 297-312.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>.

JACOBSON, C. R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 6, 2011, pp. 1438-1448.

JARVIS, T. W. *et al.* International borders, groundwater flow and hydroschizophrenia. **Groundwater**, v. 43, n. 5, 2005, pp. 764-770.

KENNEDY, K.; SIMONOVIC, S.; TEJADA-GUIBERT, A.; DORIA, M. F.; MARTIN, J. L. **IWRM implementation in basins, sub-basins and aquifers: state of the art review**. The United Nations World Water Assessment Programme. Unesco, 2009.

KLAAS D.K.S.Y; IMTEAZ M. A; ARULRAJAH, A; SUDIAYEM, I; KLAAS, E.M.E; KLAAS, E.C.M (2018). Evaluation of the effects of surface slope in discretization of groundwater models. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 151, 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/151/1/012012

LANNA, A. E. L. A gestão dos recursos hídricos no contexto das políticas ambientais. In: MUÑOZ, Héctor Raúl (Coord.). **Interfaces da gestão dos recursos hídricos: desafios da Lei de Águas**. Brasília: MMA/SRH, 2000, pp. 75-108.

LANNA, A. E. L.; PEREIRA, J. S.; HUBERT, G. Os novos instrumentos de planejamento do Sistema Francês de Gestão de Recursos Hídricos: II - Reflexões e propostas para o Brasil. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 2, abr./jun. 2002, pp. 109-120.

LEAL, M. S. **Gestão ambiental de recursos hídricos: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 1998.

LEBAC/UNESP. Laboratório de Estudos de Bacias/Universidade Estadual Paulista. **Informe Final de Hidrogeologia** – Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. Consórcio Guarani. Rio Claro, SP: Departamento de Geologia Aplicada (DGA) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE). Universidade Estadual Paulista (UNESP). São Paulo, 2008.

LINTON, J.; BUDDS, J. The hydrosocial cycle: defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. **Geoforum**, n. 57, 2014, pp. 170-180.

LLAMAS, M. R.; MARTINEZ-CORTINA, L. Groundwater irrigation and poverty alleviation. **Proc. IWRA Regional Symposium: Water for Human Survival**, 27-30 Nov. New Delhi: Central Board for Irrigation and Power, v. 2, 2002, pp. 134-143.

MADANI, K.; DINAR, A. Non-cooperative institutions for sustainable common pool resource management: application to groundwater. **Ecological Economics**, v. 74, 2012, pp. 34-45.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Orgs.). **Hidrogeologia – conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, pp. 53-75.

MEGDAL, S. B.; GERLAK, A. K.; VARADY, R. G.; HUANG, L.-Y. Groundwater Governance in the United States: common priorities and challenges. **Groundwater**, 2014, v. 53, n. 5, pp. 677-684. doi:10.1111/gwat.12294.

MELO, J. A. M. H.; SCHIER, A. C. R. O direito à participação popular como expressão do Estado Social e Democrático de Direito. **A&C Revista de Direito Administrativo & Constitucional**. Belo Horizonte, ano 17, n. 69, jul./set. 2017, pp. 127-147. DOI: 10.21056/aec.v17i69.825.

MILARÉ, E. **Direito do ambiente**. 12. ed. São Paulo: Thomson Reuters Brasil, 2020.

MIRANDA, G. M.; REYNARD, E. Integrated water resources management in federations: the examples of Brazil and Switzerland. **Water**, v. 12, n. 7, 2020.

MOURÃO, M.A.A.; PEIXINHO, F.C. (2012). A Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil: Desafios e Estágio Atual de Implantação. **Águas Subterrâneas** [S.l.], 2012. Disponível em: <https://aguasubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27659>. Acesso em: 12/01/2021.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.

NAVARRETE, C. M.; GARCÍA, A. G. **Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano**. Metodología y

aplicación al territorio. Madrid: IGME, 2003, 273 p. (Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas).

NOBRE, A. D. **O futuro climático da Amazônia**. São José dos Campos, SP: ARA/INPE/ INPA, 2014.

OAS. Organization of American States. **Guarani Aquifer: strategic action program**. Acuífero Guaraní: programa estratégico de acción. Bilingual edition. Brazil: OAS, 2009. Disponible en: http://iwlearn.net/iw-projects/Fsp_112799467571/reports/strategic-action-program/view.

OECD. **Water Resources Governance in Brazil**, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, 2015.

OKI, T.; ENTEKHABI, D.; HARROLD, T. I. The global water cycle. *In*: SPARKS, R. S. J.; HAWKESWORTH, C. J. (Eds.). **State of the planet: frontiers and challenges in geophysics**, geophysical monograph series. AGU Publications, v. 150, n. 414, 2004, pp. 225-257.

OLIVEIRA, F. R.; PRETO, L. A.; LIMA, K. J.; CARDOSO, F. B. F.; GASPAR, M. T. P.; MARRA, C. F. Methodology for the selection os priority areas to recharge the aquifers to implementing conservationist practices in watersheds. 47th IAH Congress. Brazil 2021

PALERM, J. **Cuadro localización galerías filtrantes (qanats) en México**. 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/324165405_Cuadro_localizacion_galerias_filtrantes_qanats_en_Mexico.

PALERM, J. Las galerías filtrantes o qanats en México: introducción y tipología de técnicas. **Agricultura, sociedad y desarrollo**, v. 1, n. 2, Jul./Dic. 2004, pp.

133-145. Disponible en: <http://www.colpos.mx/asyd/volumen1/numero2/asd-02-010.pdf>.

PALERM, J. Las galerías filtrantes o qanats. *In*: PALERM, J. (Ed.). **Antología sobre pequeño riego**. Sistemas de riego no convencionales. Colegio de Postgraduados, v. III, 2002, pp. 257-290.

PETELET-GIRAUD, E.; CARY, L.; CARY, P.; GIGLIO-JACQUEMOT, A.; BERTRAND, G.; HIRATA, R.; ALVES, L.; MARTINS, V.; MELO, A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CHATTON, E.; FRANZEN, M.; AUROUET, A. Multi-layered water resources, management, and uses under the impacts of Global Changes in a Southern Coastal Metropolis: when will it be already too late ? Crossed analysis in Recife, NE Brazil. **Environmental Science & Policy**, v. 13, 2017.

PILEGGI, F.; HIRATA, R. C. A.; CONICELLI, B.; ARANDA, N. Support method for interpretation of regional groundwater monitoring in urban areas. **Brazilian Journal of Geology**, v. 51, 2021, pp. 1-10.

PITT, R. *et al.* Infiltration through compacted urban soils and effects on biofiltration design. **Journal of Water Management Modeling**, v. 6062, 2003.

PIYAPONG, J.; THIDARAT, B.; JARUWAN, C.; SIRIPHAN, N.; PASSANAN, A. Enhancing citizens' sense of personal responsibility and risk perception for promoting public participation in sustainable groundwater resource management in Rayong Groundwater Basin, Thailand. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 9, 2019.

POETER, E.; FAN, Y.; CHERRY, J.; WOOD, W.; MACKAY, D. **Groundwater in our water cycle** – getting to know Earth's most important fresh water source. Guelph, Ontario, Canada: The Groundwater Project, 2020, 136 p. ISBN:978-1-7770541-1-3.

POMPEU, C. T. **Direito de águas no Brasil**. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2006.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**. São Paulo: USP, v. 22, n. 63, 2008, pp. 43-60. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10292>.

PRETTY, J. N. Participatory learning for sustainable agriculture. **World Development**, v. 23, n. 8, 1995, pp. 1247-1263.

QUEIROZ, E. T.; PONTES, C. H. C. **Estudo diagnóstico das águas minerais e potáveis de mesa do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, Diretoria de Fiscalização da Atividade Minerária, 2015.

QUEVAUVILLER, P.; BATELAAN, O.; HUNT, R. J. Groundwater regulation and integrated water planning. *In*: JAKEMAN, A. J.; BARRETEAU, O.; HUNT, R. J.; RINAUDO, J. D.; ROSS, A. (Eds). **Integrated Groundwater Management**. Springer, Cham, 2016, pp. 197-227.

QUICK, K. S.; BRYSON, J. Theories of public participation in governance. *In*: TORBING, J.; ANSELL, C. **Handbook of Theories of Governance**. Edward Elgar, 2016, pp. 1-12.

REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas. *In*: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Orgs.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 2006, pp. 111-144.

RIBEIRO, N. B.; JOHNSON, R. M. F. Discussions on water governance: patterns and common paths. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo, v. 21, 2018.

RODELL, M. et al., 2015. The observed state of the water cycle in the early 21st century. *J. Clim.* 28, 8289–8318, 2015.

ROGERS, P.; HALL, A. W. **Effective water governance**. Stockholm: Global Water Partnership, 2003.

SÃO PAULO. **Lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991**. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1991/ lei-7663-30.12.1991.html>.

SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. Governo do Estado de São Paulo. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**, 2014. Disponível em: <http://arquivo.ambiente.sp.gov.br/cea/2014/11/01-aguas-subterraneas-estado-sao-paulo.pdf>.

SCALON, M. G. B. Águas minerais e recursos hídricos: uma perspectiva de gestão integrada. **Revista de Direito, Estado e Recursos Naturais**, v. 1, n. 1, 2011, pp. 131-160.

SERRA, Silvia Helena. **Águas minerais do Brasil**. Campinas, SP: Millennium, 2009. 277 p.

SEWRPC. 2006. “State-of-the-Art of Water Supply Practices”. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission (SEWRPC). Technical Report N.º 43, Chapter VI – Artificial Groundwater Recharge and Management (preliminary Draft) (Disponível em URL http://www.sewrpc.org/watersupplystudy/pdfs/tr-43_chapter-6_preliminary_draft.pdf).

SHIKLOMANOV, I. A.; RODDA, J. C. **World water resources at the beginning of the twenty-first century**. Unesco International Hydrology Series. Cambridge: University Press, 2003.

SINDICO, F.; HIRATA, R; MANGANELLI, A. The Guarani Aquifer System: from a beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 20, 2018, pp. 49-59.

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. **Applied hydrogeology of fractured rocks**. Springer Science & Business Media, 2010.

SOUZA, C. **Coordenação de políticas públicas**. Brasília: Enap, 2018.

STJ. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial nº 1.296.193 - RJ** (2011/0288207-8). Relator: Ministro Hermam Benjamin. Brasília: DJe, 07 nov. 2016a.

STJ. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial nº 1.306.093 – RJ** (2011/0145236-6). Relator: Ministro Hermam Benjamin. Brasília: DJe, 07 nov. 2016b.

TANG, Z. *et al.* Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. **Journal of Environmental Management**, v. 76, n. 1, 2005, pp. 35-45.

TÓTH, J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. **Journal of Geophysical Research**, n. 68, 1963, pp. 4795-4812.

TOVAR, J. Conceito e propriedade das nascentes. **Revista do Serviço Público**, v. 67, n. 1, 1955, pp. 96-105. Disponível em: <https://www.revista.enap.gov.br/index.php/RSP/article/view/5154>.

TUINHOF, A.; DUMARS, C.; FOSTER, S.; KEMPER, K.; GARDUÑO, H.; NANNI, M. **Groundwater resource management an introduction to its scope and practice.** Sustainable groundwater management concepts and tools. Briefing Note Series, Note 1. The World Bank, 2006. Disponible en: http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources/4602122-1210186362590/GWM_Briefing_1.pdf.

UN-WAAP. United Nations – World Water Assessment Programme. **Water for people, water for life.** Paris: Unesco, 2003. Disponible en: <http://www.unesco.org/publishing>.

USGS. United States Geological Survey. **O ciclo d'água.** The water cycle. Portuguese. 2019. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/images/o-ciclo-d-gua-water-cycle-portuguese>.

VILLAR, P. C. **Aquíferos transfronteiriços: governança das águas e o Aquífero Guarani.** Curitiba: Juruá, 2015.

VILLAR, P. C. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. **Ambiente & Sociedade.** São Paulo, v. 19, n. 1, jan./mar. 2016, pp. 83-102. Disponible en: http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n1/pt_1809-4422-asoc-19-01-00085.pdf.

VILLAR, P. C. International cooperation on transboundary aquifers in South America and the Guarani Aquifer case. **Revista Brasileira de Política Internacional**, v. 59, 2016, pp. 1-20.

VILLAR, P. C. The agreement on the Guarani Aquifer enters into force: what changes now? 2020. **International Water Law Project Blog.** Disponible en: <https://www.internationalwaterlaw.org/blog/2020/11/16/the-agreement-on-the-guarani-aquifer-enters-into-force-what-changes-now/>.

VILLAR, P. C.; GRANZIERA, M. L. M. **Direito de águas à luz da governança**. Brasília: ANA, 2020.

VILLAR, P. C.; HIRATA, R. **A interpretação dos tribunais frente ao artigo 45 da Lei 11.445/2007 e a perfuração de poços como fontes alternativas de abastecimento de água**. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2021. Disponível em: <https://aguassubterrneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29420>.

VILLAR, P. C.; HIRATA, R. Groundwater Governance and the Construction of Legal Indicators for Brazilian States. **Ambiente e Sociedade**, v. 25, 2022.

VILLAR, P. C.; RIBEIRO, W. C. The agreement on the Guarani Aquifer: a new paradigm for transboundary groundwater management? **Water International**, v. 36, n. 5, 2011, pp. 646-660.

VILLHOLTH, K. G.; CONTI, K. I. Groundwater governance: rationale, definition, current state and heuristic framework. *In*: VILLHOLTH, Karen G.; LOPEZ-GUNN, E.; CONTI, K.; GARRIDO, A.; VAN DER GUN, J. (Eds.). **Advances in groundwater governance**. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2018, pp. 3-31.

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. **Groundwater and surface water: a single resource**. Denver: U.S. Geological Survey Circular 1139, 1999. 79 p.

WOESSNER, W.W. **Groundwater-surface water exchange**. Ontario: The Groundwater Project, 2020. 136 p.

Foto: AdobeStock

Emergencia de aguas subterráneas en el Parque Estadual Jalapão - TO. Acuífero de Urucuia.

En cooperación



MINISTERIO DE
DESARROLLO REGIONAL



ISBN 978-658810136-0



9 786588 101360