



GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS:

DESAFÍOS Y CAMINOS



AGENCIA NACIONAL DE AGUAS
Y SANEAMIENTO - BRASIL

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 A. N. de Castro

Filipe de Mello Sampaio Cunha

AGENCIA NACIONAL DE AGUAS Y SANEAMIENTO – BRASIL
MINISTERIO DE DESARROLLO REGIONAL

GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS:

DESAFÍOS Y CAMINOS

Brasília – DF
ANA
2022

© 2022, **Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento – Brasil (ANA).**

Sector Policial, Área 5, Cuadra 3, Bloques "B", "L", "M" y "T".

Código Postal: 70610-200, Brasília – DF

PABX: (61) 2109-5400 / (61) 2109-5252

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

Comité de Edición

Joaquim Gondim (coordinador)

Humberto Cardoso Gonçalves

Felipe de Sá Tavares

Nazareno Araújo (secretario ejecutivo)

Equipo editorial

Organización

Pilar Carolina Villar

Autores

Pilar Carolina Villar

Ricardo Hirata

José Luiz Albuquerque Filho

Ana Maciel de Carvalho

Colaboradores

Adivane Terezinha Costa

Alberto Manganelli

Alexandre Saia

Amélia Fernandes

Ana Carolina Corberi Famá Ayoub e Silva

Antonio Luiz Pinhatti

Bruno Conicelli

Camila de Lima

Daniel José da Silva

Daniele Tokunaga Genaro

Didier Gastmans

Drielly Sousa Rodrigues

Dua Kudushana Singgih Yejezkial Klaas

Frederico Cláudio Peixinho

Gabriel de los Cobos

Hermam Vargas

Ingo Wahnfried

Jacinta Palerm

João Alberto Oliveira Diniz

João Carlos Simanke Souza

José Eloi Guimarães Campos

Jose Luis Arumi

Júlio Henrichs de Azevedo

Luciana Cordeiro de Souza-Fernandes

Malva Andrea Mancuso

Mara Akie Iritani

Marcos B. Barbosa

Marcio Cardoso

Maria Antonieta A. Mourão

Maria Luiza Machado Granziera

Oswaldo Aly Junior

Ovídio Alejandro Melo Jara

Paulo Galvão

Reginaldo A. Bertolo

Roberto Eduardo Kirchheim

Vagney Aparecido Augusto

Valmor Freddo

Veridiana T. de S. Martins

Wilson Rodrigues de Melo Junior

Zulema Guadalupe Lazos Ramírez

Consejo Editorial

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Ana Maria Zügel

Didier Gastmans

Dora Atman

Fabrizio Bueno da Fonseca Cardoso

Fernando Roberto de Oliveira

Letícia Lemos Moraes

Márcia Tereza Pantoja Gaspar

Renato Saraiva Ferreira

Roberto Eduardo Kirchheim

Vagney Aparecido Augusto

Proyecto gráfico y edición

Ladislau Lima

Supervisión editorial

Renata Rozendo Maranhão

Jorge Thierry Calasans

Fernando Roberto de Oliveira

Fabrizio Bueno da Fonseca Cardoso

Traducción

Henrique Trentini, Global Languages

Maria Isabel Zattar, Global Languages

Foto de portada

Portada: Aparición de un acuífero fracturado en la Zona Rural de Guaribas – Piauí (PI)

Foto: Érico Hiller / Banco de Imágenes ANA

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 colaboración 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)", que tiene como objetivo 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).

Las denominaciones empleadas y la presentación del material en esta publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la UNESCO sobre el estatuto jurídico de ningún país, territorio, ciudad o zona, ni de sus autoridades, ni sobre 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

A265g Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento (Brasil).

Gobernanza de las aguas subterráneas: desafíos y caminos / Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento ; Pilar Carolina Villar ; Ricardo Hirata ; José Luiz Albuquerque ; Ana Maciel de Carvalho. – Brasília : ANA, 2022. 201 p. : il.

ISBN: 978-65-88101-37-7

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)

Preparado por Fernanda Medeiros – CRB-1/1864

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – POZO DE AGUA EN EL CASTILLO DE VINCENNES, FRANCIA (SIGLO XII)	18
FIGURA 2 – FUNDAMENTOS, OBJETIVOS, DIRECTRICES, INSTRUMENTOS DE GESTIÓN Y ARQUITECTURA INSTITUCIONAL DE LA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS.....	30
FIGURA 3 – MATRIZ Y FUNCIONAMIENTO DEL SINGREH.....	32
FIGURA 4 – AGENDA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	36
FIGURA 5 – INSTRUMENTOS DE GESTIÓN DEL AGUA EN LAS POLÍTICAS PÚBLICAS.....	39
FIGURA 6 – MAPA DE LAS CONCESIONES DE EXTRACCIÓN DE AGUAS MINERALES Y POTABLES EN BRASIL	45
FIGURA 7 – VOLUMEN DE AGUA Y CAUDALES MEDIOS ANUALES EN EL CICLO HIDROLÓGICO.....	55
FIGURA 8 – CICLO DEL AGUA	56
FIGURA 9 – DISTRIBUCIÓN DE LOS ACUÍFEROS FRACTURADOS, SEDIMENTARIOS Y CÁRSTICOS EN BRASIL.....	62
FIGURA 10 – (A) PARED DE CANTERA DE GRANITO (ITAPECERICA DA SERRA, SP), CON ALTURA TOTAL DE APROXIMADAMENTE 90 M, EN LA QUE SE PUEDEN VER VARIOS BANCOS; (B) ESQUEMA DE LA PARED EN (A) CON REPRESENTACIÓN DE FRACTURAS VERTICALES (1, 2A) Y FRACTURAS INCLINADAS (2B, 2C).....	63
FIGURA 11 – PARED DE CANTERA DE BASALTO EN RIBEIRÃO PRETO (SP), DE APROXIMADAMENTE 50 M DE ALTURA.....	64
FIGURA 12 – AGUAS SUBTERRÁNEAS VOLVIENDO A LA SUPERFICIE EN LA FORMAÇÃO NOVO REMANSO, MANAUS (AM). ESTE MANANTIAL CONTRIBUYE AL CAUDAL BASE DE UN AFLUENTE DEL RÍO TARUMÃ-AÇU.....	66
FIGURA 13 - POZO EN UNA ESCUELA DE LA COMUNIDAD DE RETIRO, MUNICIPIO DE HUMAITÁ (AM), EN LA ORILLA IZQUIERDA DEL RÍO MADEIRA. LAS MARCAS EN LA PARED INDICAN EL NIVEL ALCANZADO POR EL RÍO EN 2014. EL POZO EXPLOTA DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS CUATERNARIOS.....	67
FIGURA 14 – PROCESO INICIAL DE KARSTIFICACIÓN EN ROCA CALIZA EN ENSANCHAMIENTO EN LOS PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN DE LA ROCA (DISCONTINUIDADES), POR LOS QUE CIRCULÓ EL FLUJO DE AGUA ACIDIFICADA	69
FIGURA 15 - ENTRADA DE LA CUEVA EN PAINS/MG, INDICANDO EL NIVEL DE AGUA EN LA PARTE MÁS PROFUNDA. UN EJEMPLO DE LA CONEXIÓN ENTRE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y SUPERFICIALES	70
FIGURA 16 – FUNCIONAMIENTO DE UN ACUÍFERO.....	71
FIGURA 17 – EL MARCO GEOLÓGICO COMO ELEMENTO DE BASE PARA DEFINIR EL TERRITORIO DE LA CUENCA Y EL ALMACENAMIENTO DE AGUA	73
FIGURA 18 - (A) MODELO CONCEPTUAL PARA RÍOS EFLUENTES; (B) MODELO CONCEPTUAL PARA RÍOS AFLUENTES, ESCENARIO EN EL QUE LA ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL AGUA QUE SEPARA LA ZONA SATURADA DE LA NO SATURADA ESTÁ CONECTADA AL RÍO; (C) MODELO CONCEPTUAL PARA RÍOS AFLUENTES, ESCENARIO EN EL QUE LA ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL AGUA QUE SEPARA LA ZONA SATURADA DE LA NO SATURADA ESTÁ DESCONECTADA DEL RÍO; (D) MODELO CONCEPTUAL DE FLUJO DIRECTO	76
FIGURA 19 – LA CUENCA DEL RÍO SÃO FRANCISCO Y EL SISTEMA ACUÍFERO URUCUIA (IZQUIERDA), Y LAS RELACIONES ENTRE LAS REDES DE DRENAJE DEL SAU Y EL RÍO SÃO FRANCISCO (DERECHA).....	77
FIGURA 20 - ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL SAU, LA RED DE DRENAJE DE LA MESETA Y LA FORMA EN QUE ESTAS AGUAS LLEGAN AL RÍO SÃO FRANCISCO	78
FIGURA 21 – SISTEMAS ACUÍFEROS BRASILEÑOS, SEGÚN LA ANA.....	80

FIGURA 22 – LOS PRINCIPALES ACUÍFEROS BRASILEÑOS	81
FIGURA 23 – PERFIL DE USUARIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL PAÍS	83
FIGURA 24 – DISTRIBUCIÓN DE LOS MUNICIPIOS BRASILEÑOS (TOTAL Y POR TAMAÑO DE LA POBLACIÓN) SEGÚN EL TIPO DE FUENTE DE SUMINISTRO	84
FIGURA 25 - DEPENDENCIA DE LOS ESTADOS BRASILEÑOS EN CUANTO A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS, SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE LOS POZOS TUBULARES (A: USO URBANO; B: USO RURAL)	85
FIGURA 26 - (A) NÚMERO DE CONCESIONES DE DERECHO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS VÁLIDAS; (B) CAUDAL TOTAL POR TIPO DE CONCESIONES DE DERECHO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (M3/S) (2015)	86
FIGURA 27 – PRINCIPALES SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PROPORCIONADOS POR LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	88
FIGURA 28 – ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA RELACIÓN HIDROSTÁTICA ENTRE EL AGUA DULCE Y EL AGUA SALADA EN LOS ACUÍFEROS COSTEROS	93
FIGURA 29 - MODELO CONCEPTUAL DE LOS ACUÍFEROS DE LA RMR Y SUS DIFERENTES PROCESOS DE SALINIZACIÓN	94
FIGURA 30 – ÁREAS ESTUDIADAS EN AMBIENTES DE MESETA LATERÍTICA DE LA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO	97
FIGURA 31 – DETALLE DE LAS RAÍCES QUE ATRAVIESAN LAS DIVERSAS CAPAS DEL PERFIL LATERÍTICO: I – LATOSOL AMARILLO ± 4 M; II – NÓDULOS DE BAUXITA ± 6 M; III – BAUXITA SÓLIDA ± 7 M; Y IV – ARCILLA ABIGARRADA ± 15 M	98
FIGURA 32 – (I) ÁREA CON COBERTURA VEGETAL ORIGINAL; (II) ÁREA DEFORESTADA PARA EL INICIO DE LA ACTIVIDAD MINERA DE BAUXITA; Y (III) ÁREA EN RECUPERACIÓN AMBIENTAL POSTERIOR A LA EXTRACCIÓN	99
FIGURA 33 – BLOQUE-DIAGRAMA QUE ILUSTRA LAS RELACIONES DE LOS FACTORES ABIÓTICOS (SUELO Y GEOLOGÍA) Y BIÓTICOS (COBERTURA VEGETAL, SISTEMAS RADICULARES) CON LOS EFECTOS SOBRE LA CONEXIÓN HIDRÁULICA Y LOS PATRONES DE FLUJO SUBTERRÁNEO EN LAS MESETAS LATERÍTICAS DE LA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO	100
FIGURA 34 - POLÍTICAS PÚBLICAS, TIPOS DE PLANES, ÁMBITOS GEOGRÁFICOS Y ENTIDADES COORDINADORAS DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN BRASIL	107
FIGURA 35 – DIRECTRICES PARA LA ELABORACIÓN DE PLANES DE RECURSOS HÍDRICOS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	112
FIGURA 36 - AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS PLANES DE CUENCA, BASADOS EN LAS RESOLUCIONES DEL CNRH	115
FIGURA 37 – CONCEPTO DE PERÍMETRO DE PROTECCIÓN DE POZOS	118
FIGURA 38 – ZONA DE CONTRIBUCIÓN Y ZONA DE TRANSPORTE DE UN POZO EN UN ACUÍFERO LIBRE	119
FIGURA 39 – ESQUEMA DISEÑADO PARA LA DELIMITACIÓN DE LOS PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE LOS POZOS EN ACUÍFEROS LIBRES	120
FIGURA 40 – ÁREA DE RESTRICCIÓN Y CONTROL DEL USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ (SAG) EN EL MUNICIPIO DE RIBEIRÃO PRETO, SP	122
FIGURA 41 - ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO DE ENCUADRAMIENTO DE LAS MASAS DE AGUA SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS, DEFINIDAS POR LA RES. CNRH Nº 91/2008	125
FIGURA 42 – ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS Y CONCESIÓN DE DERECHO DE USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	127
FIGURA 43 – COBRO POR EL USO DE RECURSOS HÍDRICOS EN BRASIL – COMITÉS ESTATALES	134

FIGURA 44 – EJEMPLOS DE MÉTODOS DE RECARGA DE SUPERFICIE	156
FIGURA 45 – EJEMPLOS DE MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL EN PROFUNDIDAD EN LA ZONA NO SATURADA	156
FIGURA 46 – ESQUEMA DE LOS MÉTODOS DE INYECCIÓN DIRECTA	156
FIGURA 47 – OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	163
FIGURA 48 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LAS INFRAESTRUCTURAS DEL PAD	164
FIGURA 49 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DEL SISTEMA DESARROLLADO POR LA EMBRAPA	165
FIGURA 50 – GESTIÓN COMPARTIDA DE LOS SISTEMAS DE DESALINIZACIÓN.....	165
FIGURA 51 – DIFERENTES NIVELES DE PARTICIPACIÓN PÚBLICA	171
FIGURA 52 – ÁREA DE RECARGA DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ EN SANTA CATARINA.....	173
FIGURA 53 – SECCIÓN GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DEL ESTADO DE SÃO PAULO Y SUS SISTEMAS ACUÍFEROS.....	175
FIGURA 54 – ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS EN TERRITORIO BRASILEÑO	176
FIGURA 55 – EL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ Y SUS ZONAS DE GESTIÓN	177
FIGURA 56 – RED INTEGRADA DE MONITOREO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS (RIMAS).....	183
FIGURA 57 – LÍMITES DEL ÁREA DE RESTRICCIÓN Y CONTROL (ARC) DE EXTRACCIÓN Y USO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA REGIÓN DE JURUBATUBA	185
FIGURA 58 - ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS A PARTIR DEL CRUCE DE LA INFORMACIÓN EN EL SIG DEL PROYECTO JURUBATUBA, INTEGRANDO LOS DATOS DE LAS ÁREAS CONTAMINADAS, EL SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL DE CETESB, EL REGISTRO DE LOS POZOS TUBULARES Y LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO.....	186
FIGURA 59 – MODELO DE GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN APLICADO A LA GESTIÓN DE LAS ÁREAS CRÍTICAS.....	187
FIGURA 60 – UBICACIÓN DEL ACUÍFERO SANTO DOMINGO, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO	188
FIGURA 61 – GEOLOGÍA DEL ACUÍFERO SANTO DOMINGO.....	189
FFIGURA 62 - EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN MM3 EN EL ACUÍFERO SANTO DOMINGO (USO AGRÍCOLA)....	190
FIGURA 63 – UBICACIÓN DEL ACUÍFERO GINEBRA.....	193
FIGURA 64 – PERFIL LONGITUDINAL DEL ACUÍFERO GINEBRA	194
FIGURA 65 – SECCIÓN LITOESTRATIGRÁFICA DE LAS UNIDADES COMPONENTES DEL ACUÍFERO GINEBRA.....	194
FIGURA 66 – INSTRUMENTOS JURÍDICOS RELACIONADOS CON EL FOMENTO DE LA COOPERACIÓN INTERNACIONAL EN EL ACUÍFERO GINEBRA	196

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 – PRINCIPALES RESOLUCIONES NACIONALES EMITIDAS POR EL CNRH RELACIONADAS CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	35
TABLA 2 – CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS MINERALES SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	46
TABLA 3 – CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES MINERALES EN TÉRMINOS DE GASES Y TEMPERATURA	46

TABLA 4 - ACCIONES PRIORITARIAS PARA LAS REGIONES HIDROGRÁFICAS PREVISTAS EN EL PROGRAMA NACIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	109
TABLA 5 – CLASES PARA LA CLASIFICACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	123
TABLA 6 - NORMAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE CLASE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	124
TABLA 7 – PRINCIPALES FACTORES QUE CONDUCEN A LA EXISTENCIA DE POZOS IRREGULARES Y ACCIONES DE MITIGACIÓN.....	129
TABLA 8 – PRECIO UNITARIO BÁSICO (PUB) DEL AGUA APLICADO AL COBRO POR EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ALGUNOS COMITÉS ESTATALES DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	135
TABLA 9 - PROPUESTA DE ORGANIZACIÓN DE LOS PROGRAMAS PARA EL DESARROLLO Y LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS (PDGAS).....	137
TABLA 10 - INFRACCIONES ADMINISTRATIVAS RELACIONADAS CON EL USO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	141
TABLA 11 – DELITOS AMBIENTALES RELACIONADOS CON LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	142
TABLA 12 – PRINCIPALES DISTINCIONES ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS	149
TABLA 13 - BENEFICIOS Y DIFICULTADES DE LA PARTICIPACIÓN SOCIAL.....	170

LISTA DE VÍDEOS

VIDEO 1 – CICLO DEL AGUA (CICLO HIDROLÓGICO)	55
VIDEO 2 – ESQUEMA ILUSTRATIVO SOBRE LA BOMBA BIÓTICA	57
VIDEO 3 – DOCUMENTAL RIOS VOLADORES	57
VIDEO 4 – ACUÍFERO AMAZONAS.....	66

LISTA DE BOXES

BOX 1 – EL TIEMPO DE LOS ACUÍFEROS Y EL TIEMPO DEL SER HUMANO.....	18
BOX 2 – NATURALEZA JURÍDICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	29
BOX 3 – LOS ESTADOS Y LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	40
BOX 4 – COMPETENCIAS MUNICIPALES RELACIONADAS CON LAS AGUAS.....	42
BOX 5 – ACUÍFEROS FRACTURADOS.....	63
BOX 6 – ACUÍFEROS SEDIMENTARIOS	65
BOX 7 – ACUÍFEROS KÁRSTICOS	67
BOX 8 – INTERACCIONES RÍO-ACUÍFERO: LA IMPORTANCIA DEL SISTEMA ACUÍFERO URUCUIA PARA LA CUENCA DEL RÍO SÃO FRANCISCO	75
BOX 9 – SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (SE) DE LOS ACUÍFEROS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	87
BOX 10 – CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	90
BOX 11 – INTRUSIÓN SALINA EN LOS ACUÍFEROS COSTEROS	93

BOX 12 – LA IMPORTANCIA DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS: LECCIONES APRENDIDAS EN EL SISTEMA ACUÍFERO ALTER DO CHÃO	97
BOX 13 – PLAN INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS (PIRH) DE LA UNIDAD DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS PARANAPANEMA (PIRH PARANAPANEMA)	116
BOX 14 – PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE POZOS (PPP)	117
BOX 15 – ESTABLECIMIENTO DE ÁREAS DE RESTRICCIÓN Y CONTROL DEL USO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO INSTRUMENTO DE GESTIÓN PARA LA EXPLOTACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ (SAG), EN RIBEIRÃO PRETO, SP	121
BOX 16 – ¿POR QUÉ TENEMOS TANTOS POZOS IRREGULARES?	128
BOX 17 – CRITERIOS PARA DETERMINAR LOS CAUDALES ADMISIBLES EN LOS MANANTIALES SUBTERRÁNEOS	130
BOX 18 – LOS DIFERENTES TIPOS DE VALOR DE LOS RECURSOS AMBIENTALES.....	136
BOX 19 – SISTEMA DE INFORMACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (SIAGAS).....	139
BOX 20 – EL USO CONJUNTO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS COMO ESTRATEGIA PARA AFRONTAR EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	153
BOX 21 – RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS: UNA ALTERNATIVA PARA AUMENTAR LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA.....	155
BOX 22 – REMEDIACIÓN DE ÁREAS CONTAMINADAS: VALORES GUÍA <i>VERSUS</i> REPARACIÓN AMBIENTAL INTEGRAL.....	159
BOX 23 – LA EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE QANATS O GALERÍAS FILTRANTES: EJEMPLOS EN AMÉRICA LATINA.....	162
BOX 24 – PROGRAMA AGUA DULCE.....	164
BOX 25 – LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DE YAKARTA Y SUS IMPACTOS EN LA CIUDAD.....	168
BOX 26 – ASOCIACIÓN BRASILEÑA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (ABAS)	169
BOX 27 – LA EXPERIENCIA DEL PROYECTO DE EDUCACIÓN AMBIENTAL PARA LA PROTECCIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ, EN LA ZONA DE RECARGA DIRECTA, EN EL ESTADO DE SANTA CATARINA/BRASIL	173
BOX 28 – EL ACUERDO SOBRE EL ACUÍFERO GUARANÍ	179
BOX 29 – CENTRO REGIONAL PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (CEREGAS): EJEMPLO PRÁCTICO DE LA IMPORTANCIA DE LA COOPERACIÓN INTERNACIONAL.....	180
BOX 30 – RED INTEGRADA DE MONITOREO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS (RIMAS)	182

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 – POBLACIÓN DE LAS PRINCIPALES LOCALIDADES DEL VALLE DE SANTO DOMINGO.....	188
--	-----

LISTA DE SIGLAS

AAC – Acuífero Alter do Chão	DAEE – Departamento de Aguas y Energía Eléctrica
ABAS – Asociación Brasileña de Aguas Subterráneas	DGA – Dirección General de Aguas
ABNT – Asociación Brasileña de Normas Técnicas	DNPM – Departamento Nacional de Producción Mineral
ADI – Acción Directa de Inconstitucionalidad	EMBRAPA – Empresa Brasileña de Investigación Agrícola
ALADYR – Asociación Latinoamericana de Desalinización	ETA – Planta de Tratamiento de Agua
ANA – Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento	ETE – Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
ANM – Agencia Nacional de Minería	FEHIDRO – Fondo Estatal de Recursos Hídricos
ANP – Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles	GAC – Gestión de Áreas Contaminadas
ANVISA – Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria	GCM – Modelo de Circulación General
APA – Áreas de Protección de Acuíferos	GEF – Fondo Global del Medio Ambiente
APP – Áreas de Preservación Permanente	GIRH – Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
Arco – Áreas de Restricción y Control	IAH – Asociación Internacional de Hidrogeólogos
AS – Aguas Subterráneas	IDA – Asociación Internacional de Desalinización
AUPIT – Asociación de Usuarios del Perímetro Irrigado de Tourão	IHP – Programa Hidrológico Intergubernamental
BDNAC – Base de Datos Nacional sobre Áreas Contaminadas	IPCC – Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
BHRSF – Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco	ITRC – <i>Interstate Technology Regulatory Council</i>
BNCC – Base Nacional Común Curricular	JGB – Cuenca Hidrogeológica de Yakarta
CAF – Banco de Desarrollo de América Latina	JV – Juntas de Vigilancia
CAS – Comunidad de Aguas Subterráneas	LC – Ley Complementaria
CBH – Comité de Cuenca Hidrográfica	LQP – Límite de Cuantificación Practicable
CBH-AT – Comité de la Cuenca Hidrográfica del Alto Tietê	MAPA – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento
CBH-SF – Comité de la Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco	MAR – <i>Managed Aquifer Recharge</i>
CDC – Código de Defensa del Consumidor	MCG – Cambio Climático Global
CeReGAS – Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas en América Latina y el Caribe	MDR – Ministerio de Desarrollo Regional
CETESB – Compañía Ambiental del Estado de São Paulo	MEA – Evaluación de Ecosistemas del Milenio
CF/88 – Constitución de la República Federativa de Brasil de 1988	MMA – Ministerio de Medio Ambiente
CNARH – Registro Nacional de Usuarios de Recursos Hídricos	MME – Ministerio de Minas y Energía
CNRH – Consejo Nacional de Recursos Hídricos	MPSP – Ministerio Público del Estado de São Paulo
CONAGUA – Comisión Nacional de Aguas	OAB – Colegio de Abogados de Brasil
CONAMA – Consejo Nacional del Medio Ambiente	ODM – Objetivos de Desarrollo del Milenio
CONERH – Consejo Estatal de Recursos Hídricos	ODS – Objetivos de Desarrollo Sostenible
CREA – Consejos Regionales de Ingeniería y Agronomía	OEA – Organización de los Estados Americanos
CRH – Consejo de Recursos Hídricos	ONU – Organización de las Naciones Unidas
CS – Coeficiente de Sostenibilidad	OUA – Organización de Usuarios de Aguas
DAA – vDerecho al Aprovechamiento de Aguas	PBMC – Panel Brasileño sobre el Cambio Climático
	PDGAS – Programas para el Desarrollo y la Gestión de las Aguas Subterráneas
	PEI – Plan Estatal de Regadíos
	PERH – Política (Plan) Estatal de Recursos Hídricos
	PIRH – Planes Integrados de Recursos Hídricos

PNAS – Programa Nacional de Aguas Subterráneas	SIAGAS – Sistema de Información de Aguas Subterráneas
PNDR – Política Nacional de Desarrollo Regional	SIG – Sistema de Información Geográfica
PNDU – Política Nacional de Desarrollo Urbano	SIGRH – Sistema Integrado de Gestión de los Recursos Hídricos
PNI – Política Nacional de Regadíos	SINGREH – Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos
PNLD – Programa Nacional del Libro y el Material Didáctico	SINIMA – Sistema Nacional de Información sobre el Medio Ambiente
PNMA – Política Nacional de Medio Ambiente	SINIR – Sistema Nacional de Información sobre la Gestión de Residuos Sólidos
PNOT – Política Nacional de Ordenación del Territorio	SISNAMA – Sistema Nacional del Medio Ambiente
PNPDEC – Política Nacional de Protección y Defensa Civil	SNIRH – Sistema Nacional de Información sobre Recursos Hídricos
PNRH – Política (Plan) Nacional de Recursos Hídricos	SNIS – Sistema Nacional de Información de Saneamiento
PNS – Política Nacional de Saneamiento	SNRH – Sistema Nacional de Recursos Hídricos
PNSH – Política Nacional de Seguridad Hídrica	SNSH – Secretaría Nacional de Seguridad Hídrica
PNUD – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo	SQL – <i>Structured Query Language</i>
PNUMA – Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente	SRH – Secretaría de Recursos Hídricos
PPA – Plan Plurianual	SRHU – Secretaría de Recursos Hídricos Urbanos
PPP – Perímetro de Protección del Pozos	SSD – Sistemas de Apoyo a la Decisión
PRA – Programa Estatal de Regularización Ambiental	STD – Sólidos Totales Disueltos
PSA – Pago por Servicios Ambientales	STF – Supremo Tribunal Federal
PSAG – Proyecto Sistema Acuífero Guaraní	STJ – Superior Tribunal de Justicia
PUB – Precio Unitario Básico	TVA – <i>Tennessee Valley Authority</i>
RHN – Red Hidrometeorológica Nacional	UC – Unidad de Conservación
RIMAS – Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas	UGRHI – Unidad de Gestión de Recursos Hídricos
RMR – Región Metropolitana de Recife	UNSDSN – <i>United Nation Sustainable Development Solutions Network</i>
RMSP – Región Metropolitana de São Paulo	VET – Valor Económico Total
RNQA – Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua	VI – Valor de Investigación
RPD – Recarga Potencial Directa	VMP – Valor Máximo Permitido
RPE – Reserva Potencial Explotable	VO – Valor Guía
SAG – Sistema Acuífero Guaraní	VP – Valor de Prevención
SAPR – Sistema Acuífero de la Llanura de Recife	VRQ – Valor de Referencia de Calidad
SAU – Sistema Acuífero Urucuia	ZA – Zonificación Agroecológica
SE – Servicios Ecosistémicos	ZC – Zona de Contribución
SEWRPC – <i>Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission</i>	ZEE – Zonificación Económica Ecológica
SGB-CPRM – Servicio Geológico de Brasil	
SHAC – Sector Hidrológico de Aprovechamiento Común	

PRESENTACIÓN

La gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas está prevista en la Política Nacional de Recursos Hídricos, establecida por la Ley n° 9.433/1997, y es un elemento fundamental para garantizar la seguridad hídrica en 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, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha establecido el tema *Aguas subterráneas: Hacer 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 monitoreo de los acuíferos brasileños.

La ANA también ha respondido a una creciente demanda de formación sobre este tema y, para ello, ha elaborado materiales didácticos, como el *Cuaderno de Capacitación Las Aguas Subterráneas en la Política Nacional de Recursos Hídricos*. Esta publicación es un esfuerzo más de la Agencia para fomentar la reflexión sobre la gestión de los acuíferos a nivel nacional e internacional.

Con este libro, la institución pretende contribuir a que los distintos actores sociales puedan comprender la importancia de las aguas subterráneas y cómo se pueden utilizar los instrumentos de gestión de los recursos hídricos para promover la gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas.

Debido a su calidad técnica y a la actualidad de los temas tratados, este material servirá de base para cuatro cursos en modalidad de aprendizaje a distancia (EaD) sobre el tema de las aguas subterráneas, que serán lanzados por la ANA en 2022. La publicación también contará con ediciones en inglés y portugués para ampliar su alcance.

¡Disfrute de su lectura!

Directorio Colegiado de la ANA

SUMÁRIO

PRESENTACIÓN	11
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO 1 - LA CONSTRUCCIÓN DE LA GOBERNANZA Y LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	21
1.1 GOBERNANZA, GOBERNABILIDAD Y GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: ALINEANDO CONCEPTOS	21
1.1.1 EL CONCEPTO DE GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS (GIRH) Y SU PAPEL EN LA GOBERNANZA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS	25
1.2 LA CONSTITUCIÓN FEDERAL DE 1988 Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	26
1.3 LA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH): UNA NUEVA FORMA DE GESTIONAR LAS AGUAS	30
1.4 EL ACUERDO INSTITUCIONAL PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: EL SINGREH	31
1.4.1 MINISTERIO DE DESARROLLO REGIONAL: EL NUEVO COORDINADOR DE LA GESTIÓN DE LAS AGUAS	33
1.4.2 EL CONSEJO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH) Y SU PAPEL EN EL ESTABLECIMIENTO DE DIRECTRICES SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS	34
1.4.3 EL PAPEL DE LA ANA EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	35
1.4.4 LOS COMITÉS DE CUENCA HIDROGRÁFICA (CBH) Y LA INCLUSIÓN DE LOS ACUÍFEROS EN LA GESTIÓN	37
1.5 LOS ESTADOS Y LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	38
1.6 LOS MUNICIPIOS Y SU PAPEL EN LA GESTIÓN DE LOS ACUÍFEROS	41
1.7 LA RESPONSABILIDAD DE LOS USUARIOS EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	43
1.8 AGUAS SUBTERRÁNEAS Y AGUAS MINERALES EN BRASIL	44
REFERENCIAS	49
CAPÍTULO 2 – LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL CICLO HIDROSOCIAL	53
2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	55
2.1.1 EL CICLO HIDROSOCIAL	60
2.2 QUÉ SON LOS ACUÍFEROS Y CÓMO FUNCIONAN	60
2.3 LAS INTERACCIONES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS METEÓRICAS, SUPERFICIALES Y COSTERAS	72
2.4 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BRASIL	79
2.5 ¿CÓMO Y DÓNDE SE UTILIZAN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL PAÍS?	82
2.6 LAS FUNCIONES AMBIENTALES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL CICLO HIDROLÓGICO	86
2.6.1 PERENNIZACIÓN Y REGULARIZACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO EN EL PLANETA	89
2.6.2 TRATAMIENTO DEL SISTEMA SUELO-ACUÍFERO Y LA EXCELENTE CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	89
2.6.3 SUSTENTADOR DE LA VIDA Y LOS ECOSISTEMAS	89
2.7 LAS AMENAZAS A LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS BRASILEÑOS	91

2.7.1	SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS	91
2.7.2	CONTAMINACIÓN DEL SUELO Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	95
2.7.3	REDUCCIÓN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS DEBIDO AL CAMBIO DE USO DEL SUELO Y LA OCUPACIÓN DE LA TIERRA	96
	REFERENCIAS	101
CAPÍTULO 3 – LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: DE LA TEORÍA A LA PRÁCTICA		105
3.1	PLANES DE RECURSOS HÍDRICOS	107
3.1.1	PLAN NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH)	108
3.1.2	PLAN ESTATAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PERH)	111
3.1.3	PLANES DE RECURSOS HÍDRICOS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	111
3.1.4	CONTENIDO DE LOS PLANES DE RECURSOS HÍDRICOS DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS	113
3.1.4.1	DIAGNÓSTICO Y PRONÓSTICO DE UN PLAN DE CUENCA EN EL ESTADO DE SÃO PAULO	113
3.1.5	CONTENIDO MÍNIMO SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS PLANES DE RECURSOS HÍDRICOS	114
3.1.6	INSTRUMENTOS DE GESTIÓN ESPECÍFICOS PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	117
3.2	CLASIFICACIÓN DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA, SEGÚN LOS USOS PREDOMINANTES	123
3.3	CONCESIÓN DE DERECHO DE USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS	126
3.4	COBRO POR EL USO DE RECURSOS HÍDRICOS: RECURSOS FINANCIEROS PARA PROMOVER LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	133
3.4.1	ACCIONES PARA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS QUE PODRÍAN FINANCIARSE CON UNA TASA	136
3.5	SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	138
3.5.1	SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH)	138
3.5.2	REGISTRO NACIONAL DE USUARIOS DE RECURSOS HÍDRICOS (CNARH)	138
3.6	IMPLICACIONES JURÍDICAS PARA EL USO IRREGULAR DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	140
3.7	INSTRUMENTOS DE OTRAS POLÍTICAS QUE CONTRIBUYEN A LA GOBERNANZA DE LAS AGUAS	143
	REFERENCIAS	144
CAPÍTULO 4 – GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS		147
4.1	ESTABLECIENDO UNA AGENDA DE IMPLEMENTACIÓN DE LA GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	149
4.2	ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUAS Y LA SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS	153
4.3	ESTRATEGIAS DE PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DE LOS ACUÍFEROS	158
4.3.1	GESTIÓN DE ÁREAS CONTAMINADAS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS	158
4.4	GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO MEDIO DE GARANTIZAR EL DESARROLLO SOCIOECONÓMICO	161
4.4.1	EL USO HISTÓRICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	161

4.4.2	EL PAPEL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO MEDIO PARA ALCANZAR LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	162
4.4.3	LA NECESIDAD DE CONOCER EL PAPEL SOCIOECONÓMICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	167
4.5	INTEGRANDO A LA SOCIEDAD EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: LA IMPORTANCIA DE LA PARTICIPACIÓN SOCIAL	169
4.6	COOPERACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES ÓRGANOS ADMINISTRATIVOS Y ENFOQUE EN LA GESTIÓN LOCAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	174
4.6.1	ACUÍFEROS TRANSFRONTERIZOS E INTERESTATALES: EL CASO DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ (SAG)	175
4.7	MONITOREO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS	180
4.8	GALERÍA DE CASOS	184
4.8.1	LA GESTIÓN DE ÁREAS COMPLEJAS CONTAMINADAS POR MÚLTIPLES FUENTES: EL CASO DE LA REGIÓN DEL DISTRITO INDUSTRIAL DE JURUBATUBA, SÃO PAULO	184
4.8.2	LA GESTIÓN DEL AGUA Y LA RECUPERACIÓN DEL ACUÍFERO SANTO DOMINGO, COMONDÚ, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO	188
4.8.3	LAS COMUNIDADES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (CAS) EN CHILE	191
4.8.4	EL ACUÍFERO GINEBRA (SUIZA-FRANCIA): UNA HISTORIA DE ÉXITO EN LA COOPERACIÓN TRANSFRONTERIZA A NIVEL LOCAL	193
	REFERENCIAS	197
	CONSIDERACIONES FINALES	201

INTRODUCCIÓN

La vida transcurre sobre los acuíferos. Proporcionan sustento y agua a las sociedades y los ecosistemas. A pesar de ello, una gran parte de la población no los conoce ni sabe de su importancia, ni consigue establecer una conexión entre su territorio y los acuíferos que allí se encuentran. Si la supervivencia humana dependiera de la capacidad de cada uno para identificar los acuíferos que abastecen de agua su ciudad o de cómo contribuyen al mantenimiento de los grandes ríos regionales, ¿cuántos pasarían la prueba? Esta realidad impacta en la gestión y gobernanza de las aguas subterráneas, que requiere de acciones para superar su invisibilidad natural y social, así como una cultura de apropiación privada basada en el incumplimiento de la ley, sustentada en la tolerancia del gobierno y de la sociedad en relación con el uso irregular de estas aguas (VILLAR, 2016).

Al considerar el agravamiento de los escenarios de escasez y de degradación hídrica, es evidente que la supervivencia de la humanidad depende de la construcción de un nuevo pacto con el agua, que ciertamente incluye los acuíferos. Si la sociedad no los conoce, no habrá presión política para poner en marcha las acciones necesarias para su gestión ni para exponer los conflictos relacionados con la apropiación de sus aguas. La frase "*perdí el pozo*" o "*el manantial se secó*" dichas con resignación, reflejan, en la mayoría de los casos, el uso inadecuado de estas aguas, que ni siquiera se percibe y se soluciona, según la situación económica del usuario, con la perforación de un pozo más profundo, con otras alternativas (camiones cisternas, construcción de cisternas pluviales, etc.) o, en el peor de los casos, con el abandono del terreno.

En este sentido, este libro promueve el conocimiento de las diferentes perspectivas de los acuíferos y su importancia para la sociedad y los ecosistemas, además de señalar las formas de superar los desafíos. En el capítulo 1 – **“La construcción de la gobernanza y de la gestión de las aguas subterráneas”** – se contextualiza la estructura de la gobernanza de las aguas subterráneas, identificando los conceptos de gobernanza, gestión y manejo, así como presentando los principales actores implicados en la política hídrica nacional y su papel en la promoción de la gobernanza de las aguas subterráneas. En el capítulo 2 – **“Las aguas subterráneas en el ciclo hidrosocial”** – se expone la dinámica de los acuíferos en el ciclo hidrológico, su importancia como proveedores

de servicios ecosistémicos y los principales impactos que amenazan esta reserva de agua. En el capítulo 3, **“La gestión de las aguas subterráneas: de la teoría a la práctica”** – se presentan los principales instrumentos de gestión de aguas y la forma en que se han aplicado a las aguas subterráneas. En el capítulo 4 – **“Gobernanza de las aguas subterráneas y fortalecimiento de la gestión integrada de los recursos hídricos”** – figuran las estrategias y los desafíos que hay que afrontar en la búsqueda de la gobernanza y la gestión integrada de las aguas subterráneas. Al final de este capítulo hay una galería de casos compuesta por cuatro experiencias de gestión de acuíferos que buscan promover soluciones a su degradación. Se trata de: *a*) el proceso de remediación del acuífero Jurubatuba (en la región metropolitana de São Paulo); *b*) la lucha contra la sobreexplotación del acuífero Santo Domingo (México); *c*) las Comunidades de Aguas Subterráneas en Chile; y *d*) la gestión transfronteriza del Acuífero Ginebra, compartido entre Francia y Suiza.

La metodología empleada es el análisis documental de la legislación, de la literatura especializada y de los documentos técnicos, así como la presentación de estudios de casos que sirven para ilustrar el funcionamiento de los acuíferos, demostrar los riesgos de la falta de gestión o el potencial de estas aguas para promover el desarrollo. Para ampliar las perspectivas sobre las aguas subterráneas, se utilizaron los "boxes" y la "galería de casos" para profundizar en los conceptos e ideas trabajados en los capítulos, a partir de los informes de los especialistas invitados. Los boxes se exponen a lo largo del texto, mientras que la galería de casos se expone como una sección del Capítulo 4, en la que se ilustran casos prácticos que utilizan estrategias de gobernanza de acuíferos, a pesar de todos los desafíos que conlleva este proceso.

De este modo, la obra se configura como un esfuerzo colectivo de muchos profesionales dedicados a la gobernanza/gestión de los acuíferos. La reserva hídrica subterránea ha ido acumulándose de forma natural a lo largo de décadas, siglos y milenios, por lo que el ser humano debe utilizar este patrimonio de forma consciente y sostenible, maximizando sus beneficios a largo plazo. El Box 1 expone la necesidad de un proceso de gobernanza que busque conciliar el tiempo de los acuíferos y el de los seres humanos, y revela la complejidad de los desafíos que hay que afrontar.

Box 1 – El tiempo de los acuíferos y el tiempo del ser humano*Veridiana T. de S. Martins*

Toda el agua de la Tierra ha sido la misma desde el origen del planeta, es decir, no hay generación de agua nueva, ni pérdida de agua fuera del Sistema Tierra. Nuestro planeta es un sistema abierto para la energía (solar), pero cerrado para el agua. En el Planeta Azul, el agua se recicla desde hace más de 4.000 millones de años. El ciclo del agua, o hidrológico, es el responsable de este reciclaje, y está impulsado por la energía solar. Así, la molécula de agua pasa del estado sólido al líquido y al gaseoso, o toma el camino inverso, y se transfiere entre los diferentes depósitos terrestres, como el mar, los lagos, los ríos, las plantas, el suelo, las rocas y los animales. Las aguas subterráneas representan sólo el 1% del agua del Planeta. Por otro lado, representa el 30% del agua dulce y el 97% del agua dulce disponible en estado líquido (MARSHAK, 2019; PRESS *et al.*, 2006; REYNOLDS *et al.*, 2019; TEIXEIRA *et al.*, 2009). En los más de cuatro mil millones de años de la Tierra, la misma molécula de agua ha estado en todos los depósitos y en más de una ocasión. En algunos, el agua se renueva en días, pero en otros puede tardar miles de años en pasar, como en el caso de las aguas subterráneas.



Figura 1 – Pozo de agua en el Castillo de Vincennes, Francia (Siglo XII)

Fonte: Foto: Veridiana T. S. Martins.

En los océanos, debido a su gran volumen, el tiempo de residencia del agua es de aproximadamente 3.000 años; en la atmósfera, el vapor de agua dura una media de sólo 10 días; en la biosfera es de aproximadamente una semana; en los ríos, dos; y en los suelos de dos semanas a un año (TEIXEIRA *et al.*, 2009; MARSHAK, 2019). En las coberturas de hielo y glaciares este valor oscila entre decenas y miles de años, con evidencias de que el hielo de la Antártida se remonta a 2,7 millones de años (YAN *et al.*, 2019). En los lagos, el tiempo de residencia de las aguas es de decenas de años. Las aguas subterráneas tienen un tiempo de residencia que va de días, semanas a cientos de miles de años. Desde su área de recarga hasta el área de descarga, el Acuífero Guaraní tiene edades que van desde la actual hasta los 835.000 años (AGGARWAL *et al.*, 2015). Esta edad avanzada se encontró en un pozo del Municipio de Lins (SP). Cuanto más lejos de la zona de recarga y cuanto más profundo sea el pozo, más antigua será el agua. La velocidad media de flujo del agua en el Acuífero Guaraní es de 0,7 m/

año (AGGARWAL *et al.*, 2015). Esto significa que las aguas que se extraen del pozo que explota el Guaraní en la Ciudad de Lins (SP) no son aguas que entraron en el acuífero hoy, sino hace más de 800.000 años. En este periodo, los homínidos que caminaban por el planeta eran el *Homo erectus* y el *Homo heidelbergensis*, que empezaban a controlar el fuego. En Brasil, el fósil más antiguo encontrado es el de Luzia, datado entre 12.500 y 13.000 años, mucho más reciente que las aguas del Acuífero Guaraní en este pozo de Lins.

El agua siempre ha sido un recurso natural importante y tanto la localización de estos recursos como el dominio de su explotación han sido fundamentales para el desarrollo de la humanidad. Las crisis hídricas y climáticas, el crecimiento de la población, otros usos del agua, como la minería, el regadío, la generación de energía y la industria, entre otros, son factores que han obligado a buscar y desarrollar técnicas capaces de extraer agua del subsuelo. Los primeros pozos construidos por el ser humano se remontan a 3.000 años antes de Cristo, se excavaban formando espirales para permitir el acceso con algún animal de carga, y no tenían más de 50 m de profundidad (CUSHMAN; TARTAKOVSKY, 2017).

Al comienzo de la Era Cristiana había poco más de 170 millones de habitantes en el Planeta. Hoy en día ya hay más de siete mil millones de personas (ROSER; ORTIZ-OSPINA, 2019). La cantidad de agua sigue siendo la misma. En los últimos 120 años, el volumen de agua consumida anualmente ha aumentado un 500%, mientras que la población ha experimentado un incremento del 370% (RITCHIE; ROSER, 2018). Esto indica que la necesidad de recursos hídricos aumenta más rápidamente que la población. Asociado a esto está el aumento de los problemas ambientales y, en consecuencia, la contaminación de los recursos hídricos.

La conciencia medioambiental y el conocimiento de los sistemas hídricos necesario para evitar y hacer frente a la contaminación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos sólo han surgido más recientemente en la historia de la evolución de la humanidad. Aun así, la percepción de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos subterráneos dista mucho de ser ideal. El desconocimiento de su funcionamiento da lugar a interpretaciones casi mágicas sobre su ocurrencia y calidad, a menudo desconectadas del resto de los recursos hídricos. Es muy común asociar el agua subterránea con un agua proporcionada por Dios y que, por ser de la naturaleza, es limpia: "*la tierra lo filtra todo*".

La palabra *acuífero* no se enseña en las escuelas y puede sonar tan extraña para los adultos como para los niños. En una ocasión, en un examen de traslado para personas con titulación superior (personas que ya poseían una titulación), en la pregunta en la que se pedía la definición de acuífero, un candidato respondió que "*acuífero era la unión de los seres acuáticos*". La Base Nacional Común Curricular (BNCC) de 2018 no menciona, en su texto, las aguas subterráneas ni los acuíferos, con sólo una referencia a la palabra *sostenibilidad* en una nota a pie de página. La BNCC es responsable de determinar los contenidos¹ que deben enseñarse a los alumnos en las escuelas y, por consiguiente, el contenido de los libros de texto, seleccionados por el Programa Nacional del Libro y el Material Didáctico (PNLD). Aunque algunos libros de texto abordan el tema de *las aguas subterráneas*, esta inclusión no está garantizada por la BNCC, lo que demuestra que el tema de *las aguas subterráneas* no se valora en su justa medida, ni los profesores están preparados para trabajarlo en el aula.

El tiempo de las aguas subterráneas es muy diferente del tiempo de la sociedad, el destino que le da al agua y los problemas generados por su uso. En 2100 habrá 10.000 millones de personas que dependerán del mismo volumen de agua que sus antepasados, con el agravante del cambio climático y la contaminación. ¿Cómo revertir esta situación? ¿Cómo preservar la calidad del agua? ¿Cómo usar el agua de forma sostenible? ¿Cómo garantizar agua de calidad para las generaciones futuras?

No hay una única respuesta a estas preguntas y tampoco una única solución. No hay otra forma de lograr la sostenibilidad que, mediante el conocimiento, la educación, la preparación, la prevención y el trabajo colectivo. Sólo así se podrá mejorar la capacidad de reconocer y resolver los problemas, promover la organización social y la participación civil, crear políticas públicas y leyes que garanticen la preservación de los recursos hídricos y reducir las vulnerabilidades, mejorando la percepción de los recursos hídricos subterráneos. En conjunto, estas acciones pueden cambiar el escenario futuro y garantizar el agua para las próximas generaciones, respetando el tiempo de los acuíferos en el tiempo de los seres humanos.

1. "La Base Nacional Común Curricular (BNCC) es un documento de carácter normativo que define el conjunto orgánico y progresivo de aprendizajes esenciales que todos los alumnos deben desarrollar a lo largo de las etapas y modalidades de la Educación Básica" (texto extraído de la página del Ministerio de Educación y Cultura (MEC) en Internet. Disponible en: <http://basenacionalcomum.mec.gov>).



Pozo tubular en el Sistema Acuífero Guaraní del SAAE
de São Gabriel do Oeste (MS)
Foto: Roberto E. Kirchheim /Banco de Imágenes ANA

CAPÍTULO 1

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

1.1 GOBERNANZA, GOBERNABILIDAD Y GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: ALINEANDO LOS CONCEPTOS

El concepto de gobernanza de las aguas subterráneas surgió en la literatura a finales de la década de 2000. Una de sus primeras y más citadas definiciones fue establecida en un informe realizado por la *Global Water Partnership*, que la definió de la siguiente manera:

es 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 para 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, justificado por los siguientes factores (JARVIS *et al.*, 2005; MADANI; DINAR, 2012; VILLHOLTH; CONTI, 2018):

- importancia ecosistémica, ya que mantiene el flujo de base de ríos, manantiales y humedales;
- el principal embalse de agua dulce disponible para las poblaciones del planeta;
- los recursos naturales más extraídos del subsuelo en el mundo y en Brasil;

- las tasas de extracción superan las tasas de sustitución en diversos acuíferos;
- contaminación que, en muchos casos, hace inviable el acuífero debido a la complejidad técnica y los costos de descontaminación;
- características específicas que dificultan su gestión, en particular: a) la invisibilidad natural y social de estas aguas; b) la baja velocidad del flujo subterráneo; c) la extensión de los acuíferos; y d) la dificultad de controlar el acceso;
- percepción cultural de que estas aguas están vinculadas al derecho de propiedad del suelo;
- políticas públicas que descuidan las aguas subterráneas y su relación con las aguas superficiales;
- Desconocimiento de la situación de estas aguas y acuíferos.

En este contexto, se entendió que enfatizar la gobernanza de las aguas subterráneas contribuiría a fomentar la reflexión sobre cómo los Estados, los usuarios y la sociedad generan este recurso, y buscar estrategias específicas frente a las particularidades naturales y sociales de los acuíferos. No hay consenso sobre el significado de la gobernanza de las aguas subterráneas, por lo que es posible encontrar varias definiciones en la literatura.

La gobernanza de las aguas subterráneas puede definirse como:

[...] el ejercicio de la autoridad competente y la promoción de una acción colectiva responsable para garantizar el uso sostenible y eficiente de los recursos de aguas subterráneas en beneficio de la humanidad y de los ecosistemas dependientes. (FOSTER *et al.*, 2009, p. 3).

[...] 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. (MEGDAL *et al.*, 2014, p. 678).

[...] la promoción de una acción colectiva responsable encaminada a garantizar el control, la protección y el uso socialmente sostenible de los recursos hídricos subterráneos y los sistemas acuíferos en beneficio de la humanidad y de los ecosistemas dependientes. (FAO, 2016, p. 17).

[...] la estructura que comprende el proceso, las interacciones y las instituciones, en las que los actores (es decir, el gobierno, el sector privado, la sociedad civil, el mundo académico, etc.) participan y deciden sobre la gestión de las aguas subterráneas dentro y a través de múltiples áreas geográficas (es decir, subnacionales, transfronterizas y globales) e institucionales/sectoriales, según corresponda. (VILLHOLTH; CONTI, 2018, p. 14).

La gobernanza no se confunde con gobernabilidad, ni con gestión o manejo, aunque esta distinción plantea dudas y se observa confusión entre los términos. La distinción entre estos conceptos se centra 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 sea multipartidista o bipartidista).” (DINIZ, 1999, pág. 196).

La **gobernanza** tiene un alcance más integral e inclusivo que la gobernabilidad, ya que incorpora el “conjunto de mecanismos y procedimientos para abordar la dimensión participativa y plural de la sociedad”, considerando las opiniones no solo del gobierno (gobernabilidad), 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, la transferencia de responsabilidades, y expandiendo “el universo de actores participantes, sin renunciar a los instrumentos de control y supervisión.” (DINIZ, 1999, pág. 196).

A su vez, la **gestión** se enfoca en los actores con competencia para realizar acciones rutinarias dirigidas al diagnóstico, monitoreo 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. Así, la gestión de los recursos hídricos es una función típica del Estado, que se guía por un marco legal, que establece los lineamientos de actuación, los instrumentos de gestión y los responsables de llevar a cabo los planes, programas y acciones dirigidos a asegurar la calidad y cantidad de agua para servir a las generaciones actuales y, principalmente, a las generaciones futuras (CAMPOS; FRACALANZA, 2010). Según la FAO (2016, p. 17), el término *gestión de las aguas subterráneas* “comprende las actividades

llevadas a cabo por actores legítimos para desarrollar, utilizar y proteger de manera sostenible los recursos de aguas subterráneas”.

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 objetivo de garantizar el beneficio humano y los requisitos ambientales (GRIGG, 1996). Las medidas estructurales son aquellas que requieren la construcción de estructuras, tales como: presas, aductoras, Estaciones de Tratamiento de Aguas (ETA) y Alcantarillado (ETE), u obras de contención de la erosión del suelo, recuperación de áreas contaminadas, desfilamiento de cuerpos de agua, entre otras. Las medidas no estructurales corresponden a programas o actividades que no requieren obras, tales como zonificación de uso y ocupación del suelo, acciones de educación ambiental, campañas para la legalización del uso del agua, etc. (GRIGG, 1996).

A medida que se fortalece la idea de gobernanza, se produce 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, incluidos otros enfoques, como: a) aprendizaje social; b) técnicas de negociación y mediación de conflictos; c) conocimientos tradicionales; d) acciones de educación ambiental; e) creación o ampliación de oportunidades de participación de los usuarios y la sociedad civil, etc.

La necesidad de fortalecer la gobernanza se justifica por el hecho de que los desafíos de la implementación de la gestión del agua y el medio ambiente solo se superarán con el apoyo y la asociación de varios actores que van más allá del gobierno y los usuarios legitimados en el sistema, y deben incluir a las universidades, la sociedad civil y las comunidades tradicionales, así como a las organizaciones no gubernamentales e incluso a las organizaciones internacionales. Cada uno de estos actores puede, de varias maneras, contribuir a la protección de los acuíferos, tales como: a) promoción y difusión de conocimientos técnicos; b) adopción de tecnologías que ahorren agua; c) adopción de prácticas de conservación en áreas rurales o mantenimiento de la permeabilidad en el entorno urbano; d) respeto a la legislación vigente; e) inversiones en el mejoramiento de las redes de abastecimiento y alcantarillado, entre otros.

1.1.1 El concepto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) y su papel en la gobernanza de los recursos hídricos subterráneos

La GIRH se convirtió en el principal modelo de gestión de recursos hídricos adoptado en el mundo (BORCHARDT; BOGARDI; IBISCH, 2016). Organismos internacionales, tales como: La *Global Water Partnership*, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), las conferencias internacionales y el Foro Mundial del Agua sostienen que este es el modelo más eficiente para garantizar la sostenibilidad en el uso del agua. Sus partidarios sostienen que los problemas hídricos podrían ser resueltos por la GIRH, independientemente de las diferentes condiciones físicas, económicas, sociales y ambientales de los países (BISWAS, 2008). Sin embargo, advierten que

su aplicación requiere un contexto de gobernanza apropiado para que pueda promover eficazmente la buena gobernanza del agua.

Gran parte de la literatura atribuyó su fundamento a los principios de la Declaración de Dublín de 1992 y su inclusión en el Capítulo 18 de la Agenda 21, adoptada en Río 1992, sin embargo, su origen es anterior a todo esto (BORCHARDT; BOGARDI; IBISCH, 2016). Algunos autores afirman que la idea de la gestión integrada de los recursos hídricos se remonta a la primera mitad del siglo XIX, cuando se creó la *Tennessee Valley Authority* (TVA) en 1933, o a las discusiones propuestas en la Conferencia de Mar del Plata en la década de 1970 (BENSON; GAIN; ROUILLARD, 2015; BORCHARDT; BOGARDI; IBISCH, 2016).

No hay consenso sobre lo que es la GIRH, sin embargo, el concepto más extendido fue desarrollado por la *Global Water Partnership*, que lo define de la siguiente manera:

La GIRH es un proceso que promueve el desarrollo y la gestión coordinada del agua, la tierra y los recursos conexos con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. (GWP, 2000, p. 22).

Este concepto tiene por objeto promover la integración horizontal de usos múltiples y la integración vertical entre los diversos niveles institucionales (local, estatal o provincial, nacional y transfronterizo). A pesar del optimismo sobre este concepto, está marcado por incertidumbres (BISWAS, 2008), tales como: ¿quién y cómo se lleva a cabo este proceso? ¿Cuáles son los recursos naturales relacionados? ¿Qué parámetros deben maximizarse y cómo elegirlos? ¿Cuál es el alcance de este bienestar económico y social? ¿Qué es la sostenibilidad y cuáles serían sus parámetros? ¿Cómo definir los ecosistemas vitales y, por otro lado, cuáles no lo son? (BISWAS, 2008; VILLAR, 2015).

En la práctica, los procesos para lograr una buena gobernanza e implementar la GIRH son desafiantes y complementarios. La GIRH alienta a la legislación y a las instituciones del agua a adoptar los siguientes principios: *i)* cuenca hidrográfica como unidad de gestión espacial; *ii)* participación de los actores sociales; *iii)* mecanismos de financiamiento; *iv)* monitoreo; y *v)* desarrollo de sistemas de información. Además, fomenta la adopción de las siguientes estrategias de gestión (VILLAR, 2015):

- definición de las funciones del Estado en relación con otros actores y la forma en que se ponen en práctica los títulos y responsabilidades de los usuarios y proveedores de agua;
- crear asociaciones entre el gobierno, el sector empresarial, la comunidad y las organizaciones voluntarias;
- la prescripción legal de las instituciones de gestión del gobierno y sus respectivas competencias;
- la búsqueda de formas de garantizar el uso sostenible del recurso;
- análisis de la situación de los recursos hídricos;
- la instalación 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 y captación de agua, permisos de eliminación de aguas residuales y bases de datos;
- gestión de los recursos hídricos basada en la cuenca hidrográfica;

- estructuras organizativas a nivel de cuenca y subcuenca para permitir la toma de decisiones al nivel más bajo posible;
- preparación de planes para la 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 clave:

- 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 de aguas subterráneas y su recarga, así como hacer una planificación de 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 energía y 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 de la tierra 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 gobiernos han cambiado sus marcos legales e institucionales para implementar la GIRH e incorporar sus herramientas en la escala de cuencas hidrográficas. Y, por tratarse de un proceso sociopolítico, cada país lo ha incorporado de manera diferente (MIRANDA; REYNARD, 2020). Las próximas sesiones buscan demostrar cómo Brasil implementó este proceso en su política de agua.

1.2 LA CONSTITUCIÓN FEDERAL DE 1988 Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La Constitución Federal de 1988 representa un hito en la gestión de las aguas subterráneas, ya que transformó radicalmente su naturaleza jurídica (que se

examina en detalle en el Box 2). Estas aguas se regían por el Código de Aguas (Decreto n° 24.643/1934) que, en general, las enmarcaba como aguas particulares (art. 8), siendo su libre uso para los propietarios de los terrenos donde se encontraban (art. 96):

Art. 8°. Son particulares los manantiales y todas las aguas situadas en terrenos que también estén situados, cuando no estén clasificados entre las aguas comunes de todas las aguas públicas o comunes.

Art. 96. El propietario de cualquier terreno podrá apropiarse a través de pozos, galerías, etc. de las aguas que existan bajo la superficie de su predio siempre que no perjudique los usos existentes o derive o se desvíe de su curso natural aguas de dominio público, públicas de uso común o particulares.

A diferencia de las aguas superficiales clasificadas principalmente como aguas públicas (uso común o demaniales) o comunes, las aguas subterráneas se consideraron principalmente particulares. Hubo, sin embargo, dos excepciones a este tratamiento legal, restringidas al caso de los manantiales, que: a) formasen las cabeceras de un río (*caput fluminis*) debido a la abundancia de su caudal, según lo previsto en el art. 2, apartado “e” del Decreto n° 24.643/1934; o b) estaban situados en terrenos públicos (TOVAR, 1955). Sólo en estos dos casos se considerarían públicas las aguas subterráneas.

Así, las aguas subterráneas estaban vinculadas al Derecho de Propiedad (establecido en su momento por el art. 526 del Código Civil de 1916). Su uso estaba permitido mientras no hubiera desviación de los manantiales que abastecían a las poblaciones (art. 94) y no causó daño ni disminución en aguas públicas de dominio o públicas de uso común o particulares de terceros (art. 96, párrafo único) (TOVAR, 1955). Además, estaban prohibidas las construcciones que contaminaran o inutilizaran el agua del pozo o manantial de otros (art. 98), así como la apertura de un pozo junto a la propiedad vecina (art. 97).

Los arts. 34, inc. I, y 35 de la Constitución Federal de 1946, cuya redacción fue mantenida por la Constitución de 1967, tornó públicas todas las aguas superficiales, dividiendo su dominio entre la Unión y los Estados, sin embargo, guardó silencio con respecto a las aguas subterráneas, que permanecieron privadas:

Art. 34. Incluyen se entre los bienes de la Unión:

I – lagos y cualesquiera corrientes de agua en tierras bajo su dominio o que bañen a más de un Estado, sirvan de límite con otros países o se extiendan a territorio extranjero, así como a islas fluviales y lacustres en zonas limítrofes con otros países;

Art. 35. Incluyen se entre los bienes de los Estados los lagos y ríos en terrenos bajo su dominio y los que tienen manantial y desembocaduraas en el territorio estatal.

Por lo tanto, las aguas subterráneas solo se hicieron públicas con la promulgación de la Constitución Federal de 1988, que dividió el dominio del agua entre la Unión y los Estados, según lo determinado por sus arts. 20 y 26:

Art. 20. Son bienes de la Unión:

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 - los recursos minerales, incluidos los del subsuelo;

Art. 26. Se incluyen entre los bienes de los Estados:

I - Aguas superficiales o subterráneas, fluentes, emergentes y en depósito, excepto, en este caso, de conformidad con la ley, las que se deriven de las obras de la Unión.

Las aguas asignadas a la Unión en el inc. III, se limitan a las aguas superficiales (lagos, ríos y corrientes de agua) que cumplan las siguientes condiciones: “límites con Estados u otro país, o situadas en más de un Estado o país.” (MILARÉ, 2020, p. 1154). A su vez, el art. 26 atribuye a los Estados los recursos hídricos superficiales y subterráneos comprendidos en su territorio. En el caso de las aguas subterráneas, sin embargo, no existe ninguna restricción territorial (MILARÉ, 2020). No obstante, debido a las especificidades previstas en la legislación sobre minerales, algunas aguas subterráneas están clasificadas como recursos minerales y están sujetas al control de la Unión. Este tema será discutido en detalle más adelante en el ítem *Aguas subterráneas y aguas minerales*.

Las aguas subterráneas, por lo tanto, pertenecen a los Estados (CAMARGO; RIBEIRO, 2009; FERNANDES, 2019; VILLAR; GRANZIERA, 2020). La Constitución extinguió las aguas municipales y privadas, cuya comprensión fue corroborada por la Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (Ley n° 9.433/1997), que clasificó el agua como bien de dominio público (art. 1º, inc. I). Como resultado, el Derecho de Propiedad ya no se aplicaba a los recursos hídricos, cuyo uso quedaba condicionado a la regulación estatal. La mayoría de las disposiciones del Código del Agua se han vuelto incompatibles con el régimen de dominio establecido por la Constitución Federal y con el régimen del agua de la Ley n° 9.433/1997.

La jurisprudencia del Superior Tribunal de Justicia (STJ) sugirió la posibilidad de aguas subterráneas federales (STJ, 2013; 2016a; 2016b). Estas sentencias adoptaron la línea argumental del art. 20, inc. III de CF/88 al asignar el dominio de la Unión a “ríos, lagos y cualesquiera corrientes de agua”, sin hacer diferenciación en cuanto al hecho de que sean superficiales o subterráneas, y sólo es necesario observar la ubicación del recurso, es decir, si se encuentra en tierras de dominio federal, si sirve de límite con otros países, o si se extiende/proviene de territorio extranjero.

Esta interpretación surgió en acciones cuyo propósito era discutir la legalidad o ilegalidad de actos del Gobierno que, apoyados por decretos estatales o por el art. 45 de la Política Nacional de Saneamiento (PNS) (Ley n° 11.445/2007), destinada a frenar el uso de pozos sin permiso, como fuente alternativa de agua en zonas con red de abastecimiento de agua. Esta tesis legal, por lo tanto, fue propuesta en acciones que no discutían el dominio estatal o federal, y se llevó a cabo en un proceso sin la participación de los Estados o la Unión.

Por lo tanto, el contenido de la siguiente decisión (y otras similares) no tiene fuerza legal para eliminar el dominio estatal de las aguas subterráneas. Esta controversia ya se planteó en el ámbito del Poder Ejecutivo y Legislativo en la década de 2000 a través de la discusión del Proyecto de Enmienda a la Constitución (PEC) n° 43/2000, que buscaba transferir al dominio federal aguas subterráneas que excedieran los límites estatales o que fueran compartidas con otros países. El PEC 43/2000 fue estimulado, en gran parte, por el debate sobre el Acuífero Guaraní, sin embargo, fue presentado por razones de mérito. En este sentido, la Comisión de Constitución, Justicia y Ciudadanía se manifestó en contra de la propuesta:

La medida contenida en la propuesta que se examina es contraria al modelo descentralizado de gestión de los recursos hídricos desarrollado en los últimos años, que, a nuestro juicio, es el que mejor se adapta a la necesidad de conciliar el uso de los recursos con la gestión ambiental, especialmente en vista de nuestro arreglo federativo y de las dimensiones del país. El debate celebrado en la Audiencia Pública celebrada en la CMA sobre propiedad y gestión del agua reveló que la transferencia a la Unión de la propiedad de las aguas subterráneas no contribuye a la mejora de la Política Nacional de Recursos Hídricos. (CASAGRANDE; ABREU, 2010, p. 4).

Extracto del Recurso Especial n° 1.306.093 que trata sobre la existencia de aguas subterráneas nacionales en acción que discute la posibilidad de convivencia de pozos en áreas equipadas con una red pública de agua

[...] las aguas subterráneas no se mencionan explícitamente en el art. 20, inciso III, de la Constitución Federal, que define los bienes de la Unión. Ya, en el art. 26, inciso I, que prevé los recursos hídricos estatales, cuida directamente de ellos. La diferente forma de expresión en las dos disposiciones constitucionales llevó a algunos a defender la tesis de que las aguas subterráneas siempre y en cualquier circunstancia serían del dominio de los Estados, nunca de la Unión. Cabe decir que se trata de una interpretación errónea del texto constitucional. En primer lugar, en el plano teleológico, ya que los mismos motivos que materialmente justifican, en los términos del art. 20 de la Constitución Federal, el dominio federal de las aguas superficiales (ocupación de tierras federales, propagación por más de un Estado, demarcación de una frontera internacional, u origen o destino internacional) recomendaría, con mayor razón hasta que las aguas subterráneas no queden bajo el dominio exclusivo de los Estados y el Distrito Federal. En segundo lugar, porque lo que tenemos, en la comparación de los dos artículos, no es una omisión, pura y simple, de las aguas subterráneas en el art. 20, pero el uso de una técnica de escritura que no requiere tal mención, ya que el legislador se limitó a hablar de lagos, ríos y cualquiera corrientes de agua en tierras bajo su dominio, o que bañan a más de un Estado, sirven como límites con otros países, o se extienden a o vienen de territorio extranjero. Ahora, no hizo ninguna alusión al hecho de que tales ríos, lagos y corrientes son superficiales o subterráneos. El art. 26 incluso tenía que mencionar las aguas subterráneas, porque si no lo hacía, habría un riesgo de que, por interpretación, se afirmara que todas las aguas subterráneas serían propiedad de la Unión, aunque sería casi imposible (una situación que cambia gradualmente con los avances tecnológicos) decir exactamente dónde comienza y termina un acuífero. Por consiguiente, lo que se pretende no es excluir a la Unión del dominio, sino garantizar que los Estados no se separen de las aguas subterráneas, a fin de que coincidan las mismas hipótesis fácticas de reconocimiento de su dominio sobre las aguas superficiales. (STJ. *Recurso Especial n° 1.306.093-RJ*. 2° Grupo. Relator: Ministro Herman Benjamin, j. 28/05/2013).

La inclusión del agua subterránea en la idea de “ríos, lagos o cualesquiera corrientes de agua” está fuera de la definición técnica de estos términos que, en la literatura sobre Hidrología, encajan como *recursos hídricos superficiales*. El agua subterránea no se entiende en estos términos, ya que se mueve a través de los poros o fisuras de las rocas, por lo tanto, excepto en situaciones muy específicas, el flujo no forma corrientes de agua, siendo lento y heterogéneo, como se verá con mayor detalle en el Capítulo 2.

La Agencia Nacional de Agua y Saneamiento (ANA) y varios Comités de Cuenca expresaron su oposición al PEC n° 43/2000 (CASAGRANDE; ABREU, 2010). Los argumentos para esta posición se refieren a la dificultad de especificar los sistemas acuíferos y sus límites, ya que están formados por varias formaciones geológicas, con diferentes límites. Establecer un sistema que requiera, por tanto, determinar qué acuíferos pertenecen a la Unión y qué a los Estados miembros crearía grandes dificultades de gestión. Además, la gestión de los acuíferos debe priorizar la escala local debido a las características de los flujos de agua subterránea.

Por lo tanto, corresponde a los Estados brasileños establecer políticas para la gestión de sus recursos hídricos subterráneos, según lo determinado por las directrices previstas por la legislación nacional. Además de definir el dominio de las aguas, la Constitución Federal de 1988 determinó en el art. 21, inc. XIX, 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». El art. 22, inc. IV, a su vez, otorgó a la Unión la competencia privativa para legislar sobre el derecho del agua (VILLAR; GRANZIERA, 2020). Esos mandamientos constitucionales allanaron el camino para la promulgación de la Ley n° 9.433/1997, que sustenta los fundamentos de la gobernanza hídrica en el país. La gestión estatal de las aguas subterráneas está sujeto al cumplimiento de los supuestos contenidos en la legislación federal de aguas. El dominio estatal 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 del Acuífero Guaraní, cuyos supuestos deben ser obedecidos por los Estados.

Box 2 – Naturaleza jurídica de las aguas subterráneas

Pilar Carolina Villar y Maria Luiza Machado Granziera

El art. 3º, inc. V, de la Ley nº 6.938/1981, cuando se trata de recursos ambientales, menciona aguas subterráneas, interiores, superficiales y estuarios. Estos son, por lo tanto, bienes públicos, sujetos a la protección de la Política Nacional de Medio Ambiente (PNMA).

Esta protección también se refiere al art. 225 del CF/88, según el cual “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente ecológicamente equilibrado, un bien de uso común de la población y esencial para una calidad de vida saludable.” La expresión *bien de uso común del pueblo* no debe confundirse con los bienes públicos de uso común establecidos en el art. 99, inc. I, del Código Civil, ya que el equilibrio ambiental (macro-bien) no es público ni privado, sino que se refiere mucho más a un interés o una necesidad que a un dominio o una propiedad (GRANZIERA, 2019). Asimismo, el art. 1º, inc. I, de la Ley nº 9.433/1997, clasifica las aguas contenidas en cuerpos hídricos (ríos, lagos o acuíferos) como un bien de dominio público. El Poder Público, por lo tanto, no es el propietario del medio ambiente ecológicamente equilibrado, sino su gestor, cuya función es gestionar bienes que no le pertenecen, de manera razonada y participativa (YOSHIDA, 2007; MACHADO, 2010; VILLAR; GRANZIERA, 2020).

La Ley nº 6.938/1981 define el medio ambiente como “el conjunto de condiciones, leyes, influencias e interacciones de orden físico, químico y biológico que permiten, albergan y rigen la vida en todas sus formas.” En otras palabras, el equilibrio ambiental o medio ambiente ecológicamente equilibrado que garantiza la vida en todas sus formas es el macro-bien, protegido por la Carta Magna, a la que todo el mundo tiene derecho. El agua es un componente central de este contexto ambiental inmaterial. Se está moviendo en el ciclo hidrológico (subterráneo, superficial, meteórico) y se conecta con la perspectiva ambiental del macrobien, clasificándose como un bien difuso de la naturaleza y de uso común de las personas (VILLAR; GRANZIERA, 2020; VIEGAS, 2005).

Con el advenimiento del Código de Defensa al Consumidor (CDC), el macro-bien ambiental, como bien de uso común del pueblo, ha sido interpretado como un interés o derecho difuso “entendido como aquellos [...], transindividuales, de carácter indivisible, del que son titulares personas indeterminadas y vinculadas por circunstancias fácticas” (art. 81, inc. I, del CDC).

Benjamin (1993, p. 75) explica que este “complejo ambiental se compone de entidades singulares” que, de forma aislada, también son bienes legales. En este caso, el agua, incluidas las aguas subterráneas, como recursos ambientales (art. 3º, inc. V), consisten en micro-bienes, sujetos a regímenes legales específicos. Para ello, sus propias normas definen el dominio (federal o estatal), el uso (otorgando el derecho de uso de los recursos hídricos) y la protección (resoluciones del Consejo Nacional del Ambiente – Conama).

Las aguas subterráneas, como micro-bienes, de acuerdo con la Ley nº 9.433/1998, caen bajo los recursos hídricos y corresponden a la “porción de agua sujeta a destino específico para uso o uso por parte de una persona física o jurídica.” (VILLAR; GRANZIERA, 2020). La asignación privada de esta agua debe cumplir con los criterios de la Ley nº 9.433/1997, que requiere el otorgamiento del derecho de uso de los recursos hídricos mediante una decisión razonada del órgano gestor estatal (VILLAR; GRANZIERA, 2020). El agua de lluvia y las derivadas de cuerpos de agua ya no se caracterizan como públicas y pasan a formar parte del dominio de quien las capturó, siempre que se respeten las formalidades legales.

Excepcionalmente, el Código de Aguas Minerales establece situaciones en las que las aguas subterráneas se clasifican como recurso mineral. Para que esto ocurra, estas aguas deben tener ciertas características físicas o fisicoquímicas, o de potabilidad, además de caer en los siguientes tipos de usos: aguas minerales, termales, gaseosas, de mesa o destinadas a las finalidades balnearias, gas,. En este caso, se requiere autorización de investigación y exploración, así como obtener el derecho minero junto a la Agencia Nacional de Minería. Algunos estados, como Ceará¹ y São Paulo,² han determinado que la explotación del agua subterránea como recurso mineral también está condicionada a la legislación de recursos hídricos. En este caso, estas aguas tienen, concomitantemente, la naturaleza jurídica de un recurso hídrico y mineral.

1. Para obtener más información, consulte el Anexo 13 de la Compañía de Gestión de Recursos Hídricos – CE (Disponible en: <https://portal.cogerh.com.br/formularios-de-requerimento-outorga-2020>).

2. En el estado de São Paulo, los emprendimientos de embotellado de agua potable de mesa, minerales o para baño están sujetos a registro a través del Sistema de Concesiones Electrónicas, para fines de gestión de los recursos hídricos. En el caso de captaciones en manantiales, consultar la Instrucción Técnica DPO nº 9/2017 y en el caso de pozos, consultar la Instrucción Técnica DPO nº 10/2017.

1.3 LA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH): UNA NUEVA FORMA DE GESTIONAR EL AGUA

La Política Nacional de Recursos Hídricos del Brasil fue establecida por la Ley n° 9.433/1997 y consta 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. Las disposiciones de la política de aguas se refieren al agua en general, sin diferenciar las aguas superficiales y subterráneas.

Este diploma transformó la gestión de los recursos hídricos hasta ahora regulada por el Código de Aguas (Decreto n° 24.643/1934) (POMPEU, 2006). El Código del Agua, editado bajo los auspicios del Gobierno Provisional resultante de la Revolución de 1930, tenía una visión centralizadora, privatizadora y utilitaria, enfocada principalmente en el uso del potencial hidráulico, sin

preocupación por la conservación del agua (MILARÉ, 2020). La Ley n° 9.433/1997, a su vez, fue el resultado de un largo proceso de debates, y estructuró un modelo de gobernanza basado en la gestión descentralizada, integrada y participativa (BARBI; JACOBI, 2007), que incorporó los principales lineamientos del modelo de GIRH.

La Figura 2 muestra los fundamentos, objetivos, directrices, instrumentos de gestión e instituciones contenidas en la Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Esta ley adoptó la cuenca hidrográfica como una unidad de gestión, permitió la participación de actores sociales, atribuyó un valor económico al agua, determinó las organizaciones responsables de la gestión, estableció instrumentos para guiar el aprovechamiento, uso, protección del agua y el sistema de información. 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.

FUNDAMENTOS (art. 1°)
<ul style="list-style-type: none"> • bien del dominio público; • recurso natural limitado con valor económico; • uso prioritario para el consumo humano y la desdentación de animales en situaciones de escasez; • uso múltiple del agua; • la cuenca hidrográfica como unidad territorial para la aplicación del PNRH y las actividades del Singreh; • gestión descentralizada y participativa (Poder Público, usuarios y comunidades).
OBJETIVOS (art. 2°)
<ul style="list-style-type: none"> • garantizar la disponibilidad de agua necesaria para las generaciones actuales y futuras, con estándares de calidad adecuados a sus respectivos usos; • uso racional e integrado de los recursos hídricos; • prevención y defensa contra eventos hidrológicos críticos; • fomentar y promover la captación, conservación y utilización del agua de lluvia.
DIRECTRICES GENERALES DE ACCIÓN (art.3°)
<ul style="list-style-type: none"> • gestión sistemática de los recursos hídricos, sin disociar los aspectos de cantidad y calidad; • adaptación de la gestión de los recursos hídricos a las diversidades físicas, bióticas, demográficas, económicas, sociales y culturales de las diferentes regiones del país; • integración de la gestión hídrica y medioambiental; • articulación de la planificación hídrica con la de los sectores usuarios y con la planificación regional, estatal y nacional; • articulación de la gestión hídrica con la del uso del suelo; • integración de la gestión de las cuencas hidrográficas con la de los sistemas estuarinos y las zonas costeras.
INSTRUMENTOS DE GESTIÓN (art.5°)
<ul style="list-style-type: none"> • planes de recursos hídricos; • clasificación de los cuerpos de agua en clases, según los usos predominantes del agua; • concesión de los derechos de uso de los recursos hídricos; • cobro por el uso de los recursos hídricos; • sistema de Información sobre Recursos Hídricos.

continúa →

SINGREH (art. 33°)

- Consejo Nacional de Recursos Hídricos;
- Agencia Nacional de Agua y Saneamiento;
- consejos de Recursos Hídricos de los Estados y del Distrito Federal;
- comités de Cuenca Hidrográfica;
- organismos de los poderes públicos federal, estatal, del Distrito Federal y municipal cuyas competencias están relacionadas con la gestión de los recursos hídricos;
- agencias del agua.

Figura 2 – Fundamentos, objetivos, directrices, herramientas de gestión y arquitectura institucional de la Política Nacional de Recursos Hídricos

Fuente: Brasil (Ley n° 9.433/1997).

La implementación del PNRH está a cargo del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (Singreh), que se materializa en un conjunto de organismos y colegiados orientados a implementar la gestión integrada del agua. La integración de la gestión de las aguas superficiales, subterráneas y meteóricas es necesaria dada la inseparabilidad del ciclo hidrológico. Sin embargo, existen una serie de desafíos que involucran el problema de las diferentes territorialidades, la competencia de los diferentes órganos de gestión y entidades administrativas, la sectorización de las políticas públicas y la participación de los actores sociales.

La Ley n° 9.433/1997 no trajo directrices específicas para las aguas subterráneas, ni definió el concepto y el alcance de la gestión integrada ni la forma de conciliar la territorialidad de la cuenca hidrográfica con la de los acuíferos, ni especificó cómo aplicar los instrumentos de gestión a las particularidades de las aguas subterráneas, ni cómo establecer una coordinación con otras políticas, como las de medio ambiente, saneamiento, desarrollo territorial, costero, municipal, estatal y nacional. Al establecer Singreh, sin embargo, se creó un aparato institucional capaz de adaptar y operacionalizar la gestión a las particularidades de los recursos subterráneos. La Res. CNRH n° 202/2018, en el art. 3°, establece los principales aspectos a considerar en la gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas:

- I. delimitación de las áreas de recarga y contribución de los acuíferos a los ríos directamente conectados;
- II. Estimación de la contribución de los acuíferos al caudal básico de los ríos;
- III. Estimación de la recarga y reservas explotables y renovables;
- IV. Estimación de la disponibilidad integrada de agua subterránea y superficial para los diversos usos, considerando los ítems anteriores; y

V. las redes DE monitoreo hidrometeorológico E hidrogeológico necesarias.

La promulgación de la Ley n° 9.433/1997 representó un avance en la gestión de los recursos hídricos y, a pesar de que en su aplicación se ha dado prioridad a los recursos de superficie, se percibe gradualmente un esfuerzo institucional por incluir las aguas subterráneas. Sin embargo, la falta de datos técnicos, de redes de vigilancia, de adhesión de los usuarios a los instrumentos de gestión, de supervisión del Poder Público y de conciencia social del recurso dificultan su aplicación.

1.4 EL ARREGLO INSTITUCIONAL PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: SINGREH

El Singreh corresponde al conjunto de organismos y entidades que actúan en la gestión de los recursos hídricos en Brasil, con jerarquías y atribuciones específicas según su escala de actividad. 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.

La Figura 3 muestra el organigrama y las atribuciones de las agencias y entidades que conforman el Singreh. Debido a la división del dominio del agua, el sistema se divide en dos niveles de competencia: federal

y estatal. Esta arquitectura político-administrativa está compuesta por órganos estructurados en tres categorías, según su naturaleza y rendimiento (GRANZIERA, 2015, p. 125):

- **Órganos colegiados:** Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH); Consejos de Recursos Hídricos de los Estados y del Distrito Federal; y Comités de Cuencas Hidrográficas;
- **Órganos y entidades de gestión y control:** Agencia Nacional de Agua y Saneamiento (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 recursos hídricos; d) organizaciones no gubernamentales con objetivos de defensa de intereses difusos y colectivos de la sociedad; e) otras organizaciones reconocidas por el Consejo Nacional o por los Consejos Estatales de Recursos Hídricos.

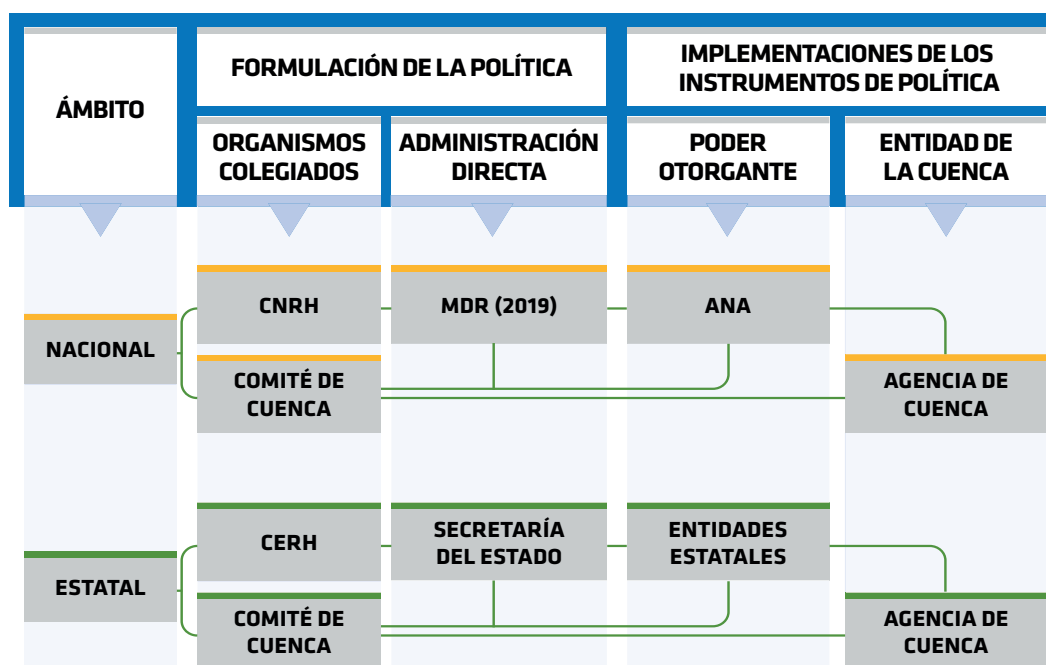


Figura 3 – Matriz y funcionamiento del Singreh*

Fuente: Villar y Granziera (2020, p. 48). (*) Composición, naturaleza jurídica y atribuciones específicas de cada organismo o entidad se detallará en los siguientes ítems.

Los órganos de Singreh son responsables de promover la gestión integrada del agua y de reconciliar la territorialidad de los acuíferos y la cuenca. En este sentido, cuando los acuíferos superen los límites de la cuenca, estos organismos deben promover “la estandarización de directrices y criterios para la recolección de datos y la preparación de estudios hidrogeológicos necesarios para la identificación y caracterización de la cuenca hidrogeológica” (art. 4º de Res. CNRH n° 15, de 11 de enero de 2001), y los Comités de Cuenca Hidrográfica

“procurarán el intercambio y sistematización de los datos generados para la perfecta caracterización de la cuenca hidrogeológica” (art. 4º, párrafo único).

En el caso de los acuíferos transfronterizos o interestatales, el Singreh es responsable de promover la integración de “órganos 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. 5º, § 1º, de la Res. CNRH nº 15/2001). En el caso de los acuíferos transfronterizos, se tendrán en cuenta los acuerdos celebrados entre la Unión y los países con los que se comparta el acuífero.

Además, el Sistema Nacional y los Sistemas Estatales y del Distrito Federal de Gestión de Recursos Hídricos deben guiar a los municipios a: *a)* promover la gestión integrada de las aguas subterráneas para seguir los planes de recursos hídricos; *b)* proteger las áreas de recarga de acuíferos; y *c)* fomentar la adopción de prácticas de reutilización y recarga artificial (Res. CNRH nº 15/2001).

No hay que olvidar, sin embargo, que aunque las aguas subterráneas son gestionadas por los sistemas estatales de recursos hídricos, son parte de un orden nacional. Por lo tanto, existe toda una infraestructura institucional y normativa nacional que influye en esta gestión. Los estados son responsables de organizar la gestión del agua subterránea, controlar su uso y calidad, así como supervisar su uso, sin embargo, sus políticas deben estar alineadas con la política nacional de recursos hídricos. 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 Nacional del Medio Ambiente (Sisnama).

Para obtener más información sobre las agencias estatales de recursos hídricos y medio ambiente, consulte:

<https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/sistema-de-gerenciamiento-de-recursos-hidricos/orgaos-gestores/lista-de-orgaos-gestores-estaduais>.

Los organismos que conforman la estructura nacional de Singreh tienen un papel importante en la dirección y coordinación de esta gestión estatal, que se expondrá con más detalle en los próximos puntos.

1.4.1 Ministerio de Desarrollo Regional: el nuevo coordinador de la gestión del agua

Originalmente, el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) era el órgano central de Singreh, y albergaba la Secretaría de Recursos Hídricos (SSR), el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) y la Agencia Nacional del Agua³ (ANA). En MMA, la Secretaría de Recursos Hídricos fue responsable de: *a)* monitorear el

funcionamiento de Singreh; *b)* promover la integración de la gestión de los recursos hídricos y ambientales; *c)* coordinar la preparación y asistir en el monitoreo e implementación del Plan Nacional de Recursos Hídricos; *d)* promover la cooperación técnica y científica; *e)* coordinar, en su esfera de competencia, la preparación de planes, programas y proyectos nacionales relacionados con las aguas subterráneas, y monitorear el desarrollo de sus acciones dentro del principio de gestión integrada de los recursos hídricos (art. 11 del Decreto nº 4.755, de 20 de junio de 2003).

A partir de la Medida Provisional nº 870, de 1 de enero de 2019, convertida en Ley nº 13.844/2019, la Política Nacional de Recursos Hídricos pasó a formar parte del Ministerio de Desarrollo Regional (MDR) -una cartera que surgió de la fusión de los Ministerios de Ciudades e Integración Nacional. Además del PNRH, el MDR tiene competencia en las siguientes políticas relacionadas con la gestión hídrica: Política Nacional de Desarrollo Regional (PNDR); Política Nacional de Desarrollo Urbano (PNDU); Política Nacional de Defensa y Protección Civil (PNPDEC); Política Nacional de Seguridad Hídrica (PNSH); Política Nacional de Riego (PNI), desde que observadas las competencias del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento (MAPA); Política Nacional de Saneamiento (PNS), y formulación y gestión de la Política Nacional de Ordenación Territorial (PNOT). Además, pasó a ser responsable de planes, programas, proyectos y acciones para la gestión de los recursos hídricos, infraestructura y garantía de la seguridad hídrica, riego, defensa y protección civil y gestión de riesgos y desastres, y vivienda, saneamiento, movilidad y servicios urbanos (art. 29).

La Secretaría Nacional de Recursos Hídricos (SNRH) se extinguió y dio paso a la Secretaría Nacional de Seguridad Hídrica (SNSH), integrada por el Departamento de Obras Hídricas y Apoyo a Estudios sobre Seguridad Hídrica, el Departamento de Proyectos Estratégicos y el Departamento de Recursos Hídricos y Revitalización de Cuencas Hidrográficas (art. 2º, inc. II, *b*, del Decreto nº 10.773/2021). Las competencias del SNSH incluyen: *a)* coordinar la formulación, revisión, implementación, monitoreo y evaluación de la Política Nacional de Seguridad Hídrica, 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

3. Actualmente, Agencia Nacional de Agua y Saneamiento (ANA).

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 la 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).

Las competencias del Departamento de Obras Hídricas y Apoyo a los Estudios sobre Seguridad Hídrica, el Departamento de Proyectos Estratégicos y el Departamento de Recursos Hídricos y Revitalización de Cuencas Hidrográficas se encuentran, respectivamente, en los arts. 20, 21 y 22 del Decreto n° 10.773/2021. El Departamento de Obras Hídricas y Apoyo a los Estudios sobre Seguridad Hídrica es responsable de apoyar la ejecución de las obras de perforación de pozos y de monitorear la implementación de las acciones de los proyectos dirigidos a ampliar el suministro hídrico. El Departamento de Proyectos Estratégicos, a su vez, tiene un papel rector en la preparación de estudios y propuestas de la Política Nacional de Seguridad Hídrica y sus instrumentos y en el seguimiento, supervisión e inspección de las acciones dirigidas al uso estratégico de los recursos hídricos y 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 estatales de manejo; *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 el CNRH; y *g*) articular la gestión de los recursos hídricos con el uso del suelo.

1.4.2 El Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) y su función en el establecimiento de directrices sobre las aguas subterráneas

El CNRH, con carácter nacional, es el órgano asesor y deliberativo de Singreh, que a partir de 2019 pasó a formar parte de la Estructura Regimientoal MDR. Su ejecución está prevista en los arts. 33, inc. I, y 34 a 36 de la Ley 9.433/1997, y en el art. 2° de la Ley n° 9.984/2000, y fue regulada por el Decreto 10.000/2019.

El art. 2° de la Ley n° 9.984/2000 asigna a el CNRH la siguiente función:

Art. 2°. Corresponde al Consejo Nacional de Recursos Hídricos promover la articulación de la planificación nacional, regional, estatal y del sector usuario elaborada por las entidades que integran el Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos y formular la Política Nacional de Recursos Hídricos, en los términos de la Ley n° 9.433, de 8 de enero de 1997.

Las facultades del CNRH se enumeran 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. Este colegiado se encarga de establecer directrices complementarias para la aplicación de la Ley n° 9.433/1997. El CNRH emitió varias resoluciones con el fin de guiar la gestión y aplicación de herramientas de gestión a las aguas subterráneas (Cuadra 1).

Estos actos normativos nacionales guían a los Estados y a los comités de cuenca en el proceso de aplicación de los instrumentos de gestión del agua a las aguas subterráneas y establecen directrices y acciones de gestión, como 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 el sistema de agua mineral.

Hasta la emisión del Decreto n° 10.000/2019, el CNRH contaba con una Cámara Técnica de Aguas Subterráneas (CTAS), la cual tenía como objetivos principales: *a*) discutir y proponer la inserción de la gestión de aguas subterráneas en el PNRH; *b*) conciliar las leyes relacionadas con su explotación y uso; *c*) proponer mecanismos institucionales para la integración de la gestión del agua; *d*) proponer mecanismos de protección y gestión y acciones mitigantes y compensatorias; *e*) analizar y proponer acciones con miras a minimizar o resolver conflictos (art. 2° de la Res. CNRH n° 9, de 21 de junio de 2000). Las atribuciones de los CTAS fueron incorporadas por la Cámara Técnica de Integración con la Gestión Ambiental y Territorial (CTIGAT) (art. 9°, inc. IV, del Decreto n° 10.000/2019).

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 puede ser muy importante en el caso de los acuíferos interestatales y transfronterizos, o en el caso de conflictos que impliquen la contribución de los acuíferos a los ríos federales.

RESOLUCIONES NACIONALES EMITIDAS POR EL CNRH	
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 directrices para la inserción de agua subterránea en los Planes de Recursos Hídricos
Resolución CNRH n° 29/2002	Define lineamientos para otorgar el uso de recursos hídricos y 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, potables de mesa o destinadas a fines de baño
Resolución CNRH n° 91/2008	Establece procedimientos generales para la clasificación de las masas de agua superficiales y subterráneas
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 lineamientos y criterios a adoptar en la planificación, implementación y operación de la Red Nacional Integrada de Monitoreo Cualitativo y Cuantitativo de Aguas Subterráneas
Resolución CNRH n° 126/2011	Aprueba las directrices 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
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 captaciones 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 otras medidas
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 nacionales emitidas por CNRH relacionadas con las aguas subterráneas

Fuente: Villar y Granziera (2020).

1.4.3 El trabajo de la ANA en las aguas subterráneas y la gestión integrada de los recursos hídricos

La Agencia Nacional de Agua y Saneamiento (ANA), originalmente Agencia Nacional de Agua, fue creada por la Ley n° 9.984, de 17 de julio de 2000. La Ley n° 14.026, de 15 de julio de 2020, cambió su denominación original y amplió su lista de competencias. El art. 1° de la Ley n° 9.984/2000 define la ANA de la siguiente forma:

entidad federal que implementa la Política Nacional de Recursos Hídricos, parte del Sistema Nacional de Gestión

de Recursos Hídricos (Singreh) y encargada 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.

Es una autarquía bajo un régimen especial, con autonomía administrativa y financiera, miembro de Singreh que, en 2019, tuvo su vínculo transferido de MMA a MDR (Decreto n° 9.666/2019). Dentro del ámbito de sus competencias, tiene las siguientes funciones: implementar la Política Nacional de Recursos Hídricos y establecer estándares 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. Sus atribuciones están previstas en los arts. 4º y 4ºA de la Ley nº 9.984/2000.

Con respecto a las aguas subterráneas, ANA busca apoyar la gestión estatal y fortalecer la gestión integrada de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, siempre enfatizando la relación río-acuífero. Su trabajo en el área de aguas subterráneas es principalmente a través de la implementación de la Agenda de Acciones para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

Superficial y Subterránea, en adelante, la Agenda de Aguas Subterráneas, que incluye las funciones 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”, y se estructura en cinco acciones principales que se dividen en varias actividades (Figura 4):

AGENDA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACCIONES	ACTIVIDADES
Promoción de la gestión integrada de acuíferos conectados con ríos federales	Diagnóstico de los acuíferos conectados con los ríos federales Elaboración de evaluaciones para la gestión integrada Proposición de marcos regulatorios y asignaciones
Elaboración de evaluaciones hidrogeológicas	Identificar y elaborar estudios en acuíferos de áreas urbanas abastecidas por AS Identificar y elaborar evaluaciones hidrogeológicas en acuíferos interestatales y transfronterizos Elaborar portafolio para las soluciones de abastecimiento con AS en áreas con vulnerabilidad hídrica por eventos críticos
-Sistematización de datos y monitoreo de AS	Operar y mantener el sistema de Aguas Subterráneas SAS/SHRH Planificar y coordinar la Red Nacional de Monitoreo Integrado Cualitativo y Cuantitativo de Aguas Subterráneas (RENAMAS)
-Apoyo y elaboración de planes de recursos hídricos en el tema AS	Elaborar el diagnóstico de las aguas subterráneas en los planes de recursos hídricos Implementar acciones previstas en los planes de recursos hídricos para AS
Capacitación	Planificación de capacitación específica en gestión integrada Implementación de la capacitación específica en gestión integrada

Figura 4 – Agenda de aguas subterráneas

Fuente: ANA (2015, p. 12).

La ANA busca ampliar el conocimiento hidrogeológico, cuya acción es a través del mapeo de acuíferos, como por ejemplo, la elaboración del *Mapa de Áreas de Afloramiento de Acuíferos y Sistemas Acuíferos en Brasil* (escala 1:1.000.000) (ANA, 2013). O, también, mediante la realización de estudios técnicos en acuíferos interestatales o transfronterizos y de la relación río-acuífero, como ocurrió en el caso de los Acuíferos de la Chapada do Apodi; Sistema Acuífero Urucuia (SAU) (ANA, 2017); Sistema Acuífero Guaraní (SAG); Acuíferos de la Provincia Hidrogeológica del

Amazonas (ANA, 2015a); ambientes cársticos en la Cuenca de São Francisco (2018) o el proyecto piloto de manejo integrado de ríos/acuíferos en las cuencas de los ríos Verde Grande y Carinhanha (proyecto en ejecución, en asociación con el SGB-CPRM). Además, se realizan estudios en acuíferos estratégicos para el abastecimiento de regiones metropolitanas, como Maceió, Natal, Belém, Isla 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 hídrico integrado de río/acuífero en los planes de cuenca, como el caso de los Planes de Cuenca del Río Doce, Río Grande, Río Paranapanema y Río Paraguay. La Agencia actúa en estrecha coordinación con los órganos estatales de gestión de los recursos hídricos, los comités de cuenca y los organismos de cuenca, con miras a elaborar los Planes de Cuencas Hidrográficas.

La ANA también es competente para organizar, implementar y administrar el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH) (art. 4º, inc. XIV, de la Ley nº 9.984/2000), que almacena diversos datos relacionados con los recursos hídricos. Además, actúa en la coordinación y planificación de la Red Nacional de Monitoreo de Aguas Subterráneas, según Res. CNRH 107/2010. En 2019, en asociación con el Servicio Geológico de Brasil – (SGB-CPRM), la ANA inició un proyecto piloto en acuíferos con alto flujo 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 proyecto piloto incluyó el Sistema Acuífero Urucua, con alrededor de 75 puntos, operando en conjunto. Actualmente, RIMAS cuenta con unos 400 puntos de monitoreo, distribuidos en 24 acuíferos y 20 estados (GENARO; PEIXINHO; MOURÃO, 2019). Cabe destacar la metodología pionera, con alcance regional, desarrollada por ANA para la planificación de

redes de monitoreo de aguas subterráneas, con el flujo de base entre las variables analizadas.

Otra contribución de las actividades de ANA al agua subterránea está relacionada con el Programa Productor de Agua. En asociación con varias instituciones, se llevan a cabo proyectos locales que adoptan prácticas de conservación del suelo y recuperación y mantenimiento de la cubierta vegetal con el fin de aumentar la permeabilidad del suelo y recuperar o aumentar el flujo de agua de los manantiales, además de reducir los procesos de erosión. El Programa también alienta la adopción de arreglos para el Pago por Servicios Ambientales (PSA), contribuyendo así al compromiso del productor rural en la adopción y mantenimiento de las buenas prácticas implementadas. La ANA incluso ha desarrollado una metodología (OLIVEIRA *et al.* 2021) para identificar las áreas más favorables en las cuencas hidrográficas para la adopción de prácticas conservacionistas con el fin de maximizar la recarga

Para obtener más información sobre el programa, consulte el sitio web del Productor de Agua:

<https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-produtor-de-agua>.

En la implementación de sus atribuciones y facultades legales, la ANA cuenta con la asociación y colaboración de otros organismos e instituciones públicas, este es el caso del Servicio Geológico de Brasil (SGB-CPRM).

El SGB-CPRM es una empresa pública vinculada al Ministerio de Minas y Energía, con atribuciones de Servicio Geológico de Brasil⁴. 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), así como 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. La colección consiste en información catalogada a través de hojas de pozos proporcionadas por instituciones públicas y privadas, gestores y usuarios de aguas subterráneas, cuyo registro no es válido para determinar la regularidad del uso del agua.

1.4.4 Los Comités de Cuenca Hidrográfica (CCH) y la inclusión de los acuíferos en la gestión

Los Comités de Cuenca Hidrográfica (CCH) 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). 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; en el caso de ríos estatales, están vinculados al respectivo Consejo Estatal de Recursos Hídricos.

Se trata de instancias políticas que se materializan a través de la construcción de un foro de discusión entre el Gobierno, los usuarios y la sociedad civil, por lo que carecen de personalidad jurídica. Estos órganos colegiados

4. Ver Ley nº 8.970, de 28 de diciembre de 1994.

se caracterizan como la instancia más importante de participación e integración local de la planificación y gestión del agua (VILLAR; GRANZIERA, 2020). Ley n° 9.433/1997, en el art. 38, y la Res. CNRH 5/2000, definen sus principales competencias:

- promover el debate sobre cuestiones relacionadas con los recursos hídricos y articular el desempeño de las partes involucradas;
- 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 al Consejo Nacional y a los Consejos Estatales de Recursos Hídricos las acumulaciones, derivaciones, captaciones y liberaciones de baja expresión con el fin de eximir la obligación de otorgar 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;
- conciliar los planes de cuenca de los cursos de agua tributarios con el Plan de Recursos Hídricos de la Cuenca de su jurisdicción;
- aprobar las propuestas de la Agencia del Agua que le sean presentadas;
- someter obligatoriamente a la audiencia pública los planes de recursos hídricos de la cuenca;
- desarrollar y apoyar iniciativas en materia de educación medioambiental;
- aprobar sus estatutos.

Estos colegiados desempeñan un papel central en la gestión y aplicación de los instrumentos de gestión. Ley n° 9.433/1997, en su art. 37, establece que los CCH pueden tener como área de operación: a) la “totalidad de una cuenca hidrográfica” (inc. I); b) la “subcuenca hidrográfica del curso de agua principal de la cuenca, o afluente de este afluente” (inc. II); o c) el “grupo de cuencas o subcuencas hidrográficas contiguas” (inc. III).

El área de actividad del CCHS considera la territorialidad de los recursos hídricos superficiales, que es más fácil de definir. La cuenca hidrográfica se

refiere precisamente al “espacio geográfico delimitado por el respectivo divisor de aguas, cuya escorrentía superficial converge a su interior, siendo capturado por la red de drenaje que le concierne.” (ANA, 2015b, p. 7). Aunque esta unidad territorial se centra en las aguas superficiales, esto no impide la gestión de los acuíferos que se encuentran en este espacio, especialmente debido a la idea de gestión integrada de los recursos hídricos.

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

El CCH es competente para aprobar y monitorear la implementación de planes de cuencas hidrográficas. El colegiado, por lo tanto, debe verificar si este instrumento de planificación incorporó aguas subterráneas, observando los lineamientos del CNRH, con énfasis en la Res. CNRH n° 22/2002, n° 92/2008 y n° 202/2008. Además, el CCH es responsable de proponer las situaciones de exención de la obligación de solicitar permiso de derecho de uso, y establecer los montos de la tarifa por el uso de los recursos hídricos subterráneos.

En general, los CCHs enfrentan dificultades para insertar agua subterránea en sus discusiones. Esto se debe en gran medida a la priorización de los recursos hídricos superficiales, la falta de conocimiento sobre las aguas subterráneas y de personal especializado, o la falta de organización de los usuarios de los pozos o de la sociedad en relación con los acuíferos. Los programas e iniciativas de Educación Ambiental y la capacitación técnica dirigida a las aguas subterráneas contribuirían a promover el conocimiento y transformar esta realidad.

1.5 LOS ESTADOS Y LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los estados y el Distrito Federal son responsables de definir las políticas estatales para sus recursos hídricos, incluidas las aguas subterráneas, y de establecer la infraestructura institucional de los Sistemas Estatales de Gestión de Recursos Hídricos, implementar los instrumentos de gestión del agua previstos en la Ley n° 9.433/1997 y 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 privativa de la Unión (art. 22, inc. IV, de CF/88) (FERNANDES, 2019; VILLAR; GRANZIERA, 2020). La Ley n° 9.433/1997 y las Resoluciones CNRH y Conama establecen o regulan 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 (VILLAR; HIRATA, 2022).

Los instrumentos de gestión hídrica pueden dividirse en dos categorías: los dedicados al agua en general y los específicos a las aguas subterráneas. La

Figura 5 muestra estos instrumentos de gestión, que son responsabilidad de los organismos que integran los Sistemas Estatales de Gestión de Recursos Hídricos. Además de los instrumentos de gestión del agua, existen instrumentos de otras políticas públicas de aplicación estatal que pueden contribuir al manejo de los acuíferos, tales como: licencias ambientales, zonificación ecológica-económica, zonificación agroecológica, planes de riego, planes estatales de saneamiento, planes estatales de residuos sólidos, manejo de áreas contaminadas, etc. Además, los estados y el Distrito Federal deben alentar a los municipios a considerar los acuíferos en los procesos municipales de planificación del uso de la tierra.



Figura 5 – Instrumentos de gestión hídrica en las políticas públicas

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

Las resoluciones del CNRH destacan la importancia de realizar estudios técnicos sobre las aguas subterráneas, principalmente en el ámbito de los planes de cuenca, con el fin de contemplar su integración con las aguas superficiales (ver Res. CNRH n° 92/2008 y Res. CNRH n° 202/2018). Estos actos normativos determinan, por ejemplo, la realización de estudios hidrogeológicos

para delimitar áreas de recarga y vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos; diagnósticos de disponibilidad y demanda de aguas subterráneas; evaluaciones hidrológicas integradas que delimitan la contribución de los acuíferos a ríos directamente conectados; y estimación de la contribución del acuífero al flujo de los ríos. También destacan la importancia

de instalar redes estatales para monitorear la calidad y cantidad de las aguas subterráneas (art. 10 de Res. CNRH 92/2008) y redes de monitoreo hidrometeorológico e hidrogeológico (art. 3º, inc. V de la Res. CNRH n° 202/2018), así como la emisión de informes de calidad (art. 13, § 2º, y art. 33 de la Res. Conama 396/2008).

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. La mayoría de los acuíferos atraviesan fronteras estatales (En el contexto brasileño la palabra “estatales” se refiere a los diferentes Estados Brasileños y no hacen referencia al Estado como forma de Nación) y, en algunos casos, nacionales. Estos datos demuestran la importancia de

las políticas y sistemas estatales de recursos hídricos y su acción conjunta para la gestión de los acuíferos, especialmente en el establecimiento de acciones conjuntas de monitoreo, intercambio de información y acciones de gestión que protejan las áreas de recarga y el flujo subterráneo, cuando se comparten. También existe la necesidad de una mayor articulación entre los sistemas federal y estatal, algo que ya ocurre en el caso de las aguas superficiales a través de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RNQA) y el Programa Estímulo para la Divulgación de Datos de Calidad del Agua – Programa Qualiágua (Res. ANA n° 643/2016). El Box 3 demuestra que todavía queda un largo camino por recorrer para consolidar la gestión estatal.

Box 3 – Los estados y la gestión de las aguas subterráneas

Luciana Cordeiro de Souza-Fernandes

Las aguas subterráneas se consideran *propiedad estatal*, es decir, su *gestión* debe ser realizado por los estados y el Distrito Federal, que tiene la competencia para legislar su manejo y protección. Sin embargo, faltan estudios sobre cómo se lleva a cabo esta gestión estatal. Souza-Fernandes y Oliveira (2018a,b,c,d) realizaron un trabajo para recopilar la legislación estatal de aguas en las cinco regiones brasileñas (Centro Oeste, Norte, Nordeste, Sudeste y Sur) y concluyeron que solo 12 Unidades Federales tienen leyes específicas sobre aguas subterráneas: São Paulo, Minas Gerais, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Alagoas, Pernambuco, Maranhão y Pará.

Las 26 UF y el DF, por lo tanto, ya han establecido sus Políticas Estatales de Recursos Hídricos (PERH), y en algunos estados el agua subterránea ha sido disciplinada a lo largo de sus PERH. Significa, como se puede ver en la Colección de Legislación de Aguas Subterráneas de Brasil – en sus cinco volúmenes – que en estos estados no existe una regulación legal individualizada sobre el manejo y uso de las aguas subterráneas como ocurre en São Paulo, por ejemplo.

En cuanto al análisis de la legislación existente, los autores llegaron a las siguientes conclusiones: a) hay repetición de conceptos y determinaciones derivadas de la ley de São Paulo (Ley n° 6.134, de 2 de junio de 1988), precursora en la legislación sobre aguas subterráneas; b) no todas las UFs establecieron la creación de áreas de protección y conservación de las aguas subterráneas; y c) las leyes de las UF que legislaron no observaron las peculiaridades de la hidrogeología local.

La protección de las aguas subterráneas requiere un esfuerzo integrado entre los estados y los municipios debido a la interconexión entre estas aguas y el suelo. Esto es especialmente importante en áreas de recarga y afloramiento de acuíferos porque, dada su vulnerabilidad, requieren de sus propias herramientas y/o instrumentos legales (urbanismo) para la protección del suelo y a través del reflejo de la calidad de las aguas subterráneas.

Enlace a la colección: <https://materiais.aguasustentavel.org.br/coletanea>.

1.6 LOS MUNICIPIOS Y SU PAPEL EN LA GESTIÓN DE LOS ACUÍFEROS

La CF/88 elevó a los municipios a la categoría de entidades federativas, lo que no es habitual en otros sistemas federativos (MIRANDA; REYNARD, 2020). A pesar de extinguir las aguas municipales, la Carta Magna incrementó considerablemente la autonomía política, jurídica, administrativa y financiera de los municipios, asignándoles varias competencias que los convirtieron en protagonistas en la gestión de los recursos hídricos (MIRANDA; REYNARD, 2020; VILLAR; GRANZIERA, 2020).

Los municipios han adquirido competencia administrativa exclusiva para prestar servicios públicos de interés local (art. 30, inc. V, de CF/88), entre ellas la organización y prestación de servicios de saneamiento, ya sea directamente o en régimen de concesión o permiso. La relación entre el saneamiento y los acuíferos es directa. Estas aguas son una fuente hídrica importante para el suministro público o soluciones alternativas de suministro cuando no hay red pública o para aliviar la demanda de agua del proveedor no residencial (HIRATA *et al.*, 2019). Además, la ausencia de una red de recolección o pérdidas de aguas residuales, así como el mal manejo de los residuos sólidos son las principales fuentes de contaminación del acuífero (HIRATA *et al.*, 2019).

La gestión municipal del saneamiento debe ser consciente de los siguientes aspectos:

- verificar y supervisar cómo la prestación del servicio de agua interfiere con los niveles de agua del acuífero;
- controlar, mediante la vigilancia sanitaria, la calidad del agua distribuida a la población;
- supervisar el cumplimiento de las obligaciones legales relacionadas con el uso de las aguas subterráneas;
- incluir en los contratos de servicios cláusulas relacionadas con la protección del acuífero, tales como: pago por servicios ambientales generados por el mantenimiento de áreas de recarga; programas de monitoreo del nivel del agua; expansión y renovación de redes de recolección de aguas residuales; mecanismos para fomentar la permeabilidad del suelo en áreas de recarga; y campañas de Educación Ambiental;
- promover campañas de sensibilización sobre el uso racional de las aguas subterráneas y los acuíferos regionales;

- garantizar la eliminación adecuada de los residuos sólidos.

El municipio también tiene competencia exclusiva para promover la ordenamiento territorial mediante la planificación y el control del uso, la parcelación y la ocupación de terrenos urbanos (art. 30, inc. VIII, de la CF/88) y la competencia legislativa exclusiva en materia de interés local (art. 30, inc. I, de la CF/88). Así, esta entidad se convierte en la principal responsable de establecer limitaciones al uso y ocupación del territorio urbano para proteger los acuíferos, utilizando 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. La planificación territorial municipal debe observar los lineamientos contenidos en los planes de cuenca hidrográfica para contribuir a la gestión integrada del agua y el suelo (Res. CNRH n° 15/2001, art. 6°).

Por lo tanto, el municipio puede imponer restricciones administrativas al uso del suelo, tales como: 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) estimulación de la adopción de prácticas de reutilización; o e) establecimiento de unidades de conservación en áreas de recarga. En este sentido, la Res. CNRH n° 15/2001 determina que los órganos de 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).

El art. 23 de la Constitución asigna competencia administrativa común en materia ambiental, lo que permite a los municipios contar con acciones dirigidas 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, monitorear y supervisar el otorgamiento de derechos a la investigación y explotación de los recursos hídricos y minerales en sus territorios (ver art. 23 de CF/88). Adicionalmente, la Ley Complementaria (LC) n° 140/2011, en el art. 9°, inc. XIV, *a* y *b*, regulaban la competencia municipal para la concesión de licencias ambientales de actividades que causen o puedan causar impacto ambiental local. El Box 4 resume las principales competencias municipales relacionadas con el agua.

Box 4 – Las competencias municipales relacionadas con el agua

*Pilar Carolina Villar
Didier Gastmans
Hermam Vargas*

Los municipios tienen las siguientes responsabilidades legales relacionadas con los recursos hídricos y temas relacionados:

1. prestar servicios de saneamiento (CF/88, art. 30, inc. V, y la Ley n° 1145/2007);
2. promover la planificación territorial, mediante la planificación y el control del uso, la entrega y la ocupación de los terrenos urbanos (art. 30, inc. VIII);
3. incluir medidas que fomenten la reutilización y la recarga natural o artificial en los instrumentos de ordenación del territorio o en los contratos de servicio público (art. 6°, párrafo único, de la Res. CNRH 15/2001);
4. proteger el medio ambiente y la lucha contra la contaminación (CF/88, art. 23, inc. VI y LC 140/2011);
5. ejecutar y hacer cumplir en el municipio las políticas nacionales, estatales y municipales relacionadas con la protección del medio ambiente y gestionar los recursos ambientales bajo su competencia (LC n° 140/2011, art. 9°, incs. I, II y III);
6. promover la integración de programas y acciones de organismos y entidades de la administración pública federal, estatal y municipal, relacionados con la protección y gestión ambiental en el municipio (LC n° 140/2011, art. 9°, inc. IV);
7. promover el desarrollo de estudios e investigaciones orientados a la protección y gestión del medio ambiente, dando a conocer los resultados obtenidos (LC n° 140/2011, art. 9°, inc. VI);
8. organizar y mantener el Sistema Municipal de Información sobre el Medio Ambiente y proporcionar información a otras entidades (LC n° 140/2011, art. 9°, incs. VII y VIII);
9. promover y orientar la educación y sensibilización ambiental (LC n° 140/2011, art. 9°, inc. XI);
10. promover la concesión de licencias ambientales a actividades o empresas con impacto ambiental local (LC n° 140/2011, art. 9°, inc. XIV);
11. supervisar el cumplimiento de las normas ambientales (CF/88, art. 23, inc. VI y LC 140/2011, art. 17, § 3°);
12. Participar en la composición de los Comités de Cuenca (art. 39 de la Ley n° 9.433/1997);
13. promover la integración de las políticas locales de saneamiento, uso, ocupación y conservación del suelo y el medio ambiente con las políticas nacionales y estatales de recursos hídricos (art. 31 de la Ley n° 9.433/1997);
14. formular la política pública de saneamiento y prestar directamente o por delegación los servicios de saneamiento, definiendo la entidad responsable de la regulación e inspección, así como sus procedimientos (art. 9° de la Ley n° 11.445/2007);
15. Elaborar los planes de saneamiento de manera compatible con los planes de cuenca (art. 9° y 19 de la Ley n° 1145/2007);
16. llevar a cabo la gestión integrada de los residuos sólidos generados (art. 10 de la Ley n° 12.305/2010);
17. contribuir juntamente con la Unión y los estados al mantenimiento y organización del Sistema Nacional de Información para la Gestión de Residuos Sólidos (Sinir), proporcionando información sobre los residuos generados (art. 12 de la Ley n° 12.305/2010);

18. Elaborar los planes municipales de gestión integrada de residuos sólidos (art. 18 de la Ley n° 12.305/2010);
19. proporcionar la información solicitada por la coordinación del Sistema Nacional de Vigilancia Sanitaria (art. 2° de la Ley n° 9782/1999);
20. llevar a cabo la vigilancia de la calidad del agua en conjunto con la Vigilancia Sanitaria con el fin de inspeccionar la calidad del agua en el sistema o solución de suministro alternativo colectivo (Ordenanza MS n° 5/2017);
21. garantizar información a la población sobre la calidad del agua para el consumo humano y los riesgos para la salud (Ordenanza de Consolidación de MS n° 5/2017, modificada por la Ordenanza de MS n° 888/2021, art. 12, incs. V y VI);
22. ejecutar las directrices para monitorear la calidad del agua para consumo humano definidos a nivel nacional y estatal (Ordenanza de Consolidación de MS n° 5/2017, modificada por la Ordenanza n° 888/2021);

1.7 RESPONSABILIDAD DE LOS USUARIOS EN LA GESTIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El uso de las aguas subterráneas se realiza a través de pozos en manantiales u otras estructuras de captación. Los principales usuarios de aguas subterráneas (mayores cantidades) utilizan los pozos tubulares⁵ y se benefician exclusivamente de estas aguas, cuyo uso está bajo su control. Los usuarios de aguas subterráneas, por lo tanto, son actores clave para lograr los objetivos establecidos en la Ley n° 9.433/1997.

Cada Estado tiene sus requisitos relacionados con el uso de las aguas subterráneas, sin embargo, en general, las siguientes son las responsabilidades de los usuarios de las aguas subterráneas: a) obtener los permisos necesarios para perforar el pozo y usar las aguas subterráneas (por ejemplo, licencia de perforación de pozos, otorgamiento de derecho de uso u otros documentos que acrediten que es un uso exento o insignificante); b) contratar compañías de perforación que sigan las normas técnicas; c) registrar 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) almacenar la información

necesaria sobre el perfil y operación del pozo; g) proveer la extracción de agua subterránea con 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 por el uso de agua en los casos donde la recolección se implementa en la cuenca; e i) tapar los pozos abandonados o improductivos, según las instrucciones de la agencia estatal de gestión. Además, los usuarios pueden adoptar soluciones tecnológicas que permitan 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).

Para el caso de aguas subterráneas clasificadas como minerales, térmicas, gaseosas, potables de mesa o para fines balnearios se destacan las siguientes obligaciones: a) obtener autorización de investigación y ordenanza minera de la Agencia Nacional de Minería (ANM); b) cumplir con los términos contenidos en la autorización de investigación y ordenanza minera emitida por la ANM; c) proteger, conservar y utilizar estas fuentes de acuerdo con los preceptos técnicos; d) establecer perímetros de protección de aguas minerales; e) observar los requisitos de la agencia estatal de gestión de recursos hídricos para este tipo de uso en relación con la necesidad de otorgar, registrar o autorizar la perforación (Villar; Granziera, 2020, p. 129).

Además de seguir los estándares estatales y federales, los usuarios deben asegurarse de que sus pozos se diseñen, construyan y operen de acuerdo con los estándares técnicos. La Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) ha establecido una serie de normas relacionadas con el diseño, construcción

5. Los pozos se dividen en dos categorías principales: i) pozos tubulares; y ii) pozos excavados, que reciben varios nombres, según la región de Brasil. El pozo tubular es una perforación cilíndrica y vertical realizada por medio de máquinas, recubiertas con material aditivo de PVC o acero en forma de tuberías y filtros, siendo popularmente llamado *pozo artesiano* o *semi-artesiano*. El pozo artesiano, sin embargo, es ese pozo tubular en el que el agua sube naturalmente, sin la ayuda de bombas, chorreando sobre la superficie del suelo. El pozo excavado (cacimba o amazonas) es un pozo poco profundo de gran diámetro.

y operación de pozos, que deben ser observadas. Se trata de: NBR n° 12212:1992 - Proyecto de pozo tubular profundo para captación de agua subterránea; NBR n° 12244:2006 - Construcción de pozo tubular profundo para captación de agua subterránea; NBR n° 13604:1996 - Filtros y tubos de revestimiento de PVC para pozos tubulares profundos - Especificaciones; NBR n° 13605:1996 - Filtros y tubos de revestimiento de PVC para pozos tubulares profundos - Determinación dimensional - Método de ensayo; NBR n° 13606: 1996 - Tubos de revestimiento de PVC para pozos tubulares profundos - Determinación del módulo de elasticidad a la flexión - Método de ensayo; NBR n° 13607:1996 - Tubos de revestimiento de PVC para pozos tubulares profundos - Verificación de la flexión al impacto; NBR n° 13608:1996 - Tubos de revestimiento de PVC para pozos tubulares profundos - Verificación del comportamiento de la unión roscada - Método de ensayo; NBR n° 15495-1:2007, versión corregida 2:2009 - Pozos de monitoreo de aguas subterráneas en acuíferos granulares - Parte 1: Proyecto y construcción.

Con base en la eficiencia hídrica, los usuarios pueden adoptar soluciones tecnológicas que permitan la economía u optimización del uso de los recursos hídricos, así como contribuir al proceso de inspección, denunciando o orientando a los propietarios clandestinos, ya que el uso irregular puede perjudicar la disponibilidad de agua de los usuarios legalizados. También se enfatiza la responsabilidad de los pozos abandonados o improductivos, los cuales deben taponarse, según lo determinado por el procedimiento provisto por el órgano de gestión estatal, ya que representan una fuente potencial de contaminación del acuífero y un riesgo para la seguridad de las personas y los animales.

En Brasil, lamentablemente, la mayoría de los usuarios de aguas subterráneas son irregulares, por lo tanto, no cumplen con las obligaciones legales y técnicas relacionadas con la perforación, construcción y operación de pozos, configurando una “apropiación privada sin regulación de aguas subterráneas, que corresponde a una forma de usurpación de agua.” (VILLAR, 2016, p. 92). Así, los propietarios de pozos que no forman parte del sistema de licencias gubernamentales utilizan un bien común del pueblo como si fuera un bien

privado, sin proporcionar ninguna compensación a la sociedad, generando impactos socioambientales que perjudican a la sociedad, a los usuarios y a los ecosistemas. El uso de estas aguas sin la autorización estatal puede calificarse como infracción administrativa y delito, según se especifica en las Tablas 10 y 11 del Capítulo 3, independientemente de la obligación de recuperar y/o indemnizar los daños causados al medio ambiente o a terceros.

1.8 AGUAS SUBTERRÁNEAS Y AGUAS MINERALES EN BRASIL

Las aguas minerales y potables de mesa se extraen de fuentes naturales o por extracción de aguas subterráneas (ASSIRATI, 2018), y se caracterizaron como “aguas subterráneas especiales” y “distintas de las aguas comunes por etapas diferenciadas 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).

La extracción de estas aguas es intensa, clasificándose como el recurso mineral más explotado en el subsuelo brasileño (HIRATA *et al.*, 2019). En 2017, la extracción para composición de bebidas fue de 21.900 millones de litros, mientras que los usos balnearios consumieron 82.200 millones 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).

Brasil es el quinto mercado de agua embotellada más grande del mundo (ASSIRATI, 2018) y posee más de mil áreas mineras de agua mineral y potables de mesa, el 48% de las cuales se encuentran en la región Sudeste (QUEIROZ; PONTES, 2015). La Figura 6 muestra las concesiones de la minería de agua mineral o potable de mesa en relación con los dominios hidrogeológicos. Algunas de estas concesiones se ubican en zonas que presentan problemas relacionados con la escasez de agua.

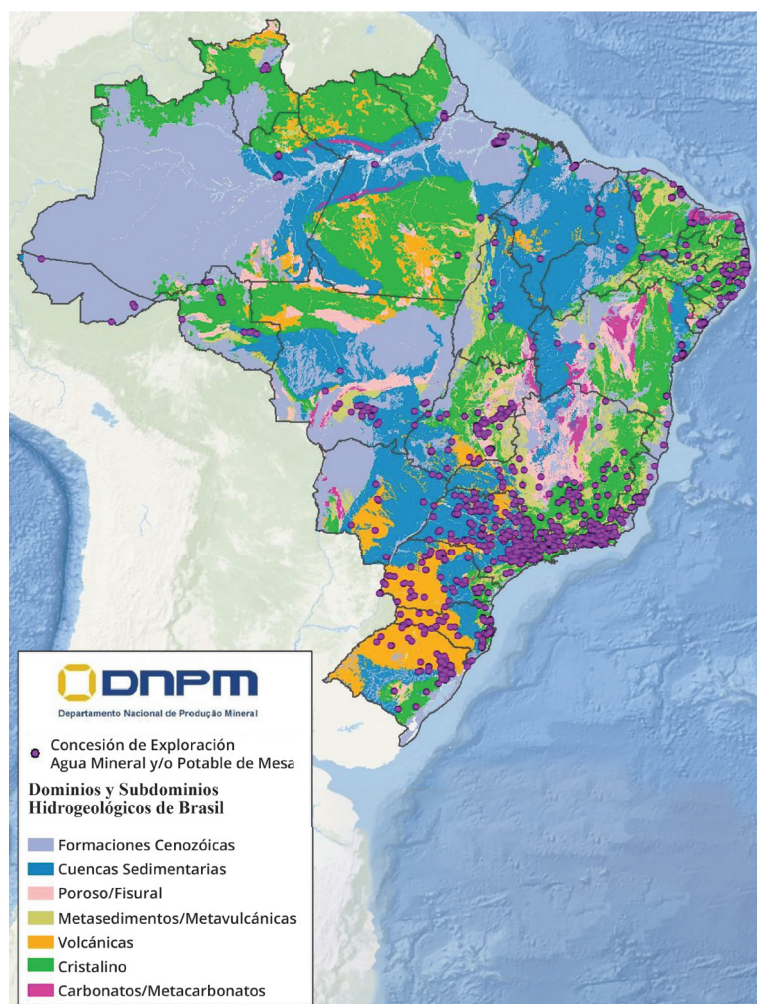


Figura 6 – Mapa de concesiones de explotación de aguas minerales y potables de mesa en Brasil

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

Estas aguas también están estrechamente vinculadas al turismo, ya sea con fines medicinales o termales. Aunque no se dispone de estudios sobre su papel económico, se construyeron importantes complejos turísticos basados en su explotación, tales como: Araxá (MG), Poços de Caldas (MG), Rio Quente (GO), Caldas Novas (GO), Olímpia (SP), Águas de Lindoia (SP), Santo Amaro da Imperatriz (SC), Gramado (RS), entre otros lugares.

Las aguas minerales se definen en el art. 1° del Código de Aguas Minerales (Decreto-Ley n° 7.841, de 8 de agosto de 1945) de la siguiente manera:

las aguas minerales son las procedentes de fuentes naturales o de fuentes cosechadas artificialmente que tienen una composición química o propiedades físicas o fisicoquímicas distintas de las aguas comunes, con características que les dan una acción medicinal.

La definición de “agua potable de mesa” se encuentra en el art. 3° del Código de Aguas Minerales (Decreto-Ley n° 7.841, de 8 de agosto de 1945), que los describe de la siguiente manera:

las aguas de composición normal procedentes de fuentes naturales o de fuentes obtenidas 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. Su comercialización requiere que la etiqueta informe el tipo de agua, es decir, si mineral o potable de mesa. El Decreto-Ley n° 7.841/1945 clasifica las aguas minerales en 12 grupos, según su composición química (Tabla 2); las fuentes se clasifican según los gases presentes y su temperatura (Tabla 3).

Clasificación	Caracterización según composición química
Radíferas	sustancias radiactivas disueltas, lo que les da una radiactividad permanente
Alcalino-bicarbonatadas	compuestos alcalinos equivalentes a al menos 0,200 g de bicarbonato de sodio (NaHCO_3)/litro
Alcalino-terrosas	compuestos alcalinotérreos equivalentes a al menos 0,120 g de carbonato cálcico (CaCO_3)/litro
a) alcalino-terrosa cálcicas	al menos 0,048 g de catión Ca en forma de bicarbonato de cálcico ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)/litro
b) alcalino-terrosas magnesias	al menos 0,30 g de catión Mg en forma de bicarbonato de magnesio (MgCO_3)/litro
Sulfatadas	al menos 0,100 g/l de sulfato aniónico (SO_4^{2-}) combinado con los cationes sodio (Na^+), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{2+})
Sulfurosas	al menos 0,001 g de anión azufre (S)/litro
Nitradas	no menos de 0,100 g/l de anión nitrato (NO_3^-) de origen mineral
Cloradas	al menos 0,500 g de cloruro sódico (NaCl)/litro
Ferruginosas	al menos 0,005 g de catión de hierro (Fe)/litro
Radiactivas	radón (Rn) disuelto
a) débilmente radiactivas	contenido de radón (Rn) entre 5-10 un. Mache/litro, a 20° C y presión de 760 mm Hg
b) radiactivas	contenido de radón (Rn) entre 10-50 un. Mache/1 litro, a 20° C y presión de 760 mm Hg
c) fuertemente radiactivas	contenido de radón (Rn) > a 50 un. Mache/litro, a 20° C y presión de 760 mm Hg
Toriativas	contenido de toronio (Tn) (un isótopo del radón) en disolución, equivalente en unidades electrostáticas a dos unidades de Mache/litro, al menos
Carbogasosas	200 ml de CO_2 libre disuelto a 20 °C y 760 mm Hg de presión/litro
Oligominerales	No alcanzan los límites establecidos en la legislación, pero tienen acción farmacológica probada acreditada por estudios sujetos a la supervisión y aprobación de la Comisión 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 de gases	Caracterización
Fuentes radiactivas	
a) débilmente radiactivo	al menos un caudal gaseoso de un litro/minuto (l.p.m.) con un contenido de radón entre 5 y 10 unidades. Mache/litro de gas espontáneo, a 20°C y presión de 760 mm Hg
b) radiactivas	al menos 1 l.p.m. de flujo gaseoso con un contenido de 10-50 unidades. Mache/litro de gas espontáneo, a 20°C y presión de 760 mm Hg
c) fuertemente radiactivas	al menos, un caudal gaseoso de 1 l.p.m., con un contenido de radón superior a 50 unidades. Mache/litro de gas espontáneo, a 20°C y presión de 760 mm Hg
Fuentes Toriativas	al menos, un caudal gaseoso de 1 l.p.m., con un contenido de toronio de emergencia equivalente en unidades electrostáticas a dos unidades Mache/litro.
Fuentes sulfurosas	aquellos que tienen en la emergencia una liberación definida de gas sulfúrico.

Clasificación de las fuentes por temperatura	Caracterización
Fuentes frías	temperatura por debajo de 25° C
Fuentes hipotermiales	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 n° 7.841/1945).

Aunque las aguas minerales y potables de mesa son subterráneas, han sido clasificadas como recursos minerales en el Código de Aguas Minerales. Según el art. 4° del Código, el uso comercial de estos recursos requiere un régimen de autorizaciones sucesivas para la investigación y concesión minera, establecido por el Código de Minas (Decreto-Ley n° 227, de 28 de febrero de 1967), que dio una nueva redacción al Decreto-Ley n° 1.985, de 29 de enero de 1940.

Al clasificar estas aguas como recursos minerales, su dominio legal fue atribuido a la Unión, con base en el art. 20, inc. IX, de la Constitución Federal de 1988⁶. En este 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°).

La autorización de investigación y minería, inspección y regulación del comercio de estas aguas es una asignación federal realizada a través de la Agencia Nacional de Minería (ANM), establecida por la Ley 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, de la Ley n° 13.575/2017).

El Código de Aguas Minerales permite que cualquier agua subterránea sea clasificada como un producto mineral, desde que cumpla con las normas impuestas por la ANM y los requisitos de potabilidad de

la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria (Anvisa). Así, las aguas subterráneas destinadas al embotellamiento o para fines balnearios estarían bajo la tutela de la Unión y se clasificarían como *recursos minerales*.

El Código de Minas indicó no sólo la posibilidad de depósitos de agua mineral, sino también de depósitos de aguas subterráneas. Estos dos tipos de depósitos estaban previstos en el art. 5°, revocado por la Ley n° 9.314, de 14 de noviembre de 1996, y en el art. 10, todavía en vigor, que establece la necesidad de una regulación especial para ambos. Cabe recordar que en el momento de la promulgación de estas leyes, los recursos hídricos se regían por el Código de Aguas de 1934, que clasificaba las aguas subterráneas, en su mayoría, como privadas, mientras que las Constituciones Federales de la época ni siquiera las mencionaban. Con la promulgación de la Constitución Federal de 1988, que incluía expresamente las aguas subterráneas como bienes estatales, se creó un obstáculo constitucional para la creación de depósitos federales de aguas subterráneas, ya que estos se colocaron bajo la tutela de los estados y regulados por la legislación de recursos hídricos.

Las aguas subterráneas, según su uso, pueden ser sometidas a diferentes tratamientos legales, aunque se extraigan del mismo acuífero y con características fisicoquímicas equivalentes. Si se destinan a usos generales, se clasifican como recursos hídricos; si se destinan a fines balnearios o embotellado de agua mineral y potables de mesa, se consideran recursos minerales (VILLAR; GRANZIERA, 2020).

Se clasifican como depósitos de agua mineral si cumplen con los siguientes requisitos: a) se utilizan para fines especiales de la legislación de aguas minerales; b) cumplen con los requisitos de calidad necesarios; y c) llevan a cabo el procedimiento administrativo con la

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

ANM, solicitando la autorización de la concesión de investigación y minería, obligatoria para quienes deseen explotar este potencial de baño o envase (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 depósito, su evaluación y la determinación de la viabilidad de su uso económico” (art. 2º, inc. V, de la Res. 76/2007). La concesión de una ordenanza de exploración para agua mineral, termal, gaseosa, de agua potable de mesa o destinada al baño se define como “un acto administrativo por el que se concede al interesado el derecho al uso industrial de depósitos de aguas minerales, termales, gaseosas, potables de mesa o destinadas al baño” (art. 2º, inc. V, de la Res. 76/2007).

Por otro lado, si la explotación de las aguas subterráneas se produce para fines generales, tales como abastecimiento, riego o uso industrial, están sujetas al régimen jurídico de los recursos hídricos estatales, que tiene como principales formalidades: a) obtención de la concesión 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. La concesión 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 impactar en la gestión de los recursos hídricos, interfiriendo con la disponibilidad de agua subterránea y superficial, sin embargo, este tipo de uso no suele ser contabilizado en el balance hídrico de la cuenca. Para evitar este problema, la Res. CNRH n° 76/2007 estableció “directrices generales para la integración entre la gestión de los recursos hídricos y la gestión del agua mineral, termales, gaseosas, potables de mesa o destinada al baño.” Esta Resolución reconoció “la necesidad de integración y 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. Su art. 3º, párrafo único, determina que la información a compartir se refiere, como mínimo:

- I. Los títulos de los derechos mineros para la investigación o exploración de aguas minerales, termales, gaseosas, potables de mesa o destinadas al baño para su inclusión en el Sistema de Información de Recursos Hídricos y consideración por los órganos de gestión de recursos hídricos;
- II. a los actos administrativos relacionados con el uso de los recursos hídricos, tales como: otorgamientos de derechos de uso, manifestaciones previas y autorizaciones para la construcción de pozos, para su inclusión en el sistema de información sobre recursos minerales y consideración por el órgano de gestión de recursos minerales;
- III. a la zona objeto de una solicitud de investigación con fines minerales, termales, gaseosas, potable de mesa o destinadas al baño;
- 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 recursos hídricos o previstas en los planes de recursos hídricos, para que sean consideradas por el órgano de gestión de recursos minerales;
- VI. Control cuantitativo y cualitativo de que disponen los órganos de gestión;
- VIII. las necesarias para la formulación de planes de recursos hídricos y el funcionamiento de los comités de cuencas fluviales.

El órgano de gestión de los recursos minerales deberá observar los actos y usos habilitantes inscritos ante el órgano de gestión de los recursos hídricos en el momento del análisis de la “solicitud de autorización para investigación de aguas minerales, termales, gaseosas, de mesa o para fines balnearios” (art. 6º). El órgano de gestión de los recursos hídricos, a su vez, 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 ordenanzas mineras para fines minerales, termales, gaseosas, potable de mesa o destinada a fines balnearios” (art. 7º).

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 76/2007 determina que se observa la información otorgada por los órganos de gestión de los recursos hídricos, sin embargo, estos no vinculan

la decisión de la ANM, lo que representa un problema, 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.

Un modelo de gestión que podría mejorar este proceso de integración sería condicionar a los usuarios de aguas minerales, termales, gaseosas, potable de mesa y destinadas a fines balnearios a los estándares legales tanto mineros como de recursos hídricos, ya que tienen naturalezas complementarias (FERREIRA JÚNIOR, 2007). Sobre la base del dominio estatal de las aguas subterráneas y de las competencias concurrentes y comunes, los Estados pueden establecer normas que determinen la necesidad de otorgar el derecho a utilizar aguas subterráneas clasificadas como minerales, termales, gaseosas, potables de mesa y destinadas a fines balnearios (FERREIRA JUNIOR, 2007). Además, pueden someter su extracción al cobro por el uso de recursos hídricos, algo que sucede, por ejemplo, en el estado de Ceará. Tales requisitos podrían estar justificados en vista del art. 12, inc. II de la Ley n° 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 de *agua de acuífero* y no de *recursos hídricos subterráneos*.

La Resolución CNRH n° 29/2002, en el art. 2°, inc. I, determina que la concesión del derecho al uso de aguas subterráneas es un requisito de las actividades mineras. El art. 9°, sin embargo, considera que lo contenido en dicha resolución no aplica a la minería prevista en el Código de Aguas Minerales. La concesión del derecho de uso tiene dos finalidades: *a)* garantizar el acceso al recurso; y *b)* controlar el uso del agua con el fin de garantizar el balance hídrico de la cuenca. Así, la ordenanza de exploración mineral garantiza al explorador el derecho de acceso al recurso mineral (agua mineral, termal, gaseosa, potable de mesa o destinado a fines balnearios), mientras que la concesión del derecho de uso de los recursos hídricos asegura que esta exploración esté sujeta a control socioambiental (FERREIRA JÚNIOR, 2007). Así, la inclusión de las aguas minerales en el sistema de recursos hídricos contribuiría a someter estas aguas a los principios del derecho del agua, como su uso múltiple, contribuyendo a evitar conflictos, como los ocurridos

entre empresas privadas y los municipios del Circuito del Agua, en Minas Gerais.

A pesar de la Res. CNRH n° 76/2007 haber tratado de construir una base de integración entre el régimen jurídico de las aguas minerales y de los recursos hídricos, debe irse más allá. El Código de Aguas Minerales debe interpretarse a la luz del Régimen Constitucional de 1988 y armonizarse con la Ley n° 9.433/97. Y, aunque las aguas protegidas por el Código de Aguas Minerales estén clasificadas como recurso mineral, son aguas extraídas de acuíferos y, por lo tanto, deben ser sometidas a los permisos de agua.

En Brasil, aunque el tema está poco explorado, existen conflictos relacionados con los usos de las aguas subterráneas y minerales, como Caldas Novas y Río Quente, en el estado de Goiás (ANDRADA; ALMEIDA, 2012) o, aún, en los complejos hidrominerales del Circuito del Agua, de Minas Gerais (Caxambu, São Lourenço, Cambuquira y Lambari) (BORGES *et al.*, 2006). El requisito de una concesión estatal del derecho de uso de los recursos hídricos para la concesión de la ordenanza minera contribuiría a una gestión más eficiente del agua (VILLAR; GRANZIERA, 2020).

REFERENCIAS

- AGGARWAL, P. K.; MATSUMOTO, T.; STURCHIO, N. C.; CHANG, H. K.; GASTMANS, D.; ARAGUAS-ARAGUAS, L. J.; JIANG, W.; LU, Z. T.; MUELLER, P.; YOKOCHI, R.; PURTSCHERT, R.; TORGENSEN, T. Continental degassing of he by surficial discharge of deep groundwater. *Nature Geoscience*, v. 8, 2015, pp. 35-39.
- 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, v. III, t. I, 2015a. 330p. Disponible en: <https://metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/api/records/07c7cf-8f-6e81-4040-b405-8361f6b4cdf9>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada e compartilhada**. 2017. Disponible en: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b26a6c8e-affa-4766-8cb7-ccdaadb3453>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Mapa das áreas aflorantes dos aquíferos e sistemas aquíferos do Brasil** (escala 1:1.000.000). 2013. Disponible en: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3ec60e4f-85ea-4ba7-a-90c-734b57594f90>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Portaria n° 149, de 26 de março de 2015**. Lista de termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos. 2015b. Disponible en: https://docs.ufpr.br/~irani/Hidrologia/Dicionario%20hidrologia%20da%20ANA_Portaria_149-2015.pdf.

- ANDRADE, A. M.; ALMEIDA, L. Aquífero termal de Caldas Novas: monitoramento mensal realizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). *Águas subterrâneas*, v. 26, n. 1, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v26i1.25048>.
- 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>.
- BARBI, F.; JACOBI, P. R. Democracia e participação na gestão dos recursos hídricos no Brasil. *Revista Katálysis*. Florianópolis, v. 10 n. 2, jul./dez. 2007, pp. 237-244.
- BENJAMIN, Antônio Herman V. **Dano ambiental – prevenção, reparação e repressão**. São Paulo: Editora RT, 1993.
- BENSON, D.; GAIN, A. K.; ROUILLARD, J. J. Water governance in a comparative perspective: from IWRM to a ‘Nexus’ Approach? *Water Alternatives*, v. 8, n. 1, 2015, pp. 756-773.
- BISWAS, A. K. Integrated water resources management: is it working? *International Journal of Water Resources Development*, v. 24, n.1, 2008, pp. 5-22.
- BORCHARDT, D.; BOGARDI, J. J.; IBISCH, R. B. **Integrated water resources management**: concept, research and implementation. Springer, 2016.
- Borges, G. C.; Bortoni, E. C.; Almeida, R. A.; Barison, M. R. Uso de tecnologias para o monitoramento qualitativo de águas minerais. *Águas subterrâneas*. 2006. Disponível em: <https://aguas-subterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23148>.
- 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/constituicaocompilado.htm.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa de 1967**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao67.htm.
- BRASIL. **Decreto- Lei nº 7.841, de 08 de agosto de 1945**. Código de Águas Minerais. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1937-1946/del7841.htm.
- BRASIL. **Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código de Águas. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-24643-10-julho-1934-498122-norma-atualizada-pe.html>.
- BRASIL. **Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018**. Regulamenta a Código de Mineração. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9406.htm.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 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. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm.
- BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19984.htm.
- BRASIL. **Resolução CNRH 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.
- 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, V. N. O.; FRACALANZA, A. P. Governança das águas no Brasil: conflitos pela apropriação da água e a busca da integração como consenso. *Ambiente & Sociedade*, v. 8, n. 2, 2010, pp. 365-382.
- 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, tendo como primeiro signatário o Senador Júlio Eduardo, que modifica a redação dos arts. 20, III, e 26, I, da Constituição Federal, para definir a titularidade das águas subterrâneas. 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.
- CUSHMAN, J. H.; TARTAKOVSKY, D. M. The handbook of groundwater engineering. 3. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 1073p.
- DINIZ, E. **Crise, reforma do Estado e governabilidade**. Brasil, 1985-1995. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1999. 228p.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global framework for action to achieve the vision on groundwater governance**. Rome, Italy, 2016.
- 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: http://www.revistadoutrina.trf4.jus.br/index.htm?http://www.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*, v. 20, 2012, pp. 415-418.
- FOSTER, S.; GARDUÑO, H.; TUINHOF, A.; TOVEY, C. **Groundwater governance conceptual framework for assessment of provisions and needs**. Sustainable Groundwater Management Contributions to Policy Promotion. GWMA/World Bank, 2009 (Strategic Overview Series, 1).
- 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. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 24 a 28 de novembro de 2019. Foz do Iguaçu-PR.
- GONÇALVES, A. F. **O conceito de governança**. XIV Congresso Nacional do Conpedi – Conselho Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Direito. Fortaleza, 2005. Disponível em: https://www.unisantos.br/upload/menu3niveis_1258398685850_alcindo_goncalves_o_conceito_de_governanca.pdf.
- GRANZIERA, M. L. M. **Direito ambiental**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015.
- GRANZIERA, M. L. M. **Direito ambiental**. 5. ed. São Paulo: Foco, 2019.
- GRIGG, N. **Water resources management: principles, regulations and cases**. New York: McGraw Hill, 1996. 540p.
- GWP. Global Water Partnership. **Integrated Water Resources Management**. Stockholm, Sweden: TAC Background Papers, n. 4, 2000. Disponível em: http://www.gwp.org/Global/GWP-CACENA_Files/en/pdf/tec04.pdf.
- 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: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 2019.
- JARVIS, T. W. *et al.* International borders, groundwater flow and hydrochizophrenia. **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.
- MACHADO, P. A. L. **Direito ambiental brasileiro**. 18. ed. São Paulo: Malheiros, 2010.
- MADANI, K.; DINAR, A. Non-cooperative institutions for sustainable common pool resource management: application to groundwater. **Ecological Economics**, v. 74, 2012, pp. 34-45.
- MARSHAK, S. **Earth: portrait of a planet**. 6th ed. New York: W.W. Norton & Company, 2019. 1025p.
- MEGDAL, S. B.; GERLAK, A. K.; VARADY, R. G.; HUANG, L.-Y. Groundwater Governance in the United States: common priorities and challenges. **Groundwater**, v. 53, n. 5, 2014, pp. 677-684. doi:10.1111/gwat.12294.
- 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, 1914p.
- OLIVEIRA, F. R.; PRETO, L. A.; LIMA, K. J.; CARDOSO, F. B. F.; GASPAR, M. T. P.; MARRA, C. F. Methodology for the selection of priority areas to recharge the aquifers to implementing conservationist practices in watersheds. 47th IAH Congress. Brazil 2021.
- POMPEU, C. T. **Direito de águas no Brasil**. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2006.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra**. São Paulo: Bookman, 2006. 656p.
- 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.
- REYNOLDS, S.; JOHNSON, J.; MORIN, P.; CARTER, C. **Exploring Geology**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 673p.
- RIBEIRO, N. B.; JOHNSON, R. M. F. Discussions on water governance: patterns and common paths. **Ambient. Soc.** São Paulo, v. 21, 2018, e01252.
- RITCHIE, H.; ROSER, M. **Water use and stress**. 2018. Disponível em: <https://ourworldindata.org/water-use-stress>.
- ROGERS, P.; HALL, A. W. **Effective water governance**. Stockholm: Global Water Partnership, 2003.
- ROSER, M.; ORTIZ-OSPINA, E. **World Population Growth**. 2019. Disponível em: <https://ourworldindata.org/world-population-growth>.
- 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. 277p.
- SOUZA-FERNANDES, L. C. S.; OLIVEIRA, E. (Orgs). **Coletânea de Legislação das Águas Subterrâneas do Brasil – Região Sudeste**. São Paulo: IAS, v. 1, 2018a.
- SOUZA-FERNANDES, L. C. S.; OLIVEIRA, E. (Orgs). **Coletânea de Legislação das Águas Subterrâneas do Brasil**. Região Norte. São Paulo: IAS, v. 5, 2018b.
- SOUZA-FERNANDES, L. C. S.; OLIVEIRA, E. (Orgs). **Coletânea de Legislação das Águas Subterrâneas do Brasil**. Região Sul. São Paulo: IAS, v. 2, 2018c.
- SOUZA-FERNANDES, L. C. S.; OLIVEIRA, E. (Orgs). **Coletânea de Legislação das Águas Subterrâneas do Brasil**. Região Centro-Oeste. São Paulo: IAS, v. 3, 2018d.
- STJ. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial nº 1.296.193-RJ** (2011/0288207-8). Relator. Ministro Hermam Benjamin. Brasília. DJe: 07/11/2016a.
- STJ. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial nº 1.306.093-RJ** (2011/0145236-6). Relator. Ministro Hermam Benjamin. Brasília. DJe: 07/11/2016b.
- STJ. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial nº 1.306.093-RJ**. 2ª Turma. Relator Ministro Herman Benjamin, j. 28/05/2013.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. Oficina de Textos, 2009. 557p.
- TOVAR, J. Conceito e propriedade das nascentes. **Revista do Serviço Público**, v. 67, n. 1, 1955, pp. 96-105. Disponível em: <https://revista.enap.gov.br/index.php/RSP/article/view/5154>.
- VIEGAS, E. C. **Visão jurídica da água**. Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2005.
- 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. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n1/pt_1809-4422-asoc-19-01-00085.pdf.

- VILLAR, P. C.; GRANZIERA, M. L. M. **Direito de águas à luz da governança**. Brasília: ANA, 2020.
- VILLAR, P. C.; HIRATA, R. Groundwater Governance and the Construction of Legal Indicators for Brazilian States. **Ambiente e Sociedade**, v. 25, 2022.
- VILLHOLTH, K. G.; CONTI, K. I. Groundwater governance: rationale, definition, current state and heuristic framework. **In**: VILLHOLTH, K. G.; LOPEZ-GUNN, E.; CONTI, K. I.; GARRIDO, A.; VANDERGUN, J. (Eds.). **Advances in groundwater governance**. Leiden, Netherlands: CRC Press, 2018, pp. 3-31.
- YAN, Y.; BENDER, M. L.; BROOK, E. J.; CLIFFORD, H. M.; KEMENY, P. C.; KURBATOV, A. V.; MACKAY, S.; MAYEWSKI, P. A.; NG, J.; SEVERINGHAUS, J. P.; HIGGINS, J. A. Two-million-year-old snapshots of atmospheric gases from Antarctic ice. **Nature**, v. 574, 2019, pp. 663-666.
- YOSHIDA, C. Y. M. Água: bem privado, bem público ou bem difuso? Implicações jurídicas, econômico-financeiras e socioambientais. **In**: YOSHIDA, C. Y. M. (Org.). **Recursos hídricos: aspectos éticos, jurídicos, econômicos e socioambientais**. Campinas, SP: Alínea, 2007, v. 1, pp. 37-56.



Surgencia de acuífero kárstico en la Cuenca del Pacui
en la frontera de Montes Claros con Corazón de Jesús (MG)
Foto: Eduardo Gomes de Assis / Banco de Imágenes ANA

CAPÍTULO 2

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL CICLO HIDROSOCIAL

2.1 EL CICLO HIDROLÓGICO Y LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El ciclo del agua, conocido científicamente como *ciclo hidrológico*, es una forma simplificada de describir los movimientos y transformaciones sufridos por el agua en el planeta Tierra. El agua está siempre en movimiento, circulando por las superficies (glaciares, icebergs, ríos, lagos, mares, etc.); por la atmósfera (nubes); o por el subsuelo (acuíferos, acuitardos), como se muestra en el Video 1. Este movimiento cíclico está relacionado con los intercambios de energía entre la atmósfera, los océanos y los continentes, lo que sustenta el clima y gran parte de su variabilidad natural (OKI; ENTEKHABI; HARROLD, 2004; COCKELL *et al.*, 2011). La luz del sol (radiación solar) y el calor del interior de la Tierra (emitido por las reacciones nucleares radiactivas) son las fuentes de energía que promueven la transformación de los estados del agua

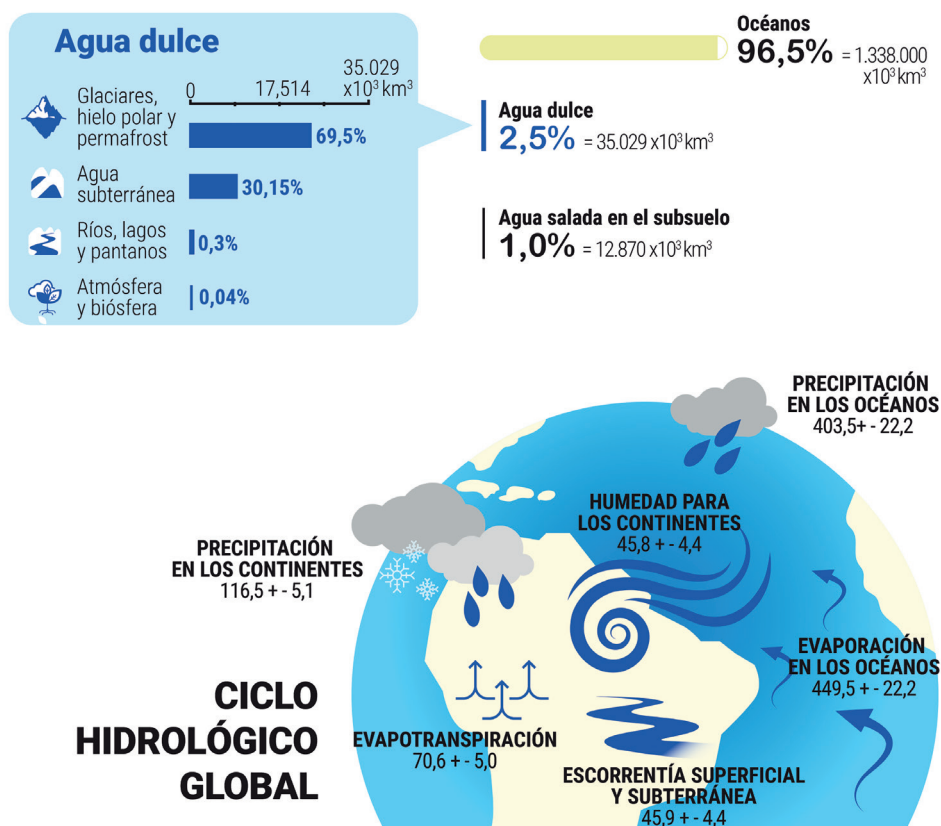
(líquido, sólido y gaseoso) y, en consecuencia, su continuo movimiento en el Planeta.

Video 1 – Ciclo del Agua (ciclo hidrológico)

Producción: ANA

Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=vW5-xrV3Bq4>.

La cantidad de agua en el planeta es constante, pero su distribución en la naturaleza es desigual y cíclica, sufriendo cambios físicos y químicos a lo largo del espacio y del tiempo, pudiendo encontrarse en estado líquido (mares, ríos, lagos y acuíferos), sólido (nieve, granizo y glaciares) y gaseoso (atmósfera, fumarolas y nubes volcánicas) (COCKELL *et al.*, 2011). Los océanos son los mayores depósitos de agua del planeta, pero los mayores volúmenes de agua dulce se encuentran en los glaciares y acuíferos. La figura 7 presenta la distribución de estos volúmenes y los caudales medios anuales en el ciclo hidrológico global.



Media anual de los flujos en el ciclo hidrológico global, incertidumbres asociadas, en los años 2000 a 2010. Fuente: Rodell *et al.* (2015)

Figura 7 – Volumen de agua y caudales medios anuales en el ciclo hidrológico.

Fuente: Shiklomanov e Rodda (2003); Rodell *et al.* (2015), adaptado por Dora Atman.

El movimiento del agua en el planeta fue registrado en la antigüedad, sin embargo, sólo en los siglos XVII y XVIII se constató la importancia de la evaporación del agua del mar como fuente de humedad en los continentes y el abastecimiento de los depósitos de agua dulce (MANOEL FILHO, 2008). Esta humedad se distribuye en forma de lluvia y nieve, contribuyendo a la escorrenría de los ríos y a los volúmenes almacenados en lagos y acuíferos.

El funcionamiento del ciclo hidrológico está influenciado por varios factores naturales, tales como: a) variaciones en la incidencia de la radiación solar,

controlada por la dinámica interna del Sol y por variaciones en la posición y trayectoria del planeta Tierra en el Sistema Solar; b) cambios en la composición de la atmósfera y el agua de los océanos; c) vientos y corrientes oceánicas; d) volcanismos; e) el tipo, patrón y densidad de la cobertura vegetal; f) variaciones en la distribución espacial y número de seres vivos; y g) tipos de suelo y subsuelo (COCKELL *et al.*, 2011; GROTZINGER; JORDAN, 2013). La Figura 8 muestra los principales fenómenos naturales que regulan los procesos de transferencia de agua en el ciclo hidrológico.



Figura 8 – Ciclo del agua

Fuente: USGS (2017).

Entre los procesos que regulan la disponibilidad hídrica destacan: *i)* evaporación; *ii)* evapotranspiración; *iii)* precipitación; *iv)* escorrentía superficial; *v)* escorrentía de base; y *vi)* infiltración. Estos procesos forman los drenajes y proporcionan recarga, descarga y percolación. Las definiciones de cada término se describen a continuación:

- i. **Evaporación:** La evaporación es un tipo de vaporización que se produce en la superficie de un líquido a medida que pasa a la fase gaseosa (vapor). En la Tierra, la evaporación es el fenómeno físico de transferencia de agua y energía inducido por el flujo de calor latente desde las superficies del agua a la atmósfera. La tasa de evaporación depende de la disponibilidad de energía, del mecanismo de transferencia de masa/energía, de las dimensiones de las superficies de agua y de los volúmenes de los embalses y lagos. Los principales factores meteorológicos que intervienen en este proceso son: la radiación solar, la temperatura

del aire y del agua, la velocidad del viento, la humedad del aire, la presión atmosférica y las características del ambiente circundante (OKI; ENTEKHABI; HARROLD, 2004).

- ii. **Evapotranspiración:** la evapotranspiración es la eliminación de agua de la superficie a la atmósfera mediante la combinación de dos procesos: la evaporación y la transpiración vegetal. La transpiración vegetal es la responsable de la salida del agua del interior de la planta a través de las aberturas de la epidermis vegetal, garantizando el intercambio de gases entre la planta y la atmósfera. De forma natural, las plantas pierden agua principalmente a través de los estomas, que son pequeñas aberturas en las hojas, encargadas de regular la salida de sustancias (gases y vapor de agua) producidas en las hojas. Casi toda el agua absorbida del suelo por las plantas se pierde a través de la transpiración, y sólo una pequeña parte se convierte en tejidos vegetales.

Los ríos voladores y la Selva Amazónica

En el caso brasileño, la evapotranspiración de la Selva Amazónica repercute en la disponibilidad de agua en otras cuencas y regiones brasileñas. La Selva Amazónica libera “20 mil millones de toneladas de agua por día”, superando el caudal que el río Amazonas descarga en el mar (17 mil millones de toneladas), influyendo directamente en el clima (NOBRE, 2014, p. 13). La influencia de la selva en el clima puede explicarse mediante la teoría de la bomba biótica (vídeo 2). Según esta teoría, los “procesos de transpiración y condensación mediados y manipulados por los árboles” modifican “la presión y la dinámica atmosféricas”, generando “un mayor suministro de humedad desde el océano hacia el interior de los continentes boscosos” (NOBRE, 2014, p. 13). Como la Selva Amazónica evapora tanta o más agua que la superficie oceánica contigua, consigue succionar “del mar a la tierra las corrientes de aire cargadas de humedad [...], que traerán la lluvia a la zona boscosa”. La tala de la selva disminuye la evapotranspiración y, en consecuencia, la condensación, lo que invierte los flujos de humedad que irán de la tierra al mar, generando un desierto (NOBRE, 2014, p. 13).

La humedad generada por la selva forma masas de aire cargadas de vapor de agua, que son transportadas por los vientos de la Cuenca Amazónica hacia el Centro-Oeste, Sudeste y Sur de Brasil, contribuyendo a la formación de lluvias en estas regiones. Estas masas de aire húmedo se denominan *ríos voladores*, ya que pueden asemejarse a verdaderos *cursos de agua atmosféricos* (Vídeo 3).

Vídeo 2 – Esquema ilustrativo sobre la Bomba Biótica

<https://www.youtube.com/watch?v=0CS9y8JIH2Y>

Producido por: Ríos Voadores

Vídeo 3 – Documental Ríos Voladores

<https://www.youtube.com/watch?v=0Mwo5PVB0ro>

Producido por: Bettina Ehrhardt en colaboración con Thomas Hagenbrock y Michael Schucht

iii. **Precipitación:** es el proceso de condensación del vapor de agua atmosférico que se acumula y *precipita* o cae sobre la superficie terrestre. La precipitación se produce por la acción conjunta de dos procesos: el enfriamiento y la adición de humedad, lo que hace que parte de la atmósfera se sature de vapor de agua (alcanzando el 100% de humedad). 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. La lluvia tiende a escurrirse o a infiltrarse en el suelo. La nieve puede acumularse en los glaciares y casquetes polares, donde puede permanecer congelada durante miles de años o derretirse y escurrir, fluyendo como arroyos y ríos o infiltrándose en el suelo. El deshielo de los casquetes polares aumenta el nivel de agua de los océanos, mientras que el deshielo acelerado de los glaciares puede comprometer el flujo de los cursos de agua, importantes para el abastecimiento de las poblaciones.

iv. **Escorrentía superficial:** se define por el flujo de agua que se produce en la superficie del suelo cuando éste está saturado de humedad o es impermeable. Estas aguas, generalmente originadas por las precipitaciones, pueden formar torrentes sucesivos, drenajes (arroyos, riachuelos, ríos), lagos, etc. Su escorrentía se produce de forma difusa o concentrada, y puede formar flujos efímeros a lo largo de los valles, dependiendo de la intensidad de las precipitaciones y de las características de las superficies (como la pendiente, la topografía y el tipo de cobertura vegetal).

Drenaje superficial: representan los cursos y caudales de aguas superficiales que forman arroyos, riachuelos y ríos. Pueden tener un carácter *intermitente* (cuando el agua fluye en sus cauces durante los periodos de lluvia y se seca durante la sequía), o *perenne* (cuando el flujo de agua permanece durante todo el año hidrológico y no se seca). Los cursos de agua *intermitentes* se forman por la escorrentía superficial y subsuperficial del agua de lluvia, mientras que los cursos *perennes* también reciben el flujo de agua subterránea de los acuíferos. Los flujos subterráneos perennes mantienen constantes

los manantiales y sus cursos de agua, además de contribuir directamente al aumento del caudal aguas abajo de los manantiales a través de afloramientos a lo largo del propio curso.

v. **Infiltración:** es el paso del agua de la superficie al interior del suelo. La capacidad de infiltración de un terreno depende de su topografía, cobertura vegetal, grado de humedad del suelo, sus propiedades físicas y químicas y la intensidad y duración de las precipitaciones. La filtración se produce por varios factores: gravedad, fuerzas capilares, adsorción y ósmosis. La infiltración disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad del suelo en la capa superficial. Si la tasa de precipitación supera la tasa de infiltración, se favorece la escorrentía superficial, por lo que cada suelo tiene un límite potencial de infiltración.

Percolación: proceso por el que el agua se desplaza verticalmente y hacia abajo a lo largo de la zona no saturada (zona vadosa o de aireación) tras infiltrarse en suelos y rocas. La *zona no saturada* es la parte de la subsuperficie en la que los espacios existentes entre las partículas del suelo y las rocas están llenos de agua y aire (humedad del suelo). Durante la percolación también se produce el proceso natural de filtrado del agua por el suelo y su enriquecimiento con elementos minerales. 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). El agua puede proceder del agua de lluvia infiltrada, del agua de deshielo o de los ríos y lagos. Las zonas de la cuenca hidrográfica que permiten la infiltración del agua constituyen zonas de recarga. En la zona saturada, los espacios vacíos están completamente llenos de agua. El umbral entre estas dos zonas se denomina *superficie freática* o *nivel de agua subterránea*. En la base de la zona no saturada existe una región húmeda llamada *franja capilar*. Esta región tiene un

espesor variable y representa una transición de la zona no saturada a la saturada, y se produce debido a las fuerzas capilares que ascienden el agua del acuífero a los espacios superiores vacíos de los suelos vecinos. 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*, la *percolación* 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. Los acuíferos, por tanto, no se abastecen de forma homogénea, existiendo zonas más favorables para la recarga, y los cambios en la ocupación del suelo pueden alterarla. Por ello, es importante que la gestión de los recursos hídricos tenga en cuenta esta característica.

Descarga: es el proceso de salida del agua de los acuíferos, donde las aguas subterráneas afloran y fluyen en la superficie (manantiales) y principalmente a lo largo de los cursos de agua, como ríos o lagos y océanos. La descarga subterránea es responsable de la perennización de los ríos. Los caudales de descarga relacionados con los acuíferos que almacenan grandes volúmenes de agua tienden a ser elevados y de carácter perenne y se ven poco afectados por largos períodos de sequía. En los acuíferos de tipo kárstico, en los que el flujo de agua subterránea se produce concentrado en conductos y cuevas, los manantiales suelen llamarse *pozos surgentes*, porque da la impresión de que un río surge en la superficie. Sin embargo, en los acuíferos pequeños y poco profundos, como los acuíferos de las laderas de colinas y montañas, las descargas subterráneas son poco caudalosas y muchas de ellas pueden funcionar sólo durante la temporada de lluvias (intermitentes) o durante unos días después de los eventos de

lluvia (efímeras). El Código Forestal (Ley n° 12.651/2012) clasifica dos tipos de descarga de acuíferos como *áreas de protección permanente: manantiales o nacimientos¹ y ojos de agua²*. Es interesante que las leyes den una protección directa y necesaria a los nacimientos de un río y a los ojos de agua, pero que guarden silencio sobre el flujo de base proveniente de los acuíferos, que es el responsable de mantener la perennidad de los ríos, gracias a la descarga de grandes volúmenes de agua.

vi. **Escurrentía de base o flujo subterráneo:** es el movimiento del agua a lo largo de la zona saturada. El agua en el suelo y en las rocas saturadas fluye en los huecos como los poros, las fracturas abiertas y otros huecos dejados por la disolución de los 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 se produce siempre en la dirección de mayor a menor carga hidráulica, que es la suma de la carga de elevación altimétrica más la carga de presión de la columna de agua en un punto determinado del reservorio subterráneo. La carga hidráulica se mide mediante pozos de monitorización distribuidos a lo largo de los reservorios subterráneos, junto con el conocimiento del sistema hidrogeológico, lo que permite definir la dirección del flujo.

En contra de las ideas populares, en la mayoría de los casos las aguas subterráneas no forman ríos o arroyos subterráneos³, sino que llenan los poros y las fracturas como una esponja que absorbe el agua, fluyendo lentamente. Estas aguas representan la dimensión oculta del

1. En el momento de la sentencia de la ADIN n° 4903, el Supremo Tribunal Federal (STF) reconoció que los manantiales intermitentes también debían considerarse Áreas de Preservación Permanente (APP).

2. *Ojos de agua*: denominación popular sin vínculo técnico-científico que en el entendimiento general es sinónimo de *manantial*. Se cree que su origen proviene de la forma circular y puntual de algunos manantiales y el consiguiente aspecto visual del flujo de agua que se asemeja a un ojo, resultado de la presión del agua que surge formando una burbuja emergente. Este tipo de manantial se diferencia visualmente de otros que se encuentran dispersos en zonas húmedas y no son visibles puntualmente. En la práctica, esta denominación no está relacionada con la intermitencia de los flujos de los manantiales, sino con los aspectos visuales que caracterizan a algunos manantiales.

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

ciclo hidrológico y se subestiman en el ciclo hidrosocial. Además de su papel en el ciclo hidrológico, estas aguas influyen en aspectos geológicos, como la estabilidad de las laderas, la subsidencia de terrenos, la inducción de terremotos y temblores sísmicos, la migración y la acumulación de petróleo, así como en aspectos ecosistémicos relacionados con el mantenimiento de los humedales (pantanos, manglares, humedales) y los cursos de agua superficiales (MANOEL FILHO, 2008).

2.1.1 El ciclo hidrosocial

Los seres humanos son agentes activos en los procesos del ciclo hidrológico, interfiriendo de manera que aumentan o disminuyen estos flujos naturales, ya sea en el territorio o fuera de él (LINTON; BUDDS, 2014). La forma en que circula el agua también está condicionada por las instituciones, las infraestructuras y las prácticas sociales de políticos, ciudadanos, empresarios, usuarios y consumidores. Esta idea ha reforzado el concepto de *ciclo hidrosocial*, que politiza la concepción biofísica de los procesos del ciclo hidrológico. El agua se mueve no solo a través de las precipitaciones, los poros de las rocas y las masas de aire, sino a través de una compleja red de conductos, tuberías, pozos, plantas de tratamiento, cisternas, pivotes de riego, mangueras de jardín, fugas, derechos legales, normas de calidad, redes de transporte, mercados y consumidores (BUDDS; LINTON; McDONNELL, 2014).

La disponibilidad de agua es un dato natural pero también social que requiere los siguientes análisis: a) ¿quién usa el agua y cómo?; b) ¿quién tiene acceso o control sobre el recurso?; c) ¿cómo se influye el uso del agua en las relaciones de poder en el campo y en la ciudad?; d) ¿cómo su presencia o ausencia determina la conformación de una sociedad?; e) ¿cómo interfieren los flujos financieros en la disponibilidad del agua, independientemente del ciclo hidrológico?; f) ¿cómo la sociedad interfiere en los elementos que componen el ciclo hidrológico?; g) ¿qué usuarios y qué usos se benefician de las infraestructuras hidráulicas? (LINTON; BUDDS, 2014).

Las acciones humanas y el fenómeno del cambio climático alteran la dinámica natural de los elementos que componen el ciclo hidrológico, interfiriendo directamente en la forma en que el agua circula por el territorio, cambiando los patrones de disponibilidad de agua y su distribución territorial y temporal. Las zonas que solían tener una buena disponibilidad de agua y un régimen de

lluvias regular pueden enfrentarse a sequías o inundaciones, cuyas consecuencias económicas, sociales y medioambientales se desconocen. Las aguas subterráneas se insertan en este ciclo hidrosocial, viéndose afectadas por las extracciones, las fugas de las redes de agua y alcantarillado, el exceso de riego, la impermeabilización de las ciudades, los cambios en el uso del suelo y la pérdida de la cobertura vegetal, así como los impactos provocados por la variabilidad y el cambio climático. Si la determinación de las trayectorias naturales de las aguas subterráneas ya es una tarea compleja, desde una perspectiva hidrosocial se convierte en un reto aún mayor, dados los limitados estudios geológicos e hidrológicos y los impactos de las actividades antrópicas en el ciclo hidrológico. Además, hace frente a la falta de información sobre su uso, que en el caso brasileño es mayoritariamente desconocido y subestimado.

2.2 QUÉ SON LOS ACUÍFEROS Y CÓMO FUNCIONAN

En Hidrogeología⁴, las formaciones geológicas se pueden clasificar según su capacidad de almacenar y transmitir agua en tres categorías: *acuíferos*, *acuitardos* o *acuicludos*:

- a) el *acuífero* es una “formación geológica con capacidad para acumular y transmitir agua a través de sus poros, fisuras o espacios resultantes de la disolución y transporte de materiales rocosos”. (Res. CNRH n° 202/2018, art. 2°, inc. I). En la práctica, sólo se consideran acuíferos las unidades geológicas capaces de producir agua por medio de pozos en condiciones económicamente viables;
- b) los *acuicludos* son formaciones geológicas que contienen agua en su interior, sin embargo, no tienen capacidad de transmisión;
- c) los *acuitardos* son formaciones semipermeables que pueden contener agua, pero su transmisión se produce muy lentamente, haciendo inviable la explotación económica.

Los *acuicludos* y *acuitardos* pueden relacionarse con los acuíferos en cuanto a que delimitan su parte superior y/o inferior, sin embargo, tienen baja o nula capacidad de transferencia de agua, considerándose

4. Hidrogeología: área de la Geología que se ocupa de la distribución y el movimiento de las aguas subterráneas en los suelos y las rocas de la corteza terrestre.

impermeables o semipermeables. La clasificación de las formaciones en una de estas categorías se realiza evaluando la capacidad de la roca o sedimento para transmitir agua, representada por el parámetro *conductividad hidráulica* (o coeficiente de proporcionalidad de la Ley de Darcy⁵). La conductividad hidráulica en los acuíferos, es decir, la velocidad de su flujo de agua, es igual o superior a 10^{-4} cm/s (o 8,64 cm/día).

La distribución de los acuíferos en el territorio depende de los procesos geológicos y geomorfológicos ocurridos en el continente. 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 del flujo, las tasas de recarga y la vulnerabilidad a la contaminación. Entender la distribución de los tipos de roca en el territorio y cómo sus características influyen en el flujo de las aguas subterráneas 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 viene definida por sus propiedades fisicoquímicas, entre las que se encuentran la porosidad, la permeabilidad (o conductividad hidráulica), las condiciones de ocurrencia (extensión, espesor y estructura) y la posibilidad técnica y económica de captación.

Clasificación de los acuíferos según los tipos de roca

Brasil tiene una antigua estructura geológica que ha estado expuesta a agentes de erosión durante un largo tiempo geológico (MENTE, 2008). Sus rocas forman generalmente el lecho (base) impermeable que sustenta todos los tipos de acuíferos (MENTE, 2008).

Estas rocas han sufrido varios procesos de deformación, plegamiento, fragmentación, entre otros, que indujeron la formación de espacios libres (fracturas) y permiten la percolación y el almacenamiento de agua, permitiendo la formación de acuíferos fisurados o fracturados. Este lecho se erosiona a veces, formando zonas bajas conocidas por su forma topográficamente deprimida, como las cuencas. A lo largo del tiempo geológico, estas rocas fueron enterradas por bloques de sedimentos, formando las cuencas sedimentarias. En los sedimentos, el agua percola en los espacios entre los granos (poros intergranulares) que se formaron junto con la deposición del bloque sedimentario, dando lugar a los acuíferos intergranulares o sedimentarios. Finalmente, en las cuencas marinas, por precipitación química, se formaron rocas carbonatadas (ricas en carbonatos- CO_3), también llamadas *rocas kársticas*. En este último caso, el agua se filtra por la roca a través de los espacios de las fracturas, grietas o cavidades generadas por la disolución química provocada por los flujos de agua de lluvia, dando lugar a los acuíferos kársticos.

Así, según el origen de la roca o el sedimento, así como su grado de consolidación, fragmentación o disolución, los acuíferos pueden clasificarse en tres categorías simplificadas:

- (a) fisurados o fracturados (Box 5);
- b) granulares o sedimentarios (Box 6); y
- c) kársticos (Box 7).

Según ANA (2013), los acuíferos y sistemas acuíferos sedimentarios afloran en el 53,8% del territorio nacional, los fracturados en el 44,7% y los kársticos sólo en el 1,5% (Figura 9).

5. 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.



Figura 9 – Distribución de los acuíferos fracturados, sedimentarios y kársticos en Brasil

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

Los acuíferos no se presentan de forma homogénea o uniforme en el territorio brasileño. La composición de las rocas o bloques sedimentarios, así como la exposición a diferentes climas hace que cada acuífero presente unas condiciones específicas de infiltración, percolación, flujos, almacenamiento y descarga de agua, lo que repercute en la producción y calidad del agua.

Box 5 – Acuíferos fracturados

Amélia João Fernandes

Los acuíferos fracturados típicos están compuestos por rocas cristalinas, metamórficas e ígneas intrusivas, que son materiales geológicos de baja permeabilidad primaria. En este tipo de material el agua subterránea se almacena y se transmite a través de las fracturas de las rocas, es decir, a partir de su porosidad secundaria. En muchas rocas volcánicas, como los basaltos, la porosidad primaria puede estar rellena y el flujo de agua subterránea se produce predominantemente a través de la porosidad secundaria, es decir, a través de los huecos delimitados por las superficies de fractura (DOMENICO; SCHWARZ, 1990; FREEZE; CHERRY, 1979; SINGHAL; GUPTA, 2010). En las rocas sedimentarias de baja permeabilidad primaria, como el *shale*, las limolitas, las fangolitas, algunas calizas y las areniscas cementadas, el flujo de agua subterránea a través de las fracturas también puede ser importante.

En general, las rocas presentan fracturas de diversas orientaciones, que se conectan entre sí, formando un sistema o red (Figura 10). Normalmente, la porosidad en estos acuíferos es baja, pero la velocidad de flujo del agua subterránea puede ser alta, lo que hace que sólo un pequeño porcentaje de fracturas sean buenos conductos (Figura 11).

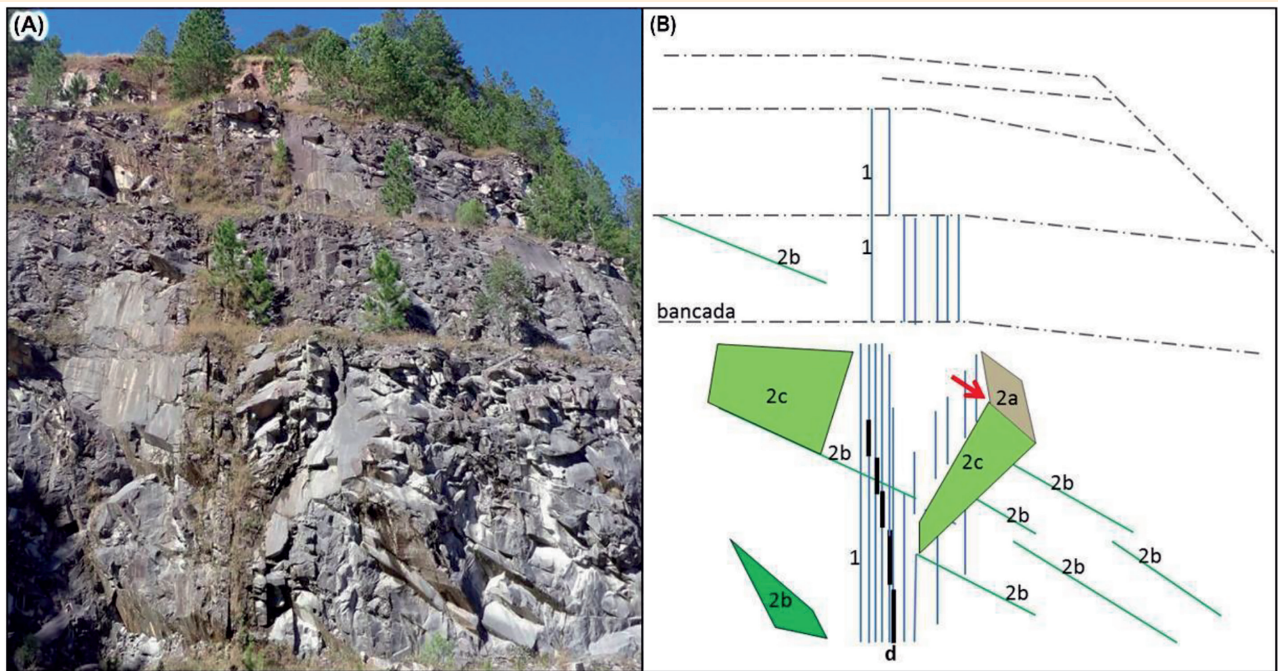


Figura 10 – (A) Pared de cantera de granito (Itapecerica da Serra, SP), con altura total de aproximadamente 90 m, en la que se pueden ver varios bancos; (B) Esquema de la pared en (A) con representación de fracturas verticales (1, 2a) y fracturas inclinadas (2b, 2c).

Fuente: Fernandes *et al.* (2016, p. 80).

En la mitad inferior de la pared rocosa hay fracturas horizontales (trazos sombreados) por las que sale el agua y crece la vegetación, lo que demuestra que son permeables y constituyen buenos conductos.



Figura 11 – Pared de cantera de basalto en Ribeirão Preto (SP), de aproximadamente 50 m de altura.

Fuente: Fernandes *et al.* (2016, p. 80).

Las aberturas de las fracturas son predominantemente muy pequeñas y suelen oscilar entre 0,01 y 0,05 mm. Estas aberturas, en un medio con una fractura/metro, proporcionan valores de conductividad hidráulica (K) entre $\sim 10^{-8}$ y $\sim 10^{-6}$ m/s. Los valores de K para las rocas ígneas y metamórficas fracturadas varían en cinco órdenes de magnitud, es decir, de 10^{-8} a 10^{-4} m/s (Figura 11) (véase, por ejemplo, ROULEAU *et al.*, 1996; SHAPIRO *et al.*, 2007; PARKER *et al.*, 2018). Las rocas cristalinas no fracturadas tienen valores de K extremadamente bajos y son comparables al *shale* y la arcilla (FREEZE; CHERRY, 1979).

Los acuíferos fracturados son importantes para abastecer a las poblaciones de varias regiones. Su explotación sostenible requiere estudios sobre su potencial de producción, al igual que es necesario evaluar los casos de contaminación de estos acuíferos por actividades humanas para proteger la salud pública. Entender las propiedades de la red de fracturas es clave para evaluar y predecir el transporte de contaminantes a través del acuífero de roca fracturada y evitar la pérdida del recurso hídrico.

Otra de las principales motivaciones para estudiar estos acuíferos es el aumento de la demanda de agua, principalmente para el abastecimiento público y para las actividades industriales y agrícolas. La Región Metropolitana de São Paulo (RMSP) y el Nordeste de Brasil son ejemplos de regiones cuya demanda de agua depende en gran medida de los típicos acuíferos fracturados, formados por rocas cristalinas metamórficas e ígneas. El flujo de las aguas subterráneas puede provocar inestabilidades, por lo que los estudios de los acuíferos fracturados, entre otras aplicaciones, son necesarios para las obras de ingeniería y para la evaluación del riesgo de catástrofes naturales (por ejemplo, deslizamientos de tierra).

Box 6 – Acuíferos sedimentarios*Ingo Wahnfried*

Los acuíferos sedimentarios están compuestos por sedimentos o rocas sedimentarias, cuyos depósitos afloran en el 70% de la superficie emergida del Planeta (WILKINSON *et al*, 2009). La porosidad predominante de esta clase de unidades geológicas es primaria, generándose al depositarse los sedimentos. Esto hace que la porosidad se distribuya por todo su volumen, facilitando la extracción del agua almacenada. La porosidad total de los sedimentos no consolidados varía entre el 25 y el 40% para la grava; el 25 y el 50% para la arena; y el 35 y el 50% para el limo (FREEZE; CHERRY, 1979), lo que muestra la tendencia de la porosidad a disminuir con el aumento de la granulometría (tamaño del sedimento). En las rocas sedimentarias, la porosidad es siempre menor que la del material con la misma granulometría no consolidada, debido principalmente al proceso de compactación. Las areniscas tienen una porosidad del 5 al 30%; los carbonatos no karstificados del 0 al 20%; y el shale del 0 al 10% (KRUSEMAN; RIDDER, 1994). La porosidad también está influenciada por el grado de selección de los granos, su esfericidad y la aparición de la cementación. Los poros de dimensiones muy reducidas no permiten la salida del agua por gravedad. Los valores de la capacidad específica, debido a esta característica, son siempre inferiores a los de la porosidad total, con valores que varían entre el 1% para las arcillas y el 30% para las arenas gruesas (KRUSEMAN; RIDDER, 1994).

Además de la porosidad, parámetros como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, la heterogeneidad y la anisotropía son definidos por las características de los sedimentos o rocas sedimentarias que forman las unidades acuíferas. La conductividad hidráulica depende de la conectividad entre los poros y por lo tanto no tiene correlación obligatoria con su volumen. Por lo tanto, la gran diversidad de tipos de depósitos y rocas sedimentarias hace que su conductividad hidráulica varíe en 11 órdenes de magnitud. Freeze y Cherry (1979) indican conductividades hidráulicas aproximadas que oscilan entre 10^{-11} m/s para las arcillas marinas, y 10^{-1} m/s para las gravas, mientras que para el shale la conductividad mínima es de 10^{-12} m/s y la máxima de 10^{-5} m/s para los carbonatos no karstificados.

La anisotropía más común en los acuíferos sedimentarios es la causada por la variación del tamaño del grano entre estratos. La conductividad hidráulica horizontal puede ser de dos a diez veces mayor que la vertical en formaciones aluviales con estratificación horizontal, pero este factor puede llegar a 100 cuando hay intercalación de capas arcillosas (KRUSEMAN; RIDDER, 1994).

El flujo distribuido por todo el volumen del acuífero sedimentario hace que la velocidad real del agua en los poros y gargantas sea pequeña en comparación con los acuíferos kársticos y fracturados. El material particulado suspendido en el agua queda totalmente retenido en este contexto, incluso en eventos de recarga intensos como las lluvias torrenciales.

En general, la calidad del agua es buena. La gran diversidad de la mineralogía de los granos que componen los acuíferos sedimentarios influye en la hidroquímica. La presencia de argilominerales facilita el intercambio de cationes y aniones, lo que puede tanto favorecer la retención de contaminantes como liberar lentamente los cationes del agua connata, estancada en poros aislados, por difusión (POETER *et al*, 2020). Las excepciones más representativas son las contaminaciones por arsénico y fluoruro, cuyas ocurrencias están asociadas a lugares específicos donde hay presencia de minerales que tienen estos elementos en su composición, y a los contextos climáticos, geomorfológicos e hidroquímicos necesarios para su movilización (AMINI *et al*, 2008; RAVENSCROFT; BRAMMER; RICHARDS, 2009).

En la Amazonia, a pesar de la abundancia de aguas superficiales, dos tercios de las sedes municipales se abastecen total o parcialmente de aguas subterráneas (WAHNFRIED; SOARES, 2012; ANA, 2021), con predominio de los acuíferos sedimentarios (véase Figuras 12 y 13). ANA (2015) realizó un estudio en la región que señaló la existencia de 14 unidades litoestratigráficas sedimentarias, con continuidad hidráulica y variado potencial hidrogeológico. Estas unidades forman el *Sistema Acuífero Amazonas*, que en el territorio brasileño ocupa un área de cerca de dos millones de km² (Vídeo 4).

Video 4 – Acuífero Amazonas

<https://www.youtube.com/watch?v=ro-5gvwilhQ>

Producido por: ANA

Una de estas unidades litoestratigráficas del Sistema Acuífero Amazonas es el Acuífero Alter do Chão (AAC) – importante fuente de suministro para ciudades como Manaus y Santarém. El AAC está formado por intercalaciones de areniscas, argilitas, limolitas y, subordinadamente, conglomerados. Su espesor medio varía entre 200 y 400 m, llegando a 1.266 m (ANA, 2015), y su superficie de afloramiento es de 312.574 km² (ANA, 2005). El AAC es predominantemente libre, con porciones semi confinadas a confinadas, a veces en la misma región.



Figura 12 – Aguas subterráneas volviendo a la superficie en la Formación Novo Remanso, Manaus (AM). Este manantial contribuye para el flujo de un afluente del río Tarumã-Açu

Foto de Ingo Wahnfried.



Figura 13 – Pozo en una escuela de la comunidad de Retiro, municipio de Humaitá (AM), en la orilla izquierda del río Madeira. Las marcas en la pared indican el nivel alcanzado por el río en 2014. El pozo explota depósitos sedimentarios cuaternarios

Foto de Ingo Wahnfried.

Box 7 – Acuíferos kársticos

Paulo Galvão

Los acuíferos kársticos son aquellos compuestos por rocas carbonatadas que se han karstificado, generando redes de conductos/cavidades por las que se transmite y reserva el agua (Figura 14). Su origen es el resultado del proceso de disolución de rocas solubles, como la caliza, la dolomita, la cuarcita, la arenisca con cementación carbonatada, etc., conocido como *karstificación*. Este fenómeno requiere al menos las siguientes condiciones: (1) roca con capacidad química para disolverse; (2) agua ácida (disolvente), resultante del contacto del agua de lluvia con el dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera o en el suelo, capturando el CO₂ de la materia orgánica; (3) gradiente hidráulico (diferencias en las cargas hidráulicas que permiten que el disolvente fluya; y (4) discontinuidades de la roca (falla/fractura, pliegue, plano de estratificación o estratificación) que permiten que el agua fluya.

Por ejemplo, el agua (H₂O) se infiltra en el suelo, capta moléculas de dióxido de carbono (CO₂), se acidifica, generando ácido carbónico (H₂CO₃) que, en contacto con la caliza (CaCO₃), reacciona para formar bicarbonato de calcio (HCO₃⁻), producto de la disolución. Todo el proceso se puede resumir mediante la siguiente ecuación (WHITE, 2003): $22 \text{ H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+} + 2 \text{ HCO}_3^-$. 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 se encuentra en una zona saturada de agua, esta estructura kárstica se considerará un acuífero kárstico. El flujo subterráneo, por tanto, determina la

estructura hidrogeológica del medio kárstico que, a su vez, crea un efecto de retroalimentación, modificando las condiciones de este flujo. Estas condiciones dan lugar a acuíferos en los que puede haber trayectorias de flujo subterráneo y puntos de drenaje inesperados que a menudo no se prevén en función del entorno topográfico e hidrológico de la superficie (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007).

Como consecuencia, se generan los famosos paisajes geomorfológicos kársticos en la superficie, caracterizados por la aparición de dolinas o sumideros (resultantes del hundimiento de los suelos/rocas en la superficie o cerca de ella debido a las zonas kársticas que hay debajo), uvalas (cuando dos sumideros/dolinas avanzan lo suficiente y se juntan), cuevas o grutas (resultantes de la espeleogénesis, formando una sucesión de redes de conductos que evoluciona con el tiempo, con dimensiones que permiten el acceso a los seres humanos) (Figura 15), drenajes *muertos* (cuando el drenaje se desvía bruscamente hacia un sistema de conductos subsuperficiales) y manantiales (descarga) kársticos, a través de los cuales el agua subterránea emerge del sistema kárstico local para alimentar ríos y arroyos (PALMER, 2007).

En cuanto a la recarga kárstica, existen dos categorías: (1) *recarga autógena*, que se produce cuando la zona kárstica se recarga por sí misma, a través de la toma directa de agua de sumideros, dolinas o cuevas; y (2) *recarga alógena*, que se produce en zonas adyacentes no kársticas y recarga indirectamente el acuífero, como, por ejemplo, cuando hay infiltración de agua en la capa de arenisca que recubre el karst. Estas características pueden reflejar el grado de vulnerabilidad intrínseca del acuífero a la contaminación superficial.

La karstificación también da lugar a diferentes condiciones de permeabilidad y conductividad hidráulica dentro del acuífero, dependiendo de la forma, la cantidad, la distribución y la interconectividad de los huecos o estructuras kársticas. Es en este escenario donde se discute el modelo de *permeabilidad triple* (WHITE, 2003), que consiste en: (1) permeabilidad de la matriz de la roca (porosidad primaria, común en los arrecifes mesozoicos y las calizas eólicas); (2) permeabilidad de la fractura (porosidad secundaria, en los karst de mármol incipientes); y (3) permeabilidad del conducto (porosidad terciaria, el propio karst). Sin embargo, la mayoría de los acuíferos kársticos tienen al menos permeabilidad doble (matriz-fractura, matriz-conducto o fractura-conducto), o triple (matriz-fractura-conducto), una condición que se observa en la mayoría de las grandes cuevas y acuíferos del mundo (FORD; WILLIAMS, 2007). Debido a estas características, la velocidad de las aguas subterráneas puede variar en muchos órdenes de magnitud, dando lugar incluso a flujos turbulentos. Es decir, dependiendo del desarrollo de la red de conductos, de la altura del gradiente hidráulico y del grado de confinamiento del acuífero, el flujo de agua puede llegar a parecerse al de un pequeño río o arroyo, alcanzando velocidades de hasta unos pocos kilómetros por día, como se observa en las regiones kársticas Dinárica, en Herzegovina (5.184 m/día) (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007), o en Pains, en Minas Gerais (840 m/día) (FERRARI *et al.*, 2018).

Los acuíferos kársticos son más sensibles y vulnerables a la contaminación. Esto se debe a la delgadez de los suelos, a la concentración de flujo en el epikarst (capa superior a menudo intensamente fracturada y karstificada) y al tipo de recarga, principalmente autógena, en la que los contaminantes pueden llegar fácilmente a la capa freática, transportados rápidamente por conductos a grandes distancias. Además, las vías de flujo en un acuífero kárstico pueden estar conectadas a las aguas superficiales. Así, un contaminante en una red de conductos, además de alcanzar mayores distancias en menor tiempo, es poco degradado o retenido por la capilaridad, como lo sería en acuíferos fisurados y granulares (RYAN; MEIMAN, 1996).

Los hundimientos son bastante comunes en las regiones kársticas. Estos eventos pueden ser naturales (por disolución de la roca o colapso de la parte superior de la cueva), ocurriendo generalmente a lo largo de un período geológico, o ser inducidos o acelerados por actividades humanas, que pueden generar colapsos catastróficos (GALVÃO; HALIHAN; HIRATA, 2015). Los problemas geotécnicos inducidos generalmente surgen de: a) la extracción excesiva de agua subterránea; b) por las actividades de construcción; y c) una combinación de ambas, donde la agricultura, la minería, las carreteras y los ferrocarriles, y la construcción urbana e industrial son factores que pueden influir. En el caso de la explotación de acuíferos kársticos urbanos, los periodos de sequía son los más peligrosos, ya que la demanda de agua subterránea aumenta, lo que lleva a la formación de conos de descenso de dimensiones kilométricas. Dentro de estos conos de depresión, los pozos, manantiales y arroyos pueden secarse o ver reducidos sus caudales de forma significativa, viéndose bien alterada la dirección general del flujo de agua (GALVÃO *et al.*, 2017).

Estas características hacen que los acuíferos kársticos sean extremadamente heterogéneos y anisótropos, lo que dificulta la descripción y cuantificación de las características del flujo subterráneo. Varios métodos pueden aplicarse a la caracterización hidrogeológica en el karst, desde las técnicas más sencillas utilizadas en los acuíferos granulares y fracturados (mapeo de campo, fotointerpretación, bombeo, geofísica, etc.), hasta enfoques más modernos como los isótopos y el modelado numérico. Se pueden utilizar otros métodos complementarios, como: el uso de rastreadores fluorescentes, hidrogramas y quimiogramas de manantiales kársticos, grabación de pozos para tipificar zonas kársticas, bombeos (en este caso de larga duración), mapeo espeleológico, etc.

A pesar de la complejidad en la exploración y explotación de los acuíferos kársticos, es precisamente por el reto en la comprensión de sus peculiaridades que, cada año, crece progresivamente el interés de los profesionales de diversas áreas, lo que hace que en la actualidad esta área de la Hidrogeología sea la que presenta más novedades técnicas y conceptuales.



Figura 14 – Proceso inicial de karstificación en roca caliza en ensanchamiento en los planos de estratificación de la roca (discontinuidades), por los que circuló el flujo de agua acidificada.

Foto de Paulo Galvão.



Figura 15 – Entrada de la cueva en Pains/MG, indicando el nivel de agua en la parte más profunda. Un ejemplo de la conexión entre aguas subterráneas y superficiales

Foto de Paulo Galvão.

Clasificación de los acuíferos según la presión de almacenamiento del agua

Los acuíferos también pueden clasificarse en relación con la presión de almacenamiento del agua en su interior como: *a) libres*; y *b) confinados* (Figura 16), aunque existen condiciones intermedias entre estos dos tipos, como los acuíferos *semiconfinados*, *cubiertos* o *suspendidos*. En los acuíferos *libres*, el límite superior está constituido por el nivel de 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*, en cambio, están limitados en su base y en su parte superior por unidades no acuíferas (acuicludos) o por rocas parcialmente impermeables (acuitardos), donde el agua se almacena a presión. La situación intermedia es la de los acuíferos *semiconfinados*, en los que las capas que los limitan tienen una baja permeabilidad, permitiendo el paso del agua, pero de forma lenta.

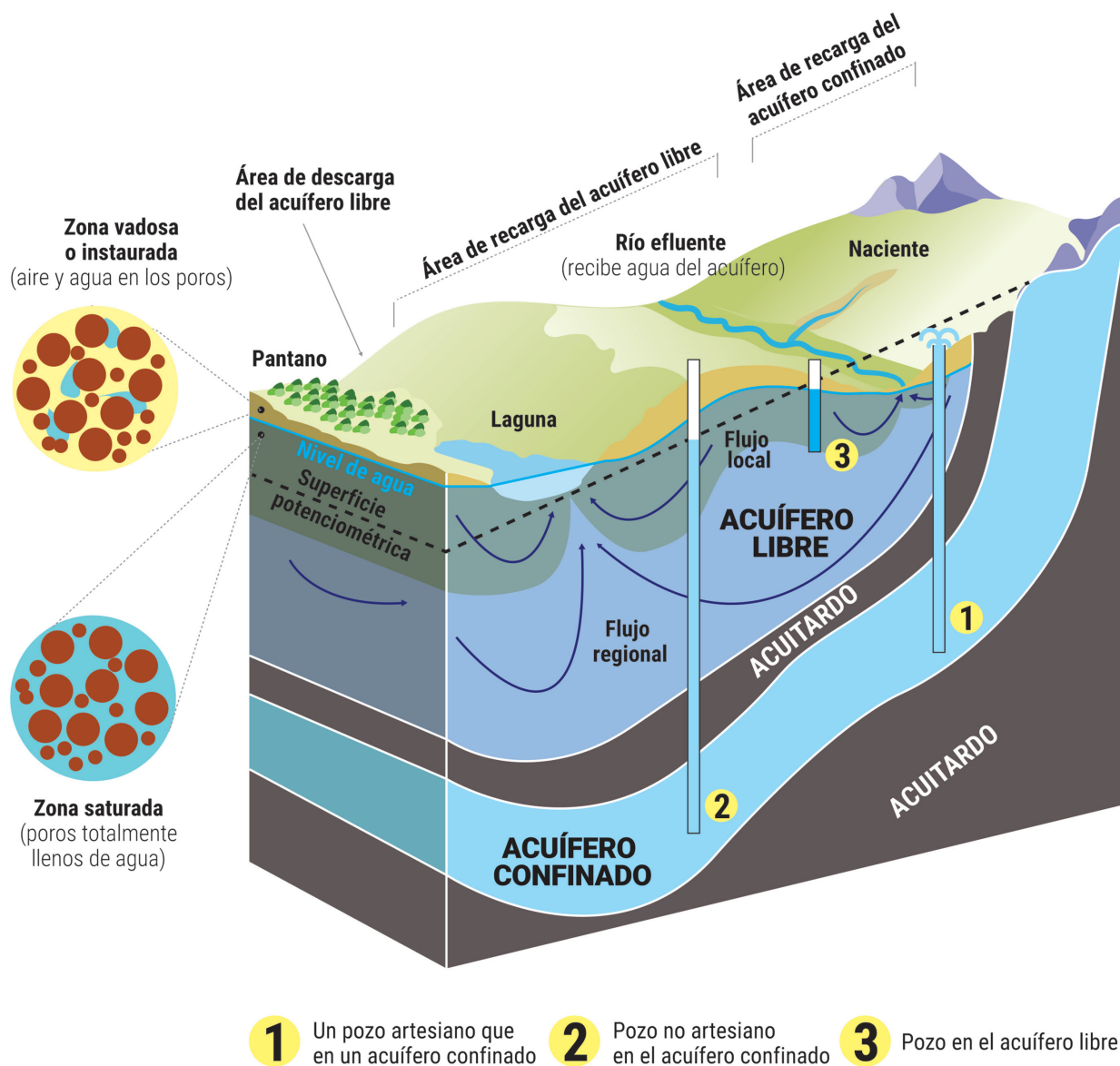


Figura 16 – Funcionamiento de un acuífero

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

El agua de los acuíferos *confinados* o *semiconfinados* está sometida a una presión superior a la atmosférica. Por lo tanto, cuando el acuífero es perforado por el pozo, el agua sube y alcanza posiciones de equilibrio piezométrico por encima de la parte superior de la capa del acuífero (reservorio) (Figura 16). En algunos casos, dependiendo de la superficie topográfica y de la presión del acuífero, esta agua puede subir por encima de la superficie, formando pozos artesianos.

Las aguas subterráneas fluyen lentamente hacia las zonas más bajas a medida que percolan a través de la zona vadosa (Figura 16). Mientras que el flujo de

agua superficial se desplaza kilómetros en pocos días, el flujo subterráneo avanza milímetros o centímetros al día. El movimiento de las aguas subterráneas se produce llenando los espacios vacíos y conectados de las rocas y desplazándose lentamente por la zona saturada. Esta diferencia en la velocidad del flujo permite que el agua que se filtró hace decenas, cientos o incluso miles de años siga moviéndose en el medio subterráneo. En comparación con los ríos, el acuífero destaca por su almacenamiento más que por su elevada producción.

Los volúmenes almacenados en los acuíferos libres fluctúan estacionalmente o a lo largo de ciclos pluria-

nuales, 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 a la dinámica de recarga, incluso los acuíferos pequeños pueden tener agua almacenada durante décadas o hasta miles de años.

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 en el acuífero aumenta con el tiempo por el incremento de la recarga, hay una tendencia natural a aumentar las tasas de salida de agua por un incremento en la descarga - por ejemplo, aumentando el caudal del flujo subterráneo que llega a los ríos. Sin embargo, cuando el nivel de agua en el acuífero disminuye debido a la reducción de la recarga, hay una tendencia a la reducción de las tasas de descarga. Así, a lo largo del tiempo geológico, el acuífero tiende a un estado de equilibrio dinámico, en el que las tasas de descarga de *mañana* serán proporcionadas por las tasas de recarga de *hoy*.

La explotación mediante pozos es una descarga impuesta a un sistema que antes estaba en equilibrio dinámico. La intensidad del bombeo y el tiempo de explotación, junto con el tamaño y las características hidráulicas del acuífero, definirán las consecuencias de esta interferencia en las tasas de recarga, descarga y almacenamiento.

2.3 LAS INTERACCIONES DE LAS AGUAS METEÓRICAS, SUPERFICIALES, SUBTERRÁNEAS Y COSTERAS

La adopción de la cuenca hidrográfica como unidad de gestión del agua convierte este espacio en la referencia para el 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 sucesión de rocas y materiales no consolidados que forman el suelo y el subsuelo de una cuenca hidrográfica, al que se asocian formas de relieve y variaciones topográficas resultantes de la acción, en el tiempo geológico, de dinámicas internas (endógenas) y externas (exógenas).

El marco geológico puede estar formado por diferentes tipos de rocas (ígneas, metamórficas o sedimentarias), con diferentes edades, composiciones y posibilidades de relación espacial (estratigrafía), así como la presencia de 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 cobertura, formadas por material no consolidado y suelos, tienen características de porosidad y permeabilidad (o conductividad hidráulica) que pueden facilitar o impedir la percolación del agua de lluvia. El clima y sus variaciones a lo largo del tiempo geológico son igualmente determinantes en la forma de aparición y 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 tanto, el marco geológico define la geometría de los acuíferos y sus relaciones con otras masas de agua superficiales (Figuras 16 y 17). Las precipitaciones, a su vez, influyen en la cantidad de agua disponible para ser almacenada en los acuíferos.

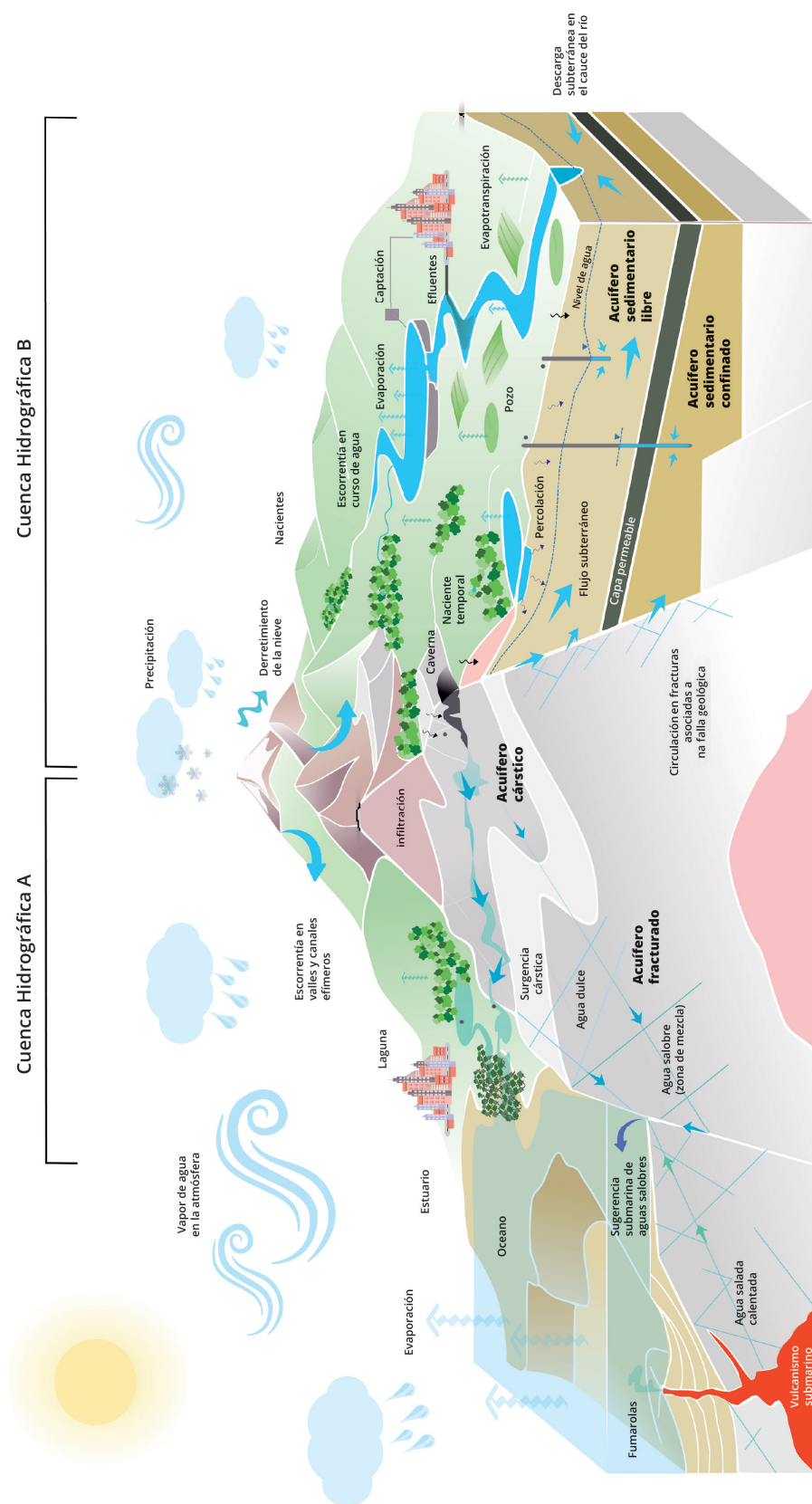


Figura 17 – El marco geológico como elemento de base para definir el territorio de la cuenca y el almacenamiento de agua
Preparado y cedido por Dora Atman.

La interacción entre el clima y el marco geológico determina la organización natural de los recursos hídricos en el territorio (Figura 17). La lluvia es el principal mecanismo de entrada de agua en la cuenca. Las rocas formarán los diferentes tipos de acuíferos y, junto con la topografía, determinarán el comportamiento del agua, que podrá fluir superficialmente, infiltrarse con la escorrentía subsuperficial vertical y lateral o, aún, ser absorbida por las plantas y volver al sistema a través de la evapotranspiración.

La escorrentía subsuperficial vertical suministra el flujo de las aguas subterráneas, y parte de esta corriente genera manantiales y aportes al interior de los drenajes de agua superficial y/o costera. En otros casos puede ocurrir lo contrario, y las masas de agua superficiales generan la recarga de los acuíferos subyacentes. Las interacciones entre las aguas superficiales y subterráneas se producen tanto en la parte alta como en la baja de una cuenca hidrográfica en función del marco geológico, las limitaciones pluviométricas y la topografía.

En los terrenos cristalinos es habitual que los manantiales aparezcan en las partes altas del relieve y formen pequeños cursos de agua, que se unen a otros al llegar a las partes bajas de los drenajes, formando arroyos, riachuelos u otras masas de agua mayores. De este modo, constituyen una cuenca hidrográfica, cuyo patrón de drenaje está generalmente controlado por la estructuración de las rocas del sustrato geológico. A lo largo de esta trayectoria se producen descargas subterráneas a 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 flujo dependiente de la escorrentía superficial. Aunque las interacciones de los acuíferos con los arroyos son menores, deben tenerse en cuenta a la hora de elaborar los planes de balance y gestión del agua, ya que pueden tener 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 su recarga y descarga, las aguas subterráneas se mueven por varios caminos, formando lo que se denomina una *red de flujo*, cuyas líneas pueden conformar tres situaciones: *local*, *intermedia* y *regional* (Figura 16) (TÓTH, 1963):

- *Líneas de flujo local*: drenan hacia zonas de descarga relativamente cercanas a los puntos donde se produjo la recarga, generalmente apuntando a cuerpos hídricos superficiales (ríos y estanques).
- *Líneas de flujo intermedio*: presentan uno o más sistemas de flujo local entre sus zonas de recarga y descarga.
- *Líneas de flujo de carácter regional*: son más profundas dentro de los acuíferos y tienen un tránsito de grandes distancias con descargas a masas de agua superficiales, a saber: ríos, grandes masas lacustres o incluso océanos.

Los flujos de aguas subterráneas deben considerarse tridimensionalmente, es decir, puede haber flujos subsuperficiales y locales que se superponen a otros más profundos, que definen los flujos regionales. Así, es posible que en un mismo acuífero existan flujos locales, intermedios y regionales, y el uso de estos términos depende de la escala utilizada (Figura 16). 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 situadas en una cuenca pueden favorecer las descargas en ríos de otras cuencas hidrográficas (Figuras 17 y 18). Por lo tanto, un mismo acuífero puede participar en los flujos de más de una cuenca hidrográfica superficial (Figuras 17 y 18), así como aportar agua al mar. Si la descarga se produce en el mar, el flujo de agua dulce procedente del acuífero se opone a los flujos de agua salada, estableciendo una frontera dinámica entre estas aguas, que están separadas por una zona de mezcla.

Existe una conexión intrínseca entre las aguas superficiales y las subterráneas, por lo que su evaluación debe realizarse 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 los acuíferos.

Por tanto, es necesario comprender, en el espacio y en el tiempo, cómo se producen estas relaciones de transferencia que regulan los volúmenes y las fluctuaciones del agua disponible para los ecosistemas. Este tema refuerza la idea de las interacciones río-acuífero, como ocurre en el caso del Sistema Acuífero Urucúa

y la Cuenca del Río São Francisco (ANA, 2017a) (Box 8). La extracción de agua subterránea a través de pozos modifica la condición hidráulica original del acuífero y de la cuenca, generando impactos positivos y negativos. En general, esta extracción genera beneficios sociales porque aumenta la disponibilidad regional de agua, permitiendo el desarrollo y el abastecimiento de

comunidades que a menudo no tienen otra fuente de agua o necesitan complementar la fuente superficial. Sin embargo, en función de los volúmenes extraídos, puede producirse una sobreexplotación que reduzca las descargas de los acuíferos en las masas de agua superficiales o en el mar, lo cual culmina en efectos ambientales y económicos negativos.

Box 8 – Interacciones río-acuífero: la importancia del Sistema Acuífero Urucuia para la Cuenca del río São Francisco

Didier Gastmans

Camila de Lima

Las aguas superficiales presentes en los distintos reservorios continentales, como ríos, lagos, embalses, humedales y estuarios, etc., interactúan con las aguas subterráneas almacenadas en los acuíferos. Esta interacción se produce tanto por la pérdida de agua de las masas hídricas superficiales hacia los acuíferos, como por la descarga de aguas subterráneas, que alimentan las masas hídricas superficiales, siendo fundamental para el balance hídrico de los reservorios continentales (BRUNNER *et al.*, 2017; WOESSNER, 2020). La comprensión de los procesos que rigen estas interacciones, así como su cuantificación, son cuestiones que deben formar parte de la agenda de debates en torno al establecimiento de políticas racionales de gestión de los recursos hídricos, como forma de minimizar los efectos causados por la escasez de agua o la pérdida de calidad de las masas de agua, superficiales y subterráneas (MANZIONE, 2015; WOESSNER, 2020).

Normalmente, el control de la interacción entre las aguas subterráneas y un curso de agua superficial depende de la diferencia de elevación de los niveles de agua en el río y el acuífero. Si la elevación del nivel freático es superior a la del agua del río, se denomina **Río Efluente** (Figuras 18a y 18d), y a la inversa, si la elevación del nivel freático es inferior a la del río, se trata de un **Río Influyente** (Figuras 18b y 18c). Para los **Ríos Influentes** se observan en la naturaleza dos situaciones de conexión hidráulica: una en la que existe una conexión entre la superficie freática y el río (Figura 18b), y otra en la que el río está desconectado de esta superficie, característica típica de los **Ríos Intermitentes** (Figura 18c) (HEALY, 2010; POETER *et al.*, 2020; WINTER *et al.*, 1999; WOESSNER, 2020).

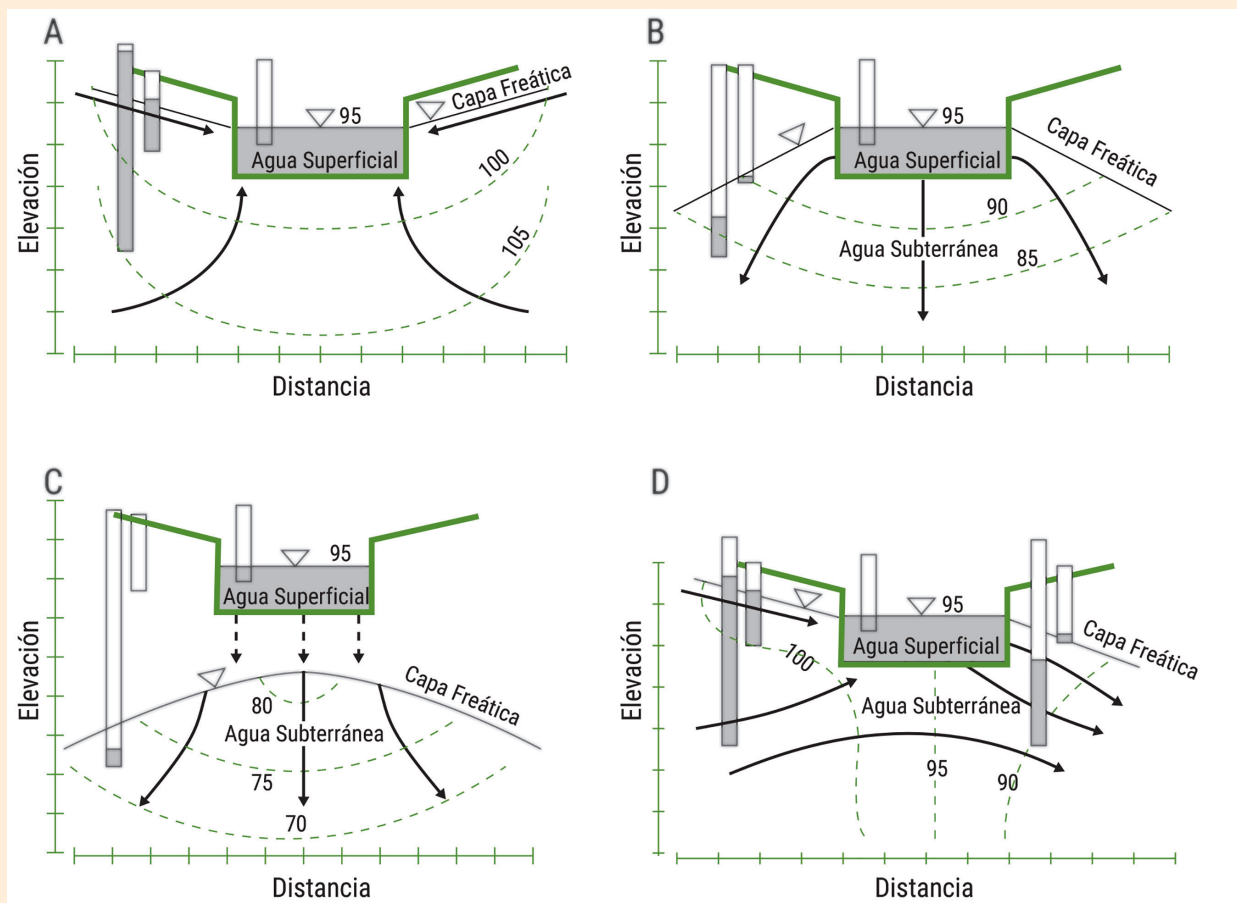


Figura 18 – (A) Modelo conceptual para ríos efluentes; (B) Modelo conceptual para ríos influentes, escenario en el que la elevación del nivel del agua que separa la zona saturada de la no saturada está conectada al río; (C) Modelo conceptual para ríos influentes, escenario en el que la elevación del nivel del agua que separa la zona saturada de la no saturada está desconectada del río; (D) Modelo conceptual de flujo directo

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

Diferentes áreas de conocimiento están interesadas en conocer y cuantificar estas interacciones, que son importantes no sólo para la Hidrología, sino también para entender el funcionamiento de los sistemas ecológicos dependientes del medio acuático y la transferencia de contaminantes. Debido a la complejidad de estas interacciones, los estudios suelen requerir una amplia y compleja instrumentación, así como una visión interdisciplinar, para favorecer la evaluación de múltiples parámetros y la combinación de técnicas (WOESSNER, 2020; KALBUS; REINSTORF; SCHIRMER, 2006).

Las conexiones entre las aguas superficiales y las subterráneas en Brasil son importantes para varias regiones hidrológicas, algunas de ellas extremadamente sensibles, como el Pantanal de Mato Grosso, o las cuencas hidrográficas de ámbito nacional. Es el caso de la Cuenca del Río São Francisco, el mayor curso de agua exclusivamente brasileño, y que a través de numerosas obras de transposición pretende garantizar la seguridad hídrica de cerca de 12 millones de personas, incluso en el Semiárido Nordeste, además del mantenimiento operativo de las centrales hidroeléctricas y del crecimiento demográfico, estimado en hasta 20,5 millones de habitantes para 2035 (CBHSF, 2016).

En la parte media de la Cuenca del Río São Francisco se encuentra uno de los principales acuíferos brasileños – el **Sistema Acuífero Urucuia (SAU)** – que es una fuente estratégica de importancia regional para el Nordeste brasileño, afectado por la sequía. Además de atender la creciente demanda de agua para el desarrollo económico de la región, este acuífero contribuye significativamente al caudal base de los afluentes de la margen izquierda del río São Francisco, especialmente en los períodos de sequía (Figura 19).

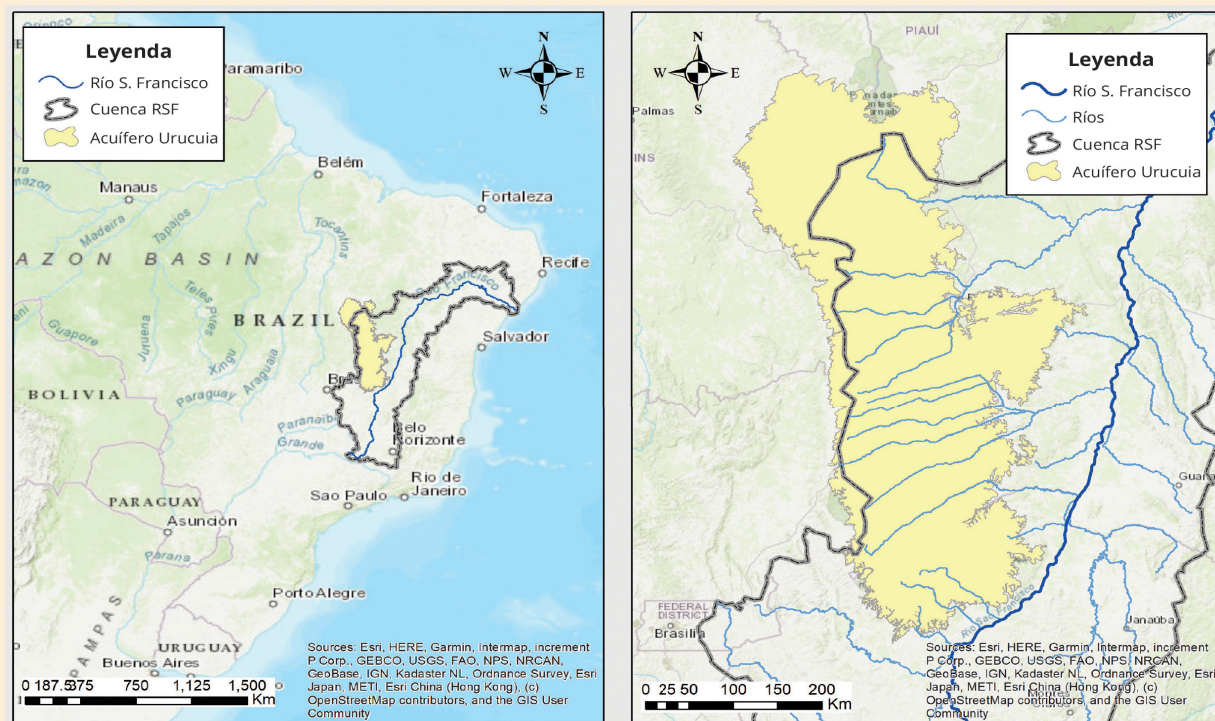


Figura 19 – La Cuenca del Río São Francisco y el Sistema Acuífero Urucuia (izquierda), y las relaciones entre las redes de drenaje del SAU y el río São Francisco (derecha)

Fuente: Gonçalves, Engelbrecht y Chang (2016), adaptado por Didier Gastmans y Camila de Lima.

El SAU es un acuífero poroso, compuesto por areniscas fluvio-eólicas neocretáceas asociadas al Grupo Urucuia, que ocupan una superficie de 125.000 km². El acuífero constituye una extensa meseta en la margen izquierda del río São Francisco, con altitudes superiores a los 900 m, que se inclina moderadamente hacia el este, alcanzando altitudes de aproximadamente 600 m.

Existen incertidumbres sobre el espesor total del conjunto rocoso que forma el acuífero. Algunos autores, como Chang y Silva (2015) y ANA (2017a) estiman, a partir de datos geofísicos, que los espesores conservados no superan los 400 m. Sin embargo, se reportan espesores mayores en pozos estratigráficos perforados en la región por el Servicio Geológico de Brasil (SGB-CPRM) y por la Agencia Nacional de Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles (ANP) (ANA, 2017a). Las tasas de recarga del acuífero representan alrededor del 18-20% de las medias anuales de precipitación (GONÇALVES; ENGELBRECHT; CHANG, 2016), que son del orden de 22,37 km³.ano⁻¹, y que se suman a un almacenamiento del orden de 1.327 km³ (ANA, 2017a). Tales volúmenes representan casi la mitad de toda la disponibilidad hídrica subterránea de la Cuenca del Río San Francisco (ANA, 2017a; CBHSF, 2016).

La abundancia de agua y las condiciones climáticas favorables en el área de ocurrencia del SAU hicieron florecer una importante actividad agrícola en el Oeste del estado de Bahía, a partir de la década de 1980, que sustituyó la vegetación nativa (Cerrado, en su mayor parte) por extensas áreas de cultivo (BRANNSTROM *et al.*, 2008). Además de las alteraciones en el uso y la ocupación del suelo, esta expansión agrícola requiere un uso intenso de los recursos hídricos para el riego de los cultivos y el abrevado de los animales.

Tras las advertencias sobre la reducción de los caudales de los ríos que atraviesan la región, la comprensión de la relación entre el SAU y las aguas superficiales pasó a formar parte de la agenda de estudio. Aunque no existe una conexión física entre el SAU y el río São Francisco, sus aguas se conectan a través de la descarga de aguas subterráneas en la red de cursos de agua que drenan la meseta (Figura 20), y representan aproximadamente el 35% del caudal medio total del río São Francisco (CBHSF, 2016). Estas descargas son cruciales durante el período más seco, cuando los aportes del SAU, en forma de descarga

a los afluentes de la margen izquierda del río São Francisco, alcanzan entre el 80 y el 90% del caudal de estos ríos, representando una importante fuente de agua para el mantenimiento de los caudales en este tramo del río São Francisco, además de ser esencial para la preservación de la mayoría de las funciones ecosistémicas relacionadas con las aguas abajo (GONÇALVES; ENGELBRECHT; CHANG, 2018).

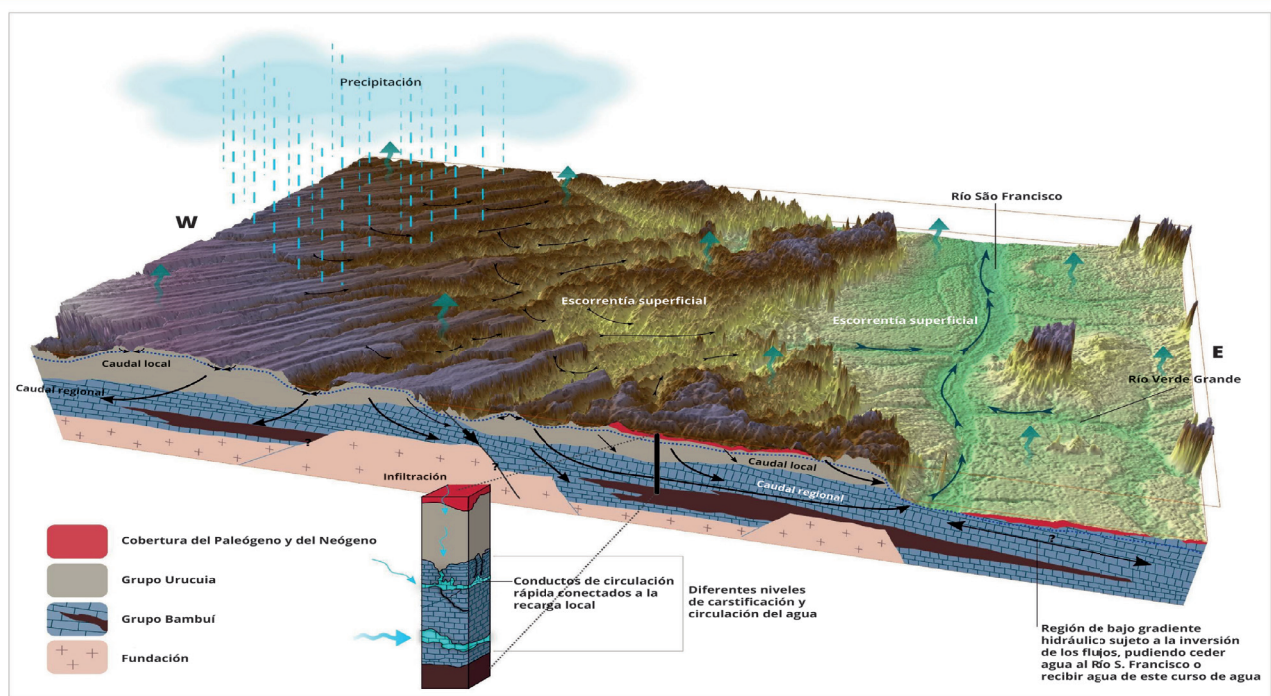
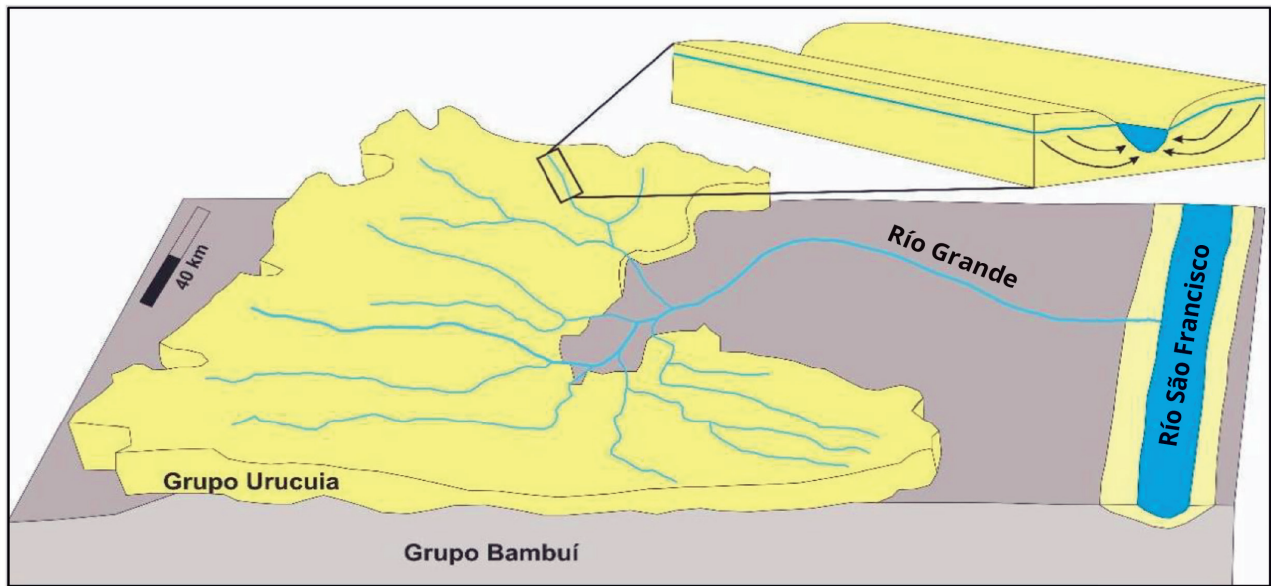


Figura 20 - Esquema de funcionamiento hidráulico del SAU, la red de drenaje de la meseta y la forma en que estas aguas llegan al río São Francisco

Fuente: Gonçalves, Engelbrecht y Chang (2016).

La intensificación regional del uso de la tierra, que conduce a un aumento de la superficie de regadío en la región, junto con el monitoreo cuali-cuantitativo, en construcción y expansión en el SAU, limitan un análisis más preciso de la situación de los recursos hídricos y sus impactos en la resiliencia hídrica de la región, así como el desarrollo de estrategias de gestión que combinan la planificación del uso de la tierra con el uso correcto de los recursos hídricos. El monitoreo integrado de los recursos hídricos en la región está siendo implementado a través de la instalación de pozos de monitoreo por la Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (RIMAS/SGB-CPRM), operada en este sistema acuífero por el Servicio Geológico de Brasil (SGB-CPRM), en asociación con la ANA. La ANA y la SGB-CPRM también han establecido una colaboración en la operación de la red integrada del Sistema Acuífero Urucua. Así, 63 pozos de RIMAS instalados en este acuífero ya forman parte de la Red Hidrometeorológica Nacional (RHN), lo que la convierte en la primera región del país que incluye un monitoreo integrado (lluvia-río-acuífero). Las acciones de monitoreo toman tiempo para permitir la comprensión de las interacciones entre los ríos y los acuíferos, pero son una herramienta básica para la buena gestión de los recursos hídricos, que también debe considerar la participación de todos los agentes involucrados, incluidos los usuarios de la tierra.

2.4 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BRASIL

A diferencia de las aguas superficiales, la determinación espacial de las aguas subterráneas y los acuíferos no es algo que pueda determinarse mediante la mera observación del territorio. Para identificar su presencia es necesario disponer de datos, mapas y modelos que tengan en cuenta la interacción entre la roca y el agua. La mayoría de los ciudadanos desconocen que viven en zonas con presencia de acuíferos, incluso cuando éstos se abastecen de fuentes subterráneas.

La invisibilidad de las aguas subterráneas dificulta la determinación de su presencia, límites, movimiento, cantidad y calidad. Su delimitación representa la proyección de la forma en que el agua se organiza en un mosaico de rocas, cuya formación, transformación y configuración son el resultado de diversos procesos geológicos que comenzaron hace millones de años. Este proceso requiere la interpretación de datos, que son escasos, y metodologías específicas, que tienen limitaciones. También hay que destacar la escasa inversión en estudios hidrogeológicos en el país. Sólo como ejemplo, el Fondo Estatal de Recursos Hídricos Paulista (FEHIDRO) invirtió menos del 1% de su asignación en proyectos destinados a resolver los problemas que afectan a las aguas subterráneas (ALBUQUERQUE FILHO, 2015). Este reto técnico y financiero se suma al social, que consiste en difundir conocimientos para construir mejores políticas del agua y establecer un vínculo entre la sociedad y los acuíferos.

La delimitación de los acuíferos y el análisis de las características y flujos de las aguas subterráneas están intrínsecamente relacionados con la roca. Por lo tanto, la primera acción para delimitar los acuíferos se refiere

a los mapas geológicos. Los acuíferos suelen recibir el nombre de la formación geológica que los constituye y que tiene las mejores características acuíferas. En Brasil, algunos sistemas acuíferos han recibido nombres no relacionados con el nombre de las formaciones, como en el caso del Sistema Acuífero Guaraní (SAG). Aunque es conocido por el potencial acuífero de sus formaciones Botucatu y Piramboia, fue rebautizado como SAG para dar cabida a otras formaciones geológicas y rendir homenaje al pueblo Guaraní que habitaba este espacio. Otro ejemplo es el Sistema Acuífero Amazonas.

A partir de la década de 1980, se construyeron las primeras cartografías de identificación de la interacción roca-agua en el territorio nacional: el *Mapa de las Provincias Hidrogeológicas Brasileñas*, escala 1/2.500.000 (MENTE; PESSOA; LEAL, 1981) y escala 1/5.000.000 (DNPM/CPRM, 1983 apud DINIZ *et al.*, 2014). Estos mapas pretendían aglutinar las regiones geológicas con “características generales similares en cuanto a las principales ocurrencias de aguas subterráneas”. (PESSOA; MENTE; LEAL, 1980, p. 461). El territorio se dividió en 10 provincias hidrogeológicas (Escudo Septentrional, Amazonas, Escudo Central, Parnaíba, São Francisco, Escudo Oriental, Paraná, Escudo Meridional, Centro Oeste y Costera) y 15 subprovincias.

La representación de esta información ha evolucionado con el avance de los conocimientos geológicos. A partir de la revisión del *Mapa Geológico de Brasil*, escala 1:1.000.000 (CPRM, 2004), se elaboró el *Mapa de Dominios/Subdominios Hidrogeológicos de Brasil*, escala 1:2.500.000 (CPRM, 2007). Los dominios hidrogeológicos están formados por un conjunto de “unidades geológicas con afinidades hidrogeológicas”, que tienen

como base principal “las características litológicas de las rocas”. (BOMFIM, 2010, p. 1). Las 2.338 unidades litológicas se agruparon en siete dominios (formaciones cenozoicas, cuencas sedimentarias, porosas/fisurales, metasedimentos/metavolcánicas, volcánicas, cristalinas y carbonatos/metacarbonatos) y 30 subdominios hidrogeológicos. La diferencia entre estos productos es que las provincias hidrogeológicas incorporan aspectos relacionados con la tectónica, la morfología, la fisiografía y la litología de las rocas, mientras que los dominios se centran en la litología (BOMFIM, 2010).

En 2014, a partir de una metodología alineada con los estándares internacionales de Cartografía Hidrogeológica, y con base en técnicas de Sistema de Información Geográfica (SIG), la SGB-CPRM lanzó el *Mapa Hidrogeológico de Brasil al Millonésimo* (DINIZ, 2014, p. 20). Esta cartografía incorporó una amplia gama de datos, tales como: capacidad de infiltración del suelo, conductividad eléctrica, dominios hidrolitológicos, relieve, hipsometría, pluviometría, densidad de pozos y volúmenes anuales explotados. Otra característica importante de esta técnica es la promoción de información de acuíferos confinados y

no sólo de acuíferos aflorantes. En este Mapa, las unidades litológicas se reorganizaron en 202 unidades hidroestratigráficas o acuíferas, de las cuales 164 son unidades aflorantes y 38 no aflorantes (DINIZ, 2014, p. 20).

Para ver este mapa haga clic en:

<https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15556>.

A partir de la sistematización realizada por la ANA (2013), se generó el *Mapa de los Sistemas Acuíferos Aflorantes de Brasil, a escala 1:1.000.000*. ANA (2013) distribuyó el potencial de aguas subterráneas de Brasil en 181 acuíferos y sistemas acuíferos aflorantes (Figura 21), de los cuales 151 son acuíferos sedimentarios, considerados los más productivos, como es el caso de Guaraní, Bauru-Caiuá, Barreiras, Urucuiá/Areado, Solimões, Alter do Chão, Açú, Barreiras y Beberibe. El dominio kárstico está formado por 26 acuíferos, entre los que destacan el Bambuí y el Jandaíra. El dominio fracturado tiene un potencial hídrico reducido y se aglutinó en cuatro grandes bloques: Sistema Acuífero Fracturado Semiárido, Sistema Acuífero Fracturado Norte, Sistema Acuífero Fracturado Centro-Sur y Acuífero Serra Geral (ANA, 2013, pp. 54-56).

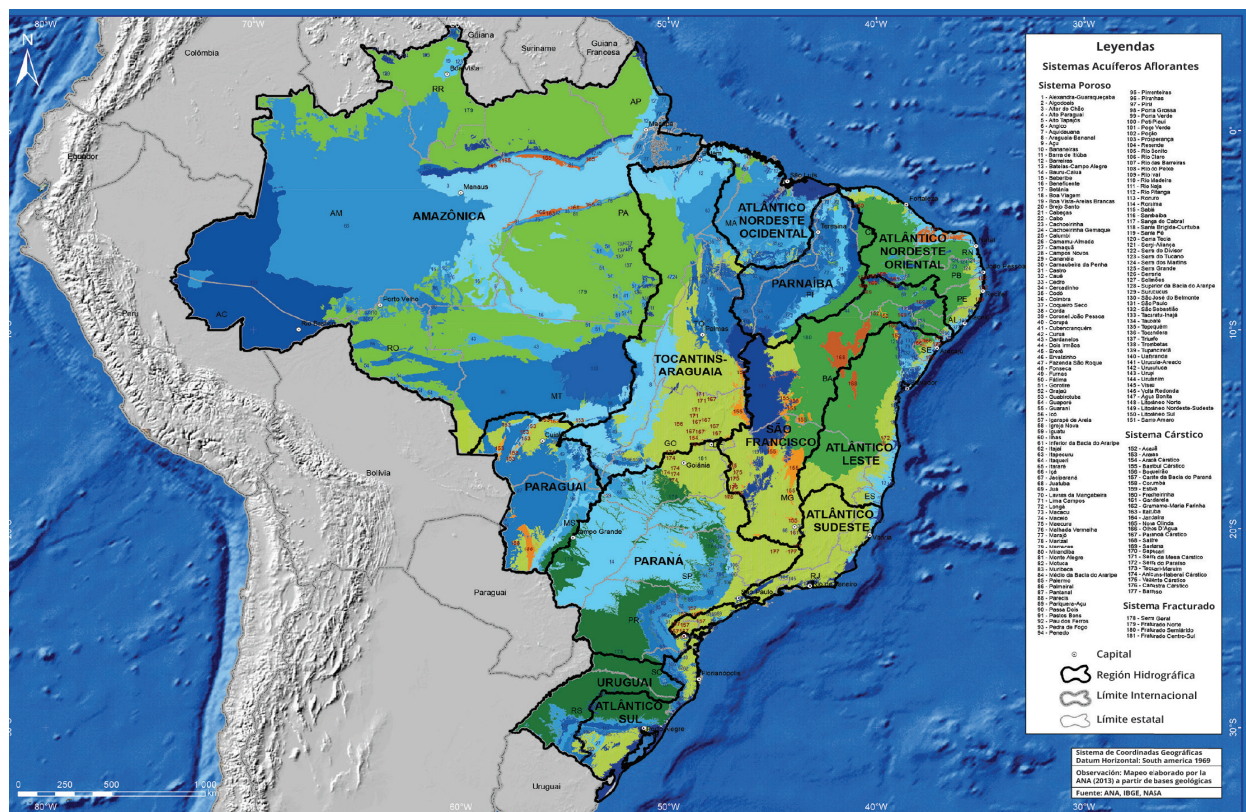


Figura 21 – Sistemas acuíferos brasileños, según la ANA

Fuente: ANA (2013).

Buena parte del territorio brasileño está abastecido por acuíferos, aunque la productividad de los pozos en zonas fracturadas es menor que la de los asociados a unidades sedimentarias. En la Figura 22 se muestran los principales sistemas acuíferos brasileños, que se encuentran en cuencas sedimentarias y se destacan por su uso y calidad del agua.

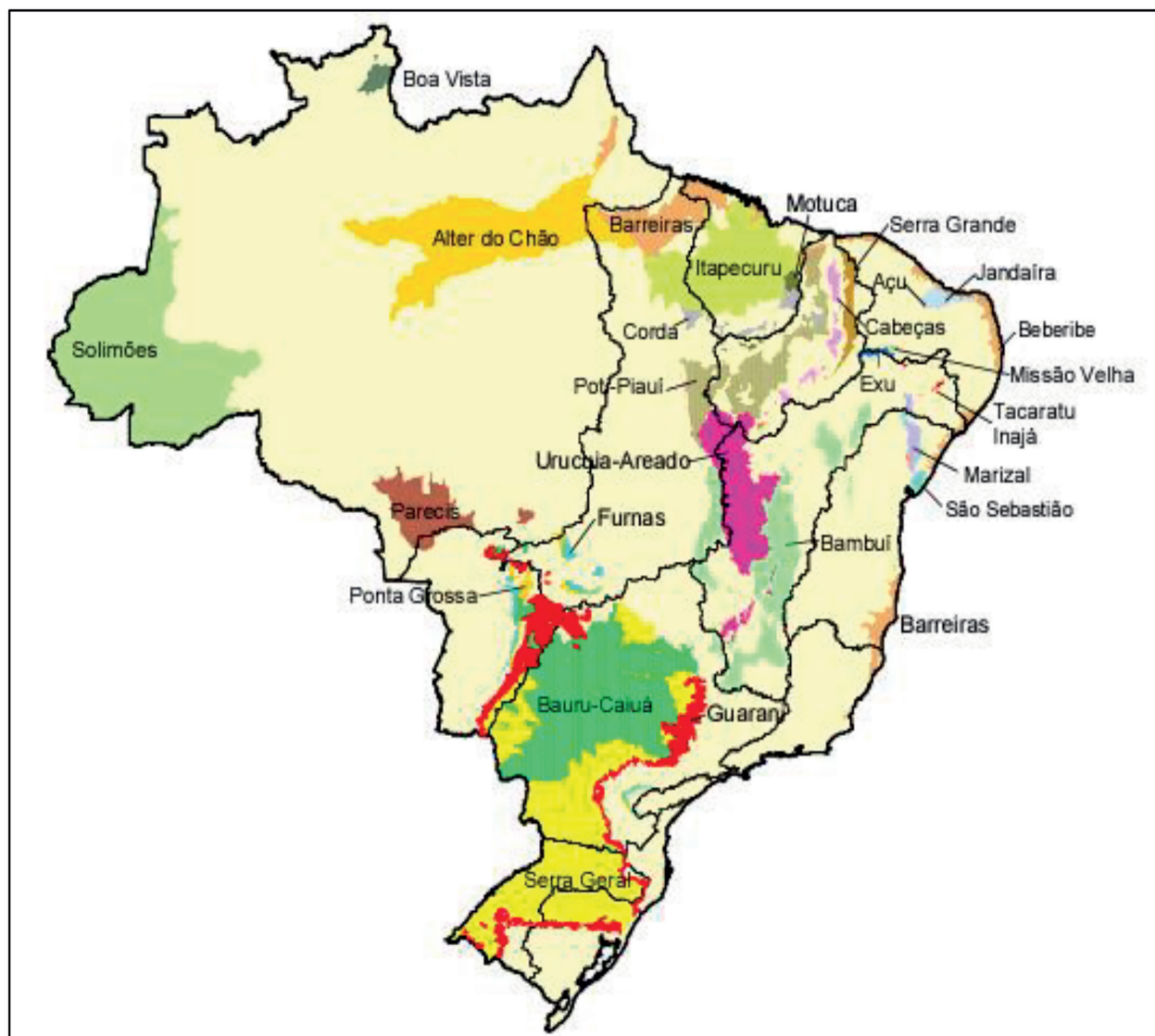


Figura 22 – Los principales acuíferos brasileños

Fuente: ANA (2007, p. 72).

Observando los mapas es posible comprender que la territorialidad de los acuíferos no siempre se corresponde con la de los cursos de agua, las cuencas hidrográficas o las regiones hidrográficas. Los acuíferos, además de ser cuerpos tridimensionales, son también unidades geológicas asociadas a sus litologías. Así, pueden existir diferentes acuíferos superpuestos, a veces con escasa o nula relación hidráulica entre ellos, como en el caso de los sistemas acuíferos Bauru, Serra

Geral y Guarani, de características diferentes pero con un área de convergencia territorial.

El Bauru es un acuífero sedimentario libre a semi-confinado que se superpone a las rocas de la Formação Serra Geral. El Serra Geral es un acuífero fracturado cuando aflora, pero cuando está cubierta por el Bauru-Caiuá, se configura como un acuífero confinado y, por tanto, confina el Guarani. En muchos casos es difícil limitar espacialmente el flujo de un acuífero a otro, en parte

porque una misma formación geológica puede presentar características y comportamientos hidráulicos muy diferentes. Así, aunque la estratigrafía y la clasificación de las unidades litológicas pueden servir de base para la definición de los acuíferos (desde el punto de vista hidroestratigráfico), deben valorarse de forma más amplia (considerando sus propiedades hidrogeológicas) y relacionarse con el propio ciclo hidrológico (zonas de recarga y descarga, por ejemplo). Por ello, algunos mapas hidrogeológicos tratan de clasificar las unidades por el tipo de porosidad de la roca o sedimento (fracturado, poroso, granular o kárstico), mientras que otros tratan de caracterizar las unidades por su producción (potencial hidrogeológico), especialmente en representaciones cartográficas de carácter regional.

Estos mapas muestran que los límites de los acuíferos están todavía en proceso de construcción y, aunque no convergen con las cuencas hidrográficas, existe una gran interacción entre las aguas superficiales y las subterráneas. Incluso, debido a los flujos locales, la mayor tasa de recarga y descarga de los acuíferos suele producirse en la cuenca.

2.5 ¿CÓMO Y DÓNDE SE UTILIZAN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL PAÍS?

Se estima que Brasil tiene 1,1 billones de $\text{m}^3/\text{año}$ de reservas de agua subterránea (ANA, 2020, p. 8). La disponibilidad de agua, a su vez, sería de aproximadamente $14.650 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo, la distribución y productividad de los acuíferos ocurren de manera desigual en todo el territorio (ANA, 2020, p. 23).

En el contexto global, Brasil es el 9º mayor usuario de aguas subterráneas (HIRATA *et al.*, 2019, p. 47). Se desconoce el número real de pozos, a pesar de la obligatoriedad de la concesión de derecho de uso o de su registro. Por desgracia, la inmensa mayoría de los usuarios son irregulares, lo que impide establecer un perfil fiable de los usuarios y de las cantidades extraídas, o de su importancia económica.

El número de usuarios de pozos crece cada año y, según las estimaciones de la ANA (2021), hay unos 2,6 millones de pozos en Brasil. El Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS) del SGB-CPRM, sin embargo, registró, en marzo de 2022, solo 348.283 pozos. A su vez, la base de datos suministrada por las Unidades Federativas registró sólo 101.074 pozos con permiso de uso (ANA, 2020). Para Hirata *et al.* (2019), estos más de 2,5 millones de pozos tendrían una capacidad de extracción de más de $17.580 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ($557 \text{ m}^3/\text{s}$), que corresponde al volumen necesario para abastecer a toda la población brasileña en el período de un año (HIRATA *et al.*, 2019). Esta infraestructura de pozos tubulares representa una inversión aproximada de R\$ 75 mil millones en servicios de perforación y complementación, además de equipos de bombeo (HIRATA *et al.*, 2019).

Por ello, las aguas subterráneas son esenciales para el abastecimiento doméstico y público, los procesos industriales, la prestación de diversos tipos de servicios y las actividades agrícolas y ganaderas.

Entre las ventajas de las aguas subterráneas con respecto a las superficiales, cabe destacar:

- la buena calidad natural de las aguas que, en la mayoría de los casos, sólo requieren cloración/fluoración;
- menores costes relacionados con la obtención de agua, extracción, mantenimiento y operación de la captación en comparación con las fuentes clásicas del sistema de aguas superficiales;
- la autonomía de los pozos tubulares, que funcionan de forma automatizada y requieren poco mantenimiento;
- la exclusividad de poseer una fuente de agua y controlar su uso;
- el menor impacto ambiental de la extracción subterránea. El pozo tubular profundo se considera de bajo impacto en comparación con la captación superficial, que implica plantas de tratamiento, conductos y presas de agua;
- la facilidad y rapidez de las infraestructuras necesarias para hacer posible la extracción. 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 implantación del sistema de extracción de aguas subterráneas puede llevarse a cabo gradualmente, racionalizando las inversiones en la extracción de agua;

- no implica la expropiación de grandes superficies, que suponen un considerable desembolso económico;
- la posibilidad de organizar la distribución sectorizada, con baterías de explotación, constituyendo sistemas aislados o interconectados y a menudo cercanos a la demanda, reduciendo la construcción de largas tuberías;
- menor susceptibilidad a las condiciones climáticas, ya que la capacidad de almacenamiento de los acuíferos hace que el flujo sea estable incluso en períodos de sequía.

La Figura 23 muestra el perfil de los usuarios según los datos del SIAGAS, de acuerdo con las siguientes clasificaciones: agricultura y ganadería (pozos dedicados al riego o al abrevado de animales); abastecimiento doméstico (residencias urbanas); abastecimiento público (proporcionado por los concesionarios de servicios de agua); industrial (pozos que abastecen a las industrias); uso múltiple (pozos que sirven para más de un propó-

sito, siendo este último mayoritariamente para la prestación de servicios urbanos); y otros (pozos para fines no enumerados en las otras categorías, como el ocio). Se observa que el suministro doméstico es el principal usuario (30%), seguido del uso agropecuario (24%), el suministro público urbano (18%), el suministro múltiple (14%), el suministro industrial (10%) y otros (4%) (HIRATA *et al.*, 2019).

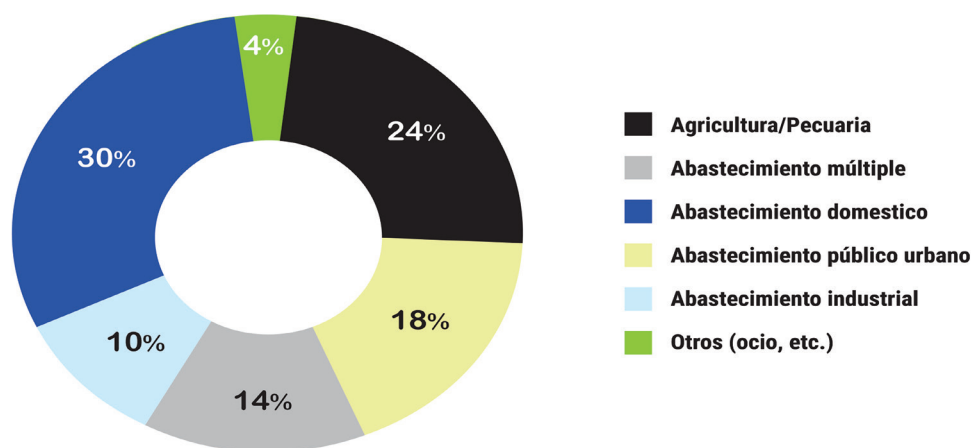


Figura 23 – Perfil de usuarios de aguas subterráneas en el país

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 caudales son reducidos, este recurso es esencial para el abastecimiento público de agua en ciudades de tamaño pequeño (< 10.000 personas) a

mediano (< 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 24) (ANA, 2010).

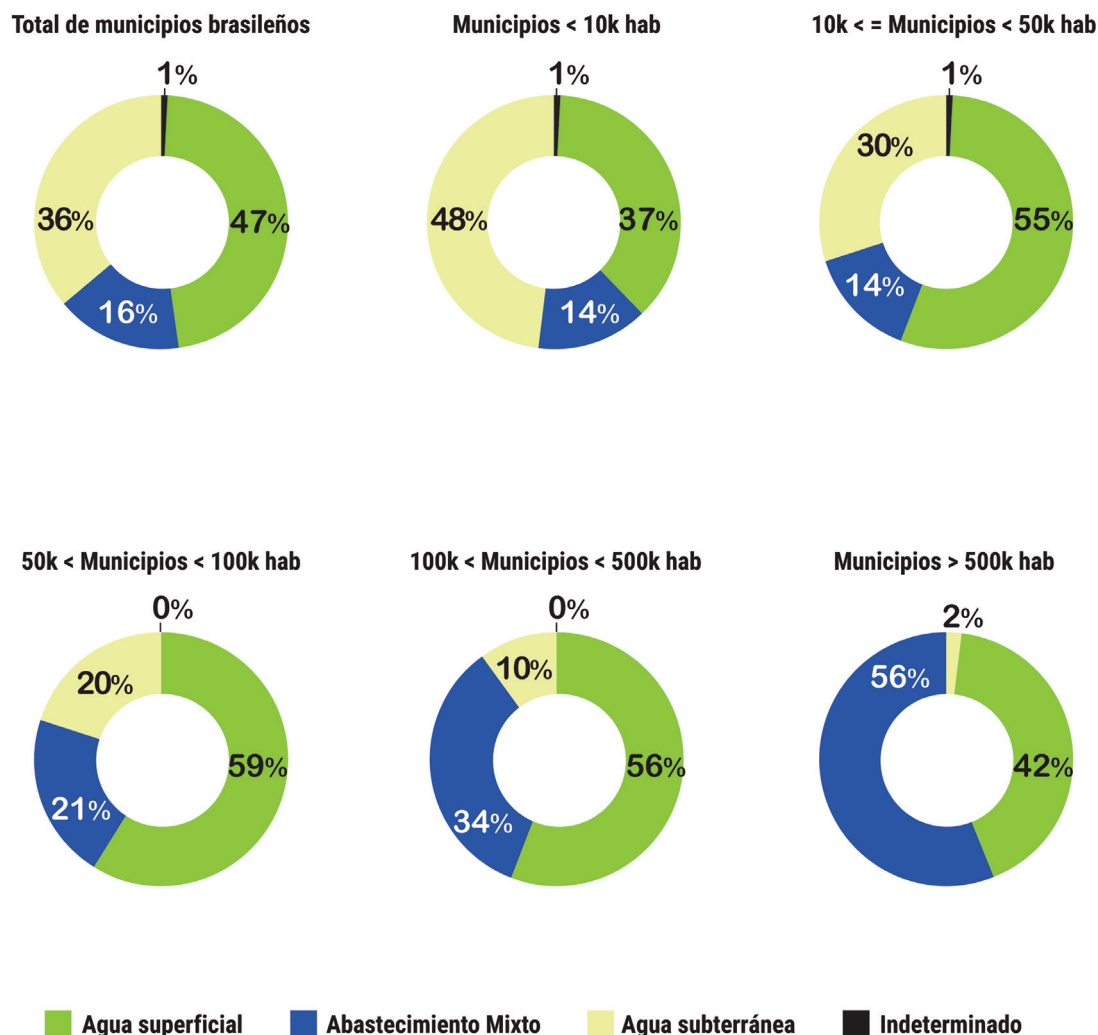


Figura 24 – Distribución de los municipios brasileños (total y por tamaño de la población) según el tipo de fuente de suministro

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

El nuevo Marco de Saneamiento (Ley n° 14.026/2020) tiende a promover el aumento de la demanda pública de agua, dado que determina que el 99% de la población debe ser atendida con agua potable para el año 2033 (art. 11-B de la Ley n° 11.455/2007, incluida por la Ley n° 14.026/2020). Las aguas subterráneas pueden contribuir a alcanzar este objetivo. Ya están siendo utilizadas de forma intensiva por importantes núcleos urbanos, como Mossoró (RN), Natal (RN), Maceió (AL), Recife (PE), Barreiras (BA) y Ribeirão Preto (SP), y son una fuente alternativa en zonas que no tienen acceso a la red pública de agua o lo tienen de forma precaria.

Las figuras 25 A y B muestran los estados que más dependen del uso de estos recursos. En cuanto al uso urbano, destacan los estados de São Paulo, Piauí, Ceará, Rio Grande do Sul, Bahía y Paraná, lo que demuestra su importancia para las regiones Nordeste y Sur, así como el intenso uso en el estado de São Paulo. En cuanto al uso rural, el principal estado usuario es Minas Gerais, seguido de São Paulo, Bahía, Tocantins y Rio Grande do Sul (HIRATA *et al.*, 2019). Aunque el Nordeste no aparece como un gran usuario rural, estas aguas son muy importantes para las poblaciones del Semiárido, sobre todo con el incentivo del uso de acuíferos salobres y tecnologías de filtrado, como ocurre en el Programa Agua Dulce.

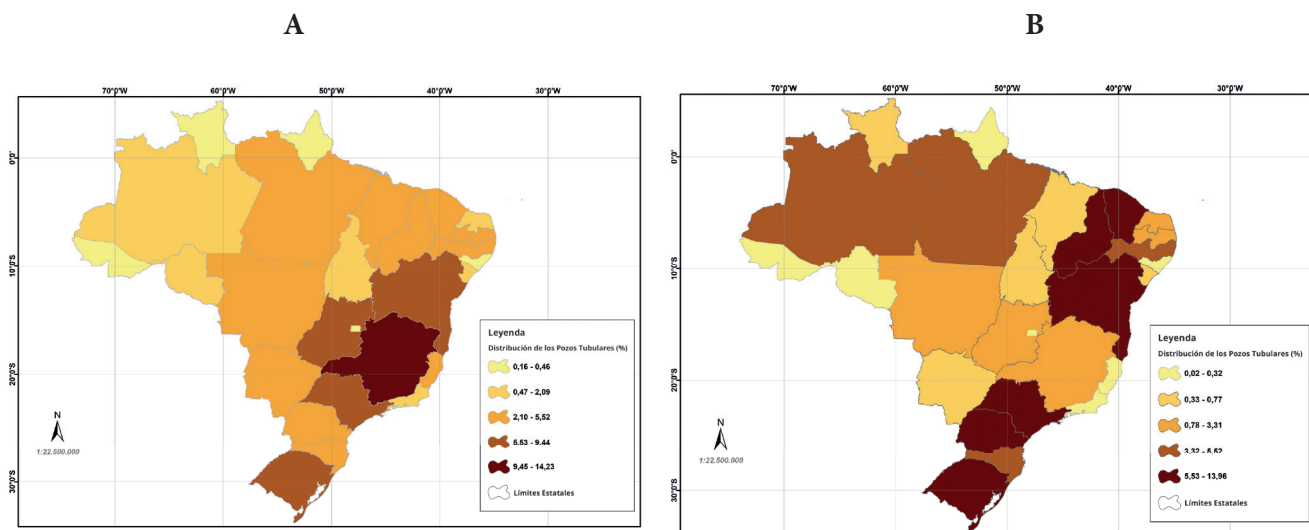


Figura 25 - Dependencia de los estados brasileños en cuanto a las aguas subterráneas, según la distribución de los pozos tubulares (A: uso urbano; B: uso rural)

Fuente: Hirata *et al.* (2019, p. 17).

Las aguas subterráneas tienen una importancia aún poco reconocida en las zonas rurales (ALY JÚNIOR, 2019). Sin embargo, esta fuente se utiliza para el abastecimiento de viviendas y empresas rurales, el riego y el abrevado de animales. Según el Censo Agropecuario del IBGE (2017), hay aproximadamente tres millones de extracciones por pozos excavados y manantiales, así como 1,03 millones de propiedades rurales dotadas de al menos un pozo tubular. Aunque los pozos excavados y los manantiales tienen un bajo caudal de agua, son la principal fuente de agua en las regiones periféricas de las ciudades que no disponen de red de agua, en los pueblos de montaña y en las pequeñas propiedades rurales. Es probable que esta realidad se mantenga, ya que la Ley 14.026/2020 no trajo ninguna directriz para la prestación de servicios públicos de saneamiento en las zonas rurales, que seguirán dependiendo de sistemas alternativos de agua, con alta dependencia de pozos y manantiales.

El uso de estas aguas para el riego también debería incrementarse porque garantiza una reserva perenne

de agua de buena calidad, salvaguardando la producción agrícola de la creciente inestabilidad del régimen climático (HIRATA; VARNIER, 1998). Este uso ya es importante, lo que se hace explícito al analizar los usos disponibles en las bases de datos oficiales. En 2015, el mayor número de concesiones válidas pertenecía al sector de suministros urbanos y rurales, seguido de la industria (Figura 26 A) (ANA, 2016). Al analizar, sin embargo, los caudales medios captados entre los usuarios (ratio número de concesiones/caudal), se observa que el principal usuario fue la agricultura (48,6 m³/h), seguido de la industria (20,86 m³/h) y el abastecimiento (17,89 m³/h) (Figura 26 B) (ANA, 2016). Es decir, proporcionalmente, los usuarios rurales utilizan mayores cantidades de agua subterránea que otros sectores. El riego intenso puede comprometer el caudal de los ríos y perjudicar varios servicios ecosistémicos, lo que demuestra la necesidad de promover estudios sobre este tema, aún poco explorado por la literatura nacional (ALY JÚNIOR, 2019).

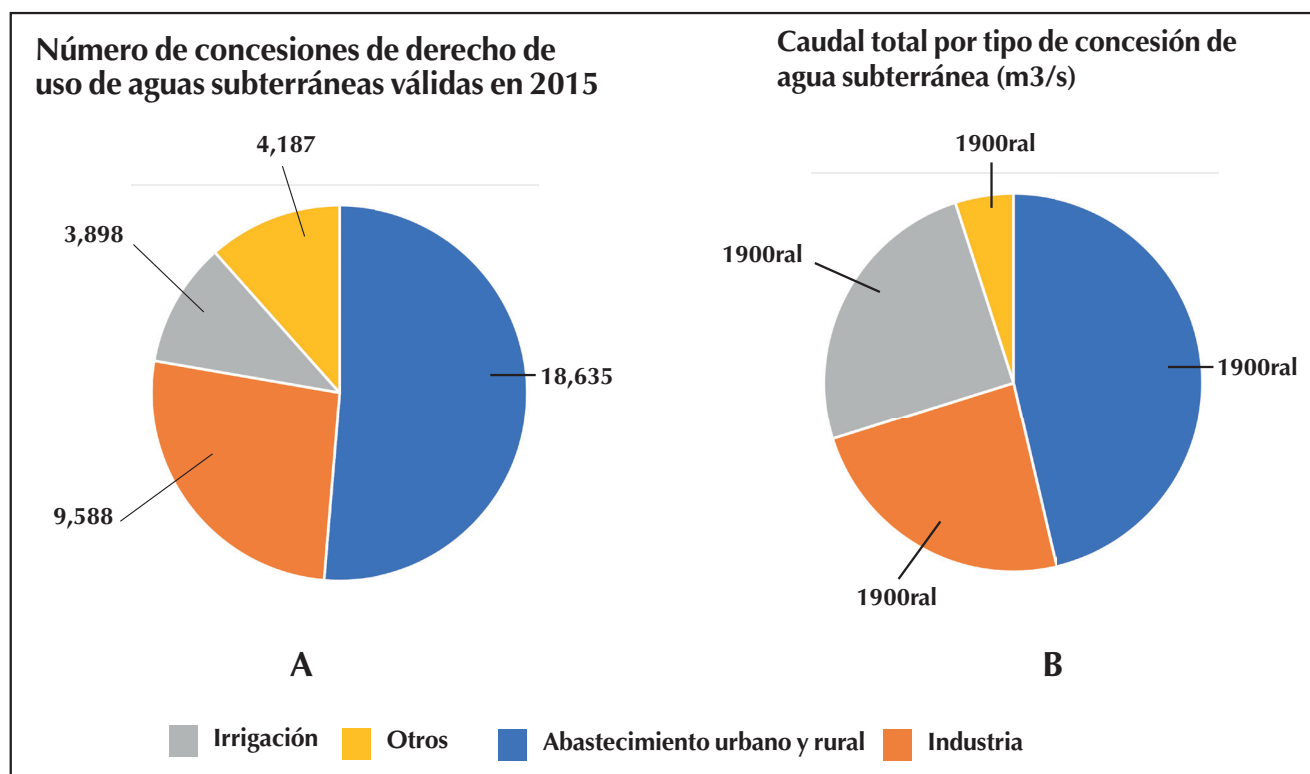


Figura 26 - (A) Número de concesiones de derecho de aguas subterráneas válidas; (B) Caudal total por tipo de concesiones de derecho de aguas subterráneas (m3/s) (2015)

Fuente: Hirata *et al.* (2019, p. 50).

Las aguas subterráneas también son fundamentales para la industria. En el conjunto de pozos de Siagas, este sector representa sólo el 10% de los usuarios, sin embargo, en el ámbito de los usos autorizados constituye el 25%, con un caudal medio ligeramente superior al del abastecimiento. Varias industrias recurren a esta fuente, incluso en zonas dotadas de infraestructura de redes de agua, como forma de ahorrar y tener una fuente propia de este bien (HIRATA *et al.*, 2019). Además, no hay que olvidar su uso por parte de las industrias de bebidas y de aguas minerales y potables.

El uso de las aguas subterráneas tiende a intensificarse debido a la mayor demanda de agua derivada del aumento del consumo, el crecimiento de la población, el aumento de las exportaciones de *comodities* agrícolas, la degradación de las fuentes de agua superficiales, el aumento de los períodos de sequía, la necesidad de cumplir el objetivo de abastecimiento universal de agua y los problemas derivados del cambio climático global,

que tienden a afectar más a las aguas superficiales (HIRATA; CONICELLI, 2012).

2.6 LAS FUNCIONES AMBIENTALES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL CICLO HIDROLÓGICO

Las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico proporcionan varios servicios ecosistémicos al estar vinculadas a los procesos que regulan el volumen, la distribución y la calidad del agua disponible en el planeta. El concepto de servicios ecosistémicos y su relación con los acuíferos y las aguas subterráneas se exponen en el Box 9. La importancia de estos recursos va mucho más allá del suministro de agua para los seres humanos. Entre sus múltiples funciones ecosistémicas destacan: *a)* almacenamiento, regularización y perennización 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 de los ecosistemas.

Box 9 – Servicios Ecosistémicos (SE) de los acuíferos y aguas subterráneas*Oswaldo Aly Júnior*

El término *Servicios Ecosistémicos* fue introducido por Erlich y Erlich (1981), siendo adoptado por la economía ecológica y ambiental a partir de los años 90 (GÓMEZ-BAGGETHUN *et al.*, 2010). Los SE se definen como bienes y beneficios que los ecosistemas proporcionan gratuitamente a los seres humanos, promoviendo su bienestar (BERGKAMP; CROSS, 2015). Su origen se basa en las diferentes funciones de los sistemas naturales que forman una compleja relación para sostener la vida humana. Este concepto considera que existe una correlación positiva entre el bienestar humano y el bienestar ambiental. Varios estudios tratan de identificar y cuantificar monetariamente su importancia y su papel.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) lanzó el Informe de Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005), que consideraba el “ecosistema (como) un complejo de comunidades de plantas, animales y microorganismos y su respectivo entorno que interactúan como una unidad funcional”. Los servicios ecosistémicos son el resultado de las interacciones entre diferentes funciones de los ecosistemas y pueden derivar de una o más funciones, además una función del ecosistema puede generar más de un servicio ecosistémico (CONSTANZA *et al.*, 1997).

El MEA considera que los seres humanos son los que integran e interactúan con los ecosistemas, interfiriendo directa y/o indirectamente en su funcionamiento. El concepto de SE puede subdividirse en cuatro categorías: i) *regulación*, relacionada con las características de regulación de los ecosistemas; ii) *provisión*, relacionada con los “productos proporcionados, obtenidos o extraídos de los ecosistemas”, incluida el agua; iii) *soporte*, entendido como “servicios necesarios para la producción de los demás servicios de los ecosistemas”; y iv) *cultural*, que comprende los “beneficios intangibles que obtienen las personas, incluyendo la diversidad cultural, los valores religiosos y espirituales, los conocimientos, los valores educativos y estéticos, etc.” (MEA, 2005).

Las aguas subterráneas son indispensables para mantener la salud de los ecosistemas y la calidad de la vida humana. Además de ser una fuente de suministro y de insumos productivos para la industria, los servicios y la agricultura, muchos SE están directamente relacionados con el almacenamiento, la recarga y el afloramiento o la descarga de aguas subterráneas. Estas aguas permiten almacenar el agua de lluvia y de deshielo, además de cumplir una importante función medioambiental al proporcionar el caudal de base de los ríos, lagos y zonas húmedas, asegurando la integridad de estos ecosistemas terrestres, acuáticos y estuariales, especialmente durante los períodos de sequía. Estas aguas siguen asociadas a la cultura y al turismo y son reconocidas por sus propiedades terapéuticas, medicinales o incluso por su belleza paisajística.

Así, las aguas subterráneas garantizan la estabilidad geológica, ya que al mantener la estructura de los poros de los acuíferos evitan el hundimiento del terreno y de los ecosistemas de cavernas. Los acuíferos, a su vez, sostienen parte del paisaje, la biodiversidad y las cuencas hidrográficas, lo que incluye las zonas ribereñas, los ecosistemas terrestres y las cimas de las cuencas hidrográficas. Además, en algunas regiones permiten la producción de energía geotérmica. La figura 27 resume los principales SE que proporcionan estas aguas (GRIEBLER; AVRAMOV, 2015).

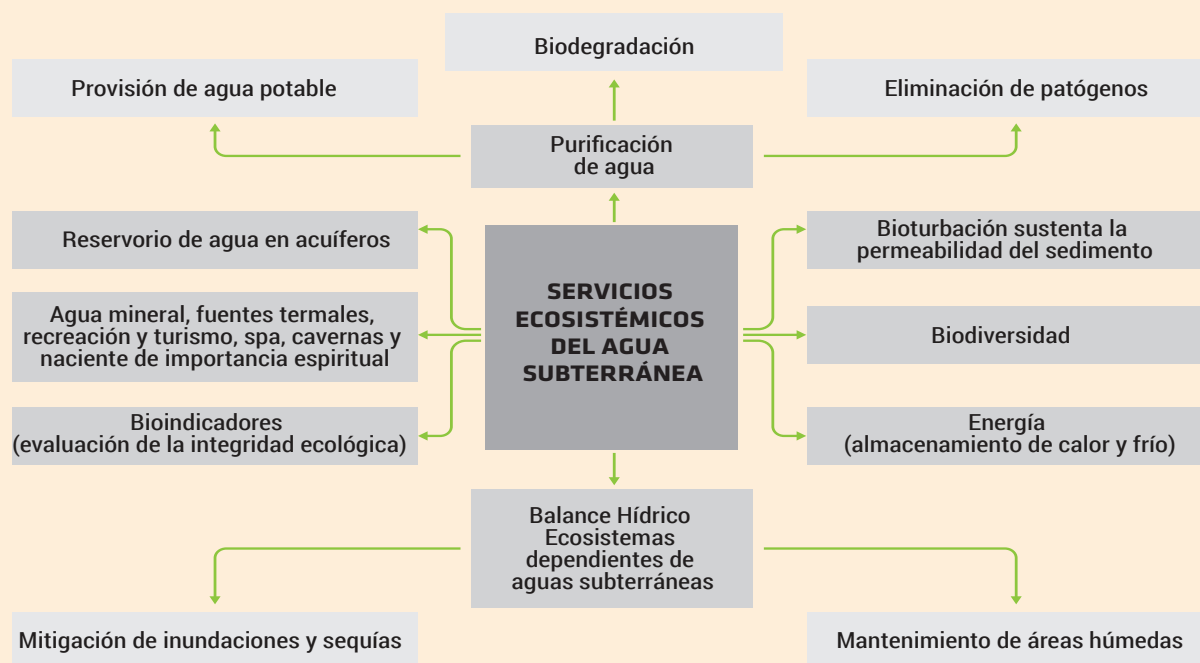


Figura 27 – Principales servicios ecosistémicos proporcionados por las aguas subterráneas

Fuente: Griebler e Avramov (2015, p. 356).

Las aguas subterráneas sustentan SE que son esenciales para la vida y el bienestar de la población y los ecosistemas. A pesar de ello, las actividades antrópicas han generado graves impactos (contaminación, sobreexplotación, impermeabilización, cambios en el régimen climático, etc.), que amenazan su continuidad. Cuanto más complejas y avanzadas tecnológicamente son las sociedades humanas, más se desarrolla la noción irreal de su independencia de los sistemas naturales. En la actualidad, el consumo de SE se realiza a una escala insostenible e interfiere en el funcionamiento de los ecosistemas.

Los escenarios estudiados por el MEA (2005) revelan la necesidad de mejorar las políticas públicas, las instituciones y la forma de mitigar las consecuencias negativas de la presión sobre los ecosistemas. Brasil debe estimar la importancia de los SE que aportan los acuíferos para los diferentes tipos de uso, así como intensificar las acciones para su conservación y uso sostenible, con el fin de garantizar el mantenimiento de dichos SE.

2.6.1 Perennización y regularización del ciclo hidrológico en el Planeta

Las aguas subterráneas actúan como reservas de agua para los ríos y lagos, ya que contribuyen continuamente al mantenimiento del caudal 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 tanto, tienen una función reguladora del ciclo hidrológico en las cuencas hidrográficas e incluso a escala planetaria. En Brasil, más del 90% de las cuencas hidrográficas tienen ríos alimentados por la descarga de aguas subterráneas (ANA, 2017b, p. 37), lo que es responsable de su perennización, incluso en aquellos lugares donde hay regímenes climáticos con períodos secos. Este servicio se extiende a los lagos, pantanos y manglares. A pesar de estas características, es necesario evaluar cómo el cambio climático puede afectar a estos recursos (Box 10).

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

El agua que percola hacia el acuífero sufre un proceso de filtrado a lo largo de su recorrido subterráneo. 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, adquiere diferentes características químicas, que varían según la proporción y el tipo de sólidos disueltos. Las cantidades de elementos químicos en las aguas subterráneas dependen del clima de las zonas de recarga, de las condiciones químicas de la zona vadosa y de la geología del sistema de aguas subterráneas por el que fluye. La interacción del agua con las partículas del suelo y la roca suele permitir su enriquecimiento debido a la disolución de los minerales. Este proceso tiende a aumentar con el tiempo de interacción agua-roca y la reactividad del propio material sólido. En muchos casos, la trayectoria hasta los puntos de descarga da como resultado un agua de excelente calidad y rica en sales minerales. En otros, sin embargo, la disolución de estos minerales puede generar problemas de calidad, incluyendo anomalías naturales que pueden comprometer la potabilidad del agua.

2.6.3 Sustentador de la vida y los ecosistemas

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

Las aguas subterráneas no presentan cambios bruscos de temperatura ni de sus cualidades físico-químicas, por lo que su afluencia proporciona un hábitat estable para las plantas y los animales acuáticos. Además, la descarga de los acuíferos es esencial para mantener las lagunas costeras y los manglares, ya que permite diluir la salinidad de las influencias marinas, distribuyendo los nutrientes y regulando las condiciones fisicoquímicas.

Incluso en los casos en los 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 las lluvias, el nivel del agua en las partes altas se reduce mucho, pero en los valles puede no haber variación, porque el agua infiltrada en las lluvias anteriores sigue avanzando 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 una vegetación muy arraigada que extrae la humedad directamente del nivel freático. En el cerrado se encuentran varias especies que han desarrollado raíces profundas para absorber el agua de los acuíferos. También existe toda una flora y fauna asociada a las fuentes hidrotermales, que son los lugares donde las aguas calentadas y enriquecidas con minerales emergen de una larga trayectoria subterránea.

Por último, las aguas subterráneas contribuyen a la estabilidad geológica, ya que garantizan el mantenimiento de la estructura de los poros de las rocas, evitando o reduciendo el riesgo de hundimiento del terreno o de los ecosistemas de cavernas.

Box 10 – Cambio climático y aguas subterráneas*Adivane Terezinha Costa*

El Cambio Climático Global (MCG) se refiere a cambios significativos en el ciclo hidrológico, el régimen de lluvias, la temperatura, la evaporación y la humedad en relación con los valores históricos de una región (HIRATA *et al.* 2019). Estos cambios están asociados al calentamiento que viene experimentando el Planeta como consecuencia de las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero, originadas por actividades antrópicas, especialmente en las últimas tres décadas (IPCC, 2018). Los cambios en el ciclo hidrológico causados por el MCG interfieren en todo el proceso de recarga de los manantiales, ya sean superficiales o subterráneos, y pueden generar impactos directos en las aguas subterráneas, como la reducción de la recarga de los acuíferos, e indirectos al reducir el suministro de agua superficial, lo que lleva a una mayor explotación de las aguas subterráneas (aumento de la perforación de pozos), que puede culminar en la sobreexplotación de los acuíferos si no hay una planificación estratégica eficiente.

Smerdon (2017) presenta una sinopsis de trabajos publicados entre 2011 y 2016, donde hace varias menciones al estado del cambio climático y las aguas subterráneas considerando las predicciones futuras de las condiciones de recarga. Los estudios indican que la incertidumbre de la distribución y la tendencia de las precipitaciones futuras de los modelos climáticos más utilizados, como los Modelos de Circulación General (GCM), dan lugar a predicciones variables de recarga. Los estudios de modelado a menudo no pueden predecir la magnitud y la dirección (aumento o disminución) de las condiciones futuras de recarga porque los propios GCM no están de acuerdo. No obstante, estos estudios indican que las regiones más sensibles al cambio climático serán las zonas de montaña y las zonas áridas, donde los cambios sutiles en el calendario y la duración del tiempo estacional podrían alterar significativamente los niveles de recarga.

Brasil es vulnerable a los cambios climáticos actuales y aún más a los proyectados para el futuro, especialmente en lo que se refiere a los extremos climáticos, con predicciones de lluvias fuertes e intensas durante el período húmedo, y lluvias reducidas y espacialmente irregulares en los períodos secos (HIRATA *et al.*, 2019). Según Marengo (2008), las proyecciones climáticas indican que en la Amazonia y el Nordeste las precipitaciones pueden reducirse hasta un 20% a finales del siglo XXI en un escenario de altas emisiones. Como resultado, el sur de Brasil tendrá un aumento extremo de las precipitaciones.

Estos cambios en el clima pueden actuar como una fuente adicional de presión para la demanda de agua potable y de riego, lo que repercute en el sector socioeconómico. En este contexto, las ciudades que dependen del recurso subterráneo son más resistentes a la sequía y están mejor preparadas para afrontar los retos que impone el cambio climático global (HIRATA *et al.*, 2019), aunque se resalta el riesgo de sobreexplotación.

En regiones sometidas a largos periodos de sequía, como el Semiárido brasileño, la situación crítica de vaciado de las presas se ha sorteado con la implantación de suministros de agua alternativos, principalmente de aguas subterráneas. En respuesta a los siete años de sequía, el estado de Ceará perforó más de tres mil pozos entre 2015 y 2018, exclusivamente para el abastecimiento de las poblaciones de las ciudades y las zonas rurales (TEIXEIRA, 2018). Las previsiones para 2050, según los informes del IPCC y del Inpe (MARENGO, 2008), indican que el Semiárido tiende a hacerse más árido con el cambio climático, aumentando la frecuencia e intensidad de las sequías y reduciendo la disponibilidad de recursos hídricos.

Cabe destacar que en Brasil aún son escasos los estudios de predicción sobre los impactos del cambio climático en las aguas subterráneas, incluyendo cómo afectarán a la relación entre las aguas superficiales y los acuíferos, que están conectados hidráulicamente (KUNDZEWICZ *et al.*, 2007; PBMC, 2014).

Según el informe del Panel Brasileño sobre el Cambio Climático (PBMC, 2014), las perspectivas futuras sobre los impactos del cambio climático en los recursos hídricos subterráneos en Brasil indican que el Nordeste puede experimentar una reducción del 70% en la recarga para el año 2050 (DÖLL; FLÖRKE, 2005; PBMC, 2014). En el Sistema Acuífero Guaraní, las previsiones indican que casi el 70% de los escenarios climáticos generaron variaciones en los niveles de agua subterránea por debajo de los medidos en el monitoreo entre 2004 y 2011 (MELO, 2013).

Los estudios apuntan al cambio climático como posible causa de los problemas relacionados con la variabilidad, la disponibilidad, la cantidad y la calidad de los recursos hídricos. En este contexto, se prevé

que las poblaciones más pobres sean las más vulnerables, ya que están expuestas a la escasez de agua. Ante las incertidumbres futuras sobre la disponibilidad y demanda de aguas subterráneas y la posibilidad de que se produzcan eventos hidrológicos extremos más frecuentes y severos, crece la importancia de contar con capacidades técnicas que apunten a elaborar un mapa integrado de vulnerabilidad al cambio climático, instrumentos adecuados de planificación y cooperación entre entidades de diferentes ámbitos y sectores, así como una amplia difusión del tema a la sociedad.

2.7 LAS AMENAZAS A LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS BRASILEÑOS

Los acuíferos, aunque están más protegidos que las masas de aguas superficiales, también están sujetos a los impactos derivados del uso excesivo del agua y de las actividades antrópicas, presentando problemas relacionados con la cantidad, como la sobreexplotación o la reducción de la recarga, y con la calidad, como la contaminación.

2.7.1 Sobreexplotación de acuíferos

La extracción de agua de un acuífero genera su descenso y modificación 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 surgen a lo largo de un período de tiempo, que varía según el tamaño del acuífero, la capacidad de almacenamiento y el escenario de uso. El potencial de almacenamiento de los acuíferos permite tener largos períodos de extracción de aguas subterráneas, incluso en períodos de sequía, sin generar un marco de sobreexplotación.

Las alteraciones hidráulicas y químicas de los acuíferos tardan años o décadas en ser percibidas por los usuarios o las Autoridades Públicas. Por esta razón, es necesario monitorear estas extracciones para evitar que generen externalidades, cuya recuperación puede ser compleja, costosa y lenta de revertir.

La disminución del nivel del agua del acuífero por sí sola no caracteriza un marco de sobreexplotación, sino que se materializa cuando los efectos de la extracción causan pérdidas financieras, ecológicas o sociales que no pueden ser compensadas por los beneficios de la explotación. Este término abarca diversos fenómenos e impactos generados por la extracción o por los cambios en la recarga, que reducen la disponibilidad de agua, perjudicando a los usuarios o a las funciones ambientales y sociales de las aguas subterráneas. A pesar de ser considerado impreciso por la comunidad científica, el término *sobreexplotación* es ampliamente utilizado por los gestores por su capacidad de transmitir a la sociedad la idea de que el acuífero está en riesgo (CUSTÓDIO; LLAMAS, 2001).

La sobreexplotación puede afectar a parte de un acuífero o a todo el sistema. Este fenómeno va más allá de un problema entre el equilibrio hídrico y la retirada de agua por encima de la recarga, ya que comprende una serie de efectos negativos. Debido a la baja velocidad del flujo subterráneo, la evaluación de los efectos de la sobreexplotación puede tardar años en manifestarse, aunque sus causas se hayan producido hace tiempo.

En el caso de los acuíferos fósiles, es decir, aquellos en los que la restitución del agua en la porción explotada tiene más de decenas de miles de años, la sobreexplotación es inevitable, ya que la pérdida del nivel vendrá 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 (FOSTER *et al.*, 2002).

Si la sobreexplotación es un problema, el abandono de los pozos y de su explotación también puede generar impactos negativos relacionados con el aumento del nivel freático. Cuando se reduce la explotación de un acuífero, los niveles de agua recuperan la situación original o incluso la superan, ya que las ciudades pueden 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 partes eran secas (zona no saturada), lo que requiere el drenaje del agua. Si los cimientos del edificio se construyeron en suelo seco, la reanudación del nivel de las aguas subterráneas provoca su movimiento vertical, lo que puede afectar a la estabilidad estructural. El restablecimiento de esta condición natural acaba generando una serie de pérdidas que recaerán sobre los propietarios del bien o infraestructura.

A diferencia de las aguas superficiales, no es posible visualizar directamente los procesos que tienen lugar dentro del acuífero. Por ello, el reto de su gestión es medir y establecer cuándo su explotación se considera lo suficientemente dañina como para clasificarla en esta situación. En general, se entiende por sobreexplotación los cambios en el ciclo hidrológico que provocan uno o varios de los siguientes impactos:

- a) **reducción de los niveles de los acuíferos por 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 aportación hídrica de los flujos 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 costes de explotación del agua debido al descenso de los niveles dinámicos de los pozos y/o al 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 depresiones. Los costes de extracción están más asociados al bombeo, que requiere energía para llevar el agua del acuífero a la superficie, que al trabajo en sí. A pesar de ello, el diseño de un pozo debe ser compatible con los caudales a explotar, por lo que las reducciones del nivel de agua pueden hacer que las extracciones no sean adecuadas para este fin. Si los costes de extracción superan los niveles económicamente aceptables para una situación determinada, se considera que el acuífero está sobreexplotado;
- d) **pérdida de pozos poco profundos o manantiales impidiendo el acceso equitativo al agua.** El uso de aguas subterráneas a través de pozos excavados o incluso de pozos tubulares poco profundos por parte de las poblaciones pobres y socialmente vulnerables es una práctica común en las zonas rurales o en las regiones periurbanas. En muchos casos, constituyen la única fuente de agua disponible para garantizar la seguridad hídrica y 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 sequen los pozos más superficiales y los manantiales. En la mayoría de los casos, el pozo más profundo está legalizado, a diferencia de los demás usuarios de pozos, sin embargo, este uso puede generar un problema de desigualdad social y perjudicar el principio de los usos múltiples del agua. Es habitual que los propietarios de pozos que se han secado no relacionen la pérdida del pozo con la sobreexplotación del acuífero;
- e) **subsistencia del terreno.** La explotación de algunos acuíferos, como los asociados a sistemas kársticos o sedimentarios, puede crear hundimientos del terreno e impactar en las obras civiles, causando daños sociales y económicos, como el derrumbe de edificios y la modificación de los flujos de agua urbanos;
- f) **infiltración de agua contaminada o salina en el acuífero debido a un bombeo excesivo o a 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, estas alteraciones pueden llevar agua de baja calidad a las zonas de uso del acuífero. Por ejemplo, el bombeo de pozos induce la entrada de agua contaminada de acuíferos freáticos o ríos en el acuífero. La contaminación derivada de la inducción de agua de baja calidad a través del bombeo debe abordarse mediante el control de la operación y la explotación de los pozos; y
- g) **intrusión salina en los acuíferos costeros.** En los acuíferos costeros, en situación de equilibrio, existe un gradiente hidráulico que condiciona un flujo de agua dulce desde el continente hacia el océano. Este flujo puede invertirse debido a las características de las mareas y las variaciones meteorológicas, por ejemplo, mezclando agua dulce y salada. Esta mezcla de aguas está condicionada por la dispersión hidrodinámica, por la que el agua dulce, menos densa, tiende a fluir más cerca de la superficie, mientras que el agua salada, más densa, se desplaza hacia el acuífero, formando una cuña salina (FEITOSA *et al*, 2008). La extracción excesiva de los acuíferos costeros permite el avance de la cuña salina hacia el continente, ya que el bombeo invierte las direcciones de flujo de estas aguas, provocando un desequilibrio hidrodinámico del sistema y comprometiendo la calidad de las aguas del acuífero. Este proceso se detalla en el Box 11.

Box 11 – Intrusión salina en los acuíferos costeros

Roberto Eduardo Kirchheim

La extracción excesiva de aguas subterráneas en las zonas costeras, cerca del litoral, puede promover la reducción de la descarga de agua dulce en los ecosistemas costeros y el avance de las intrusiones salinas (en forma de cuñas) hacia el interior de los acuíferos. La existencia de descargas de agua dulce hacia el mar es lo que limita el avance de estas intrusiones en el continente.

La intrusión salina se define como el movimiento de agua salada hacia acuíferos saturados de agua dulce. Este escenario se registra en varias regiones costeras y ha sido objeto de estudios en todo el mundo durante los últimos 50 años. Se trata de una situación de reversibilidad compleja y costosa que conduce inevitablemente al abandono de la infraestructura de extracción. El agua salada tiene altas concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) y componentes inorgánicos, lo que la hace inadecuada para el consumo humano y otros usos antrópicos.

En condiciones naturales de acuíferos costeros, se observa un equilibrio hidrodinámico entre las aguas dulces que se yuxtaponen sobre las aguas densas y saladas. De forma muy simplificada, el espesor de la columna de agua dulce por encima de la interfaz de agua salada puede estimarse en función de la relación entre las respectivas densidades (relación de Ghyben y Herzberg) (KRESIC, 2006) (Figura 28). Esta expresión puede sintetizarse mediante la igualdad ($z=40h$), es decir, por cada 1 m de columna de agua dulce sobre el nivel del mar hay otros 40 m de columna de agua entre el nivel del mar y la interfaz con el agua salada. Si la altura (h) disminuye, se hace evidente que la línea que limita esta interfaz acaba ascendiendo, para mantener este equilibrio.

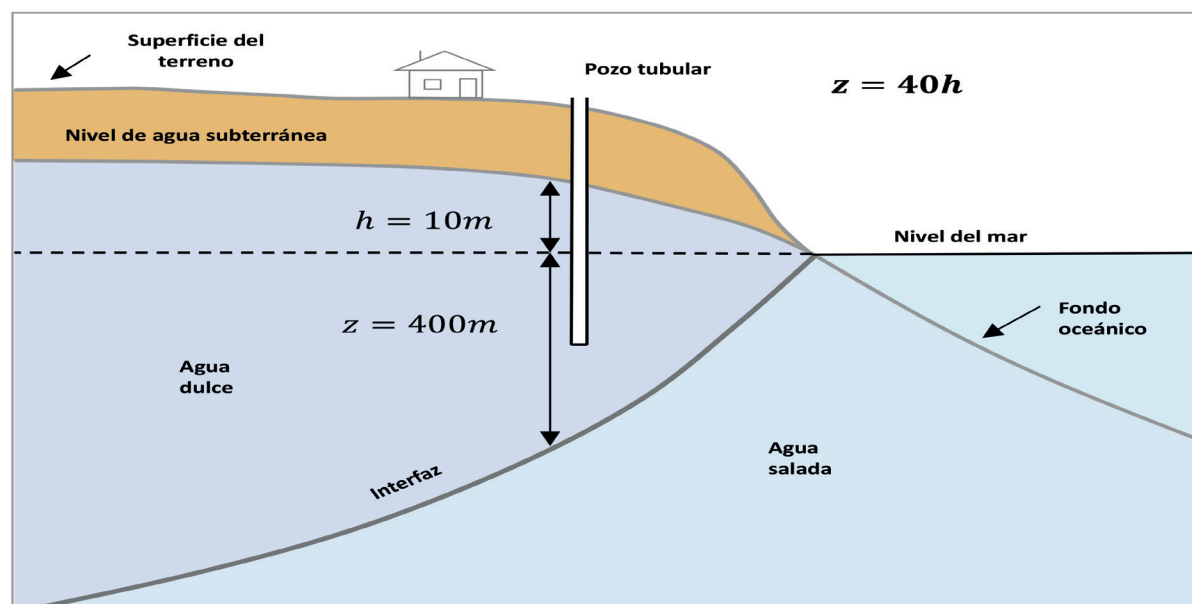


Figura 28 – Ilustración esquemática de la relación hidrostática entre el agua dulce y el agua salada en los acuíferos costeros

Fuente: Kresic (2006), adaptación de Roberto Eduardo Kirchheim.

Aunque es bastante válida como primera aproximación matemática, esta ecuación adopta un escenario simple de equilibrio isostático y sin movimiento advectivo del agua. La dinámica verdadera de las aguas subterráneas en regiones costeras, entretanto, implica en una descarga de agua subterránea dulce con velocidad de percolación, creando verdadera zona de transición en la cual las aguas se mezclan por medio de mecanismos de dispersión y difusión molecular. Esta mezcla está causada e influenciada por las heterogeneidades en la geometría del acuífero y las propiedades hidráulicas, así como por las fuerzas dinámicas

que operan en varias escalas temporales, como los efectos diarios de las mareas, las variaciones estacionales y/o anuales en las tasas de recarga en los acuíferos costeros o las variaciones en la posición de la línea de costa. Estas fuerzas dinámicas van desplazando de un lado a otro toda la franja de mezcla entre el agua dulce y la salada. Cuando las condiciones naturales de un acuífero costero se alteran debido al bombeo, la posición y la forma de la interfaz dulce-salada, así como las propiedades geométricas de la zona de mezcla, cambian en las tres dimensiones, dando lugar a intrusiones salinas. La presencia de acuíferos multicapa y acuitardos discontinuos, junto con las extracciones de distintos acuíferos a diferentes profundidades, hace que las relaciones espaciales y temporales entre el agua dulce y la salada sean complejas.

La literatura técnica sugiere una serie de metodologías destinadas a diagnosticar escenarios de intrusión, desde estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos para demarcar la interfaz agua salada y agua dulce hasta el uso de trazadores isotópicos y técnicas de modelado matemático. Todas ellas exigen un seguimiento sistemático de los resultados de los niveles y la calidad. Se pueden emplear varias técnicas de mitigación, que implican recargas artificiales, reordenación de los pozos de producción y formación de barreras hidráulicas.

La zona costera de Brasil tiene las mayores densidades demográficas y una alta demanda de recursos hídricos, aun así, los estudios de diagnóstico, monitoreo y mitigación de las cuñas salinas son incipientes. La zona costera del estado de Río de Janeiro y algunas capitales de la Región Nordesteña cuentan con estudios que, mínimamente, involucraron etapas de diagnóstico y modelación para el avance de la cuña salina. Destaca el caso de Recife, que fue evaluado en el Proyecto Coqueiral, en el que participaron varios agentes institucionales nacionales e internacionales, como: CEPAS (IGC- USP), EESC-USP, UFPE, SGB-CPRM, Geohyd, CeRIES y BRGM (Figura 29).

La extracción de agua para abastecer a la Región Metropolitana de Recife (RMR), que forma la cuarta mayor aglomeración de población brasileña, con 3,7 millones de habitantes, ha provocado un importante descenso de los niveles potenciométricos de los acuíferos, su salinización y contaminación (HIRATA *et al.*, 2012). La degradación está relacionada con el aumento de la demanda de agua, amplificada puntualmente por los períodos de sequía, así como con el hecho de que miles de pozos tubulares no están legalizados y son explotados por usuarios privados (HIRATA *et al.*, 2012).

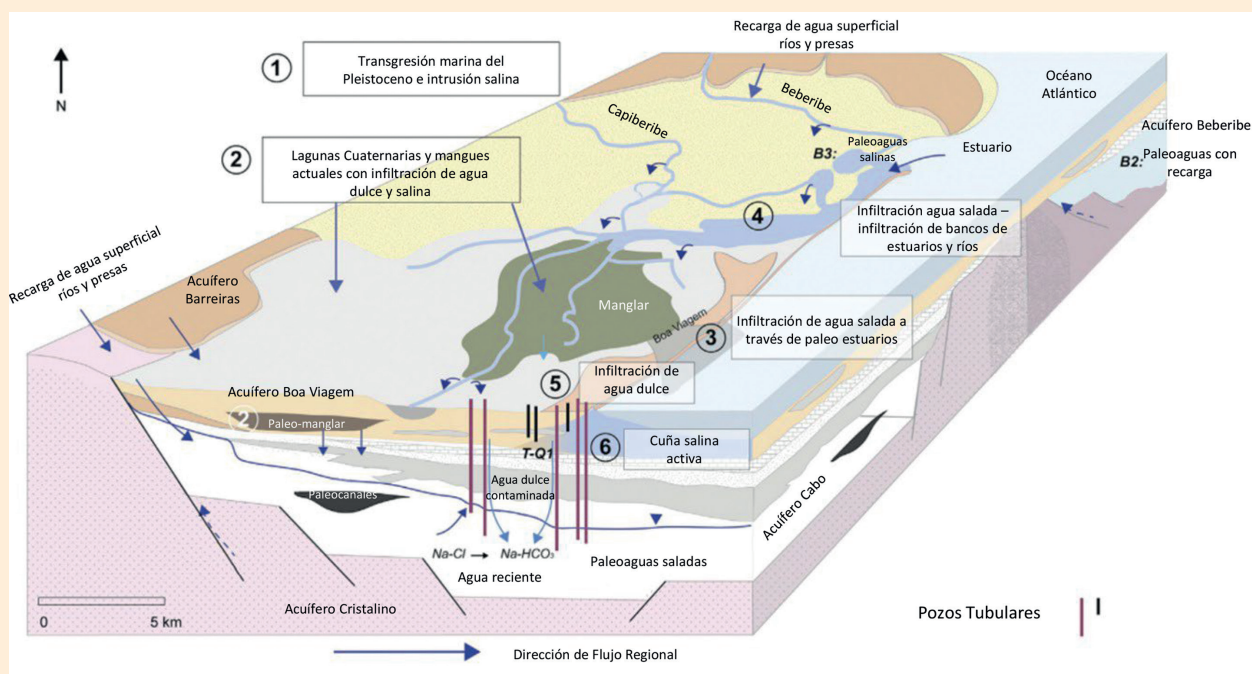


Figura 29 - Modelo conceptual de los acuíferos de la RMR y sus diferentes procesos de salinización

Fuente: Cary *et al.* (2015).

La dependencia de las aguas subterráneas en la región es conocida, con pozos perforados en el Sistema Acuífero de la Llanura de Recife (SAPRe), compuesto por Beberibe y Cabo (confinados) y Boa Viagem (freático, superpuesto a los anteriores). Desde 1970, ha habido un aumento en los niveles de sal en SAPRe (COSTA FILHO *et al.*, 1998; COSTA; COSTA FILHO; MONTEIRO, 2002; MONTENEGRO *et al.*, 2010). Los principales procesos de salinización regional (Figura 29) que se dan en la región son: *i*) transgresiones marinas pretéritas; *ii*) presencia de manglares cuaternarios donde el agua de mar y el agua dulce se evaporan y se mezclan antes de la infiltración y la interacción con las arcillas y la materia orgánica; *iii*) paleoestuarios como vías preferentes para la intrusión de agua de mar actual en el acuífero superficial; *iv*) estuario actual que favorece la mezcla de agua de mar y agua dulce y la infiltración desde las orillas del río; *v*) infiltración de agua dulce desde la superficie; y *vi*) intrusión actual de agua de mar en el acuífero superficial de Boa Viagem.

2.7.2 Contaminación del suelo y las aguas subterráneas

La contaminación del suelo y los acuíferos se produce principalmente por la eliminación incorrecta de efluentes y residuos sólidos, la manipulación y el almacenamiento de sustancias peligrosas o los accidentes. La zona no saturada representa la primera línea de defensa natural contra la contaminación y tiene cierta capacidad para atenuar y eliminar los contaminantes (FOSTER; HIRATA, 1988). A pesar de ello, varias actividades generan cargas contaminantes que superan la capacidad de retención y degradación de la zona no saturada, lo que provoca la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas. Según Foster e Hirata (1988), la contaminación puede ser:

- a) **puntual:** cuando la fuente de contaminación se limita a un área pequeña, lo que facilita su identificación, extensión y monitoreo, ya que generalmente provoca 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) **difusa o multipunto:** cuando la fuente de contaminación está repartida por el territorio y los contaminantes se liberan de forma dispersa, lo que dificulta su identificación, ya que no es posible ver plumas de contaminación bien definidos. En este caso, se encuentran en zonas agrícolas con aplicación excesiva de agroquímicos y fertilizantes, zonas urbanas con fugas en las redes de alcantarillado o que utilizan fosas rudimentarias y sépticas, entre otras.

Las fuentes potenciales de contaminación pueden estar relacionadas con las actividades de las zonas urbanas, periurbanas o rurales, incluidas las derivadas

del proceso de urbanización, la eliminación de residuos 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. Entre estas actividades, sin embargo, hay algunas que pueden causar mayores impactos o son de ocurrencia más frecuente (FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER *et al.*, 2002). Corresponde a la administración identificar, distinguir y clasificar estas actividades antrópicas, permitiendo a los organismos públicos y a la sociedad establecer sus políticas.

Hay pocas publicaciones sobre el tema, sin embargo, Foster e Hirata (1988) y Foster *et al.* (2002) señalan que las actividades contaminantes no están necesariamente vinculadas a las grandes empresas. En ocasiones, las pequeñas empresas pueden generar incluso una mayor preocupación, ya que manipulan productos peligrosos sin el control necesario, siendo responsables de grandes impactos. Es el caso del Distrito Industrial de Jurubatuba (São Paulo), recogido en la galería de casos del Capítulo 4. En esta región, una empresa de pocos centenares de metros cuadrados generó una grave contaminación al manipular sin el debido cuidado disolventes clorados (como desengrasantes para la producción de baterías). Por ello, 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, pues no hay forma 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. El nitrógeno, aunque es poco tóxico, está muy extendido, lo que lo convierte

en un reto de gestión. Está presente en los fertilizantes utilizados en la agricultura y en los efluentes domésticos que se filtran al acuífero a través de fosas sépticas o rudimentarias, y a través de las fugas de la red de alcantarillado.

Brasil presenta una situación especialmente vulnerable en cuanto a la falta de alcantarillado sanitario, ya que el 39% de las aguas residuales generadas no se recogen; el 12% van a parar a sistemas de tratamiento individual *in situ* (fosas sépticas); y el 27% se vierten mayoritariamente en el suelo a través de fosas y sumideros rudimentarios (99%) o en aguas superficiales (1%) (HIRATA *et al.*, 2019, ANA, 2017b, IBGE, 2008). En las zonas dotadas de infraestructuras de saneamiento, las redes de alcantarillado carecen de mantenimiento, lo que permite la fuga de volúmenes expresivos que pueden superar el 10% del total de las aguas residuales recogidas (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 América del Norte y Europa, que informan de numerosos casos de extensas zonas contaminadas.

Otro problema es que los pozos o captaciones se construyen sin seguir las normas técnicas, su ubicación es inadecuada (cerca de fuentes potenciales de contaminación) o no se mantienen adecuadamente, lo que puede provocar la contaminación del acuífero. La diligencia técnica evita, por ejemplo, la contaminación microbiológica, muy frecuente en los pozos instalados cerca de fosas. El pozo, por tanto, debe situarse a distancias seguras de las fuentes potencialmente contaminantes, y se recomienda la adopción de perímetros de protección del pozo, así como la realización de análisis químicos periódicos.

En Brasil, la información sobre la situación de las zonas contaminadas es escasa. En la Base de Datos Nacional sobre Áreas Contaminadas (BDNAC)⁶ sólo hay información de los estados de Minas Gerais, Río de Janeiro y São Paulo.

2.7.3 Reducción de la recarga de los acuíferos debido al cambio de uso del suelo y la ocupación de la tierra

Los cambios en los patrones de cobertura del suelo urbano y rural afectan directamente a la recarga de las aguas subterráneas al influir en la distribución de las precipitaciones, la temperatura, la escorrentía superficial, la evapotranspiración y la recarga de los acuíferos (TANG *et al.*, 2005). Las principales causas de estos cambios en la recarga de los acuíferos se correlacionan con los siguientes aspectos: *a*) sellado por superficies impermeables (JACOBSON, 2011); *b*) compactación (PITT *et al.*, 2003); y *c*) reducción de la cobertura vegetal arbórea (ANDJELKOVIC, 2001). Las zonas selladas están más presentes en las zonas urbanas e incluyen todos los espacios pavimentados y edificados que impiden la infiltración del 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 cobertura vegetal arbórea provoca 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 la alteración del suelo, y sus raíces y ecosistemas asociados contribuyen a mejorar la porosidad del suelo (ARTAXO, 2014; AZEVEDO, 2019). En las ciudades, se puede llegar a compensar la pérdida de recarga natural debido a las fugas en la red de drenaje de agua, alcantarillado y aguas pluviales (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015).

6. El BDNAC fue establecido por la Res. Conama n° 420/2009. Para obtener más información, consulte: <http://ibama.gov.br/residuos/areas-contaminadas/banco-de-dados-nacional-sobre-areas-contaminadas-bdnac>.

Box 12 – La importancia de la cobertura forestal en la recarga de los acuíferos: lecciones aprendidas en el Sistema Acuífero Alter do Chão

Júlio Henrichs de Azevedo
José Eloi Guimarães Campos

Los ecosistemas tropicales mantienen una relación con el control de las tasas de infiltración, evapotranspiración y recarga bajo diversas condiciones de lluvia en las regiones tropicales (KRISHNASWAMY *et al.*, 2013), siendo un tema que necesita ser mejor estudiado en Brasil, particularmente en la región amazónica (CARVALHO, 2012). El Bosque Tropical Húmedo, que cubre más del 80% de la formación del Acuífero Alter do Chão, ha demostrado tener un papel importante en el mantenimiento del régimen de lluvias, regulando la infiltración y manteniendo las tasas de recarga de este acuífero (CARVALHO, 2012). La pérdida de agua por evapotranspiración, que normalmente se resta del balance de la tasa de recarga de un acuífero (HEALY, 2010), acaba siendo compensada por la selva tropical, que tiene el papel de optimizar los procesos de infiltración (flujo rápido) en detrimento de la escorrentía superficial, y de mantener el régimen de lluvias.

La investigación de Azevedo, Freitas-Silva y Campos (2020) y Azevedo y Campos (2021) sobre los patrones de circulación y cuantificación de la recarga del Sistema Acuífero Alter do Chão, a partir de las mesetas lateríticas de bauxita, desarrollada en la Selva Nacional de Saracá-Taquera, en Porto Trombetas, Oriximiná/PA (Figura 30), con base en estudios potenciométricos, hidroquímicos, isotópicos, pedológicos y de geología estructural, que son herramientas bien establecidas para estudios de flujo de agua subterránea (JIE *et al.* 2011; GASTMANS; CHANG; HUTCHEON, 2010; HEALY, 2010; FEITOSA *et al.*, 2008), corrobora sustancialmente la importancia de la cobertura vegetal en el control de la recarga del Acuífero Alter do Chão.

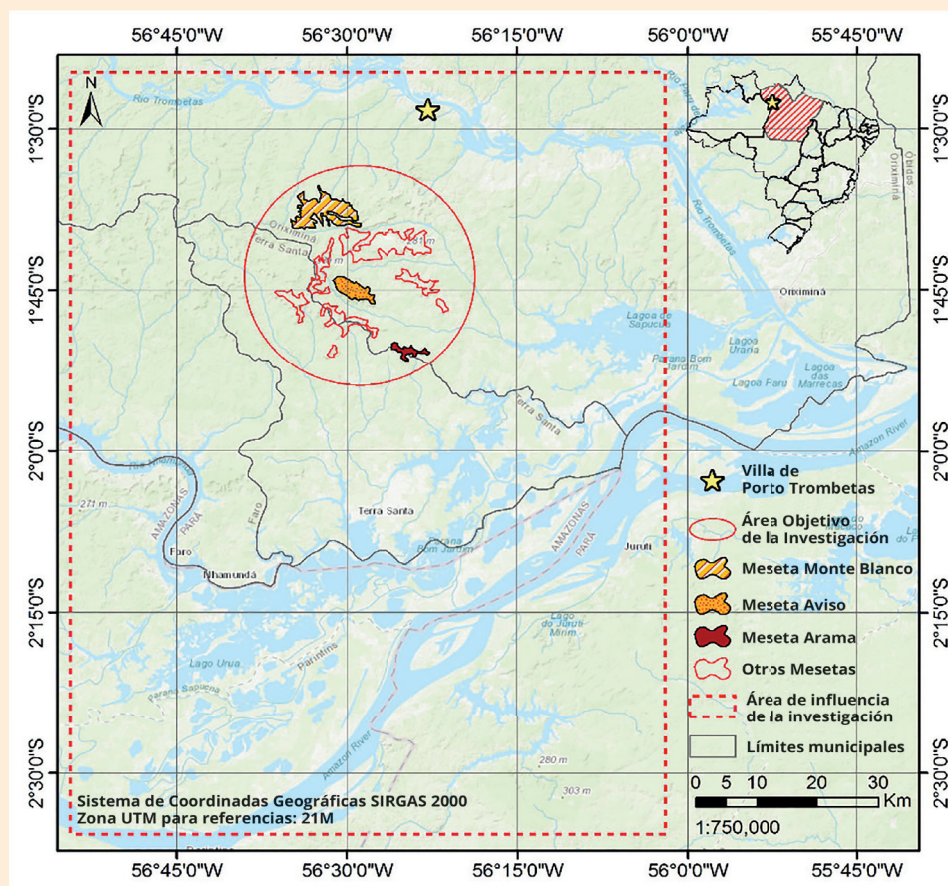


Figura 30 – Áreas estudiadas en ambientes de meseta laterítica de la Formación Alter do Chão
Fuente: Azevedo, Freitas-Silva y Campos (2020).

Las capas minerales de estas mesetas mantienen valores alternos de conductividad hidráulica, lo que, en principio, limitaría el flujo vertical del agua en el perfil y, en consecuencia, la recarga de las aguas subterráneas. Las bioturbaciones promovidas por las raíces interactúan con las capas de los perfiles lateríticos y provocan zonas de flujos preferenciales, contribuyendo a un aumento de la permeabilidad. La figura 31 muestra el efecto de bioturbación de las raíces, que pueden alcanzar hasta 15 m de profundidad. En este rango, el material geológico presenta una baja conductividad hidráulica (del orden de 10^{-7} m/s).

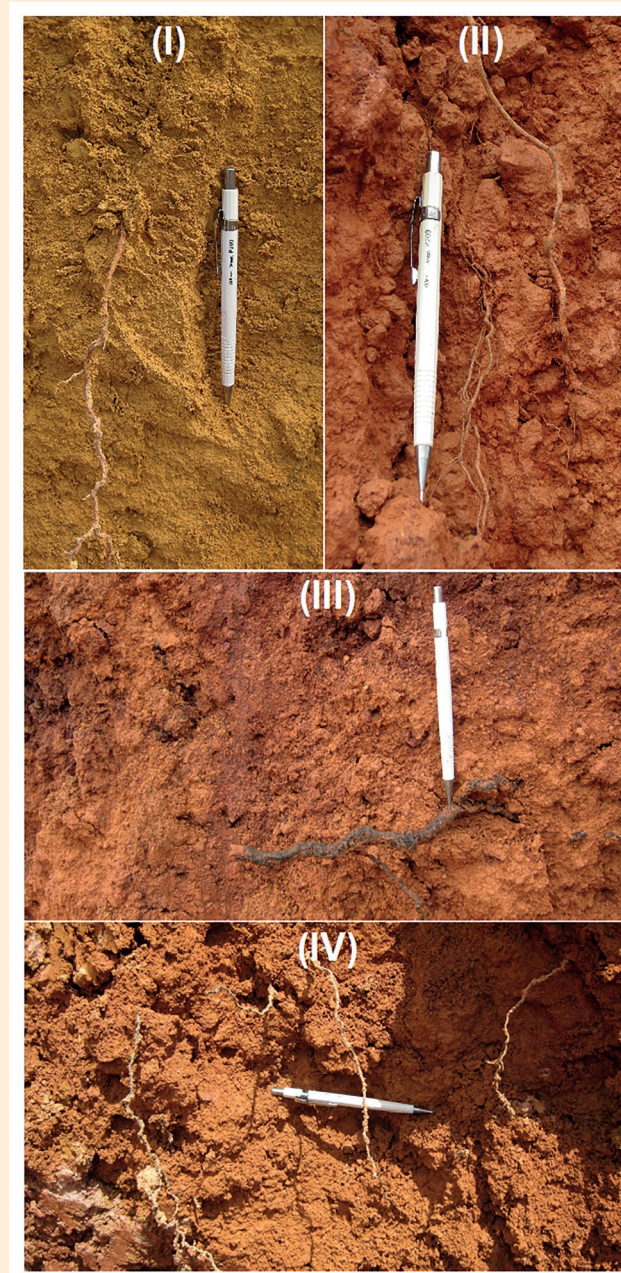


Figura 31 – Detalle de las raíces que atraviesan las diversas capas del perfil laterítico: I – Latosol Amarillo \pm 4 m; II – Nódulos de Bauxita \pm 6 m; III – Bauxita Sólida \pm 7 m; y IV – Arcilla Abigarrada \pm 15 m

Fuente: Azevedo y Campos (2021, p. 8).

La interpretación de los efectos positivos de la cobertura vegetal y su consecuente bioturbación proviene de la comparación de los niveles potenciométricos de tres áreas de investigación y con diferentes usos, a saber: *i)* área con cobertura vegetal original de Bosque Tropical Húmedo; *ii)* área deforestada con fines de actividad mineral (extracción de bauxita); y *iii)* área minera en etapa inicial de recuperación ambiental (Figura 32). La zona con cobertura vegetal original fue la que mantuvo una mayor regularidad en los niveles del acuífero (menor variación estacional) en comparación con las otras zonas. En cuanto a la tasa de recarga, no hubo diferencias significativas entre la zona con cobertura forestal original y la zona recientemente deforestada con fines mineros. Los datos, sin embargo, indican una reducción de esta tasa en casi un 50% en las zonas alteradas por más tiempo (minería). Y, a pesar de estar en el proceso inicial de recuperación ambiental (reconformación del terreno y reforestación), aún no han logrado el esperado restablecimiento de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos de la zona de la zona vadosa (GRIGG, 2016).



Figura 32 – (I) Área con cobertura vegetal original;
(II) Área deforestada para el inicio de la actividad minera de bauxita; y (III) Área en recuperación ambiental posterior a la extracción
Fuente: Azevedo (2019).

Los estudios hidrogeológicos realizados en la Selva Nacional de Saracá-Taquera contribuyen a consolidar el entendimiento de que los procesos de recarga de aguas subterráneas no dependen necesariamente de las respuestas de las propiedades físicas del ambiente subterráneo y de los patrones geomorfológicos de las condiciones climáticas, sino de las relaciones que se establecen entre los componentes ambientales de naturaleza abiótica, biótica y antrópica. La cobertura vegetal y las bioturbaciones subsuperficiales deben ser consideradas adecuadamente. La Figura 33 ilustra algunas de estas relaciones en los ambientes de meseta laterítica bauxítica desarrollados sobre la Formación Alter do Chão.

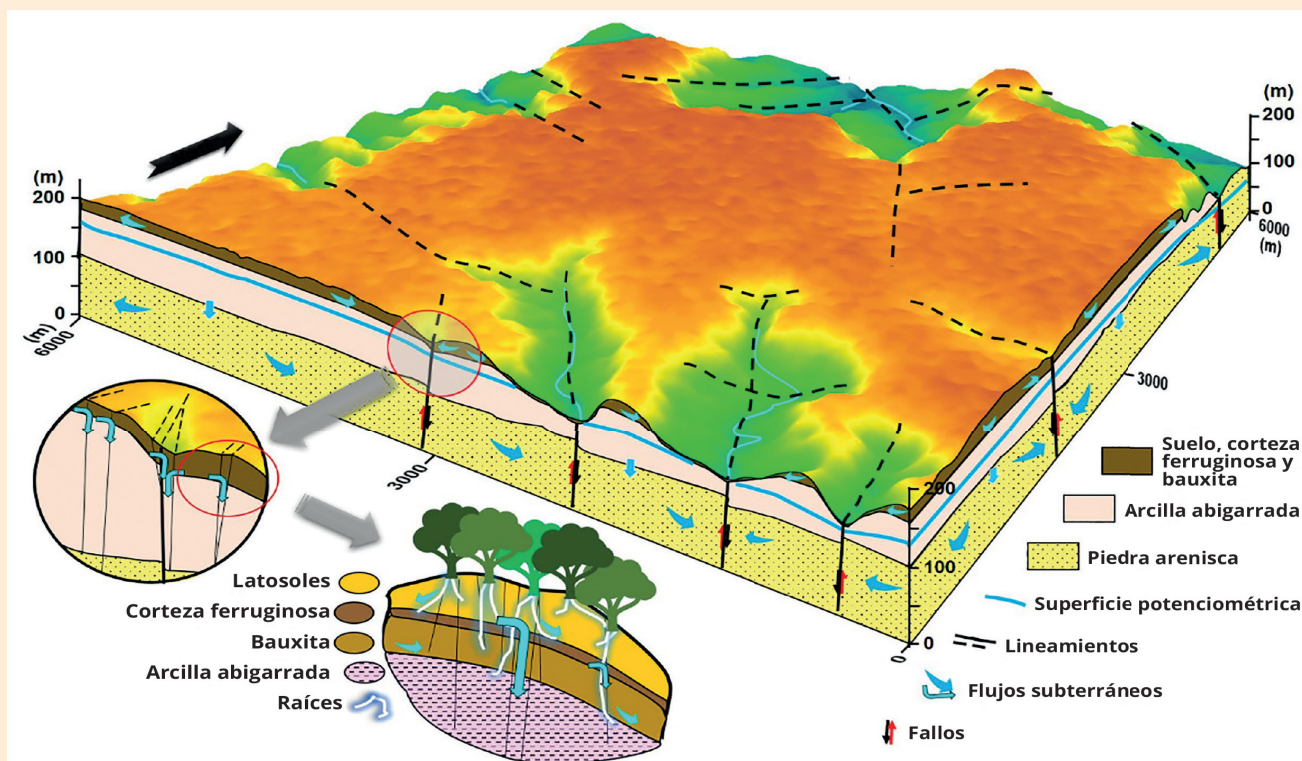


Figura 33 – Bloque-diagrama que ilustra las relaciones de los factores abióticos (suelo y geología) y bióticos (cobertura vegetal, sistemas radicales) con los efectos sobre la conexión hidráulica y los patrones de flujo subterráneo en las mesetas lateríticas de la Formação Alter do Chão

Fuente: Azevedo, Freitas-Silva y Campos (2020, p. 59).

Existen muchas lagunas en el conocimiento de los procesos de recarga en ambientes tropicales que, además de tener una notable relevancia científica, deben ser entendidas como estratégicas para el establecimiento de mejores prácticas de conservación y gestión de las zonas de recarga de acuíferos, así como para el establecimiento de mecanismos de gestión cada vez más sostenibles de las reservas hídricas subterráneas. Todo indica que la conservación de la vegetación autóctona y la recomposición de los ecosistemas modificados contribuyen a la producción de agua no sólo de los cursos de agua superficiales, sino también de los acuíferos libres o de bajo grado de confinamiento.

REFERENCIAS

- ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Gestão e gerenciamento das águas subterrâneas. **Fórum “Olhares sobre nossas águas: seus usos, qualidade, aspectos, gestão e saneamento”**. Mesa Redonda II – Qualidade das águas e a importância das águas subterrâneas para a provisão de água. Campinas, SP, 11 de maio de 2015 (Presentación oral).
- 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 Estadual de Campinas (Unicamp). Campinas, SP, 2019.
- AMINI, M.; MUELLER, K.; ABBASPOUR, K. C.; ROSENBERG, T.; AFYUNI, M.; MØLLER, K. N.; SARR, M.; JOHNSON, C. A. Statistical modeling of global geogenic fluoride contamination in groundwaters. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 1, 2008, pp. 3662-8. doi: 10.1021/es071958y.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília, 2005 (Cadernos de Recursos Hídricos). Disponível em <http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VFDisponibilidadeDemanda.pdf>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Brasília, 2007.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água – panorama nacional**. Brasília: ANA/Engenheiros/Cobrape, 2010.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Geográfico de Recursos Hídricos do Brasil**. Sistemas Aquíferos. Mapa das Áreas Aflorentes dos Aquíferos e Sistemas Aquíferos do Brasil (escala 1:1.000.000). Hidrografia. 2013. 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 Pilotos (escala 1:50.000)**. Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da PHA no Brasil, t. I, v. III, 2015. 330p.
- 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-6ffb2069e6>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e proposição de modelo de gestão integrada compartilhada: resumo executivo**. Brasília, 2017a. 100p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno**. Brasília, 2017b.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual**. Brasília, 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas Águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília, 2021. 332p., il. ISBN: 978-65-88101-19-3.
- ANDJELKOVIC, I. Guidelines on non-structural measures in urban flood management. **International Hydrological Programme (IHP)**. Paris, France: [s.n.], 2001.
- ARTAXO, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o antropoceno? **Revista USP**, v. 103, 2014.
- 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) – Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2019. 139p.
- AZEVEDO, J. H.; FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. Atividade neotectônica na região de Porto Trombetas, Pará, Brasil: evidências, cinemática e influências na hidrogeologia. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 43, n. 3, 2020, pp. 47-62.
- AZEVEDO, J. H.; CAMPOS, J. E. G. Flow patterns and aquifer recharge controls under Amazon rainforest influence: The case of the Alter do Chão aquifer system. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 112, 103596, 2021.
- BERGKAMP, G., CROSS, K. **Groundwater and Ecosystem Services: towards their sustainable use**. Switzerland: IUCN (The World Conservation Union)/ISGWAS, 2015.
- BRANNSTROM, C.; JEPSON, W.; FILIPPI, A. M.; REDO, D.; XU, Z.; GANESH, S. Land change in the Brazilian Savanna (Cerrado), 1986-2002: comparative analysis and implications for land-use policy. **Land Use Policy**, v. 25, n. 4, 2008, pp. 579-595.
- BRUNNER, P.; THERRIEN, R.; RENARD, P.; SIMMONS, C. T.; FRANSSEN, H.-J. H. Advances in understanding river-groundwater interactions. **Reviews of Geophysics**, v. 55, 2017, pp. 818-854.
- BUDDS, J.; LINTON, J.; McDONNELL, R. The hydrosocial cycle. **Geoforum**, v. 57, 2014, pp. 167-169.
- 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. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, pp. 77-91.
- CARVALHO, J. S. **Caracterização hidrogeológica da região ao norte da cidade de Manaus, com base em informações geofísicas (resistividade elétrica), geológicas e geomorfológicas**. Tesis (Doctorado en Clima y Ambiente) – Programa de Post-Graduación en Clima y Ambiente. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Universidade Estadual do Amazonas. Manaus, 2012. 157p.
- CARY, L.; PETELET-GIRAUD, E.; BERTRAND, G.; KLOPPMANN, W.; AQUILINA, L.; MARTINS, V.; HIRATA, R.; MONTENEGRO, S.; PAUWELS, H.; CHATTON, E.; FRANZEN, M.; AUROUET, A. Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): a multi-isotope approach. **Science of the Total Environment**, v. 530-531, 15 Oct. 2015, pp. 411-429.
- CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025**. Belo Horizonte, 2016.
- CHANG, H. K.; SILVA, F. P. Contribuição ao arcabouço geológico do sistema aquífero Urucua. **Revista Geociências**. São Paulo, v. 34, n. 4, 2015, pp. 872-882.

- COCKELL, C.; CORFIELD, R.; EDWARDS, N.; HARRIS, N. **Sistema Terra-Vida** – uma introdução. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 360p.
- CONSTANZA, R.; DARGE, R.; GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; ONEILL, R. V.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, v. 387, 1997, pp. 253-260.
- COSTA FILHO, W. D.; SANTIAGO, M. F.; MENDES FILHO, J.; COSTA, W. D. Concentração salina das águas subterrâneas na planície do Recife. III Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste. *Anais...*, Recife, PE, 1998, pp. 124-131.
- COSTA, W. D.; COSTA FILHO, W. D.; MONTEIRO, A. B. A sobre-exploração dos aquíferos costeiros em Recife-PE. In: BOCANEGRA, MaM (Ed.) **Groundwater and Human Development**, 2002.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, escala 1:2.500.000**. 2007. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/10323>.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa Geológico do Brasil, escala 1:1.000.000**. 2004.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. 2. ed. Barcelona: Omega, 2001. 274p.
- DARCY, H. **Les fontaines publiques de la Ville de Dijon**. Dalmont, Paris, 1856.
- DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. C.; PAULA, T. L. F. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo**. Nota técnica. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15556/1/rel_mapa_hidrogeo_brasil.pdf.
- DÖLL, P.; FLÖRKE, M. Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. **Frankfurt Hydrology**. Institute of Physical Geography, Frankfurt University. Frankfurt am Main, Germany. Paper 3, 2005.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and chemical hydrogeology**. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1990.
- EHRlich, P. R.; EHRlich, A. H. **Extinction: the causes and consequences of the disappearance of species**. New York: Random House, 1981.
- 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. 812p.
- FERNANDES, A. J.; FIUME, B.; BERTOLO, R.; HIRATA, R. C. A. Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP). **Geologia USP**, v. 16, n. 3, 2016, pp. 71-88 (Série Científica).
- FERRARI, J. A. et al. **Identificação e caracterização hidrológica da área de influência da Gruta do Éden – Pains, MG**. Relatório final. São Paulo: Instituto Geológico, 2018. 36p.
- FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst geomorphology and hydrology**. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2007. 562p.
- 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.; 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. 103p.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice Hall, 1979. 604p.
- GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 23, n. 7, 2015, pp. 1499-1513.
- GALVÃO, P.; HIRATA, R.; HALIHAN, T.; TERADA, R. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, 2017, 159p.
- GASTMANS, D.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. **Applied Geochemistry**, v. 25, n. 1, 2010, pp. 16-33.
- GOLDSHEIDER, N.; DREW, D. **Methods in karst hydrology**. London: Taylor & Francis Group, 2007.
- GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; GROOT, R.; LOMAS, P. L.; MONTES, C. The history of ecosystem services in economic theory and practice: from early notions to markets and payment schemes. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, 2010, pp. 1209-1218.
- GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Evolução da contribuição do Sistema Aquífero Urucuia para o rio São Francisco, Brasil. **Águas Subterráneas**, v. 32, n. 1, 2018. 10p.
- GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Análise hidrológica de séries históricas da Bacia do Rio Grande (BA): contribuição do Sistema Aquífero Urucuia. **Águas Subterráneas**, v. 30, n. 2, 2016, pp. 190-208. 190p. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v30i2.28514>.
- GRIEBLER, C.; AVRAMOV, M. Groundwater ecosystem services: a review. **Freshwater Science**, v. 34, n. 1, mar./2015, pp. 355-367.
- GRIGG, A. H. Hydrological response to bauxite mining and rehabilitation in the jarrah forest in southwest Australia. **Journal of Hydrology (Regional Studies)**, n. 12, 2016, pp. 150-164.
- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 738p.
- HEALY, R. W. **Estimating groundwater recharge**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010. 244p.
- HIRATA, R.; FOSTER, S.; OLIVEIRA, F. **Águas subterráneas urbanas no Brasil: avaliação para uma gestão sustentável**. São Paulo: Fapesp/IGC-USP, 2015. 111p.
- HIRATA, R.; MONTENEGRO, S.; PETELET, E.; WENDLAND, E.; MARENGO, J.; MARTINS, V.; BERTOLO, R.; CARY, L.; MEDEIROS, E.; FRANZEN, M.; PIERRE, D.; AQUILINA, L.; GIGLIO-JACQUEMONT, A.; BATISTA, J. Coqueiral: uma proposta metodológica para solucionar o problema de salinização do Sistema Aquífero da Planície do Recife (PE). XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. *Anais...* Bonito, MS, 23 a 26 de outubro de 2012.

- 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: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 2019.
- HIRATA, R.; VARNIER, C. **Águas subterrâneas e agronegócios**. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: ABAS, 1998. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22325>.
- 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 de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>.
- IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **The Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>.
- 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.
- JIE, Z.; BENDEL, D.; BARTHEL, R.; HEYDEN, J. Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge Calculations. **Hydrogeology Journal**, n. 19, 2011, pp. 1487-1502.
- KALBUS, E.; REINSTORF, F.; SCHIRMER, M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 10, n. 6, 2006, pp. 873-887.
- KRESIC, N. **Hydrogeology and Groundwater Modelling**. 2. ed. Flórida, EUA: CRC, 2006.
- KRISHNASWAMY, M.; BONELL, B.; VENKATESH, B. K.; PURANDARA, K. N.; RAKESH, S.; LELE, M. C.; KIRAN, V.; REDDY, S.; BADIGER. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”. **Journal of Hydrology**, n. 498, 2013, pp. 191-209.
- KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. **Analysis and evaluation of pumping test data**. 2nd ed. Wageningen, The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement, publication 47, 1994. 370p.
- KUNDZEWICZ, Z. W. et al. Freshwater resources and their management. **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). PARRY, M.L. (Eds.). Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press, 2007, pp. 173-210.
- LINTON, J.; BUDDS, J. The hydrosocial cycle: defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. **Geoforum**, v. 57, 2014, pp. 170-180.
- 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.
- MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas**. Jundiaí, SP: Paco, 2015.
- MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Revista Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, 2008.
- MEA. Avaliação Ecosistêmica do Milênio. **Ecosistemas e bem-estar humano: estrutura para uma avaliação** (Resumo). 2005. Disponível em: <https://www.Millenniumassessment.Org/Documents/Document.63.Aspix.pdf>.
- MELO, D. C. D. **Estimativa de impacto de mudanças climáticas nos níveis do Sistema Aquífero do Guarani**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2013.
- MENTE, A. A água subterrânea no Brasil. 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. 31-48.
- MENTE, A.; PESSOA, M. D.; LEAL, O. **Projeto Mapa Hidrológico do Brasil na escala de 1:2.500.000**. Relatório final. CPRM. Superintendência Regional de Recife, v. II, 1981. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/6688>.
- MONTENEGRO, S.; PAIVA, A.; CABRAL, J.; CAVALCANTI, G.; SCALIA, E. **Investigation of Seawater Intrusion in Recife Coastal Plain (Pernambuco, Brazil)**. 21st SWIM Conference. Açores, 2010, pp. 254-257.
- NOBRE, A. D. **O futuro climático da Amazônia**. São José dos Campos, SP: ARA/INPE/ INPA, 2014.
- 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.
- PALMER, A. N. **Cave geology**. Dayton, OH: Cave Books, 2007. 288p.
- PARKER, B. L.; BAIROS, K.; MALDANER, C. H.; CHAPMAN, S. W.; TURNER, C. M.; BURNS, L. S.; CHERRY, J. A. Metolachlor dense non-aqueous phase liquid source conditions and plume attenuation in a dolostone water supply aquifer. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 479, n. 1, 2018, pp. 207-236.
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudança Climática. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas.
- ASSAD, E.D.; MAGALHÃES, A. R. (Eds.). COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.
- PESSOA, D. M.; MENTE, A.; LEAL, O. Províncias Hidrogeológicas adotadas para o Mapa Hidrogeológico do Brasil na escala 1:2.500.000. 1º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais...** Recife, nov. 1980. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23940>.
- PITT, R. et al. **Infiltration through compacted urban soils and effects on biofiltration design**. [S.l.: s.n.], v. 6062, 2003.
- 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, 136p. ISBN: 978-1-7770541-1-3.

- RAVENSCROFT, P.; BRAMMER, H.; RICHARDS, K. S. **Arsenic pollution: a global synthesis**. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2009. 579p.
- RODELL, M.; BEAUDOING, H. K.; L'ECUYER, T. S.; OLSON, W. S.; FAMIGLIETTI, J. S.; HOUSER, P. R.; ADLER, R.; BOSILOVICH, M. G.; CLAYSON, C. A.; CHAMBERS, D.; CLARCK, E.; FETZER, E. J.; GAO, X.; GU, J. G.; HILBURN, K.; HUFFMAN, G. J.; LETTENMAIER, D. P.; LIU, W. T.; ROBERTSON, F. R.; SCHLOSSER, I. C. A.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. The Observed state of the water cycle in the early twenty-first century. **Journal of Climate**. American Meteorological Society, 2015. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00555.1.
- ROULEAU, A.; DENIS, C.; COUSINEAU, P.; LAPCEVIC, P. The estimation of hydraulic parameters of a fractured orthoquartzite formation at the laboratory and field scales. In: AUBERTIN, M.; HASSANI, F.; MITRI, H. (Eds.). **Rock mechanics: tools and techniques** Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium. Montreal: A.A. Balkema, 1996, pp. 1359-1366.
- RYAN, M.; MEIMAN, J. An examination of short-term variation in water quality at the karst spring in Kentucky. **Ground Water**, v. 34, n. 1, 1996, pp. 23-30.
- SHAPIRO, A. M.; HSIEH, P. A.; BURTON, W. C.; WALSH, G. J. Integrated multi-scale characterization of ground-water flow and chemical transport in fractured crystalline rock at the Mirror Lake Site, New Hampshire. **Geophysical Monograph-American Geophysical Union**, v. 171, 2007.
- 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.
- SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. **Applied hydrogeology of fractured rocks**. Springer Science & Business Media, 2010.
- SMERDON, B. D. A synopsis of climate change effects on groundwater recharge. **Journal of Hydrology**, v. 555, 2017, pp. 125-128.
- 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.
- TEIXEIRA, F. **Água subterrânea e a convivência com o semiárido**. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2018 (Apresentação oral). Disponível em: http://www.abas.org/xxcabas/apresentacoes/t2_16-30_francisco-teixeira.pdf.
- TÓTH, J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, 1963, pp. 4795-4812.
- USGS. United States Geological Survey. **O ciclo d'água**. The water cycle. Portuguese. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/o-ciclo-d-gua-water-cycle-portuguese>.
- WAHNFRIED, I. D.; SOARES, E. A. A. Água subterrânea na Amazônia: importância, estado atual do conhecimento e estratégias de pesquisa. **Ciência e Ambiente**, n. 44, 2012, pp. 29-40.
- WHITE, W. B. Conceptual models for karstic aquifers. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 1, n. 1, jan. 2003.
- WILKINSON, B. H.; MCELROY, B. J.; KESLER, S. E.; PETERS, S. E.; ROTHMAN, E. D. Global geologic maps are tectonic speedometers – Rates of rock cycling from area-age frequencies. **Geological Society of America Bulletin**, v. 121, n. 5-6, 2009, pp. 760-779. Disponível em: http://strata.geology.wisc.edu/reprints/Wilkinson_et al2009.pdf. doi:10.1130/B26457.1.
- WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. **Groundwater and surface water: a single resource**. Denver, Colorado: US Geological Survey Circular, v. 1139, 1999. 79p.
- WOESSNER, W. W. **Groundwater-Surface Water Exchange**. Ontario, Canada: The Groundwater Project, 2020. 136p.



Río Roda Velha formado por manantiales del Acuífero
Urucuia, São Desidério (BA)

Foto: Vagney A. Augusto / Banco de imágenes ANA

CAPÍTULO 3

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

3.1 PLANES DE RECURSOS HÍDRICOS

Los planes de recursos hídricos fueron previstos por la Ley nº 9.433/1997, y constituyen el principal instrumento para la “construcción de consenso en la cuenca hidrográfica” (PORTO; PORTO, 2008, p. 51). La aplicación de estos planes va más allá de la planificación tradicional, ya que su construcción se realiza a través de procesos participativos que reúnen a autoridades públicas, sociedad civil y agentes económicos (PORTO; PORTO, 2008). Por lo tanto, la ley los define como “planes maestros que tienen por objeto fundamentar y orientar la aplicación de la Política Nacional de Recursos Hídricos y la ordenación de los recursos hídricos” (art. 6º de la Ley nº 9.433/1997).

Su aplicación se da en tres escalas de acción: nacional, estatal y de cuenca hidrográfica (art. 8º de la Ley nº 9.433/1997). Así, contamos con: a) el Plan Nacional de Recursos Hídricos; b) los Planes Estatales de Recursos Hídricos; y c) los Planes de Cuencas Hidrográficas, los cuales se subdividen en dos categorías, según el tipo de cuenca (estatal e interestatal): Planes de Cuenca Hidrográfica bajo dominio estatal y Planes de Cuenca Hidrográfica de Ríos bajo dominio federal (LANNA; PEREIRA; HUBERT, 2002). Cada uno de estos planes incorpora los acuíferos correlacionados con la cuenca hidrográfica respectiva. La Figura 34 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.

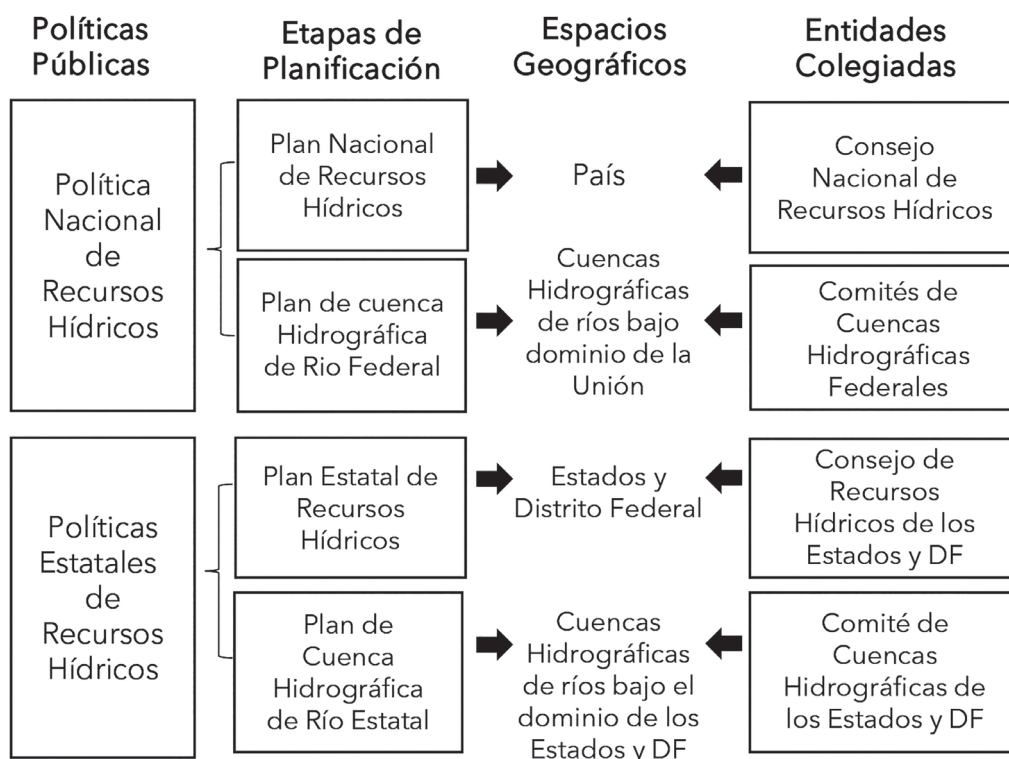


Figura 34 – Políticas públicas, tipos de planes, áreas geográficas y entidades coordinadores del proceso de planificación de los recursos hídricos en Brasil

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

En la misma cuenca hidrográfica pueden coexistir varias escalas de planes de recursos hídricos, como el caso de la Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco (BHRSF). El Plan Nacional de Recursos Hídricos y los Planes Estatales de Recursos Hídricos, respectivamente, traen pautas específicas para la cuenca interestatal y las subcuencas estatales del Río São Francisco. Estos lineamientos deben ser observados por los planes de recursos hídricos de la cuenca hidrográfica interestatal y por las unidades estatales de manejo de recursos hídricos. La BHRSF está bajo la supervisión del Comité de Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco (federal) y la Agencia Peixe Vivo, que elaboran el Plan de Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica del Río São Francisco 2016 a 2025¹. Paralelamente, operan CCH estatales, compuestos por subcuencas de la BHRSE, como el CCH Velhas, que fue instituido por el estado de Minas Gerais y organizó el Plan Maestro de Recursos Hídricos de la Cuenca del Río das Velhas².

3.1.1 Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH)

El primer Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) fue aprobado en 2006 por la 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 Res. CNRH n° 216, de 11 de septiembre de 2020, pospuso la vigencia de este último ciclo de implementación hasta diciembre de 2021.

La Secretaría Nacional de Seguridad Hídrica (SNSH), vinculada al MDR, con el apoyo técnico de la ANA y en conjunto con la CNRH, ha discutido el nuevo Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH 2022-2040), cuya función es orientar la elaboración de los Planes Plurianuales (PPA) federales, estatales o distritales y sus respectivos presupuestos anuales. La estructura del PNRH 2006-2020 consta de cuatro volúmenes: *i*) Panorama y estado de los Recursos Hídricos del Brasil (v. 1), que trata del diagnóstico del agua; *ii*) Agua 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° 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 y el análisis del Sistema de Cuentas Económicas Ambientales del Agua. Este informe resume los principales datos sobre el agua en el país, sin embargo, la disponibilidad de información sobre las aguas subterráneas se reduce en comparación con las aguas superficiales.

PNRH 2006-2020 tiene varios programas y subprogramas que se detallan en su volumen 4. En total, se prevén siete programas nacionales y seis regionales. Los programas nacionales son los siguientes: 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 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; y Programa VII – Programas Sectoriales enfocados en Recursos Hídricos. Las aguas subterráneas se incluyen en los subprogramas y acciones prioritarias de estos programas, además de formar parte del Programa Nacional de Aguas Subterráneas (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 Jurídicos; y *iii*) Capacitación, Comunicación y Movilización Social (CARDOSO, 2009).

El Cuadro 4 muestra las acciones consideradas prioritarias para cada región hidrográfica.

1. El plan está disponible en: <https://cbhsaofrancisco.org.br/plano-de-recursos-hidricos-da-bacia-hidrografica-do-rio-sao-francisco/>.

2. El plan está disponible en: <https://cbhvelhas.org.br/plano-director-cbh-velhas/>.

Región Hidrográfica y Estados	Acciones prioritarias para las Regiones Hidrográficas previstas en el Programa de Aguas Subterráneas
Región Hidrográfica del Uruguay (RS y SC)	<ul style="list-style-type: none"> – Aplicación de los Planes de Cuenca, clasificación y cobro; – programas de revitalización de las cuencas y de conservación del suelo; – red de monitoreo hidrometeorológico; – registro de usuarios.
Región Hidrográfica de Tocantins – Araguaia (GO, MT, TO, MA, PA y DF)	<ul style="list-style-type: none"> – Implementación/incremento de Siagas en los estados; – Programa de gestión de AS para los acuíferos transfronterizos; – ampliación y consolidación de la red de monitoreo de los AS; – criterios para la concesión de aguas subterráneas; – la aplicación y difusión de Rimas y la ampliación de la red de monitoreo de calidad y cantidad del AS; – el registro de los usuarios de AS; – elaboración y difusión de mapas hidrogeológicos estatales; – el establecimiento de convenios y términos de cooperación técnica; – proyectos de protección de las zonas de recarga de acuíferos; – revisión de la política relativa al agua mineral y los recursos hídricos; – desarrollo de estudios sobre aguas termales.
Región Hidrográfica de Paraguay (MT y MS)	<ul style="list-style-type: none"> – Ampliación de la red de monitoreo de la calidad de las AS; – elaboración de mapas hidrogeológicos; – establecimiento de un convenio y de un término de cooperación; – proyectos de protección de las zonas de recarga de acuíferos; – registro de los usuarios de las aguas subterráneas; – desarrollo del inventario de AS; – normalización de las normas de gestión de las aguas subterráneas; – aplicación de la concesión para las aguas subterráneas; – estudios de AS, priorizando el acuífero pantanal; – campañas para la adecuación técnica de los trabajos de captación de AS.
Región Hidrográfica del Atlántico Oriental (AL, CE, PB, PE y RN)	<ul style="list-style-type: none"> – Fomentar la elaboración de legislación específica de las AS; – evaluación de las reservas, el potencial y la disponibilidad de las AS; – el seguimiento de AS y de sus áreas de protección; – estudios de vulnerabilidad de los acuíferos; – desarrollo de tecnologías de desalinización de AS; – capacitación de personal para la gestión de las obras hídricas subterráneas; – promoción de la gestión compartida de los acuíferos; – estudios de la capacidad de soporte (cantidad y calidad) de las AS; – articulación de la gestión hídrica con los planes de uso ocupación del suelo; – regulación del uso del agua en la agricultura, la ganadería y la cría de camarones.
Región Hidrográfica del Atlántico Sudeste (ES, RJ, SP, MG y PR)	<ul style="list-style-type: none"> – Desarrollo de estudios para la implementación de la red de monitoreo de aguas subterráneas en la cuenca de Ribeira.
Región Hidrográfica del Atlántico Sur (SC, RS, PR y SP)	<ul style="list-style-type: none"> – Ejecución de los planes, programas y acciones propuestos en el Proyecto Acuífero Guaraní; – zonificación del uso de la tierra y evaluación de su interferencia en los principales acuíferos (Serra Geral, Alto Tietê, Guaraní y sedimentarios costeros); – puesta en marcha de una red de monitoreo estatal; – sistemas de información para manantiales subterráneos.
Región Hidrográfica Amazónica (AC, AM, AP, MT, PA, RO y RR)	<ul style="list-style-type: none"> – Implantación y ampliación de la red integrada de vigilancia de AS; – directrices y medidas contra la sobreexplotación y la contaminación de AS; – elaboración de mapas hidrogeológicos estatales; – el establecimiento de convenios y términos de cooperación técnica; – promoción de programas de capacitación para perforadores de pozos poco profundos.

Región Hidrográfica y Estados	Acciones prioritarias para las Regiones Hidrográficas previstas en el Programa de Aguas Subterráneas
Región Hidrográfica del Atlántico Este (BA, SE, MG y ES)	<ul style="list-style-type: none"> – Registro de pozos e integración de bases de datos; – realización y ampliación de estudios hidrogeológicos; – Estudios de disponibilidad de AS; – creación de redes de monitoreo de AS y el fortalecimiento de la fiscalización; – identificación, mapeado y difusión de las fuentes de degradación de las AS; – estrategias para el uso sostenible de las AS; – creación de sistemas de apoyo a la toma de decisiones para contribuir a la planificación y gestión de AS. – capacitación de profesionales en el área de perforación y operacionalización de pozos tubulares profundos y medición de caudales de arroyos y ríos; – fortalecimiento de la gestión de AS; – la supervisión de los pozos y la realización de campañas de educación y sensibilización.
Región Hidrográfica del Atlántico Occidental (MA y PA)	<ul style="list-style-type: none"> – Intercambio con países con experiencia en la gestión de AS; – directrices para la regulación y definición de las zonas de recarga; – estudios de viabilidad para la implantación de cobro de AS; – programas de capacitación en el uso, conservación y gestión de AS.
Región Hidrográfica de Paraná (DF, GO, MG, MS, PR, SC y SP)	<ul style="list-style-type: none"> – Directrices y medidas contra la sobreexplotación y la contaminación de las AS; – zonificación de las posibles zonas de restricción y control de AS; – Red de monitoreo de AS y su articulación con los estados; – expansión del conocimiento hidrogeológico: a) acuíferos transfronterizos e interestatales; b) estudios a escala local; y c) monitoreo cualitativo y cuantitativo de las aguas subterráneas.
Región Hidrográfica del São Francisco (AL, BA, DF, GO, MG, PE y SE)	<ul style="list-style-type: none"> – C) Estudios sobre el potencial, la disponibilidad, la demanda y la vulnerabilidad de los acuíferos; – base de datos de pozos; – ampliación de la red de monitoreo cualitativo y cuantitativo de las AS; – preparación del Atlas de las AS de la cuenca del río São Francisco; – creación de un sistema de apoyo a la toma de decisiones para contribuir a la gestión de las AS; – registro de usuarios; – estudios para la recuperación y rehabilitación de acuíferos; – estudios para definir criterios para la recarga artificial de acuíferos; – clasificación de las AS en clases de uso; – capacitación del personal encargado de la gestión, el monitoreo y la supervisión de las AS; – estudios de viabilidad para la aplicación del cobro por el uso de AS; – definición de los perímetros de protección de la recarga; – estudios para definir las distancias de interferencia entre los pozos.
Región Hidrográfica de Parnaíba (MA, PI y CE)	<ul style="list-style-type: none"> – Programas destinados a la utilización y el conocimiento de las reservas explotables; – programa para el control y la utilización racional de las AS y la protección de las zonas de recarga; – estudios para la protección y la explotación sostenible de los acuíferos.

Cuadro 4 – Acciones prioritarias para las regiones hidrográficas previstas en el Programa Nacional de Aguas Subterráneas

Fuente: BRASIL (2011, p. 58 a 120).

Estas acciones se encuentran entre las prioridades y metas previstas por el PNRH 2006-2020, relacionadas con las aguas subterráneas, que actúan tanto en los escenarios nacionales y regionales como en cuencas específicas. Se recomienda que varias de estas acciones continúen en PNRH 2022-2040. La expansión de la Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (RIMAS) en un 100% fue uno de los objetivos nacionales, pero no se logró por limitaciones presupuestarias. A pesar de ello, la Red se amplió de 369 a 409 pozos (MDR, s.d.). Parte de estos pozos de monitoreo comenzaron a ser operados conjuntamente entre el SGB-CPRM y la ANA, con la inclusión de estos datos piezométricos en la Red Hidrometeorológica Nacional (RHN), lo que

contribuyó 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.

La elaboración de estudios sobre los acuíferos de la Región Amazónica fue una de las metas regionales alcanzadas y que dio lugar a la ejecución del proyecto *Evaluación de los Acuíferos de las Cuenas Sedimentarias de la Provincia Hidrogeológica Amazónica en Brasil (Escala 1:1.000.000) y Ciudades Piloto (Escala 1:50.000)* (ANA, 2015). Ejemplos de iniciativas en las cuencas federales son la implementación de los *Estudios para la Implementación de la Gestión Integrada de Aguas Superficiales y Subterráneas en la Cuenca del Río*

São Francisco: Subcuenas de los ríos Verde Grande y Carinhanha (BA/MG), programado para terminar a mediados de 2023, en una asociación entre ANA y SGB-CPRM. También cabe mencionar la recolección de datos técnicos sobre aguas subterráneas en las cuencas de los ríos Verde Grande y Paranapanema, ejecutada por ANA (MDR, s.d.).

3.1.2 Plan Estatal de Recursos Hídricos (PERH)

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 de propiedad estatal. Su principal objetivo es orientar la gestión del agua a través de lineamientos y criterios a escala estatal, con el fin de contemplar las necesidades expresadas en los planes de cuenca. Su elaboración, actualización e implementación son responsabilidad de los órganos que integran los Sistemas Estatales de Gestión de Recursos Hídricos, según lo dispuesto por la legislación estatal.

Cada estado, con base en su Política Estatal de Recursos Hídricos, establece los lineamientos y criterios para la elaboración de PERH, abarcando los siguientes aspectos:

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

Debido al dominio estatal de las aguas subterráneas, los PERH son piezas clave para estimular la gestión de los acuíferos. Entre la información a ser cubierta por este instrumento se encuentran: datos sobre la disponibilidad, demanda y calidad de las aguas subterráneas; propuesta de áreas para la explotación de estas aguas o medidas de protección, tales como áreas de restricción al uso de

aguas subterráneas; identificación de puntos prioritarios para su monitoreo; estimulación de mecanismos de coordinación entre CCHs que comparten el mismo acuífero; definición de programas estatales específicos para aguas subterráneas, etc. (VILLAR; HIRATA, 2022).

3.1.3 Planes de Recursos Hídricos de Cuencas Hidrográficas

Como su nombre indica, este instrumento tiene la cuenca hidrográfica como unidad territorial. 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*, cuyo nombre se hizo común a partir de la implementación de las Políticas Estatales de Recursos Hídricos (PERH) que comenzaron en 1991 (SÃO PAULO, 1991), y la edición de la Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

El Plan de Recursos Hídricos de Cuencas Hidrográficas se define así en el art. 2º de la Resolución n° 145, de 12 de diciembre de 2012:

[...] instrumentos de gestión de 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 como objetivo 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.

El documento establece la planificación estratégica de la gestión del agua, con disposiciones legales y reglamentarias sustentadas en la Ley n° 9.433/1997 y en varias Resoluciones de la CNRH, especialmente en los artículos 10 a 13 de la Res. CNRH n° 145/2012, que establecen sus etapas y contenido mínimo: *i) Diagnóstico de Situación de los Recursos Hídricos; ii) Pronóstico; y iii) Plan de Acción* (Figura 35). Los planes de cuenca deben incluir las directrices de otros planes de recursos hídricos (nacionales, estatales u otros planes de cuenca que puedan superponerse).

El Plan de Recursos Hídricos de Cuencas hidrográficas debe contener el programa de acción plurianual, cuyo periodo es normalmente de 12 años. El documento establece el programa de inversión (corto, mediano y largo plazo), y contiene: nombre de la acción planificada; líneas programáticas del colegiado gestor; meta establecida; plazo (año) de ejecución; área de

cobertura de la acción; prioridad de ejecución; pronóstico de responsable de la ejecución; ejecutor de la acción; costo estimado de la acción; y fuentes de los recursos financieros necesarios.

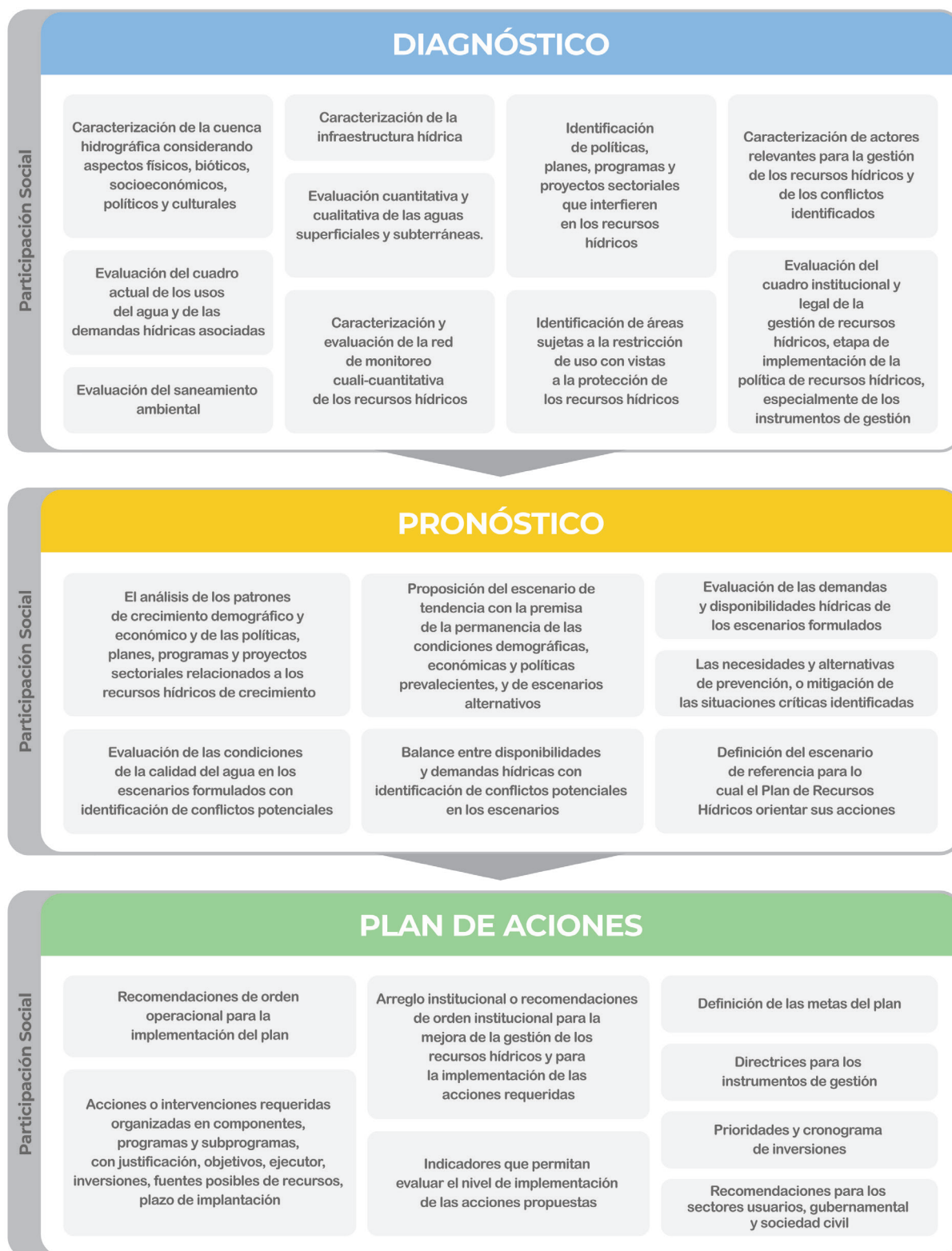


Figura 35 – Directrices para la elaboración de Planes de Recursos Hídricos de Cuencas Hidrográficas

Fuente: CNRH (Res. n° 145/2012).

3.1.4 Contenidos de los Planes Hídricos de Cuencas Hidrográficas

La hoja de ruta metodológica para la elaboración de un Plan de Recursos Hídricos se basa en la definición del método de trabajo, actividades, resultados y productos a generar. Estos puntos se incluyen en un *Término de Referencia*, definido a partir de la articulación entre la entidad de gestión de recursos hídricos y el Comité de Cuenca Hidrográfica (CCH), de acuerdo con las especificidades de la cuenca. Dichos productos se preparan secuencialmente, de acuerdo con las etapas de *diagnóstico*, *pronóstico* y *plan de acción*. Cada una de estas etapas debe contemplar los contenidos presentados en la Figura 35, estableciendo metas (corto, mediano y largo plazo) y acciones para su implementación, según lo recomendado por la Res. CNRH n° 145/2012.

La etapa de *Diagnóstico* caracteriza la situación de los recursos hídricos, basándose principalmente en los datos e información disponibles (datos secundarios), sin perjuicio de la posibilidad de utilizar datos primarios (ver art. 11 de la Res. CNRH n° 145/2012). Es importante aclarar que la Res. CNRH n° 145/2012 presenta la estructura mínima de los planes, sin embargo, dentro del ámbito de competencia concurrente y común, los estados pueden incorporar elementos adicionales, como en el caso del estado de São Paulo. El diagnóstico establece el marco general de referencia de la unidad de estudio y constituye la base para identificar aspectos críticos para la gestión, así como subsidiar el desarrollo de actividades posteriores.

El art. 12 de la Res. CNRH N° 145/2012 define el contenido mínimo de la etapa de *Pronóstico*, que comprende la caracterización de escenarios a construir en función de aspectos vinculados, directa e indirectamente, a la situación de los recursos hídricos, según los horizontes de planificación adoptados (Figura 35). Así, es posible priorizar intervenciones para mejorar las condiciones de los recursos hídricos.

Finalmente, está el *Plan de Acciones* que, según el art. 13 de la Res. CNRH n° 145/2012, tiene como objetivo “mitigar, minimizar y anticipar los problemas relacionados con los recursos hídricos superficiales y subterráneos”, con el fin de cumplir con los lineamientos y principios, así como alcanzar los objetivos establecidos en la Política Nacional de Recursos Hídricos.

3.1.4.1 Diagnóstico y Pronóstico de un plan de Cuenca en el Estado de São Paulo

Los Estados pueden regular el contenido de sus planes de cuenca hidrográfica siempre que cumplan con las directrices nacionales, e incluso pueden establecer requisitos adicionales debido a la realidad regional. En el caso del estado de São Paulo, el Consejo Estatal de Recursos Hídricos (CRH) emitió la Resolución CRH n° 146/2012, que establece las orientaciones para la elaboración de planes de cuencas hidrográficas, determinando el contenido mínimo de las etapas de *Diagnóstico* y *Pronóstico*. El *Diagnóstico* debe contener al menos los siguientes temas:

- Caracterización General de la Cuenca
- Caracterización física
- Disponibilidad de recursos hídricos
- Demandas de recursos hídricos
- Balance: Demanda *versus* Disponibilidad
- Calidad de las aguas
- Saneamiento
- Suministro de agua potable
- Alcantarillado sanitario
- Gestión de residuos sólidos
- Drenaje y Gestión de Aguas Pluviales
- Gestión del Territorio y Áreas Sujetas a Gestión Especial
- Uso y ocupación del suelo
- Áreas de Vegetación Natural y Protegidas
- Áreas susceptibles a la erosión, quebradas, escurrimientos y sedimentación.
- Áreas susceptibles de inundación, anegación o desbordamiento
- Contaminación ambiental
- Evaluación del Plan de Cuenca Hidrográfica
- Síntesis del Diagnóstico

En el contenido propuesto por el CRH, se incluyeron aspectos orientados a evaluar el Plan de Cuenca hidrográfica existente y su implementación por parte de la unidad de manejo hidrológico, así como una síntesis del diagnóstico realizado. Estos elementos son

importantes para fundamentar el marco de planificación actual y su implementación en la unidad de gestión, lo que permite revisiones, reorientaciones y mejoras de la planificación con objetivo a dar seguimiento a las acciones a desarrollar posteriormente

La Resolución CRH n° 146/2012 también establece procedimientos detallados para la etapa de *Pronóstico*. El objetivo es establecer el estado del arte del conocimiento sobre los instrumentos de planificación existentes e implementados (planes, programas, proyectos, acciones y empresas, etc.), directa e indirectamente vinculados a aspectos de interés para la gestión y manejo de los recursos hídricos (superficiales, subterráneos o costeros), en las tres esferas de gobierno (federal, estatal y municipal). También de acuerdo con la Resolución CRH n° 146/2012, la etapa de *Pronóstico* debe contener al menos los siguientes temas:

- I. Planes, Programas, Proyectos y Emprendimientos con Incidencia en la UGRHI
- II. Escenario de planificación:
 - 1 Dinámica socioeconómica
 - 2 Demandas de recursos hídricos
 - 3 Disponibilidad de recursos hídricos
 - 4 Balance: demanda *versus* disponibilidad
 - 5 Calidad del agua
 - 6 Saneamiento:
 - 6.1 Suministro de agua potable
 - 6.2 Alcantarillado sanitario
 - 6.3 Gestión de residuos sólidos
 - 6.4 Drenaje y gestión del aguas pluviales urbanas
- III. Gestión de los Recursos Hídricos de la UGRHI:
 - 1 Legislación relativa a los recursos hídricos
 - 2 Concesión del uso de los recursos hídricos
 - 3 Licencias ambientales
 - 4 Cobro por el uso de los recursos hídricos
 - 5 Estructura de los cuerpos de agua
 - 6 Monitoreo cualitativo de los recursos hídricos
 - 7 Sistema de información sobre recursos hídricos

IV. Áreas críticas y prioridades para la gestión de los Recursos Hídricos:

- 1 Delimitación de áreas críticas para la gestión de los recursos hídricos
- 2 Establecimiento de prioridades a la gestión de los recursos hídricos

V. Propuestas de Intervención en Gestión de Recursos Hídricos de la UGRHI

Las etapas de *Diagnóstico* y *Pronóstico* permiten la construcción de escenarios y la identificación de áreas críticas para la gestión de los recursos hídricos, así como mejorar la sinergia de acciones, independientemente de la responsabilidad de ejecución, con el fin de integrar un plan de acción para la unidad hidrológica.

3.1.5 Contenido mínimo sobre las aguas subterráneas en los planes de recursos hídricos

Las Resoluciones CNRH n° 15/2001, 22/2002, 92/2008, 145/2012 y 202/2018 establecen las directrices para la inclusión de las aguas subterráneas en los Planes de Recursos Hídricos de las Cuencas Hidrográficas. La Figura 36 muestra el contenido mínimo que debe incluirse en los planes de cuenca en relación con las aguas subterráneas.

El plan de recursos hídricos debe adoptar una visión holística que integre las aguas subterráneas, las aguas superficiales y las aguas atmosféricas. La inclusión de las aguas subterráneas en este instrumento requiere procedimientos metodológicos que promuevan el conocimiento y la caracterización de aspectos físicos (naturaleza del entorno, arquitectura de las unidades componentes, distribución espacial, interconexiones hidráulicas entre unidades adyacentes, patrones de flujo, parametrización hidrodinámica, reservas, entre otros); propiedades químicas (calidad del agua, contaminación, vulnerabilidad a la contaminación, entre otros); y aspectos socioambientales regionales (demanda, tipos de uso, ocupación del suelo, marcos regulatorios, entre otros). Además, deben establecer directrices para su gestión integrada, teniendo en cuenta la dimensión ambiental y social del agua, así como buscar formas de garantizar el uso sostenible, la protección, la prevención, la remediación o la mitigación de situaciones de riesgo, como la sobreexplotación y la contaminación. Brasil necesita estudios para evaluar si los planes de cuenca han incorporado los requisitos de las Resoluciones CNRH para aguas subterráneas.

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.
Delimitación de las áreas de recarga de acuíferos y definición de las zonas de protección	<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 36 – Aguas subterráneas en planes de cuenca, basados en Resoluciones CNRH

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

Los planes de cuenca deben incorporar un análisis detallado de los acuíferos y su relación con los recursos de aguas superficiales. Sin estos datos, la extracción desordenada de aguas subterráneas puede comprometer el flujo de los ríos, reduciendo la disponibilidad de cuerpos de superficie y causando daños al medio ambiente y a los usuarios. Los planes

de cuenca interestatales han buscado construir este enfoque a través de Planes Integrados de Recursos Hídricos (PIRH), sin embargo, aún queda un largo camino por recorrer ante la falta de datos o problemas relacionados con la implementación de instrumentos de gestión. El Box 13 se examina esta experiencia en la cuenca del Paranapanema.

Box 13 – Plan Integrado de Recursos Hídricos (PIRH) de la Unidad de Gestión de Recursos Hídricos Paranapanema (PIRH Paranapanema)

Malva Andrea Mancuso

El Plan Integrado de Recursos Hídricos (PIRH) de la Unidad de Gestión de Recursos Hídricos del Paranapanema (PIRH Paranapanema) es un instrumento de planificación y gestión fuertemente consensuado e integrado, desarrollado con el objetivo principal de permitir la gestión efectiva de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en beneficio de las generaciones presentes y futuras (ANA, 2016).

Fue necesario un arreglo institucional consistente para consolidar la visión integradora que orientó la elaboración del PIRH Paranapanema y las directrices de los Instrumentos de Gestión que respetan las dominialidades y contextos sociopolíticos, así como las especificidades de la legislación vigente de los estados de São Paulo, Paraná y la Unión. El Plan presenta, en este sentido y cuando es necesario, diferentes enfoques ante las instancias federales y estatales. La ANA fue responsable de su elaboración y, por lo tanto, contaba con el seguimiento de los órganos de gestión del Estado: Departamento de Agua y Energía Eléctrica de São Paulo (DAEE/SP), Águas Paraná, CCH-Paranapanema (con los comités de las unidades estatales de gestión) y con el apoyo de la empresa consultora Profill Engenharia e Ambiente Ltda, que realizó los estudios e informes técnicos. El seguimiento de la elaboración del Plan fue coordinado por el Grupo de Trabajo (GT-Plan) y las Cámaras Técnicas de Integración (CTIPA) e Institucional y Legal (CTIL) (ANA, 2016).

El PIRH Paranapanema se completó en 2016 y busca constituir elementos para la gestión de múltiples usos del agua, considerando las metas a alcanzar e integrarse con la conservación de los recursos hídricos existentes. Según el *Diagnóstico*, no existen problemas generalizados en cuanto a los recursos hídricos, pero, en términos de cantidad, se indicaron déficits relacionados con el riego (usuario principal). En cuanto a la calidad de las aguas superficiales, la vertiente de Paraná presenta una mayor ocurrencia de tramos con peores estándares de calidad (clases 3 y 4) en relación a los usos del agua. Esta situación se configura por las menores tasas de recolección de aguas residuales en relación con el estado de São Paulo (ANA, 2016).

La cuenca del Paranapanema tiene un alto potencial de agua subterránea, pero se indicaron acciones específicas en vista de la necesidad de superar varias brechas de conocimiento. Entre las acciones se encuentran estudios para identificar áreas con potencial de agua subterránea a partir del mapeo de áreas críticas, así como para definir las condiciones de explotación de los acuíferos. En este sentido, se indican acciones para ampliar y consolidar la red de monitoreo de datos cualitativos subterráneos. Uno de los objetivos de los estudios sobre las aguas subterráneas es el perfeccionamiento de la información sobre la disponibilidad (integrada con las aguas superficiales) y sobre las demandas mediante la ampliación del registro de pozos. La necesidad de diseñar y proponer incentivos para el uso de manantiales subterráneos, en caso de disponibilidad, para satisfacer las demandas de agua actuales o proyectadas, está presente en una acción específica. El *Diagnóstico* también señaló la necesidad localizada de la creación de Unidades de Conservación (UC) y una atención especial al control de la erosión en áreas urbanas y periurbanas y la conservación del suelo en áreas rurales (ANA, 2016).

Como *Pronóstico* de los Recursos Hídricos, se presentaron tres escenarios, uno de ellos de tendencia y dos alternativos (acelerado y estancado). Los escenarios permitieron inferir que, si no hay intervenciones de mejora y control, los problemas o situaciones existentes pueden generar o agravar conflictos, tanto en aspectos cuantitativos como cualitativos (ANA, 2016).

La estrategia propuesta para lograr la sostenibilidad hídrica del sistema, que apoyó el *Plan de Acción*, se estructuró en tres líneas de acción: Aumento de la Disponibilidad Hídrica; Regulación de las Demandas Hídricas; y Regulación de Cargas Contaminantes (ANA, 2016).

En relación con los Instrumentos de Gestión de los Recursos Hídricos, se determinaron directrices para las aguas superficiales bajo el dominio de la Unión y recomendaciones generales para las aguas superficiales bajo el dominio de los estados, sin embargo, no hay ninguna recomendación para las aguas subterráneas. Entre los lineamientos para la Concesión, destacamos la unificación del flujo de referencia al Paranapanema de la Unidad de Gestión de Recursos Hídricos (UGRH) y, en relación con la Cobro, se contemplaron lineamientos

y recomendaciones comunes a los cuerpos de agua de los estados y los dominios de la Unión. Además, se propuso la implementación progresiva de la Agencia del Agua (ANA, 2016).

Los Programas (12 en total, con 37 subprogramas) y Acciones (123 en total) estructuran sus ejes en dos componentes: a) Gestión de Recursos Hídricos; y b) Intervenciones y Articulaciones con la Planificación Sectorial. Se centra en la gestión integrada y participativa de la oferta y la demanda de agua (teniendo en cuenta los aspectos cuantitativos y cualitativos de las fuentes de agua superficiales y subterráneas). El presupuesto proporcionó recursos para ser invertidos en 20 años (ANA, 2016). El PIRH Paranapanema tuvo como principal legado sumar los esfuerzos de instituciones y actores que trabajaron directa o indirectamente en la gestión de los recursos hídricos de la UGRH Paranapanema, definiendo objetivos comunes y técnicamente marcados, y fortaleciendo la premisa de que la gestión de los recursos hídricos debe estar marcada por la integración de las diversas entidades y comités (ANA, 2016).

3.1.6 Instrumentos de gestión específicas de 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 Res. CNRH 22/2002, a su vez, establece que los Planes de Cuenca deben prever medidas para el uso y protección de los acuíferos (art. 3°, inc. VI), mientras que la Res. CNRH n° 92/2008 establece la definición de zonas de protección de acuíferos, zonas de restricción y control, y perímetros de protección de pozos sobre la base de estudios hidrogeológicos (art. 2°, incs. I, II y III).

Las Áreas de Protección del Acuífero (APA) están destinadas a proteger las zonas de recarga de aguas subterráneas, sin embargo, dado que presuponen restricciones sobre el uso y la ocupación de la tierra, el instrumento no se utilizó, incluso si podría aplicarse sin el apoyo de los municipios, que

tienen competencia exclusiva para la planificación territorial municipal.

Los Perímetros de Protección de Pozos (PPP) están destinados a proteger la extracción de aguas subterráneas 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. Las PPP se explican en el Box 14.

Las Áreas de Restricción y Control (ARC) son medidas excepcionales y temporales destinadas a restringir el uso o la extracción de agua en situaciones en las que su calidad o cantidad se ve comprometida. Las áreas de restricción del uso de aguas subterráneas se pueden utilizar en función de los siguientes criterios: densidad de los pozos de captación; número de proyectos potencialmente contaminantes; criticidad de la disponibilidad de aguas subterráneas; ocurrencia de cambios en la calidad natural; y presencia de áreas contaminadas. El Box 15 se presenta el caso de ARC de uso de aguas subterráneas en Ribeirão Preto-SP.

Box 14 – Perímetro de Protección de Pozos (PPP)

Mara Akie Iritani

La experiencia de otros países, especialmente de Europa, muestra que el establecimiento de un área de protección alrededor de los pozos de suministro público, especialmente los ubicados en acuíferos libres, es una estrategia eficiente para minimizar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas abastecidas a la población (NAVARRETE; GARCÍA, 2003).

El concepto de Perímetros de Protección de Pozos (PPP) se basa en el control de actividades potencialmente contaminantes y la aplicación de restricciones sobre el uso del suelo alrededor del pozo, donde se produce el área de recarga del acuífero. Las medidas con mayor nivel de restricción se aplican en las áreas delimitadas por los perímetros más interiores, ubicadas más cerca de la captación (Figura 37). En algunos casos, el PPP puede tener como objetivo no solo proteger la calidad, sino también la cantidad de agua, con el fin de garantizar la sostenibilidad de la reserva para el suministro de la población (NAVARRETE; GARCÍA, 2001).

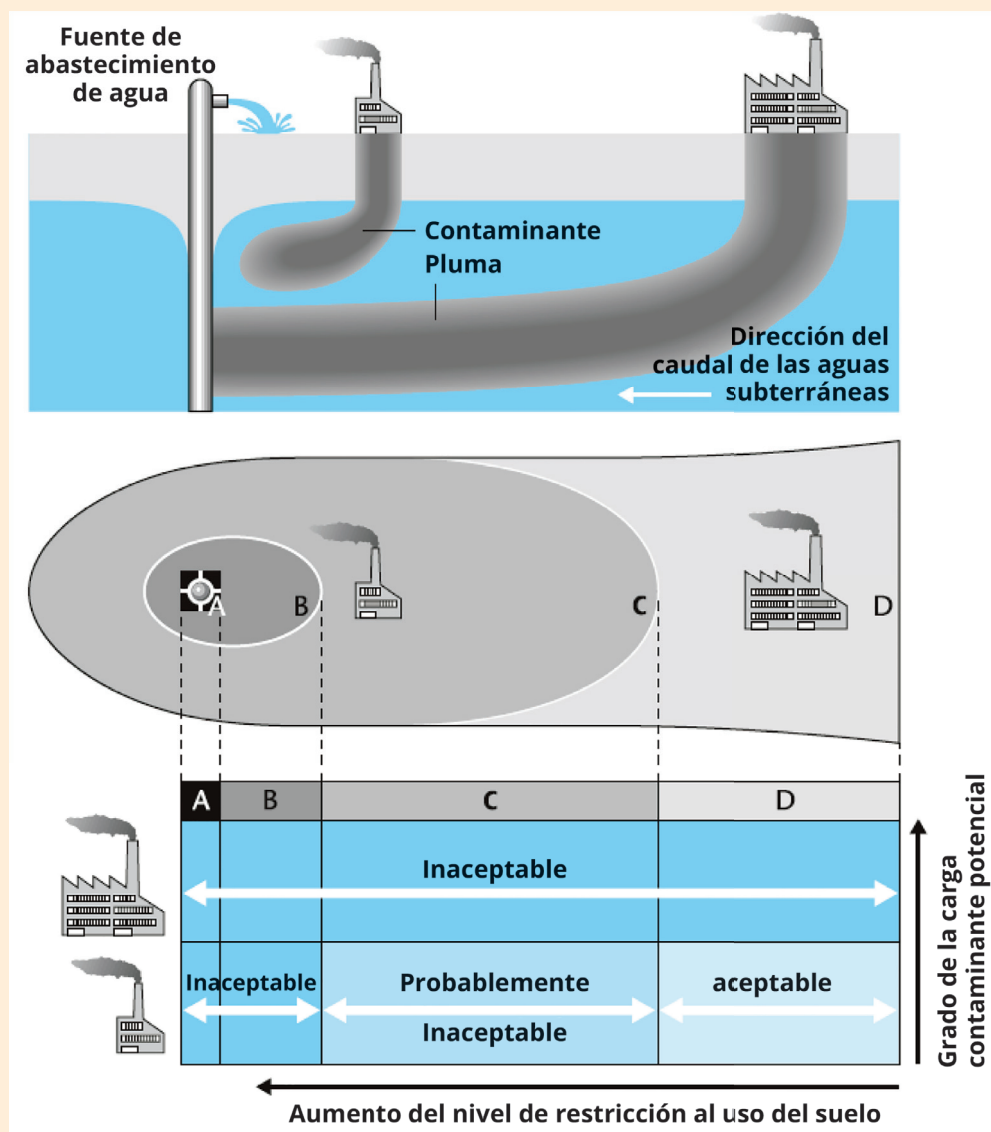


Figura 37 – Concepto de Perímetro de Protección de Pozos

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

Las PPP se establecen en la Zona de Contribución (ZC) del pozo, y tienen en cuenta contaminantes no conservadores (experimentan degradación con el tiempo) y contaminantes conservadores (no hay degradación, y la disminución de la concentración se debe principalmente a la dilución a lo largo del flujo subterráneo) (FOSTER *et al.* 2002).

La ZC es el área donde el acuífero se recarga y el flujo de agua subterránea converge al pozo (Figura 38a). Su extensión depende de las características del acuífero (permeabilidad, porosidad, espesor y recarga) y de las condiciones constructivas y operativas del pozo (profundidad de penetración en el acuífero, caudal y tiempo de operación). La delimitación de los perímetros de protección puede basarse en diferentes criterios, tales como: a) distancia longitudinal del pozo; y b) tiempo recorrido por el agua en el acuífero para llegar al pozo (llamado *tiempo de tránsito*). Los puntos con el mismo tiempo de tránsito de agua en el acuífero dibujan un isócrona, que se utiliza para delimitar el perímetro de protección. La zona interna a la isócrona se denomina *Zona de Transporte* (Figura 38B).

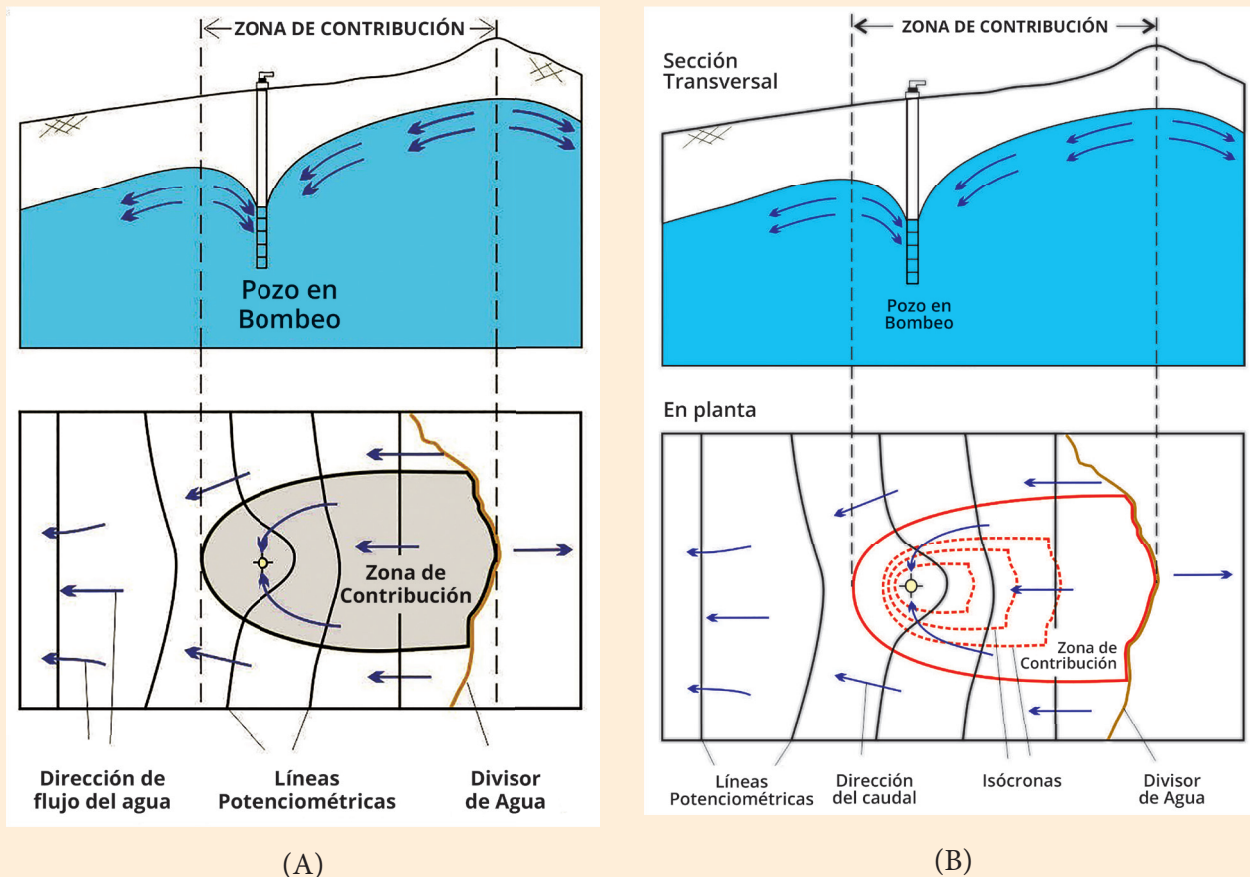


Figura 38 – Zona de contribución y zona de transporte de un pozo en un acuífero libre

Fuente: Iritani y Ezaki (2012, p. 3 y 5).

Estos criterios pueden estar asociados con características hidrogeológicas que afectan el flujo de agua en el acuífero, como la presencia de una cuenca hidrográfica, fallas o contactos entre formaciones geológicas y otras.

Existen varios métodos para delimitar los perímetros de protección, que se pueden encontrar en USEPA (1987, 1994), Navarrete y García (2003), Strobl y Robillard (2005), Environmental Agency (2019) y Liu, Weisbrod y Yakirevich (2019). El método que se adopte deberá tener en cuenta la complejidad del acuífero, las características constructivas y de explotación del pozo, la interferencia hidráulica y el uso de la tierra. Esta elección también depende de la cantidad y calidad de los datos existentes, la importancia de la financiación para la oferta de la población atendida y los recursos financieros disponibles.

La identificación de ZC puede ser difícil y, en consecuencia, agregar mayor incertidumbre a la delimitación de las PPP debido a la presencia de complejidades (FOSTER; SKINNER, 1995; FRANKE *et al.*, 1998; PARIS *et al.*, 2019), tales como: a) acuíferos sedimentarios multicapa, fracturados o kársticos; y b) áreas con interferencia de pozos o influencia de cuerpos de agua superficiales. En estas situaciones, el modelado numérico tiene mejor precisión (GÁRFIAS; EXPÓSITO; LLANOS, 2008; CARVALHO; HIRATA, 2012), sin embargo, implica mayor costo, tiempo y datos necesarios para su aplicación. También debe tenerse en cuenta el objetivo de la PPP que debe establecerse. Por ejemplo, para tiempos de tránsito cortos, las incertidumbres asociadas con métodos más simplificados pueden ser aceptables, ya que el perímetro cubre un área pequeña y el resultado no muestra una gran variación en relación con métodos más complejos (FOSTER *et al.*, 2002; CARVALHO; HIRATA, 2012).

Delimitación de perímetros de protección de pozos

Los perímetros de protección de los pozos de suministro público y las medidas de restricción y control que se adopten deben estar respaldados por normas legales. En los países de la Comunidad Europea, por ejemplo, la base jurídica es la Directiva 2000/60/CE (DOVERI; MENICHINI; SCOZZARI, 2015). En Brasil, el apoyo a la delimitación de áreas de protección de pozos está vinculado a la legislación estatal que se ocupa de la gestión de los recursos hídricos o legislación específica sobre aguas subterráneas, como, por ejemplo, en Minas Gerais (Ley n° 13.771/2000), Acre (Ley n° 1.117/1994), Pernambuco (Decreto n° 20.423/1998); Piauí (Ley n° 5.165/2000), Roraima (Ley n° 547/2006), São Paulo (Decretos n° 32.955/1991 y 63.261/2018) y el Distrito Federal (Decreto n° 22.358/2001). Carvalho e Hirata (2012) y García y Navarrete (2005) realizaron un relevamiento de los perímetros de protección de pozos adoptados en varios países y mostraron que se adoptan comúnmente entre tres y cuatro zonas de protección.

La zona más interna del pozo se denomina *zona operativa*, donde solo se permiten las actividades asociadas con la operación del pozo (FOSTER *et al.*, 2002) (Figura 39). Para la plena protección de una cuenca en un acuífero libre, los autores sugieren la delimitación de otros perímetros (Figura 39) y destacan, en el tema de salud pública, la importancia de la zona de protección dirigida a contaminantes no conservadores. En Alemania, Holanda y Reino Unido, el criterio para delimitar este perímetro es el tiempo de tránsito de 50 días (GARCÍA; NAVARRETE, 2005; ENVIRONMENTAL AGENCY, 2019).

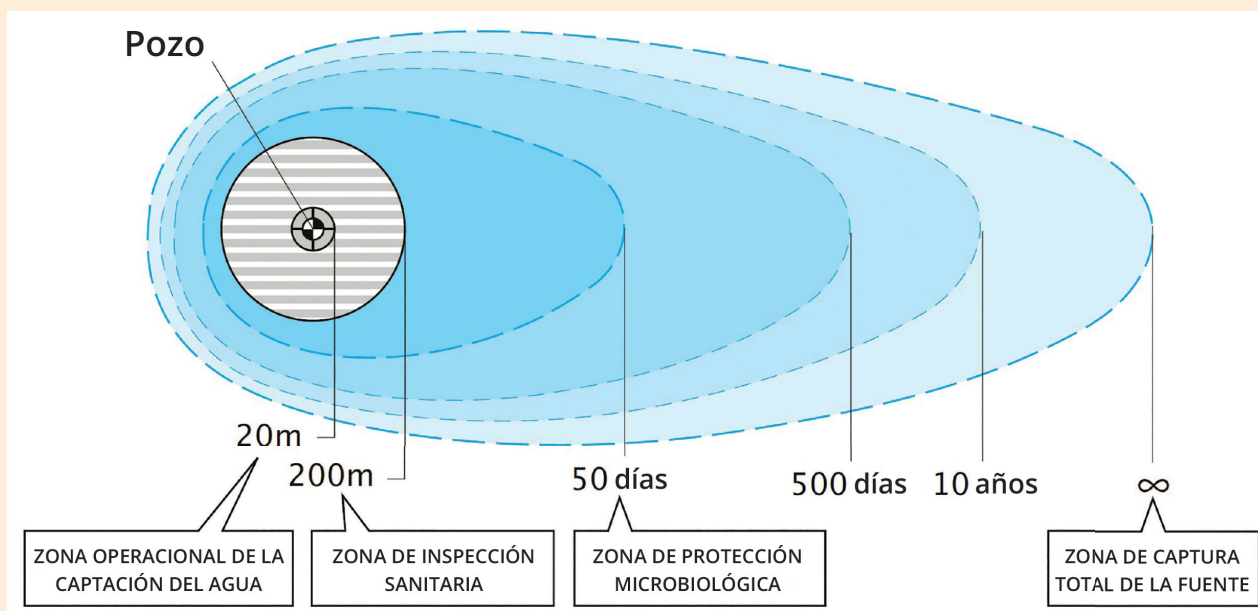


Figura 39 – Esquema diseñado para la delimitación de perímetros de protección de pozos en un acuífero libre

Fuente: Foster *et al.* (2006, p. 35).

Este criterio también se adopta para el Perímetro de Alerta, establecido en la legislación sobre la protección de las aguas subterráneas en los estados de São Paulo y Pernambuco. Iritani y Ezaki (2012) enumeraron métodos simples para subsidiar el cálculo del Perímetro de Alerta, que se aplicó en el estado de São Paulo (2016), en un estudio desarrollado en el Sistema Acuífero Bauru (SÃO PAULO, 2016).

El control y la restricción de las actividades humanas dependen del peligro que imponen al pozo (Figura 37). El enfoque y las metodologías propuestas por Foster *et al.* (2002) ayudan a identificar el peligro de contaminación y definir las medidas que se impondrán en cada perímetro de protección de los pozos.

Además de las bases técnicas, la implementación de áreas de protección de pozos debe ser un proceso participativo que involucre a los usuarios y a la sociedad en general. En el estado de São Paulo, por ejemplo, la legislación exige que tales acciones se basen en estudios y sean aprobadas por el Consejo Estatal de Recursos Hídricos.

Box 15 – Establecimiento de Áreas de Restricción y Control del Uso de Aguas Subterráneas como Instrumento de Manejo para la Exploración del Sistema Acuífero Guaraní (SAG), en Ribeirão Preto, SP

José Luíz Albuquerque Filho

La Resolución n° 052, de 15 de abril de 2002, del Consejo de Recursos Hídricos (CRH) del estado de São Paulo instituyó “[...] dentro del alcance de las directrices y procedimientos del Sistema Integrado de Gestión de Recursos Hídricos (SIGRH) para la definición de áreas de restricción y control de la extracción y el uso de aguas subterráneas”.

Este instrumento de gestión fue previsto por la Ley n° 6.134, de 2 de junio de 1988 (art. 7°), que prevé la preservación de los yacimientos naturales de aguas subterráneas y se regula por el Decreto n° 32.955, de 7 de febrero de 1991, y por la Resolución n° 52 de la Comisión de Derechos Humanos, de 15 de abril de 2005. Las Áreas de Restricción y Control (ARCs) del uso de las aguas subterráneas son “[...] aquellas en las que existe la necesidad de disciplinar actividades que puedan causar cambios o efectos negativos en la cantidad o calidad de las aguas subterráneas” (art. 1 de la Resolución CRH n° 52/2005).

La ciudad de Ribeirão Preto, ubicada en la Región Nordeste del estado de São Paulo, con una población de 676,440 habitantes, depende exclusivamente de la fuente subterránea constituida por el Sistema Acuífero Guaraní (SAG), según el *Informe de Situación de Recursos Hídricos* (CCH PARDO, 2020). Según el profesor e investigador Osmar Sinelli, un hidrogeólogo que ha estado trabajando en la región durante mucho tiempo, el uso de las aguas subterráneas del SAG se remonta a la década de 1930. La creciente demanda de agua muestra un desequilibrio entre los volúmenes extraídos, la reducción de las reservas subterráneas disponibles y la disminución de los niveles de agua subterránea en el acuífero.

A partir de este escenario, el Comité de la Cuenca Hidrográfica del Pardo (CCH Pardo) propuso la Resolución CCH Pardo n° 04/06 (aprobada el 06/09/2006), que estableció “Áreas de Restricción y Control de Captación y Uso de Aguas Subterráneas en el área urbana de Ribeirão Preto”. La ARC de Ribeirão Preto tiene como objetivo contener el cono de descenso del nivel freático causado por el bombeo intensivo de los pozos existentes. Esta resolución fue presentada al Consejo Estatal de Recursos Hídricos (CRH) y aprobada mediante la Resolución CRH n° 065/06 (aprobada el 09/04/2006). La deliberación ha sido revalidada por las instancias de CCH Pardo y CRH, basadas en estudios técnicos hidrogeológicos. La última versión es la Resolución CCH Pardo n° 300, de 17 de septiembre de 2021, la cual fue ratificada por la Resolución CRH n° 260, de 16 de diciembre de 2021.

La Figura 40 muestra la delimitación del Área de Restricción y Control del Uso de Aguas Subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en el Municipio de Ribeirão Preto (SP), la cual establece las siguientes zonas y sus criterios técnicos en relación a la perforación de nuevos pozos y uso de aguas subterráneas:

- **Zona 1 – Área urbana en la zona interna del cono de descenso:** solo se permite la nueva perforación de pozos tubulares profundos para reemplazar los pozos existentes, destinados al sistema de suministro de agua para el consumo humano, bajo la responsabilidad del poder Público del Municipio;
- **Zona 2 – Área urbana adensada:** se permiten reemplazos de pozos tubulares profundos, como en la Zona 1, o perforación de nuevos pozos para el sistema de suministro de agua para consumo humano, bajo la responsabilidad del Gobierno municipal; y reemplazos de pozos existentes con el posterior taponamiento del pozo existente, o profundización de pozos tubulares profundos existentes para cualquier propósito, bajo la responsabilidad del usuario privado; y
- **Zona 3 – Área de expansión urbana:** se permiten reemplazos de pozos tubulares profundos, como en la Zona 1; profundización o reemplazo de pozos tubulares profundos existentes, para cualquier propósito, bajo la responsabilidad de usuarios privados; y nueva perforación de pozos tubulares profundos para cualquier propósito de uso.

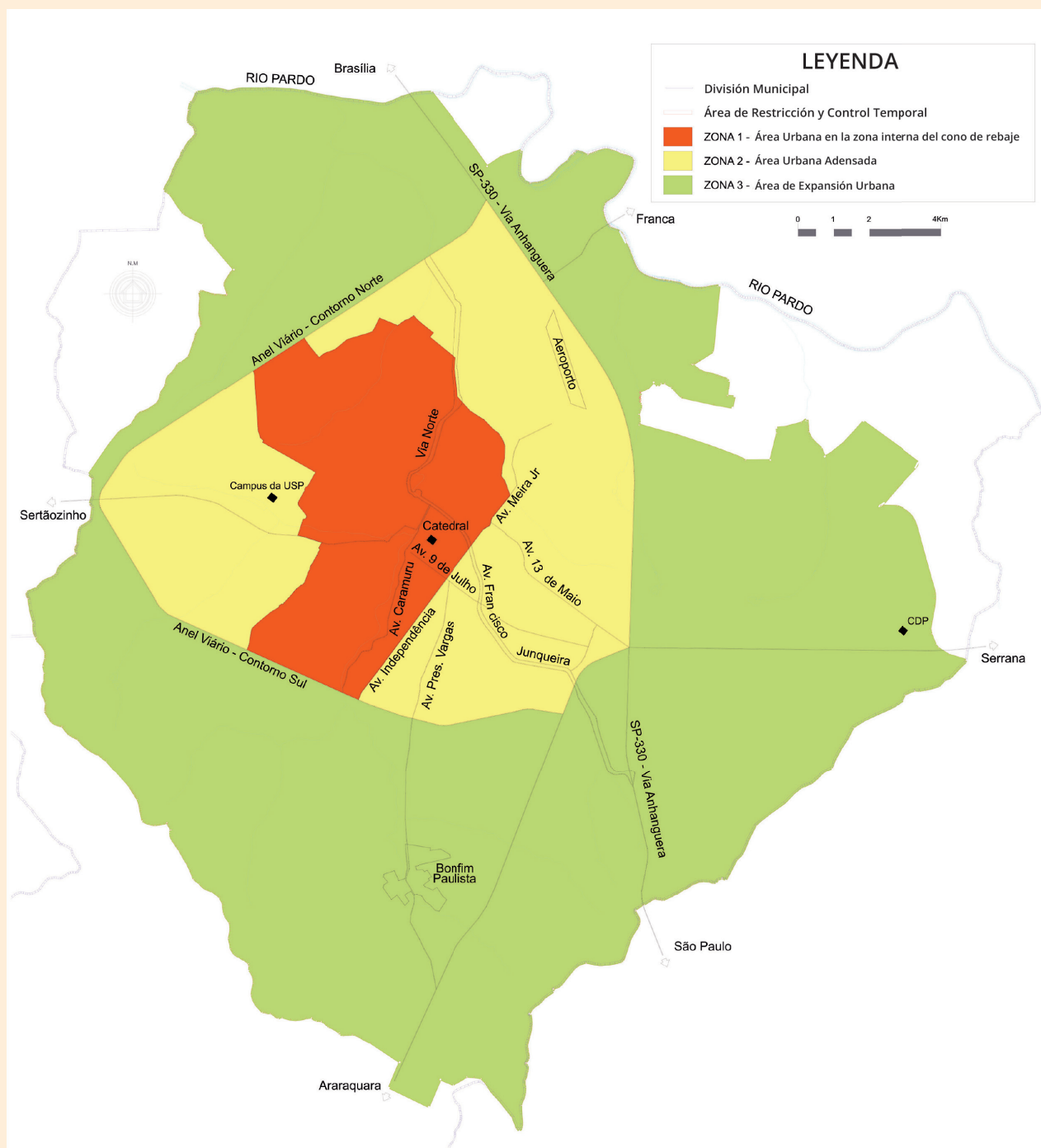


Figura 40 – Área de Restricción y Control del Uso de Aguas Subterráneas del Sistema Acuífero Guarani (SAG) en el Municipio de Ribeirão Preto, SP

Fuente: CCH Pardo (Resolución n° 04/06).

Las ARC es un instrumento de gestión de recursos hídricos dedicado a corregir distorsiones en el uso de acuíferos que pueden comprometer la calidad o cantidad de aguas. La reversión de estas situaciones es un proceso complejo, que requiere monitorear la evolución de la situación identificada, así como la articulación de los comités gestores (Comités y Consejos de Recursos Hídricos) con el Poder Público y la negociación y acciones entre los actores involucrados.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS CUERPOS DE AGUA SUBTERRÁNEA, SEGÚN LOS USOS PREDOMINANTES

La clasificación de los cuerpos de agua en clases, de acuerdo con los usos predominantes del agua acuífera, está regulada por la Res. Conama n° 396/2008 y por la Res. CNRH n° 91/2008. El art. 29 de la Res. 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 funcionamiento;
- IV. el uso y la ocupación de la tierra y su historia;
- V. la viabilidad técnica y económica del marco;
- VI. la ubicación de las posibles fuentes de contaminación;
- VII. la calidad natural y el estado 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 Res. Conama n° 396/2008, y se muestra en la Tabla 5.

Clases	Usos
Clase especial	Aguas acuíferas, conjunto de acuíferos o porción de los mismos destinados a la preservación de ecosistemas en unidades de protección integral y aquellas que contribuyen directamente a los tramos de masas de aguas superficiales clasificadas como 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 5 – Clases de clasificación de aguas subterráneas

Fuente: Conama (Res. n° 396/2008).

La Res. Conama n° 396/2008 determina que 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 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 de Cuantificación Practicables (LQP), presentados en el Anexo I de la Res. Conama n° 396/2008. Los VRQ deben ser definidos por el organismo competente, que puede ser Conama u organismos estatales, sin embargo, tales normas aún no se han determinado. La Tabla 6 muestra los patrones de cada una de las clases:

Clases	Usos
Clase especial	Deben mantener sus condiciones naturales de calidad.
1	Presentan, para todos los parámetros, un Valor de Referencia de Calidad (VRQ) inferior o igual a los Valores Máximos Permitidos (VMPr +) de los usos preponderantes (art. 7° de la Res. Conama n° 396/2008).
2	Presentan, 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	Deben 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	Deben cumplir con los Valores Máximos Permitidos menos Restrictivos (VMPr-) entre los usos predominantes, 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 tendrán condiciones ni estándares de calidad, según los criterios utilizados en la Resolución Conama n° 396/2008 (art. 11).

Tabla 6 – Normas para la clasificación de las aguas subterráneas

Fuente: Conama (Res. n° 396/2008).

El procedimiento para enmarcar las masas de agua superficiales y subterráneas está definido por la Res. CNRH n° 91/2008. Las etapas de este procedimiento se dividen en: *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 41).

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 Res. CNRH 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, y debe ser conducido por el CCH junto con su Agencia Técnica (COSTA *et al.*, 2019, p. 45). Hasta la fecha, este instrumento no se ha utilizado en relación con las aguas subterráneas.



Figura 41 – Etapas del procedimiento para enmarcar masas de agua superficiales y subterráneas, definidas por la Res. CNRH n° 91/2008

Fuente: CNRH (Res. n° 91/2008).

3.3 CONCESIÓN DEL DERECHO A UTILIZAR LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEAS

Ley n° 9.433/1997, en el art. 5°, inc. III, estableció el otorgamiento del derecho de uso de los recursos hídricos, definido como “el acto administrativo por el cual la autoridad otorgante presta 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 Res. CNRH n° 16/2001). Este instrumento permite conciliar el carácter público del agua con su uso particular, a través del rol de gestor estatal (ANA, 2007). Las prioridades de la concesión se incluyen como requisito del contenido mínimo de los planes hidrológicos de cuenca hidrográfica (art. 7°, inc. VIII, de la Ley n° 9.433/1997), que ha de aprobar el CCHS.

Lanna (2000, p. 89) afirma que 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.” Este instrumento es un reflejo del Poder Policial del Estado, ya que regula el uso de los recursos hídricos mediante la concesión de autorización formal al usuario que pretenda utilizarlos de manera privada, por un plazo determinado y de acuerdo a las condiciones establecidas (PORTO; PORTO, 2008).

El plazo máximo de vigencia de la concesión del derecho de uso de los recursos hídricos 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 Cuenca Hidrográfica (art. 6° § 1° de la Res. CNRH n° 16/2001).

La asignación de la concesión no implica la disposición de las aguas, sino más bien un derecho de uso (art. 18 de la Ley n° 9.433/1997). Así, busca equilibrar la disponibilidad hídrica con las demandas, permitiendo al Gobierno 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 Ley n° 9.433/1997, que así determina:

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 una masa de agua para el consumo final, incluido el suministro público, o la aportación del proceso de producción;
II - extracción de agua de acuíferos subterráneos para consumo final o insumo del proceso de producción;
III - liberación en un cuerpo de aguas residuales y otros residuos líquidos o gaseosos, tratados o no, con fines de dilución, transporte o eliminación final;
IV - aprovechamiento de potenciales hidroeléctricos;
V - otros usos que cambian el régimen, la cantidad o la calidad del agua en un cuerpo de agua.

La Ley n° 9.433/1997 incluía expresamente la necesidad de conceder un derecho de uso para la “extracción de agua de acuíferos subterráneos para el consumo final o la aportación al proceso de producción” (art. 12, inc. II). Debido al dominio estatal de las aguas subterráneas, los estados y el Distrito Federal son responsables de regular el otorgamiento del derecho de uso de estos recursos, 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 en los casos de disminución de las aguas subterráneas en edificios y obras de construcción civil o del nivel del agua en las actividades mineras (en este caso, ver Res. CNRH n° 29/2002). En estas dos situaciones, el foco no está en el uso de las aguas subterráneas, sino en el efecto que estas actividades pueden generar para el acuífero.

Debido a la competencia privada de la Unión para legislar en materia hídrica, el requisito de este instrumento sólo puede ser renunciado por los estados y el Distrito Federal en los casos previstos en el art. 12, párrafo 1° de la Ley n° 9.433/1997:

§ 1° 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, captaciones y liberaciones consideradas insignificantes;
- III - las acumulaciones de volúmenes de agua considerados insignificantes.

En los casos del art. 12, § 1°, se renuncia a la solicitud de concesión del derecho de uso, sin embargo, es necesario cumplir con otras condiciones administrativas impuestas por los estados, tales como: *a*) inscripción en el registro de pozos o usuarios; y *b*) obtención de un documento que acredite el carácter de uso exento o insignificante. Corresponde a los CCH proponer directrices y criterios para establecer los usos considerados insignificantes,

y a los CERH aprobarlos. En caso de ausencia de determinación de estos criterios por parte de CCH o ausencia de esta entidad, la autoridad otorgante estatal hará la definición de manera provisional (ver Res. CNRH n° 184/2016). Los volúmenes considerados exentos, por lo tanto, pueden variar entre cuencas o en regiones específicas de la misma cuenca.

La definición de usos considerados insignificantes debe tener en cuenta 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 la misma masa de agua, de todas las derivaciones,

abstracciones, liberaciones o acumulaciones de volúmenes de agua de escasa expresión, considerados insignificantes” (art. 6° de la Res. CNRH n° 184/2016).

La asignación de la concesión a utilizar las aguas subterráneas debe garantizar la gestión integrada del agua a fin de “evitar el compromiso cualitativo y cuantitativo de los acuíferos y las masas de aguas superficiales conectadas a ellos” (art. 3°, inc. III de la Res. CNRH n° 15/2011). Por lo tanto, la decisión debe basarse en los estudios hidrogeológicos descritos en el art. 2° de la Res. CNRH n° 92/2008 (representado en la Figura 42), que forman la base de los planes de cuenca. Es importante resaltar que en el país no existen lineamientos para el otorgamiento de concesiones en acuíferos fósiles.

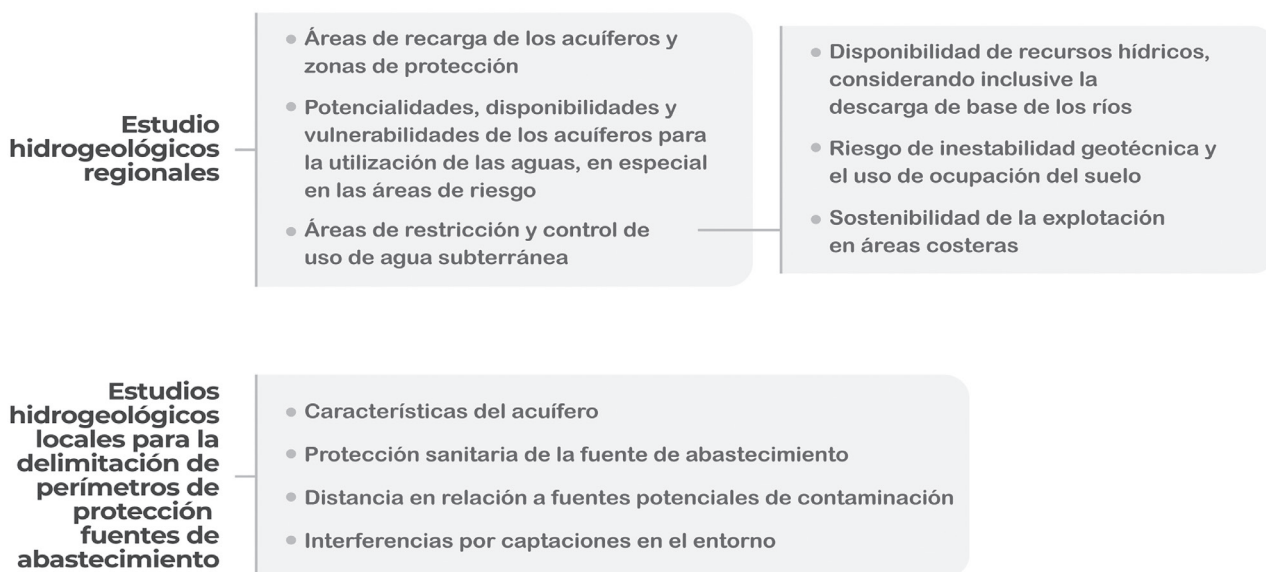


Figura 42 – Estudios hidrogeológicos y concesión del derecho de uso de las aguas subterráneas

Fuente: CNRH (Res. n° 92/2008), elaborado por los autores.

Se advierte que el otorgamiento del derecho de uso de las aguas subterráneas debe tener en cuenta no solo las características de los acuíferos y las necesidades de los usuarios, sino también los siguientes criterios: i) interferencia entre pozos y niveles máximos de disposición permitidos; ii) intrusión salina; y iii) gestión de la demanda entre usuarios de aguas subterráneas y superficiales, así como articulación con la gestión del suelo (COSTA *et al.*, 2011).

El problema más grave, sin embargo, se remonta a la muy baja adherencia de los usuarios al instrumento. Se estima que 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 permiso de uso, sería denegada” (VILLAR; HIRATA, 2019). Los pozos irregulares “son aquellos cuya perforación y uso de aguas subterráneas está soportado por la ley, sin embargo, se requiere el cumplimiento de ciertos procedimientos o se imponen restricciones o condiciones para este uso, que no fueron cumplidas por el propietario del pozo” (VILLAR; HIRATA, 2019).

Según la base de datos de ANA (2021), existen 115.354 abstracciones subterráneas regularizadas por las Unidades Federales, incluyendo las modalidades

para otorgar el derecho de uso y usos insignificantes. Este número es mucho menor que el que se encuentra en otras bases de datos, como las del SGB-CPRM o el IBGE. El Poder Público desconoce el número real de pozos existentes o el uso del recurso, lo que compromete todo el proceso de gestión (HIRATA *et al.*, 2019; ANA, 2020).

El uso irregular del agua “permite la apropiación de un bien para el uso común de las personas y desvía los recursos hídricos de sus usuarios legítimos, cambiando el régimen de propiedad del agua y causando varios impactos ambientales y sociales” (VILLAR, 2016, p. 92). La condición irregular también dificulta la aplicación de otros instrumentos. Sin una estimación de la demanda real por el uso de los recursos hídricos subterráneos, los diagnósticos, pronósticos y programas de acción de los planes de cuenca hidrográfica se ven perjudicados. Además, sin la concesión, no hay forma de aplicar el cargo por el uso de estos recursos.

Lamentablemente, en el caso de los usos legalizados, la mayoría de los permisos se otorgan sin las evaluaciones hidrológicas necesarias o no se basan en metodologías apropiadas. La ANA (2013, p. 64) recomienda que el cálculo de la disponibilidad hídrica subterránea se guíe por los conceptos de:

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

- **Coefficiente de Sostenibilidad (CS):** porcentaje máximo recomendado para explotar la RPD, a fin de evitar efectos adversos en el acuífero o disminución de los flujos de base de ríos interconectados;
- **Reserva Potencial Explotable 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 beca, sin embargo, existen otras formas de determinar estos valores. La precariedad de la implementación de este instrumento pone en riesgo los objetivos de la política hídrica, porque sin el control de su uso no hay forma de garantizar la disponibilidad de agua para las generaciones presentes y futuras o el uso racional e integrado, y mucho menos prevenir y mitigar los eventos hidrológicos críticos resultantes del uso inadecuado del agua. Por lo tanto, es prioritario invertir en campañas de sensibilización de los usuarios, mecanismos de incentivos y acciones de fiscalización.

El box 16 busca explicar las razones de la ilegalidad de los pozos, mientras que el Box 17 explica los criterios más frecuentes utilizados para determinar los caudales. La falta de datos técnicos y la aplicación de metodologías adecuadas para otorgar concesiones, combinadas con el alto número de pozos irregulares, crea una situación de vulnerabilidad a las aguas subterráneas y dificulta la elaboración de diagnósticos, pronósticos y programas de acción para los acuíferos.

Box 16 – ¿Por qué tenemos tantos pozos irregulares?

Antonio Luiz Pinhatti

Los pozos irregulares superan a los pozos regulares en Brasil, lo que lleva a la pregunta: ¿por qué hay tantos pozos irregulares? La invisibilidad del recurso y el limitado conocimiento por parte de los usuarios, perforadores de pozos y órganos de gestión contribuye a esta situación. Los usuarios no tienen la percepción de que el uso irregular de las aguas subterráneas pueda interferir y dañar su pozo o el de otros, mucho menos que pueda impactar el medio ambiente.

Los usuarios buscan en el agua subterránea una solución individual a su problema de suministro. Este colectivo desconocido de usuarios individuales que buscan satisfacer su demanda particular puede causar la sobreexplotación de un acuífero. El número de pozos irregulares en Brasil retrata el caso típico de la *Tragedia de los Comunes* (HARDIN, 1968), en la que existe “una situación en la que los individuos que actúan de manera independiente y racional de acuerdo con sus propios intereses se comportan en contra de los mejores intereses de una comunidad, agotando un recurso común”.

La falta de conocimiento sobre la obligación legal o la falta de incentivos para buscar la regularización a través de la concesión, junto con la falta de supervisión tanto de los órganos de gestión de recursos hídricos como de los órganos de control de la actividad de perforación de pozos (los Consejos Regionales de Ingeniería y Agronomía – CREA) contribuyen a la perforación de pozos irregulares y el

uso de aguas subterráneas sin autorización. Los métodos de perforación de pozos son rápidos y de costo relativamente bajo, lo que permite mantener y operar un pozo irregular que pasa desapercibido, lo que dificulta la realización de cualquier acción fiscalizadora. En este sentido, las empresas de perforación son responsables de sus trabajos y del cumplimiento de los requisitos legales. Por razones comerciales, el pozo a menudo se construye sin la debida autorización, lo que convierte a las empresas de perforación en facilitadoras del uso irregular de las aguas subterráneas.

El uso irregular cuestiona la gestión de los recursos hídricos en Brasil y requiere la adopción de acciones con los *stakeholders*, con el fin de revertir este escenario. La Tabla 7 resume los principales factores que conducen a la existencia de pozos irregulares y sus acciones mitigantes.

Actores sociales	Factores facilitadores	Acciones de mitigación
Usuarios	<ul style="list-style-type: none"> – Falta de conocimiento sobre los aspectos técnicos y legales de las aguas subterráneas. – No ven problemas ni consecuencias en el uso irregular de las aguas. – Falta de conocimiento sobre los beneficios de tener el pozo regularizado. – No existen incentivos o compensaciones financieras o de servicio que hagan atractiva la regularización de pozos para el usuario. – No hay voluntad del usuario de pagar las cuotas de financiación, sin ver la devolución de este pago. – Resistencia a aceptar el pago de la tasa de alcantarillado proporcional al volumen de agua extraída en el pozo. – Existe el entendimiento de que tener un pozo irregular 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 regularizar los pozos. – Proporcionar información técnica y de disponibilidad de agua subterránea para ayudar al usuario en la prospección y captura del recurso. – Ofrecer compensación por uso regularizado. Por ejemplo, a través de la orientación técnica operativa, sobre la eficiencia energética y de las bombas, la calidad del agua, etc. – Busque 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 inspeccionar y controlar los pozos irregulares y hacer cumplir la ley. – Ausencia de tradición institucional y estabilidad organizacional. – Conocimientos y datos limitados sobre el comportamiento de los acuíferos. – Registros incoherentes de pozos 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 inspección efectiva. – Rara vez se aplican sanciones a los usuarios de pozos irregulares, en muchos casos solo se requiere llevar a cabo la regularización. – Los recursos hídricos subterráneos no son considerados prioritarios por los administradores ni por la sociedad. – Los procesos de concesión son a menudo complejos, burocráticos y requieren mucho tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> – Realizar inspecciones efectivas, identificando pozos irregulares, promoviendo la regularización y aplicando la ley y sus sanciones. – Utilice la inspección y la aplicación de sanciones de manera ejemplar, incluida la divulgación de estas acciones para demostrar la acción del estado. – Crear programas de regularización de pozos, especialmente en áreas con uso intenso de aguas subterráneas, evidencia de sobreexplotación y conflictos entre usuarios vecinos.
Perforadores	<ul style="list-style-type: none"> – Omisión de la obligación de conceder y de los riesgos y consecuencias derivados de la falta de autorización – Conocimiento limitado de hidrogeología para comprender los impactos del uso irregular. – Existen perforadores que actúan sin registro en el organismo de control de la actividad (CREA) o cuyo responsable técnico pasa menos tiempo del mínimo establecido. – Falta de relaciones sólidas entre los órganos de gestión y control de la actividad de perforación, lo que podría reducir el número de pozos irregulares. 	<ul style="list-style-type: none"> – Establecer una relación entre el órgano de gestión de los recursos hídricos y el CREA, incluido el intercambio de información. – 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 7 – Principales factores que conducen a la existencia de pozos irregulares y acciones de mitigación

Fuente: Foster, Hirata y Custodio (2021), adaptado por el autor.

Box 17 – Criterios para determinar los caudales concesionables en manantiales subterráneos*Vagney Aparecido Augusto**José Eloi Guimarães Campos*

La determinación de los criterios para otorgar o autorizar el uso de las aguas subterráneas tiene como objetivo definir, principalmente, parámetros técnicos relacionados con los sistemas de aguas subterráneas que favorezcan su uso adecuado, definiendo límites aceptables para su explotación, a fin de no ocasionar daños a los acuíferos. También son importantes para permitir, de manera equilibrada, los diferentes tipos de usos de las aguas subterráneas a corto, medio y largo plazo, garantizando que los usuarios no se vean perjudicados por usos desequilibrados. Para lograr estos objetivos, las acciones deben incluir todos los aspectos involucrados en el sistema hídrico, incluido el medio ambiente en sí y el marco natural que constituyen los acuíferos.

La Ley n° 9.433/1997 define la cuenca hidrográfica como unidad básica para la ordenación de los recursos hídricos. Esta definición legal considera el relieve como un factor delimitador de los flujos de aguas superficiales y su acumulación, sin embargo, las aguas subterráneas no siguen las mismas premisas de delimitación, flujos y acumulación. Muchos acuíferos extrapolan las cuencas hidrográficas, presentando flujos subterráneos desconectados de los superficiales, y siguen patrones, formas y tiempos totalmente diferentes para los flujos y la acumulación. En este sentido, la definición de una unidad base para el manejo de los recursos subterráneos debe considerar al menos tres condiciones ambientales: clima, hidrogeología y aspectos de hidrología superficial que la afectan, de acuerdo al concepto de dominios hidrogeoclimáticos (AUGUSTO; CAMPOS, 2021).

Los criterios para otorgar el derecho de uso, necesariamente, deben respetar las diferencias entre los tipos de acuíferos. Estos diferentes acuíferos reciben, almacenan y permiten flujos de agua en sus espacios libres de formas, volúmenes y velocidades muy diferentes, lo que debe implicar también criterios diferentes para sus usos y, en consecuencia, para el proceso de concesión. En este contexto, los criterios para la concesión de aguas subterráneas deben tener en cuenta las condiciones actuales de explotación de los acuíferos, los factores climáticos que proporcionan agua a lo largo del tiempo y todas las interferencias superficiales que afectan o se ven afectadas por los acuíferos.

En la escala acuífera, el término *caudal de seguridad* fue descrito por primera vez por Lee (1915) como un caudal de agua que puede ser eliminado anualmente, sin peligro de agotamiento de las reservas almacenadas. Por consiguiente, el autor ya reconoció que el bombeo excesivo en un acuífero afectaría a las aguas superficiales. Meinzer (1920) y Conkling (1946) afirman que la cantidad de agua que debe extraerse de los acuíferos debe ser igual a la tasa de su recarga natural. Meinzer (1920) argumenta que las tasas seguras de extracción de un acuífero, sin agotar su suministro, son las limitaciones de la viabilidad económica en la extracción. Aunque la definición no apunta a la sostenibilidad, refleja bien lo que sucedió con los acuíferos estadounidenses agotados. Theis (1940) incorporó el balance hídrico y definió el *caudal de seguridad perenne*. Para ello, añadió en el caudal disponible para su uso, un volumen de recarga inducido por el bombeo, más una parte de las descargas naturales. Bear y Levin (1967) propusieron el *caudal óptimo* basado en fines económicos, sociales, culturales y bióticos, siendo los recursos hídricos una de las variables. El *caudal óptimo* podría sobreexplotar los acuíferos por no tener como objetivo mantener el sistema de agua a tiempo. En Brasil, el *caudal óptimo* podría traer conflictos entre los usos prioritarios previstos por la ley o, entonces, favorecer el uso económico en detrimento de los usos esenciales y los bajos rendimientos económicos. Sophocleous (1997) definió el flujo de seguridad como la obtención y el mantenimiento de un equilibrio a largo plazo entre la cantidad de agua subterránea retirada y la cantidad anual de recarga natural. Para el autor, el *caudal sostenible* difiere y debe ser menor que la recarga natural, considerando también que los vertidos naturales sostienen el drenaje, los humedales y los ecosistemas dependientes. Fetter (2004) considera que *las reservas explotables* se refieren a una tasa de extracción regular y permanente sin causar daños por el agotamiento de las reservas permanentes. Kalf y Woolley (2005) enfatizan que es necesario separar el concepto de *sostenibilidad* del sistema acuífero del *rendi-*

miento de producción del sistema. La sostenibilidad debe basarse en el volumen de recarga y descarga del sistema, y puede considerar los volúmenes de recarga inducidos con el proceso de bombeo. El flujo de seguridad puede ser sostenible si la suma de los flujos de recarga naturales es mayor que la suma de las descargas/extracciones del sistema. En regiones de climas áridos o semiáridos o en acuíferos con un alto grado de confinamiento, la recarga es restringida y puede conducir a un uso no sostenible, sin embargo, aún existen acuíferos con grandes volúmenes de agua almacenada con alta productividad hídrica. En estos casos, el uso de volúmenes mayores a la recarga, aunque se justifique, estaría agotando un volumen no renovable, lo que sería un proceso de extracción del recurso hídrico almacenado a lo largo del tiempo geológico. En los países donde el agua es un bien público, el uso de recursos hídricos no renovables justificaría un análisis más profundo de la relación de los costos socioambientales en detrimento de los beneficios privados generados por sus usos.

En condiciones naturales, antes de la producción de agua subterránea, los acuíferos están en un estado de equilibrio dinámico (ZHOU, 2009). La eliminación del agua conduce a un nuevo equilibrio, ya sea aumentando la recarga, disminuyendo la descarga, perdiendo el almacenamiento o combinando todos estos factores. El bombeo puede reducir la evapotranspiración al reducir los niveles de agua e inducir una recarga adicional cuando los acuíferos tienen una superficie freática poco profunda bajo clima húmedo lluvioso o también a través de la inducción de recarga por cuerpos de agua superficiales adyacentes. Las respuestas dinámicas de un acuífero al bombeo son relativas y dependen de las condiciones del cono de extracción generado, y sus distancias de las áreas de recarga y descarga naturales. Si se establece un nuevo equilibrio dinámico con una tasa de bombeo más baja que la recarga natural, es decir, supuestamente segura, esto aún puede causar el agotamiento de los niveles y no ser suficiente para mantener los ecosistemas dependientes. Además, el bombeo puede causar la intrusión de aguas de mala calidad y el hundimiento de la tierra, incluso sin la sobreexplotación de los acuíferos.

La sostenibilidad de las aguas subterráneas se basa en su desarrollo y uso, y puede mantenerse durante un tiempo infinito sin causar consecuencias ambientales, económicas o sociales inaceptables, de acuerdo con el contexto del sistema hidrológico completo y a largo plazo (ALLEY; REILLY; FRANKE, 1999; ALLEY; LEAKE, 2004). La cantidad de agua subterránea disponible para su uso depende de cómo los cambios en la recarga y descarga afectan el medio ambiente circundante y el compromiso aceptable entre los usos de las aguas subterráneas y estos cambios. El equilibrio de estas variables a largo plazo es el tema central del concepto evolutivo de sostenibilidad.

En Brasil, el término *caudal de seguridad* se considera una *reserva renovable o regulatoria* ($m^3/año$). Estas reservas se renuevan anualmente con el ciclo hidrológico y están directamente relacionadas con las precipitaciones, lo que las hace variables a lo largo de los años. Campos y Correia (2013) indican que las *reservas explotables y concesionables*, cuyo volumen se puede extraer sin causar daño, pueden ser mayores que las reservas renovables, considerando la suma de la reserva renovable anual con parte de la reserva permanente. La *reserva permanente* se refiere al volumen de agua subterránea almacenada en los acuíferos a lo largo del tiempo geológico, y no cambia significativamente en el ciclo anual. Estos son importantes no solo como reservas estratégicas, sino porque constituyen la base para apoyar las reservas renovables y el marco del acuífero, permitiendo descargas naturales relacionadas con los ciclos de precipitaciones.

Entre los *principales criterios técnicos* utilizados para determinar los caudales a otorgar a las aguas subterráneas, se destacan los siguientes: *i)* caudal promedio del acuífero; *ii)* porcentaje del caudal del pozo; *iii)* caudal base de drenaje superficial; *iv)* caudal de seguridad; y *v)* bajada y análisis cualitativo de datos de pruebas de bombeo disponibles (CAMPOS; CORREA 2013). Roedel (2017) y Campos y Correa (2013), con base en modelos numéricos y aplicación de un sistema de información geográfica, propusieron que la concesión debe considerar la favorabilidad y potencial del agua subterránea, la interferencia entre pozos y recursos hídricos superficiales, el flujo promedio del acuífero y el análisis del impacto del flujo requerido, siendo el flujo máximo inferior al 90% de la recarga natural.

Es evidente que la determinación de caudales a acuíferos debe basarse en estudios hidrogeológicos previos, sin embargo, los criterios pueden considerarse como base para su aplicación en diferentes condiciones en la escala de acuíferos y pozos. Para su aplicación, sin embargo, se deben considerar las limitaciones e impactos locales:

- **Caudal medio de los pozos del acuífero:** determinado a partir de los valores de los caudales de los pozos que se lograron a través de diferentes características constructivas, pero dentro del mismo acuífero. Esta velocidad de caudal se puede obtener por aritmética o promedio ponderado de las profundidades, diámetro de los pozos o por la longitud de las secciones filtrantes. Se basa en la capacidad productiva promedio del acuífero, por lo tanto, su aplicación depende de las condiciones de recarga y las reservas renovables para definir límites aceptables de uso.
- **Porcentaje de caudal individual del pozo:** es una fracción del flujo máximo obtenido de las pruebas de bombeo en los pozos a ser concesionados. Esta fracción debe variar en función del compromiso de la región en la que se requiera la concesión y las condiciones de circulación (recarga y descarga). Deberían tenerse en cuenta los riesgos de sobreexplotación y contaminación a que están sometidos los acuíferos. En el caso de la existencia de pozos vecinos con interferencia mutua, el caudal otorgado debe considerar los sistemas de pozos como un solo sistema.
- **Caudal de seguridad:** son los valores de las reservas renovables multiplicados por un factor de seguridad. El factor se define en función de las características hídricas de cada unidad de gestión (Dominios Hidrogeoclimáticos). El caudal de seguridad puede estar representado en el área unitaria (km² o hectárea) de los acuíferos y tiene como objetivo representar las reservas explotables en función de la proporcionalidad de su ocurrencia. En algunos casos, puede representar valores por encima de la reserva renovable, en otros, valores más bajos.
- **Caudal base de drenajes superficiales:** los caudales de concesión se definen en función de un porcentaje del flujo base de drenajes, aplicable solo en drenajes perennes y donde los flujos subterráneos representan la única fuente de agua en períodos de sequía. Este criterio es difícil de aplicar, principalmente debido a: *i)* la falta de datos en muchos drenajes; *ii)* la inaplicabilidad en drenajes intermitentes; *iii)* en los casos en que la existencia de presas cambia el patrón de flujo natural de los ríos; *iv)* la existencia de cuencas y liberaciones que alteran los caudales naturales de recesión; *v)* el uso y ocupación del suelo que favorecen cambios en la escorrentía superficial, entre otros aspectos. Debido a estas dificultades, este criterio, en su caso, sólo permite aproximaciones.
- **Extracción disponible:** se obtiene a partir de la prueba de bombeo, estando relacionada con el espesor de los acuíferos, profundidad de instalación de la bomba, profundidad del nivel estático, variaciones anuales del nivel freático y potencial interferencia entre pozos. La extracción máxima disponible es la que logra la inmersión de la bomba. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, esta extracción máxima disponible debería limitarse a un porcentaje del espesor del acuífero a fin de preservar la mayor parte de su zona saturada.
- **Análisis cualitativo de los datos de la prueba de bombeo:** se utilizan datos de bombeo con un enfoque en la capacidad específica (caudal explotado por la extracción producida al nivel del agua en el pozo). Es un criterio relativo para el talento productivo con capacidades específicas bajas, en el que se otorga un caudal inferior al caudal de prueba. En el caso de valores elevados, el caudal concedido podrá ser similar al obtenido en el ensayo de bombeo. También se deben considerar otros datos hidráulicos al otorgar concesiones, incluyendo: *i)* la capacidad específica promedio del acuífero; *ii)* el valor nominal de la extracción; y *iii)* el tiempo de recuperación del nivel estático después del final del bombeo de 24 horas. En cuanto a la disponibilidad, se debe considerar la favorabilidad del acuífero en los siguientes aspectos: condiciones de recarga y circulación del agua, y estimación de reservas de agua explotables. Para las estimaciones de disponibilidad, se pueden aplicar diferentes métodos y criterios, sin embargo, lo más importante es que los parámetros aplicados sean conservadores, es decir, optimistas con respecto a los sistemas naturales, y pesimistas con respecto a los proyectos humanos.

3.4 COBRO POR EL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS: RECURSOS FINANCIEROS 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. Alentar la racionalización del uso del agua y su conservación, recuperación y ordenación sostenible;
- III. obtener recursos financieros para el financiamiento de 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 de ahorro de agua, de acuerdo con la clasificación de las masas de agua en clases de usos predominantes; e,
- 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 ciliares, a través de compensaciones e incentivos a los usuarios. (art. 2º de la Res. CNRH nº 48/2005).

Este instrumento económico y de control se basa en los principios del contaminador-pagador y del

usuario-pagador, siendo que los importes recaudados tienen carácter de precio público, al tratarse de una contraprestación pagada por el uso de un bien público (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 CCH interestatales, el cobro es aplicado en las siguientes cuencas: Cuenca del río Paraíba do Sul; en las cuencas de los ríos Piracicaba, Capivari y Jundiaí; en la cuenca del río São Francisco; en la cuenca del río Doce; en la cuenca del río Paranaíba; y en la cuenca del río Verde Grande (ANA, 2019).

El agua subterránea es un recurso de dominio estatal, y corresponde a los estados regular y aplicar el instrumento. Con base en la legislación, de manera participativa, los CCH establecen los mecanismos de cobro y sugieren los montos, los cuales serán aprobados por el CERH. En algunos estados, además de esta aprobación, es necesario un decreto gubernamental para hacer cumplir el cobro (VILLAR; GRANZIERA, 2020). Sólo se cobra a los usuarios que tienen el permiso de derecho de uso de los recursos hídricos.

La aplicación del cobro por parte de los Comités Estatales tiene mucho que avanzar, ya que no se aplicó en gran parte del territorio nacional (Figura 43). Además, la situación irregular de los usuarios de las aguas subterráneas perjudica su eficacia en las cuencas que cobran por su uso. Diversas regiones con una alta tasa de explotación de aguas subterráneas y dotadas de CCH aún no han implementado el instrumento, como es el caso de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul y Goiás. La recolección podría contribuir a la implementación de varios programas y proyectos dirigidos a mejorar la gestión del agua, así como fortalecer la gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas.

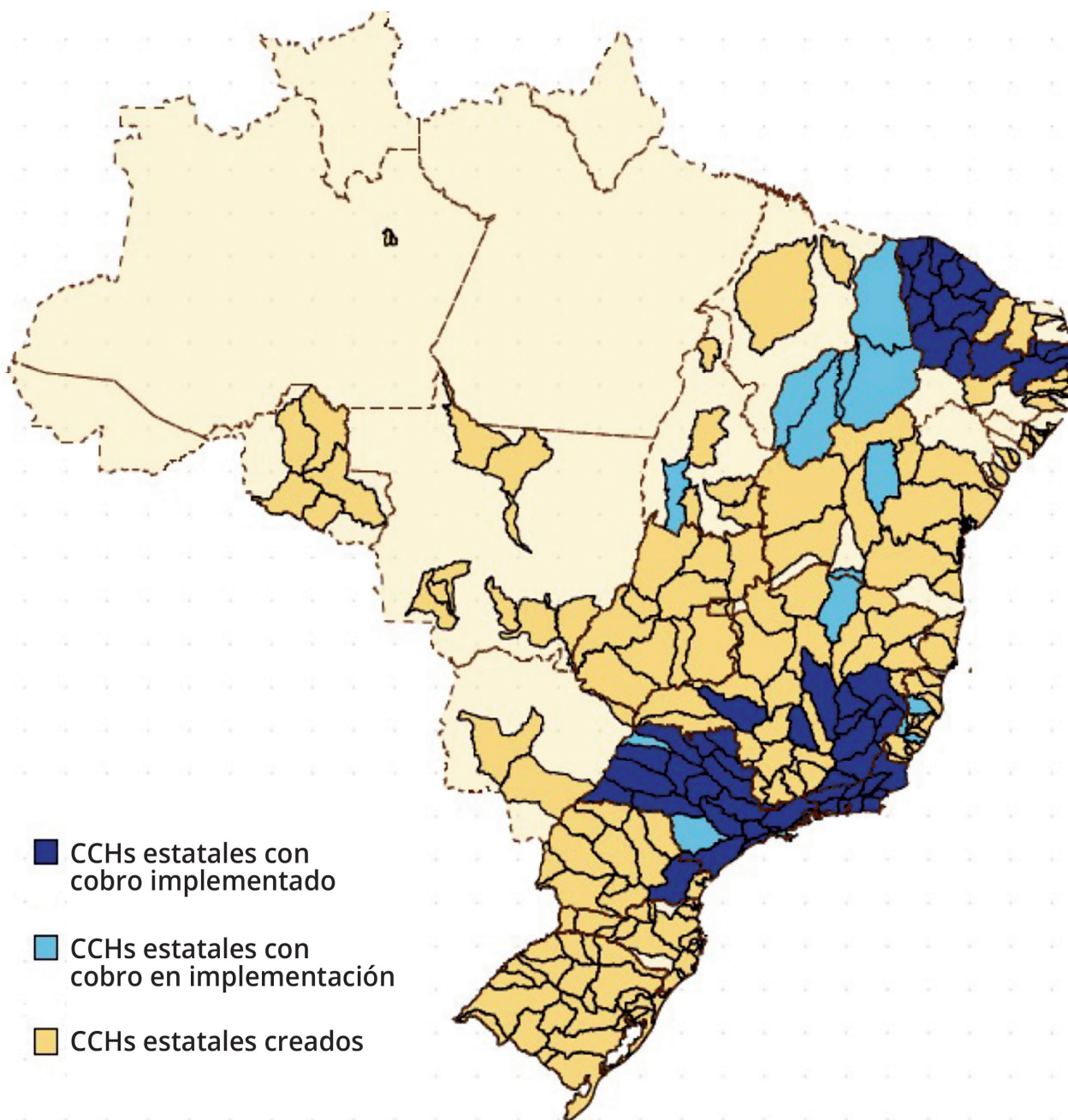


Figura 43 – Cobro por el uso de recursos hídricos en Brasil – Comités Estatales

Fuente: ANA (2019, p. 26).

La Tabla 8 muestra el Precio Unitario Básico (PUB) aplicado en algunas cuencas estatales.

Cuenca	UF	Valor cobrado por el agua	Fundamento jurídico
Cuenca Hidrográfica del Coreaú; Cuenca Hidrográfica del Litoral; Comité de la Cuenca Hidrográfica del Curu; Cuencas Hidrográficas Metropolitanas, etc.	CE*	<ul style="list-style-type: none"> – Las cuencas tienen un cobro uniforme regulado por el Estado. – Los valores oscilan entre R\$ 0,00192 y R\$ 2,93208/m³, dependiendo del usuario y el tipo de captación. – Hay un valor específico para la extracción de agua mineral de R\$ 0,85233/m³. 	Comunicación n° 01/2021/ GECOM/DIAFI/COGERH, del 16/02/2021.
Cuenca Hidrográfica del Rio das Velhas	MG	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01415/m³ extraídos de aguas superficiales y subterráneas; – R\$ 0,0283/m³ consumido; – R\$ 0,09905/kg de DBO liberado. 	Resolución Normativa CCH-Velha n° 3, 03/08/2020.
Cuenca Hidrográfica de los Afluentes Mineros de los Ríos Pomba y Muriaé	MG	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ extraídos de aguas superficiales y subterráneas; – R\$ 0,02/m³ captado consumido; – R\$ 0,07/kg de DBO liberado. 	Deliberación del Comité de Cuencas Hidrográficas de los Afluentes Minerales de los Ríos Pomba y Muriaé n° 37/2014.
Cuenca Hidrográfica del Río Araguari	MG	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ captado de aguas superficiales; – R\$ 0,0115/m³ captado de aguas subterráneas; – R\$ 0,02/m³ captado consumido. 	Resolución CCH-Araguari n° 12, 25/06/2009.
Cuencas del Alto Iguaçu y Afluentes del Alto Ribeira	PR	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ captado de aguas superficiales; – R\$ 0,02/m³ captado de aguas subterráneas; – R\$ 0,02/m³ captado consumido; – R\$ 0,10/kg/año de DBO liberado. 	Resolución n° 5 del Comité de Cuencas del Alto Iguaçu y Afluentes del Alto Ribeira, de 11/07/2013.
Cuenca del Alto Tietê	SP	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ de agua captada, extraída o derivada; – R\$ 0,02/m³ de agua consumida; – R\$ 0,10/kg de DBO 5,20 liberado. 	Anexo 1 - Decreto n° 56.503, de 9 de diciembre de 2010.
Cuenca del Río Pardo	SP	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ de agua captada, extraída o derivada; – R\$ 0,02/m³ de agua consumida; – R\$ 0,10/kg de DBO 5,20 liberado. 	Decreto n° 58.771, de 20 de diciembre de 2012.

(*) En el estado de Ceará, los montos de cobro son decretados por el Gobernador para todas las cuencas, previa manifestación por el Consejo Estatal de Recursos Hídricos (CONERH/CE). No hay manifestación de CCH estatales con respecto al cobro (ANA, 2019).

Tabla 8 – Precio Unitario Básico (PUB) del agua aplicada en la recolección para el uso de recursos hídricos en algunos Comités Estatales de Cuencas Hidrográficas

Fuente: elaborado por los autores.

El PUB no es el precio final pagado por el usuario, que se obtiene a través de fórmulas matemáticas que aplican varios coeficientes de ponderación a este valor. A pesar de la aplicación de estos coeficientes, sin embargo, los precios cobrados son bajos y no necesariamente estimulan el uso racional de los recursos hídricos (OCDE, 2015). El valor de las aguas subterráneas es mucho más amplio que el precio cobrado por ellas. En el Box 18 se presentan los diversos tipos de valores de los recursos ambientales.

Box 18 – Diferentes tipos de valor de los recursos medioambientales*Oswaldo Aly Júnior*

La valoración ambiental utiliza diferentes métodos para cuantificar económicamente un activo ambiental, “estimando” la importancia (y los costos) de los servicios de los ecosistemas afectados o perdidos debido a la acción antrópica. Al estimar los costos y valores de los impactos ambientales, es posible evaluar las consecuencias positivas y negativas de las políticas públicas y las acciones privadas, y comprender hasta qué punto las personas están dispuestas a aceptar la preservación o restauración del medio ambiente natural, y cuánto esto afectará a las generaciones futuras. Lamentablemente, la valoración ambiental de las aguas subterráneas es un tema poco explorado en Brasil

Una de las formas de estimar el valor del recurso ambiental es calculando el Valor Económico Total (VET). El cálculo incluye el *valor de uso* (*directo*, *indirecto* y *opcional*) y los *valores de no uso* (valor de existencia). El primer conjunto se refiere al uso potencial (actual o futuro), mientras que el segundo está relacionado con la existencia del bien, independientemente de su uso.

El *valor del uso directo* se atribuye a un recurso ambiental donde la apropiación directa se produce a través de la extracción o el consumo. Por ejemplo: extracción de agua potable para consumo humano (embotellada/entubada); consumo de agua no potable (riego, lavado de autos y jardines); flujo base que perpetúa los ríos y garantiza el riego, la acuicultura, el transporte fluvial y la generación de energía; turismo y ocio: balnearios hidro minerales, contemplación de cavernas y paisaje.

A su vez, el *valor de uso indirecto* estima los beneficios indirectos derivados de la dinámica de los ecosistemas y el funcionamiento de los acuíferos. Por ejemplo: dilución de aguas residuales y transporte de sedimentos que evita la sedimentación e inundación, filtración, purificación y atenuación de contaminantes (sistema acuífero-suelo y riberas de ríos), recarga/infiltración artificial y almacenamiento subterráneo, apoyo a la biodiversidad, ciclo de nutrientes.

El *valor de la opción* se atribuye a la preservación de los recursos naturales y los ecosistemas para su uso directo o indirecto en el futuro. Todos los servicios presentados anteriormente y no utilizados actualmente tienen un valor de opción, ya que pueden ser utilizados en algún momento futuro.

Los *valores de no uso*, como el valor de existencia, buscan estimar valores que no están asociados con el uso directo o indirecto del recurso, sino más bien con aspectos intangibles. Su valor proviene de aspectos morales, culturales, éticos o altruistas en relación con el derecho a la existencia de especies distintas de los recursos humanos o naturales, aunque no tengan uso actual o futuro. Su medición tiene un alto grado de subjetividad, ya que suelen obtenerse a través de encuestas de opinión.

3.4.1 Acciones relativas a las aguas subterráneas que podrían financiarse mediante la tarificación

En la mayoría de los casos, las aguas subterráneas no son una prioridad para los planes de acción y las inversiones. El Gráfico 9 busca demostrar posibles temas centrales para la elaboración y ejecución de programas y acciones que contribuirían a promover la gestión del agua por parte de las agencias de gestión de recursos hídricos.

Temas centrales para la realización del PDGAS	Acciones para la gestión de las Aguas Subterráneas (AS)
Bases Técnicas para la Gestión de Aguas Subterráneas	– Registro de usuarios de aguas subterráneas en toda la cuenca.
	– Adaptar, mejorar y regular los criterios de otorgamiento de AS.
	– Evaluación hidrogeológica, técnico-económica, monitoreo y control de la perforación de pozos tubulares profundos para evitar la sobreexplotación de acuíferos.
	– Desarrollo de estudios orientados a la innovación y modernización tecnológica aplicada a la seguridad hídrica de las fuentes de agua subterráneas.
	– Los estudios para la proposición o actualización de la legislación afectan a las AS o las directrices para la disciplina del uso y ocupación de la tierra que afectan las áreas de ocurrencia del acuífero.
	– Desarrollo de estudios sobre aguas termales (circulación hidrotermal).
	– Revisión de la política sobre agua mineral y recursos hídricos.
	– Preparación de proyectos de gestión de aguas subterráneas para acuíferos transfronterizos.
	– Establecimiento de subsidios para AS en el Plan Estatal de Recursos Hídricos, Planes de Cuencas Hidrográficas e Informes de Evaluación de Sistemas Estatales de Gestión de Recursos Hídricos y Singreh.
Mejora de la calidad y protección del acuífero	– Registro de fuentes reales o potenciales de contaminación de acuíferos y zonas de recarga.
	– Registro, estudio y caracterización de fuentes difusas de contaminación urbana e insumos agrícolas.
	– Desarrollo de proyectos de protección de áreas de recarga de acuíferos a través de la recuperación y/o conservación de drenajes y cabeceras.
	– Elaboración de la cartografía que contiene la zonificación de la vulnerabilidad natural de los acuíferos.
	– Ejecución de mapeos de vulnerabilidad y peligro a la intrusión de cuñas de sal en acuíferos costeros.
Desarrollo de Sistemas de Información de Acuíferos	– Implementación/incremento de Siagas en los estados y Distrito Federal.
	– Desarrollo e implementación de Sistemas de Soporte a la Decisión (SSD) para apoyar el análisis de aplicaciones de perforación de pozos profundos y concesiones de derechos de uso de aguas subterráneas en los estados y en el Distrito Federal.
Implementación, operación y mantenimiento de Rimas	– Ampliación y consolidación de la red de vigilancia de las aguas subterráneas (por ejemplo: Rimas).
	– Ampliación de la red de monitoreo de calidad y cantidad de aguas subterráneas.
Capacitación y difusión en aguas subterráneas	Establecimiento de convenios y términos de cooperación técnica con instituciones públicas de investigación y docencia (SGB-CPRM, Universidades Federales y Estatales, Centros Tecnológicos Federales, entre otros), desarrollo académico (Fundaciones de Apoyo a la Investigación, CNPq) y asociaciones que trabajan en aguas subterráneas (ABAS, ABRH, ABGE, APG, ABES, entre otros), así como organizaciones no gubernamentales que trabajan en temas relacionados con las aguas subterráneas.
	Elaboración, publicación y difusión de la cartografía hidrogeológica básica de los estados y del Distrito Federal.
	Capacitación de los participantes en general de los Comités de Cuenca sobre los aspectos generales de las aguas subterráneas y los acuíferos.
	Campañas publicitarias para la difusión y mejora de las fuentes de agua subterránea, destacando la conectividad de las aguas subterráneas y la necesidad de regularizar los pozos.

Tabla 9 – Propuesta para la organización de Programas de Desarrollo y Gestión de las Aguas Subterráneas (PDGAS)

Fuente: elaborado por los autores.

3.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los sistemas de información son esenciales para informar 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 destacan tres sistemas de información: el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH), el Registro Nacional de Usuarios de Recursos Hídricos (CNRH), que es un subsistema del SNIRH, y el Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS). Los dos primeros están bajo la tutela de ANA, y SNIRH busca agrupar información general sobre los recursos hídricos, mientras que CNRH se enfoca en los usos regularizados de los recursos hídricos. SIAGAS, que es anterior a la Ley n° 9.433/1997, se dedica exclusivamente a los pozos, analizando datos constructivos, geológicos e hidrogeológicos (ver Box 19).

El SIAGAS opera independientemente de los sistemas coordinados por la ANA. Aunque su integración es deseable, conectarlos es un desafío técnico en vista de las diferentes interfaces utilizadas. La coordinación facilitaría el trabajo institucional y contribuiría a generar una base de datos consolidada con información relacionada con la investigación, el uso y la gestión, sin embargo, aún no se ha previsto llevar a cabo esta integración. La moción de la CNRH n° 038, de 7 de diciembre de 2006, recomendó la adopción del SIAGAS por los órganos de gestión del Estado, las secretarías de los gobiernos estatales, la Agencia Nacional del Agua (ANA) 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 Ambiental (SINIMA) y el Sistema Nacional de Información Sanitaria (SNIS), y la Moción CNRH n° 039, de 7 de diciembre de 2006, también recomendó la integración entre estos sistemas.

3.5.1 Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH)

El SNIRH está previsto en los arts. 5°, inc. VI, y 25 a 27 de la Ley n° 9.433/1997, y tiene por objeto “la recolección, tratamiento, almacenamiento y 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 de SINGREH, los usuarios, la comunidad científica y la sociedad en general³. Los datos almacenados proporcionan la base para la preparación de los Planes de Recursos Hídricos, y se pueden encontrar datos 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. En el caso de las aguas subterráneas, por ejemplo, se pueden encontrar sistemas acuíferos nacionales⁴ y transfronterizos⁵.

3.5.2 Registro Nacional de Usuarios de Recursos Hídricos (CNRH)

El CNRH 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. 1°, § 2°). Este registro materializa un “registro de usuarios de recursos hídricos, usos e interferencias regularizados por los Estados y la Unión” (art. 1, § 1°). Desarrollado por ANA, junto con las autoridades estatales de gestión de recursos hídricos, CNRH también forma parte de SNIRH.

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. En su Anexo, dicha Resolución determina todos los datos que deben ser integrados por la ANA y las Unidades de la Federación.

La idea es que los Estados inserten en este Registro Nacional sus bases de datos relacionadas con los usos de los recursos hídricos, permitiendo difundir sus usuarios y usos, en función de las diferentes territorialidades (local, regional o nacional). Este Registro sirve de puente entre el Sistema Nacional y los Sistemas Estatales de Información de Recursos Hídricos con respecto a los diversos tipos de usos de los recursos hídricos. Los organismos o entidades que gestionan los recursos

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

4. Disponible en: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/3ec60e4f-85ea-4ba7-a90c-734b57594f90>.

5. Disponible en: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/54891117-5f06-4cdc-b929-fc4db50eec08>.

hídricos y los otorgantes estatales y de la Unión son responsables de insertar el registro de usuarios, usos e interferencias, más los actos de regularización, según lo establecido en la Res. CNRH n° 126/2011. Se clasifican como usuarios de este Registro, a todas las “personas⁶

físicas o jurídicas, de derecho público o privado, que utilicen o interfieran con los recursos hídricos, estén o no sujetos a concesión, de conformidad con el art. 12 de la Ley n° 9.433/1997, y las normas estatales vigentes” (art. 3°, inc. III, de la Res. CNRH n° 126/2011)^{6, 7}

Box 19 – Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS)

Valmor Freddo

Creado en 1996 por el SGB-CPRM, el Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAGAS) se destaca en el tema de la gestión de la información, siendo la principal recopilación de información de los pozos existentes en Brasil. Los principales socios que apoyan y contribuyen a su consistencia alimentaria y de datos son la gestión de los recursos hídricos y las partes interesadas de los estados de la Federación, las empresas de perforación de pozos y los usuarios de los recursos hídricos.

El SIAGAS tiene como objetivo recopilar, consistir, almacenar y poner a disposición datos e información hidrogeológica georreferenciada. Inicialmente, su acción tiene como objetivo apoyar la elaboración de mapas hidrogeológicos y, posteriormente, atender las demandas de los usuarios, provenientes del área de Recursos Hídricos y afines. Presenta mecanismos que facilitan la recolección, consistencia y almacenamiento de datos hidrogeológicos, actuando en articulación con órganos de gestión estatal y empresas socias (públicas y/o privadas).

Una de las preocupaciones prioritarias, desde el comienzo del desarrollo de este Sistema, era proporcionar a los administradores y a los encargados de adoptar decisiones información cada vez más cualificada y pertinente. Por lo tanto, la filosofía adoptada fue acercarse a una base de datos, estructurada en un modelo de datos con contenido integral, a fin de permitir una mayor flexibilidad, racionalización e intercambio con otras bases de datos.

El SIAGAS es un instrumento importante para apoyar la decisión, y su misión es:

- proporcionar subsidios a la investigación, estudio y proyectos de Hidrología e Hidrogeología desarrollados por el Servicio Geológico de Brasil, dentro del alcance de su desempeño;
- formar una base de datos nacional de pozos para subsidiar la Política Nacional de Recursos Hídricos; y
- proporcionar información para la toma de decisiones, con el objetivo de aumentar el suministro de agua, y servir como un instrumento para la gestión de los recursos de aguas subterráneas.

Entre los principales beneficios generados por el Proyecto SIAGAS, podemos mencionar:

- añadir valor a la base de datos de pozos;
- instrumento de apoyo a la gestión racional de los recursos de aguas subterráneas;
- insumo para la elaboración de los Mapas Temáticos en Hidrogeología;
- apoyo a la Política Nacional de Recursos Hídricos.

Con un sistema interactivo y totalmente abierto al público, el SIAGAS permite el acceso a datos de registro, pruebas constructivas, geológicas, hidrogeológicas, de bombeo y análisis químico de varios pozos en todo el territorio nacional. Su contenido se puede encontrar en la plataforma electrónica SIAGAS Web, con fácil acceso a la información, que permite la investigación jerárquica, tanto puntual como espacial, además de permitir a los usuarios utilizarlo en una amplia gama de aplicaciones, desde la gestión, monitoreo de aguas subterráneas, estudios de evaluación hidrogeológica y suministro de agua⁷.

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

7. Todos los datos están disponibles en el sitio web: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>.

3.6 IMPLICACIONES JURÍDICAS PARA EL USO IRREGULAR DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La legislación nacional y estatal sobre recursos hídricos impone una serie de obligaciones a quienes desean utilizar los recursos hídricos subterráneos. Entre ellos, destacan los siguientes (VILLAR; GRANZIERA, 2020, pp. 128-129):

- licencia o autorización para perforar pozos;
- la concesión del derecho a utilizar los recursos hídricos, otorgado por la autoridad competente, y el uso compatible con las condiciones prescritas;
- en el caso de los usos previstos en el art. 12 de la Ley n° 9.433/1997, observancia de los procedimientos previstos en la legislación estatal, como la obtención de la declaración de uso exento o insignificante con el órgano competente de gestión de los recursos hídricos y el uso del agua dentro de los límites previstos;
- las extracciones de aguas subterráneas deben diseñarse, construirse y explotarse de acuerdo con las normas técnicas vigentes;
- las extracciones de agua subterránea deben estar equipadas con dispositivos que permitan la recolección de agua, mediciones de nivel, flujo y volumen capturados para permitir el monitoreo cuantitativo y cualitativo;
- los usos de las aguas subterráneas objeto de la subvención están sujetos a recogida, si este instrumento está en vigor en la cuenca;
- cualquier actividad o empresa debe tomar medidas preventivas para evitar daños a los acuíferos;
- el propietario de pozos abandonados o improductivos, o cuya operación cause cambios perjudiciales en la calidad de las aguas subterráneas, deberá tomar medidas, de acuerdo con el procedimiento aprobado por la agencia de gestión de recursos hídricos.

En el caso de las aguas subterráneas que se utilizan como aguas minerales, termales, potables de mesa o de baño, destacan las siguientes obligaciones (VILLAR; GRANZIERA, 2020, p. 129):

- obtener la autorización de investigación y la ordenanza minera de la ANM para explorar el potencial de las aguas subterráneas relacionadas

con las características del agua mineral, termal, potable de mesa o de baño;

- obedecer los términos contenidos en la autorización de investigación y en la ordenanza de exploración emitida por ANM;
- establecer perímetros de protección del agua mineral;
- algunos Estados exigen la concesión de derechos de uso o la declaración de uso exento para este tipo de explotación.

El incumplimiento de cualquiera de estas obligaciones podrá 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 de 1988. Existe mucha jurisprudencia en los Tribunales Estatales, la cual: *a)* autoriza el taponamiento de pozos sin otorgar el derecho de uso o acreditar su exención; *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 sin autorización de recurso federal (VILLAR; HIRATA, 2019; VILLAR; GRANZIERA, 2020). Sin embargo, en la jurisprudencia, el pago de indemnizaciones al Gobierno del Estado o a terceros afectados por el uso de aguas subterráneas sin otorgar el derecho de uso no estaba localizado, sin embargo, en teoría, esta compensación sería factible desde un punto de vista legal.

La responsabilidad civil se materializa cada vez que se produce un daño a un acuífero, y se desarrolla de dos maneras: *a)* reparación, remediación o compensación por el cambio indeseable causado al medio ambiente y sus elementos, al acuífero y sus aguas; y *b)* compensación por el daño que este cambio ha causado a la salud y los intereses de las personas afectadas, como los usuarios legítimos que han perdido sus pozos.

La responsabilidad administrativa y penal requiere una conducta así tipificada. En la Tabla 10 se indican las principales infracciones administrativas relacionadas con el uso de las aguas subterráneas, enumeradas en la Ley n° 9.433/1997 y el Decreto Federal n° 6.514/2008. Los Estados también tienen competencia para establecer otras infracciones administrativas relacionadas con el uso y la protección de esas aguas. Cabe señalar también que el Código de Aguas Minerales establece varias obligaciones

e infracciones administrativas relacionadas con el comercio de aguas minerales (art. 24 a 34). La mayoría de estas infracciones administrativas se sancionan mediante: a) apercibimiento por escrito, en el que se establecen plazos para la corrección de irregularidades; b) multa, simple o diaria; c) embargo provisional del

pozo para realizar servicios y trabajos necesarios para el efectivo cumplimiento de las condiciones de otorgamiento o para el cumplimiento de normas relacionadas con el uso, control, conservación y protección de los recursos hídricos; y d) embargo definitivo del pozo o su taponamiento.

Ley n° 9.433/1997:

Art. 49. Constituye una infracción de las normas de utilización de los recursos hídricos superficiales o subterráneos:

I. derivar o utilizar los recursos hídricos para cualquier fin, sin la respectiva concesión del derecho de uso;

II. iniciar la implementación o puesta en marcha de una empresa relacionada con la derivación o uso de recursos hídricos, superficiales o subterráneos, que implique cambios en el régimen, cantidad o calidad de los mismos, sin autorización de los órganos o entidades competentes;

III. (VETADO)

IV. hacer uso de los recursos hídricos o realizar obras o servicios relacionados con los mismos en desacuerdo con las condiciones establecidas en la concesión;

V. perforar pozos para la extracción de aguas subterráneas o explotarlos sin la debida autorización;

VI. fraudar las mediciones de los volúmenes de agua utilizados o declarar valores diferentes de los medidos;

VII. infringir las normas establecidas en el reglamento de esta Ley y en los reglamentos administrativos, incluidas las instrucciones y procedimientos establecidos por los órganos o entidades competentes;

VIII. Obstruir u obstaculizar la acción supervisora de las autoridades competentes en el ejercicio de sus funciones.

Decreto Federal n° 6.514/2008:

Art. 61. Causar contaminación de cualquier tipo a niveles que provoquen o puedan provocar daños a la salud humana, o causar la muerte de animales o la destrucción significativa de la biodiversidad:

Párrafo único. Las multas y demás sanciones a que se refiere el *caput* se aplicarán previo informe técnico elaborado por el organismo ambiental competente, identificando el alcance del daño resultante de la infracción y de acuerdo con la gradación del impacto.

Art. 62. Incurrir en las mismas multas del art. 61 quien:

[...]

III - causar la contaminación del agua que hace necesario interrumpir el suministro público de agua de una comunidad; [...].

Art. 63. Realizar investigaciones, minería o extracción de minerales sin la autorización, permiso, concesión o licencia competente de la autoridad ambiental competente o en desacuerdo con la obtenida:

Multa de R\$ 1.500,00 (mil quinientos reales) a R\$ 3.000,00 (tres mil reales), por hectárea o fracción.

Art. 66. Construir, reformar, ampliar, instalar u operar establecimientos, actividades, obras o servicios utilizando recursos ambientales, considerados efectivos o potencialmente contaminantes, sin licencia o autorización de los organismos ambientales competentes, en desacuerdo con la licencia obtenida o en contra de las normas y reglamentos legales pertinentes:

Multa de R\$ 500,00 (quinientos reales) a R\$ 10.000.000,00 (diez millones de reales).

Art. 82. Elaborar o presentar información, estudio, laudo o informe ambiental total o parcialmente falso, engañoso u omitido, ya sea en sistemas de control oficial, ya sea en concesión de licencias, concesión forestal o cualquier otro procedimiento administrativo ambiental:

Multa de R\$ 1.500,00 (mil quinientos reales) a R\$ 1.000.000,00 (un millón de reales).

Tabla 10 – Infracciones administrativas relacionadas con el uso de aguas subterráneas

Fuente: Villar y Granziera (2020, p. 130).

La Tabla 11 presenta los delitos ambientales relacionados con el uso de aguas subterráneas, establecidos por la Ley n° 9.605/1998. Además, el uso de aguas minerales sin autorización de la ANM ha sido considerado por varios jueces como un delito de usurpación de bienes del Gobierno Federal, previsto en el art. 2 de la Ley n° 8176/1991.

Ley n° 9605/1998:

Art. 54. Causar contaminación de cualquier tipo a niveles que provoquen o puedan provocar daños a la salud humana, o causar la muerte de animales o la destrucción significativa de flora:

Pena - prisión, de uno a cuatro años, y multa.

§ 1°. Si el crimen es culposo:

Pena - detención, de seis meses a un año, y multa.

§ 2°. Si el crimen:

[...]

III - causa la contaminación del agua que hace necesario interrumpir el suministro público de agua de una comunidad;

[...]

Art. 55. Realizar investigaciones, minería o extracción de recursos minerales sin la autorización, permiso, concesión o licencia competente, o en desacuerdo con la obtenida:

Pena - detención, de seis meses a un año, y multa.

Art. 60. Construir, renovar, ampliar, instalar u operar, en cualquier parte del territorio nacional, establecimientos, obras o servicios potencialmente contaminantes, sin licencia o autorización de los organismos ambientales competentes, o contrarios a las normas legales y reglamentarias pertinentes:

Pena - detención, de uno a seis meses, o una multa, o ambas penas, acumulativamente.

Art. 68. Permiso, aquellos que tienen el deber legal o contractual de hacerlo, para cumplir con una obligación de interés ambiental relevante:

Pena - detención, de uno a tres años, y multa.

Párrafo único. Si el delito es culposo, la pena es de tres meses a un año, sin perjuicio de la multa.

Art. 69-A. Elaborar o presentar, en la concesión de licencias, concesión forestal o cualquier otro procedimiento administrativo, estudio, laudo o informe ambiental total o parcialmente falso o engañoso, incluyendo por omisión:

Pena - prisión, de 3 (tres) a 6 (seis) años, y multa.

§ 1°. Si el crimen es culposo:

Pena - detención, de 1 (uno) a 3 (tres) años.

§ 2°. La sanción se incrementa de 1/3 (un tercio) a 2/3 (dos tercios), si existe un daño significativo al medio ambiente, debido al uso de información falsa, incompleta o engañosa.

Ley n° 8176/1991:

Art. 2°. Es delito contra la propiedad, en forma de usurpación, producir bienes o explotar materia prima perteneciente a la Unión, sin autorización legal o en desacuerdo con las obligaciones impuestas por el título autorizante.

Pena: detención, de uno a cinco años y multa.

Tabla 11. Delitos ambientales relacionados con las aguas subterráneas

Fuente: Villar y Granziera (2020, p. 131).

3.7 INSTRUMENTOS DE OTRAS POLÍTICAS QUE CONTRIBUYEN A LA GOBERNANZA DEL AGUA

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 con las políticas relacionadas con el uso y la ocupación del territorio, los sectores usuarios 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 urbanismo.

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

De acuerdo con sus competencias, los estados y municipios deben regular e implementar estos instrumentos, incluidos los aspectos relacionados con el agua (aguas superficiales y subterráneas) y la promoción de la seguridad hídrica. Los principales instrumentos de gestión que pueden tener una influencia positiva o negativa en el agua son (VILLAR; HIRATA, 2022):

- Plan maestro;
- Legislación relacionada con la entrega, el uso y la ocupación de los terrenos;
- Zonificación ambiental;
- Concesión de licencias ambientales para actividades potencialmente contaminantes;
- Licencias o autorizaciones administrativas para el sondeo y perforación de pozos;
- Zonificación Económica Ecológica (ZEE);
- Unidades de conservación;
- Programa Estatal de Regularización Ambiental (PRA);

- Áreas de Preservación Permanente y Reserva Legal;
- Sistema Nacional de Información del Medio Ambiente (Sinima);
- Planes de Cambio Climático;
- Planes de Residuos Sólidos;
- Planes de Gestión de Residuos Sólidos;
- Gestión de Áreas Contaminadas;
- Informe de áreas contaminadas;
- Planes de saneamiento;
- Sistema de Información sobre 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 a medida que guían y optimizan el desempeño de los usuarios, protegen el agua o los elementos relacionados con el ciclo hidrológico, imponen restricciones o limitan el uso y la ocupación de la tierra, o condicionan la implementación de actividades potencialmente contaminantes o usuarios de recursos naturales. El gran desafío, sin embargo, es que se implementen de manera efectiva y eficaz, además de contemplar las aguas subterráneas. El Poder Público tiene dificultades para elaborar o aplicar importantes instrumentos de planificación, como los Planes Estatales de Riego, la Zonificación Agroecológica y la Zonificación Económica Ecológica. Esta 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 inclusión de la protección de los acuíferos en la planificación territorial municipal. Las aguas subterráneas son esenciales para el suministro público, especialmente en los municipios pequeños. Sin embargo, no es habitual que los municipios utilicen instrumentos de política urbana para proteger las áreas de recarga que contribuyen a garantizar el suministro local, o para llevar a cabo una zonificación que tenga en cuenta la vulnerabilidad de los acuíferos.

REFERENCIAS

- ALLEY, W. M.; LEAKE, S. A. The journey from safe yield to sustainability. National
- ALLEY, W. M.; REILLY, T. E.; FRANKE, O. L. Sustainability of ground-water resources. **US Geological Survey Circular**, v. 1186, 1999.
- ANA. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: 2013. Brasília: ANA, 2013. Disponível em: http://conjuntura.ana.gov.br/docs/conj2013_rel.pdf. Acesso: 29/04/2015.
- 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. **Avaliação dos aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000)**. Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da PHA no Brasil, t. I, v. III, 2015. 330p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH) da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema**. Paranapanema, SP, set. 2016.
- 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.
- AUGUSTO, V. A.; CAMPOS, J. E. G. Domínios Hidrogeoclimáticos no Semiárido Brasileiro, Estado da Bahia: Unidades-Base para Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.
- Bear, J.; Levin, O. The optimal yield of an aquifer. I.A.S.H. Symposium on Artificial
- Recharge and Management of Aquifers, **IASH Publ.** n. 72, pp. 401-412. 1967.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos... Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**: Prioridades 2012-2015. Brasília, dez. 2011. Disponível em: <https://bibliotecadigital.seplan.planejamento.gov.br/bitstream/handle/iditem/435/PNRH%202012-2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- 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).
- CBH PARDO. Comitê da Bacia Hidrográfica do Pardo. **Deliberação nº 04, de 9 de junho de 2006**.
- CBH PARDO. Comitê da Bacia Hidrográfica do Pardo. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica 2020**. Grupo de Trabalho Permanente do Relatório Anual de Situação dos Recursos Hídricos e Plano de Bacia/UGRHI-4 Pardo. Ribeirão Preto, SP, 2020. 114p. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-PARDO/19583/relatorio-situacao-2020-ab2019-versao-final.pdf>.
- 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 15, de 11 de janeiro de 2001**. Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/61-resolucao-n-15-de-11-de-janeiro-de-2001/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://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/2437-resolucao-n-202-de-28-de-junho-de-2018/file>.
- 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 nº 48, de 21 de março de 2005**. Estabelece critérios gerais para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/2436-resolucao-cnrh-48/file>.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 91, de 05 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>.
- 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://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>.

- CONKLING, H. Utilization of groundwater storage in stream system development. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 111, 1946, pp. 275-305.
- 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.
- DOVERI, M.; MENICHINI, M.; SCOZZARI, A. Protection of groundwater resources: worldwide regulations and scientific approaches. In: SCOZZARI, A.; DOTSIKA, E. (Eds.). **Threats to the Quality of Groundwater Resources: prevention and control**, Handbook of Environmental Chemistry, Berlin, Springer-Verlag, chapter 1, 2015 (doi 10.107/698_2015_421).
- ENVIRONMENTAL AGENCY. **Manual for the production of groundwater source protection zones**. Bristol: Environment Agency, 2019, 112p.
- FETTER C.W. **Applied Hydrogeology**. Upper Saddle River. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2004.
- 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, 103p.
- 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, 104p.
- FOSTER, S.; SKINNER, A. C. Groundwater protection: the Science and practice of land surface zoning. Groundwater Quality, Remediation and Protection, Prague Conference, Proceedings. **IAHS Publication**, n. 225, 1995, pp. 471-482.
- FRANKE, O. L.; REILLY, T. E.; POLLOCK, D. W.; LABAUGH, J. W. **Estimating áreas contributing recharge to wells**. Lessons from previous studies. Denver, US: Geological Survey, 1998. 14p. (Circular n. 1174).
- GARCÍA, A. G.; NAVARRETE, C. M. Protection of groundwater intended for human consumption in the water framework directive: strategies and regulations applied in some european countries. **Polish Geological Institute Special Papers**, v. 18, 2005, pp. 28-32.
- GÁRFIAS, J.; EXPÓSITO, J. L.; LLANOS, H. Delimitación de las zonas de protección mediante métodos analíticos y um modelo numérico de agua subterrânea, acuífero Margarita, Cuba. **Boletín Geológico y Minero**, v. 119, n. 1, 2008, pp. 7-20.
- GRANZIERA, M. L. M. **Direito ambiental**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015.
- Ground Water Association. **Groundwater Journal**, v. 42, 2004.
- HARDIN, G. The tragedy of the commons. **Science**, v. 162, 1968, pp. 1243-1248.
- 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 (USP) e Trata Brasil, 2019.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço. 2. ed. **Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos**. São Paulo: Instituto Geológico, n. 2, 2012.
- KALE, F. R.; WOOLEY, D. R. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. **Hydrogeology Journal**, v. 13, 2005, pp. 295-312.
- LANNA, A. E. L. A gestão dos recursos hídricos no contexto das políticas ambientais. In: MUÑOZ, H. R. (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.
- LEE, C. H. **The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type**. Transactions of American Society of Civil Engineers, paper n. 1315, 1915, pp. 48-251.
- LIU, Y.; WEISBROD, N.; YAKIREVICH, A. Comparative study of methods for delineating the wellhead protection area in an unconfined coastal aquifer. **Water**, v. 11, 2019. 1168p.
- MDR. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Informe de Implementação das Prioridades e Metas para 2016-2020/21. Brasília, 2016. Disponible en: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1/Pag_02_Informe_Prioridades_PNRH_2016_2020.pdf.
- MEINZER, O. E. Quantitative methods of estimating ground-water supplies. **Geological Society of America Bulletin**, v. 31, 1920, pp. 329-338.
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Informe de Implementação das Prioridades e Metas para 2016-2020/21. Disponible en: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1/Pag_02_Informe_Prioridades_PNRH_2016_2020.pdf.
- NAVARRETE, C. M.; GARCÍA, A. G. Methodology for wellhead protection área implementation. Application to urban water supply catchments in carbonated and detritic formations in Spain. **Protecting Groundwater**. Birmingham, UK: Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 2001, pp. 198-209.
- NAVARRETE, C. M.; GARCÍA, A. G. **Perímetros de protección para captaciones de agua subterrânea destinada al consumo humano**. Metodología y aplicación al territorio. Madrid: IGME, 2003, 273 p. (Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas).

- OECD. Water Resources Governance in Brazil, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, 2015.
- PARIS, M. C.; D'ELIA, M.; PÉREZ, M.; PACINI, J. Wellhead protection zones for sustainable groundwater supply. **Sustainable Water Resources Management**, v. 5, 2019, pp. 161-174.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, 2008, pp. 43-60. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10292>.
- ROEDEL, R. M. **Proposição de critérios técnicos para outorga de águas subterrâneas**. Estudo de caso: polo industrial de Camaçari. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador, 2017.
- SÃO PAULO. **Deliberação CRH nº 146, de 11 de dezembro de 2012**. Aprova os critérios, os prazos e os procedimentos para a elaboração do Plano de Bacia Hidrográfica e do Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica. Disponível em: https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/deliberacao//CRH/10742/deliberacao_crh_146_2012_pbh.pdf.
- 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#:~:text=Artigo%202.%C2%BA%20%2D%20A%20Pol%C3%ADtica,pelas%20gera%C3%A7%C3%B5es%20futuras%2C%20em%20todo>.
- SÃO PAULO. Sistema Aquífero Bauru. Delimitação de perímetros de proteção de poços de abastecimento público. São Paulo: Instituto Geológico/Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Coord. Geral José Luiz Albuquerque Filho e Mara Akie Iritani. **Cadernos do Projeto Aquíferos**, n. 6, 2016 (texto e anexos). Disponível em: <http://igeologico.sp.gov.br/noticias/caderno-do-projetos-aquiferos-no6>.
- SOPHOCLEOUS, M. A. Managing water resources systems: why safe yield is not sustainable. **Ground Water**, v. 35, 1997.
- STROBL, R. O.; ROBILLARD, P. D. Review of USEPA-recommended and German wellhead protection area delineation methods. **Journal of Environmental Hydrology**, v. 13, paper 3, 2005.
- THEIS, C. V. The source of water derived from wells: essential factors controlling the response of an aquifer to development. **Civil Engineer**, v. 10, 1940, pp. 277-280.
- USEPA – U.S. **Ground water and wellhead protection**. Handbook. Washington: USEPA, Office of Research and Development (EPA/625/R-94/001), 1994.
- USEPA – U.S. **Guidelines for delineation of wellhead protection areas**. Washington: USEPA, Office of Groundwater Protection (EPA/440/6-87-010), 1987.
- VILLAR, P. C.; GRANZIERA, M. L. M. **Direito de águas à luz da governança**. Brasília: ANA, 2020.
- 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. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n1/pt_1809-4422-asoc-19-01-00085.pdf.
- 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. **Águas subterrâneas**. 2019. Disponível em: <https://aguassubterraneas.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.
- ZHOU, Y. A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. **Journal of Hydrogeology**, v. 370, 2009, pp. 207-213.



Pozo Violeta en los Acuíferos Cabeças y Serra Grande en Alvorada do Gurguéia (PI)
Foto: Vagney A. Augusto / Banco de imágenes ANA

CAPÍTULO 4

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

4.1 ESTABLECIMIENTO DE UNA AGENDA DE IMPLEMENTACIÓN PARA LA GOBERNANZA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Históricamente, la gobernanza del agua en Brasil siempre ha centrado sus esfuerzos en las aguas superficiales. En este contexto, el Gobierno tiene dificultades para introducir las aguas subterráneas 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, pero también acciones específicas que consideren las particularidades de cada dimensión, so pena de que la sociedad pierda oportunidades sociales, ecológicas y económicas. La Tabla 12 muestra las principales distinciones entre aguas superficiales y subterráneas.

Apariencia	Aguas subterráneas	Aguas superficiales
Almacenamiento	Grande	Pequeño y mediano
Área de recursos	Relativamente sin restricciones	Limitado a cuerpos de agua
Velocidad del flujo	Muy bajo	Medio y alto
Tiempo de residencia	Generalmente décadas/siglos	Generalmente semanas/meses
Propenso a las sequías	Baja	Alta
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 natural variable	Sin protección
Persistencia de la contaminación	Generalmente extrema	Generalmente transitoria

Tabla 12 – 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, independientemente del escenario de cambio climático o crisis hídrica, estas aguas son fundamentales para el suministro público, los usos económicos y para los grupos vulnerables que no tienen otra fuente de agua. Por último, su duración de residencia significa que parte de ellos no se considera un recurso renovable, lo que requiere un debate sobre cómo maximizar su uso y el derecho de las generaciones futuras al recurso.

La falta de conocimientos sobre las aguas subterráneas o 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 y, en consecuencia, a una disminución del caudal fluvial y de la disponibilidad de agua de 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 con fines de suministro, riego o industria. En este contexto, existen tres problemas centrales que amenazan las aguas subterráneas (CONTI, 2017):

- a) **Falta o ineficiencia de gestión y control de las extracciones acuíferas.** 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 las acciones para mantener la calidad del acuífero o para recuperarlo.** Las actividades antropogénicas pueden contaminar los acuíferos y hacer inviables importantes reservas de agua.
- c) **Falta de planificación estratégica en el manejo 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 forman 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 degradarse.

La solución de estos problemas demanda una gobernanza basada en el conocimiento, la coordinación interinstitucional y la participación de los múltiples actores (institucionales y sociales) involucrados en el uso y la 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 de gestión sectorizadas y la participación de los usuarios.

El conocimiento hidrogeológico existente en Brasil es incipiente en vista de las necesidades impuestas por el manejo de los recursos hídricos, sin embargo, es solo él que permite la “visualización” de 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 un proceso de toma de decisiones participativo y fundamentado. La invisibilidad y el desconocimiento también se producen en relación con los conflictos entre los usuarios y entre las políticas públicas sobre 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 estén utilizando los pozos de manera incorrecta (o irregular), o por la proximidad de actividades capaces de contaminar el suelo y los acuíferos. Sin entender qué causa estos problemas, no hay presión social sobre 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, en el caso de los recursos subterráneos, muestran limitaciones. La fuerte evidencia es el alto grado de pozos irregulares. Si el incumplimiento de la ley es, en sí mismo, un problema, otro es el desconocimiento de la existencia del número real de pozos. En Brasil, el 90% de las captaciones de aguas subterráneas son particulares y solo el 10% abastece redes públicas urbanas (HIRATA *et al.*, 2019). La mayoría de las abstracciones son invisibles a las políticas públicas, y los estados no tienen idea de la dimensión económica y el papel socioambiental de estas aguas.

Debido a la facilidad de exploración, esta fuente se vuelve cada vez más popular para la oferta de diversas actividades en el campo y en la ciudad, y se basa en los siguientes puntos: bajo costo de exploración; velocidad de la perforación de pozos (en algunos casos en menos de una semana); nuevas tecnologías asociadas con la operación de pozos, que permiten 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 elaborar 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 su uso? No hay respuestas correctas a estas preguntas, porque en cada acuífero, en el contexto de la propia cuenca hidrográfica, existe la necesidad de un proceso de gobernanza que defina cómo se dará su uso frente a las funciones socioeconómicas y ecosistémicas 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 del agua.**

La hidrogeología juega un papel fundamental en la gobernanza de los acuíferos en la medida en que esta ciencia es responsable por delimitar los acuíferos y determinar los aspectos centrales de su gestión: 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; e) cómo recuperar un acuífero. En muchos casos, incluso con la existencia de datos que demuestren 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, la gestión, la propiedad, el uso y la importancia de las aguas subterráneas.**

El debate debe ir más allá de las cuestiones técnicas de Geología e Ingeniería, e incorporar temas como: a) la arquitectura institucional y jurídica de la gobernanza de las aguas subterráneas; b) el valor de estas aguas; c) las relaciones sociales y las estructuras de poder detrás de la lógica de la clandestinidad, la ignorancia y la invisibilidad; d) los procesos de participación social en relación con estas aguas; e) los conflictos sociales y la apropiación desigual de los recursos; y f) las estrategias de educación ambiental, etc.

- **Deficiencias 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 vertical¹ entre los órganos de gestión 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 promover políticas eficaces para la gestión de las aguas subterráneas. A pesar de ello, faltan iniciativas que promuevan esta coordinación entre la Unión, los Estados, el Distrito Federal y los municipios, y que correlacionen los recursos hídricos subterráneos con las agendas del medio ambiente, el ordenamiento territorial, 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 irregular. 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 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.

1. 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).

La gobernanza, la gobernabilidad y la gestión de los recursos de aguas subterráneas están sujetas a la siguiente agenda mínima:

- el reconocimiento regional de los acuíferos potenciales y sus principales funciones ecosistémicas mediante estudios que incorporen las diversas funciones desempeñadas por las aguas subterráneas, incluida su importancia económica (cuantificarla) y ecológica (reconocerla). Los trabajos para este reconocimiento deben considerar el mapeo hidrogeológico, basado en el registro de pozos tubulares, mapa geológico de superficie, mapa de la red hidrográfica, áreas de pantanos, manglares y lagos, balances hídricos regionales (en cuencas hidrográficas), entre otros;
- estudio sobre la relación de los acuíferos con otras masas de agua, cuantificando los vertidos de aguas subterráneas en la perennidad de ríos, lagos, manglares y pantanos, mediante análisis en cuencas fluviales y modelización numérica regional;
- identificación de áreas críticas de recursos hídricos subterráneos, es decir, aquellas con mayor uso de aguas subterráneas, tanto para el suministro público como privado, o aquellas donde se identifica el mayor riesgo de contaminación (en el sentido de Foster e Hirata, 1988), a partir del registro de posibles fuentes de contaminación y vulnerabilidad a la contaminación;
- identificación de los actores implicados en el uso y la gestión de los recursos hídricos, territoriales y medioambientales;
- identificación de comunidades y grupos vulnerables que dependen de las aguas subterráneas;
- creación de grupos específicos de Hidrogeología en Comités de Cuenca y otras instancias que contribuyan a planificar el uso del agua en las cuencas, especialmente en áreas críticas. Estos grupos deberían definir un programa de inversiones concreto a fin de determinar las esferas prioritarias y los estudios que busquen soluciones;
- realizados los estudios hidrogeológicos básicos, los órganos de gestión de los recursos hídricos, especialmente los colegiados, deben establecer grupos interdisciplinarios con el objetivo de proponer acciones estratégicas integrales para una gestión comprometida con las necesidades de la sociedad y el medio ambiente, teniendo en cuenta, entre otros, temas 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;
- impartir formación técnica a diversos niveles para diversos públicos, siempre en consonancia con las políticas de gestión y gobernanza de los recursos hídricos subterráneos;
- 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 de la Salud 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 identificando a los usuarios privados irregulares, haciéndolos conscientes de la importancia de un buen uso y protección y mantenimiento de su captación;
- la búsqueda de mecanismos de incentivo para promover la regularización de los pozos;
- promover el establecimiento de organizaciones de usuarios que ayuden al Poder Público en el monitoreo y fiscalización de las aguas;
- promover alianzas con universidades y centros de investigación, el Colegio de Abogados de Brasil (OAB) y el Ministerio Público, con el fin de monitorear 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;
- inclusión de las aguas subterráneas en las políticas urbanas, los planes de saneamiento, los planes de riego y los planes de gestión 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 su planificación, ejecución y curso de largo plazo de forma a mejorar el uso de los recursos hídricos, incluyendo los subterráneos.

Box 20 – El uso conjunto de los recursos hídricos superficiales y subterráneos como estrategia para hacer frente al cambio climático*Bruno Conicelli*

Las aguas subterráneas son fundamentales para hacer frente a las crisis hídricas. Basado en datos oficiales, Hirata *et al.* (2019) encontraron que las ciudades abastecidas solo con agua superficial se vieron dos veces más afectadas por la crisis que las abastecidas solo con agua subterránea. Tales diferencias podrían ser mayores si se planificara y gestionara el uso de las aguas subterráneas, lo que no ocurre en la mayoría de las ciudades.

En virtud de su capacidad de almacenamiento, los acuíferos pueden suministrar agua incluso después de largos períodos de sequía, cuando la recarga es limitada o incluso nula. Las caídas de nivel en un acuífero bajo explotación son lentas, lo que permite restaurar el almacenamiento en períodos en los que hay abundancia de lluvia. Esta característica contribuye a enfrentar largos períodos de sequía, y la ciudad o la empresa, cuando es necesario, puede hacer uso de este “ahorro” de agua del ciclo hidrológico, y dejar la fuente superficial para la temporada de lluvias o incluso crear mecanismos para que el excedente de agua pueda recargar el acuífero, compensando las extracciones del período de sequía. Este tipo de explotación se conoce en Hidrogeología como el *uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas* (FOSTER; STEENBERGEN, 2011).

El uso conjunto permite un mejor y más equilibrado aprovechamiento del ciclo hidrológico (y no sólo de un recurso), buscando el más disponible, el más barato y el que cause el menor daño al medio ambiente. Otro punto importante es que en una ciudad hay varios tipos de fuentes de agua que pueden servir para diferentes usos. Los acuíferos urbanos profundos tienen agua potable y pueden ser utilizados directamente para el suministro público, con poco o ningún tratamiento. Por otro lado, los acuíferos poco profundos, que en algunos lugares tienen sus aguas extraídas solo para drenar y mantener secas las construcciones civiles subterráneas, pueden utilizarse para usos menos nobles, como la limpieza, el riego de áreas verdes o, cuando el proyecto constructivo lo permita, en uso sanitario (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015).

La recarga artificial gestionada de los acuíferos es un aliado importante del uso conjunto, que puede ayudar a los efluentes tratados a garantizar la restitución de los acuíferos sobreexplotados. Por lo tanto, la estrategia de uso conjunto del agua es la clave para permitir la sostenibilidad tanto de las ciudades como de la agricultura de regadío.

4.2 ESTRATEGIAS PARA PROTEGER LA CANTIDAD DE AGUA Y LA SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

La principal característica de los acuíferos es el gran almacenamiento de agua. Por lo tanto, podrían permitirse retiradas de volúmenes superiores a la recarga siempre que hubiera compensaciones en el futuro. Esto, sin embargo, 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 de la participación de los usuarios. Las extracciones en los acuíferos no deben reducirse a una simple aritmética de entradas y salidas, que ignora su capacidad de almacenamiento 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 para proporcionar más agua o para regular el equilibrio entre la producción y la demanda, especialmente en períodos de sequías prolongadas.

La formación de una planificación a largo plazo se ve obstaculizada por las escasas inversiones en estudios, lo que permitiría una evaluación precisa del potencial de los acuíferos. Además, el problema de sobreexplotación está asociado con el gran 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 inicialmente en la identificación de áreas críticas, es decir, aquellas donde el uso de las aguas subterráneas es más intenso o donde sus servicios ecosistémicos son esenciales. El reconocimiento de áreas críticas debe tener un

carácter regional, idealmente en la escala de 1:100.000 – 1:250.000, y cubrir cuencas fluviales específicas con el fin de verificar los recursos superficiales que pueden ser impactados. 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, basadas en un registro de pozos, con pruebas y datos hidráulicos; b) identificación de áreas ecológicamente frágiles del flujo subterráneo (pantanos, ríos y manglares); c) registro de centros 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) historial de reducción de flujo en ríos, drenajes y pantanos secos o pérdida de manantiales y lagos.

El estudio de la caracterización de áreas críticas debe desarrollarse en semi-detalle, preferiblemente en una escala de 1:50.000 o mayor. El enfoque es identificar las áreas con mayor uso de recursos hídricos, ya sea por la alta densidad de pozos, la suma de flujos altos o la presencia de disminución pronunciada del nivel potenciométrico, así como en casos de situaciones de conflicto entre usuarios o donde el uso del recurso involucra poblaciones vulnerables.

El método para detallar las áreas críticas puede ser el MetQ (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015), en el que se verifica un área en tamaños de 500 m x 500 m o 250 m x 250 m, y se ubican los pozos. Se considerarán más críticas las áreas con mayor densidad de pozos o donde la suma de caudales sea mayor. Dicha herramienta puede subsidiar la subvención, ya que permite al administrador de recursos establecer las áreas donde se puede alentar o prohibir el uso de aguas subterráneas, o incluso donde la subvención debe estar condicionada a requisitos específicos.

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. Este es el caso del área de restricción y control de la extracción y uso de aguas subterráneas en Ribeirão Preto (SP), expuesta en el capítulo anterior. La opción de regular las áreas de restricción y control es una política de manejo planificada

en varios estados brasileños e incluso internacionalmente. El caso del acuífero del Valle de Santo Domingo (México) ilustra cómo esta medida puede estabilizar las extracciones, aunque advierte sobre la dificultad de revertir las pérdidas de una extracción sin control prolongado durante años. Además, este tipo de medidas requiere la participación del Poder Público y 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 fijación de objetivos y formas de asignación de agua, y vigilar el cumplimiento de la medida. Para cumplir con estas obligaciones, es necesario establecer asociaciones entre los diversos niveles de gobierno (local, estatal y federal). Los usuarios, a su vez, deben comprometerse a reducir la extracción de agua a fin de alcanzar los objetivos, vigilar sus pozos y colaborar con el Poder Público para recuperar el acuífero.

Otra opción para recuperar el acuífero es la adopción de mecanismos para la recarga artificial del acuífero, detallados en el Box 21. En este caso, la estructura puede ser implementada por el Poder Público, por los usuarios o por modelos mixtos entre el Poder Público y los usuarios. En Brasil, la recarga artificial no se utiliza como política pública, aunque está prevista en la Res. CNRH 153/2013. Los estados no reglamentaron este tema con el detalle necesario, por ejemplo, especificando los estudios y procedimientos a implementar.

La Galería de Casos presenta el Acuífero de Ginebra, que es un acuífero transfronterizo compartido entre Francia y Suiza, que implementó un sistema de recarga artificial conjunto. Aunque el acuífero es transfronterizo, este arreglo institucional se llevó a cabo por iniciativa de las localidades afectadas (Cantón de Ginebra, Suiza, y el Departamento de Alta Savoia, Francia), independientemente de cualquier acción de los gobiernos federales u órganos del Ministerio de Relaciones Exteriores. Este esquema de paradiplomacia² se posiciona como la principal experiencia exitosa en la gestión de acuíferos transfronterizos. Los gobiernos locales dividieron el costo de la implementación del sistema de recarga artificial y crearon un comité técnico compuesto por hidrogeólogos de ambos países. Sus determinaciones técnicas en relación con las tasas de explotación son vinculantes para los órganos de gestión y los usuarios de suministro público, los cuales son los principales responsables de la sobreexplotación del acuífero.

2. La paradiplomacia es una acción internacional llevada a cabo por entidades subnacionales, como los estados federados, ONG, empresas y municipios.

Box 21 – Recarga artificial de acuíferos: una alternativa para aumentar la disponibilidad hídrica

José Eloi Guimarães Campos
Vagney Aparecido Augusto
Júlio Henrichs de Azevedo
Drielly Sousa Rodrigues

El proceso más común de recarga natural de las aguas subterráneas es el originado por la infiltración del agua de lluvia desde la superficie y su percolación en el perfil del suelo a la zona saturada de los acuíferos (VRIES; SIMMERS, 2002; SCANLON; HEALY; COOK, 2002). Sólo una parte del agua infiltrada en la superficie resulta en efectiva recarga, ya que este equilibrio se ve afectado por el proceso de evapotranspiración, por la retención de agua en el suelo en forma de humedad y, a veces, por el interflujo subsuperficial, que se produce debido a los contrastes de permeabilidad en la sección de infiltración.

La recarga artificial de acuíferos corresponde a cualquier acción humana que resulta en la expansión de la recarga natural, intencionalmente o no (FETTER, 2001). Históricamente, el término *recarga artificial de los acuíferos* (*artificial recharge of the aquifers*) se ha utilizado para referirse a proyectos que tienen como objetivo aumentar la infiltración y elevar la parte superior de la zona saturada de los acuíferos. En los últimos años, esta terminología ha sido reemplazada por *recarga gestionada de los acuíferos* (*Managed Aquifer Recharge - MAR*).

La recarga artificial puede llevarse a cabo en tres situaciones en relación con los reservorios subterráneos: i) en la superficie, mediante la dispersión e inducción de infiltración de agua de lluvia, utilizando cuencas, tanques, curvas de nivel y terrazas o, aún, dirigiendo drenajes a depresiones naturales en el suelo (Figura 44); ii) en la zona insaturada de los acuíferos (en general, dentro de los suelos), desde cajas de infiltración (rellenas o recubiertas), zanjas de recarga, drenajes subterráneos o por galerías de drenaje (Figura 45); y iii) directamente en la zona saturada de los acuíferos, por pozos poco profundos o profundos (Figura 46).

Sus principales objetivos son: aumentar la disponibilidad de agua subterránea; elevar los niveles potenciométricos; y recuperar acuíferos sometidos a sobreexplotación. Sin embargo, la práctica puede dar lugar a otras ventajas, como la mitigación de los efectos de la intrusión de cuñas de sal en los acuíferos costeros; la dilución *in situ* de contaminantes naturales o la salinidad de los acuíferos; la reducción al mínimo de la escorrentía superficial del agua de lluvia (con la reducción de los riesgos de inundaciones); y la regulación/estabilización de las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas.

Las aguas utilizadas para la recarga pueden tener los siguientes orígenes: agua de lluvia (generalmente recogida en techos de edificios); agua de cuerpos hídricos superficiales (ríos o lagos); agua de otros acuíferos (generalmente bombeada desde mayores profundidades); aguas residuales o reutilización. La principal condición para observar es que el agua utilizada en la recarga artificial no comprometa efectiva o potencialmente la calidad ambiental del agua del acuífero a la que se dirige (CONAMA, 2008; CNRH, 2013).

La aplicación de la recarga artificial en una gran superficie debería ir precedida de estudios, con la construcción de sistemas piloto y de un seguimiento cualitativo y cuantitativo. Sólo después de que se conozca la eficacia del sistema propuesto se ampliará su aplicación en áreas mayores.

Para que los proyectos de recarga artificial de acuíferos logren los resultados esperados, es importante conocer los mecanismos y dinámicas de la recarga natural, ya que la recarga inducida debe simular las mismas trayectorias de flujo natural. La implementación de los sistemas piloto deberá ir precedida de los siguientes estudios: evaluación hidráulica de los acuíferos (determinación de parámetros hidráulicos); determinación de las condiciones límite de los acuíferos (espesor, porosidad y límites); verificación de la calidad del agua de los acuíferos y recarga; aplicación de estudios geofísicos (para determinar las ubicaciones ideales para la implementación de los sistemas piloto); y otras técnicas hidrogeológicas (estudios isotópicos, trazadores, realización de pruebas hidráulicas en el acuífero y pruebas de infiltración *in situ*).

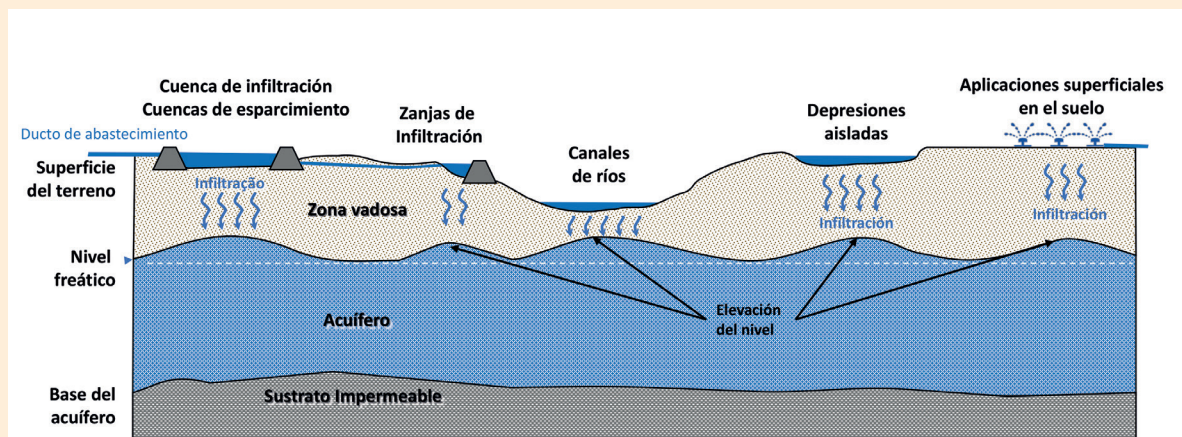


Figura 44 – Ejemplos de métodos de recarga de superficie

Fuente: adaptado de Topper *et al.* (2006, p. 77).

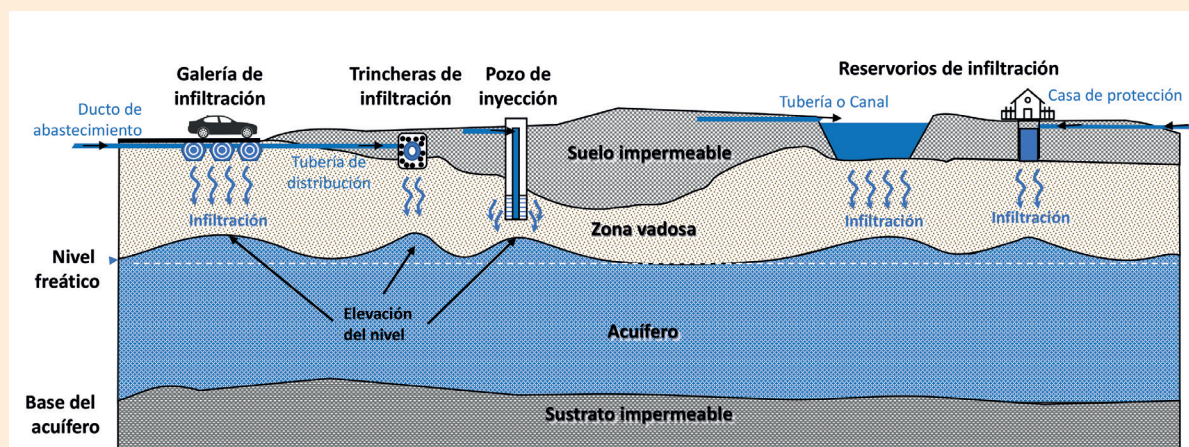


Figura 45 – Ejemplos de métodos de recarga artificial en profundidad en la zona no saturada

Fuente: adaptado de Topper *et al.* (2006, p. 81).

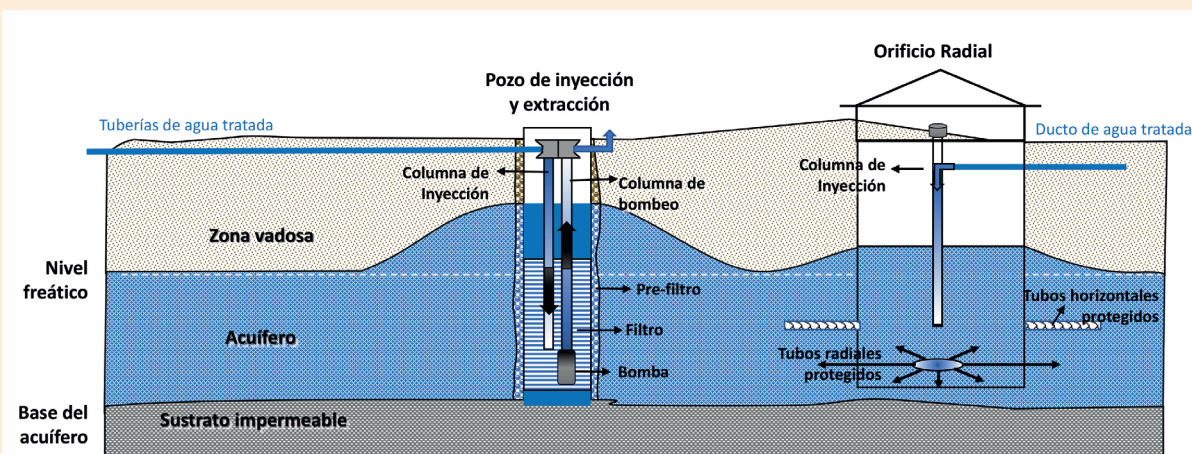


Figura 46 – Esquema de los métodos de inyección directa

Fuente: adaptado de Topper *et al.* (2006, p. 82).

La recarga natural de los acuíferos está fuertemente controlada por el suelo (espesor y relación arena/arcilla) y el clima (precipitación total y régimen de distribución de las lluvias en el tiempo y en el espacio). En regiones con mayor excedente hídrico, con lluvias más regulares y abundantes, la presencia de suelos espesos favorece la recarga. Por otro lado, las regiones con fuerte estacionalidad climática, con un amplio período sin eventos lluviosos (incluso con un alto volumen medio de lluvia) presentan una amplia pérdida de agua, ya que la recarga natural requiere que se alcancen condiciones adecuadas antes de que las plumas de humedad se conviertan en una recarga efectiva (principalmente el reemplazo de agua en la zona no saturada de los suelos). Por otro lado, en las regiones semiáridas, con lluvias concentradas en pocos meses del año, la presencia de suelos más gruesos (si los hay) constituye una barrera para la recarga natural.

La recarga artificial, por lo tanto, puede ser una forma de minimizar las pérdidas naturales de agua debido a la estacionalidad climática y las características intrínsecas del suelo. En este sentido, si la inducción de infiltración se realiza a mayores profundidades, es decir, por debajo de la zona de mayor desarrollo radicular, las pérdidas por evapotranspiración, reemplazo de humedad del suelo e interflujo se minimizan con el consecuente aumento de la efectividad de la recarga.

El desarrollo de la recarga de acuíferos gestionados es una práctica común para la gestión de los recursos hídricos en diferentes países del mundo (DILLON *et al.*, 2019). India y Estados Unidos son los países que más practican este tipo de técnica, seguidos por países de Europa y Australia. En Brasil, esta práctica es incipiente, aplicándose sólo en la investigación académica y en iniciativas aisladas.

Los principales proyectos que han avanzado en el conocimiento de este tipo de técnicas en Brasil incluyen: i) práctica de recarga artificial en condominios en el Distrito Federal (CADAMURO, 2002; CADAMURO; CAMPOS, 2005); ii) recarga en el área urbana de Recife (PE) para la recuperación de niveles potenciométricos (MONTENEGRO *et al.*, 2005); iii) recarga de acuíferos térmicos en la región de Caldas Novas (GO) con el uso de agua después de la circulación en piscinas (ALMEIDA, 2011); iv) recarga orientada a la optimización de la calidad de las aguas subterráneas en la parte sur del estado de Tocantins (AZEVEDO, 2012); v) recarga de acuíferos cristalinos en la región semiárida de Petrolina (PE) orientada a la dilución de sales disueltas (SILVA, 2016); y vi) recarga de acuíferos contaminados en condominios en el Distrito Federal, orientada al tratamiento *in situ* por dilución (NUNES, 2016).

La creciente urbanización (impermeabilización del suelo), la conversión de áreas naturales para fines agrícolas y ganaderos (supresión de vegetación y compactación del suelo por pisoteo de rebaños y moto mecanización), entre otros, son factores antropogénicos de disminución de la recarga natural. Además, la tendencia señalada en la disminución de las precipitaciones o, al menos, el cambio en los patrones históricos de precipitación, así como los escenarios de aumento de la temperatura global (cambios potenciales en las tasas de evapotranspiración), también convergen en la disminución de la recarga natural de los acuíferos.

Dados los cambios esperados en los patrones climáticos y la intensificación del uso y la ocupación de la tierra, la adopción de tecnologías de recarga artificial puede contribuir a mitigar las crisis hídricas, especialmente en entornos urbanos.

En este contexto, es necesario que la gestión del agua avance en los debates sobre cuestiones jurídicas y técnicas relacionadas con el desarrollo de proyectos de recarga artificial o de recarga gestionada de acuíferos. Dichas discusiones deben ser transversales e involucrar a agencias ambientales y de gestión del agua, empresas de saneamiento, gobiernos municipales (responsables de la planificación territorial), instituciones representativas del sector agrícola, comunidades académicas y sociedad civil. Además del establecimiento de lineamientos generales para la recarga artificial en el país, es importante determinar la obligación de adoptar esta técnica cuando se caracterice como una medida de mitigación en situaciones específicas, tales como dilución de contaminantes en aguas subterráneas, compensación por los efectos del sellado de tierras, reducción de riesgos de inundación por exceso de escorrentía superficial, y reemplazo por descenso del acuífero por bombeo.

4.3 ESTRATEGIAS PARA LA PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEL ACUÍFERO

Las estrategias para la protección de la calidad de los acuíferos no deben disociarse de las destinadas a proteger la cantidad de sus aguas. La extracción de aguas subterráneas puede influir en la entrada de aguas salobres de acuíferos profundos o del mar, así como de aguas contaminadas de cursos de agua superficiales o acuíferos subterráneos, degradando el acuífero. En este sentido, las áreas de restricción y control del uso de las aguas subterráneas también pueden considerarse instrumentos para proteger su calidad, ya que al restringir la explotación de las aguas subterráneas, se evita que la contaminación ingrese o se propague a través del acuífero.

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

Prioridad, la protección del acuífero viene dada por el control del uso y ocupación del suelo, con el fin de evitar que se generen cargas contaminantes o que lleguen al acuífero (zona saturada). Este tipo de protección requiere la aplicación de instrumentos que: a) restrinjan ciertos usos en áreas de recarga; b) soliciten autorización o permiso para el uso y ocupación del suelo, teniendo en cuenta la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos; y c) adopten procedimientos de manejo de peligros para prevenir o mitigar accidentes. La legislación brasileña ha establecido varios instrumentos a esos efectos, como el caso de las leyes sobre licencias ambientales, zonificación ambiental y uso y ocupación de tierras municipales.

De acuerdo con Foster e Hirata (1988) y Foster *et al.* (2002), la prevención de la contaminación puede ocurrir reduciendo el peligro de contaminación de un área. El mayor peligro se presenta cuando existen altas cargas contaminantes en zonas de alta vulnerabilidad, como los afloramientos de un acuífero libre de sedimentos arenosos y permeables. Por el contrario, el menor peligro se asocia con casos en los que hay una carga de contaminantes reducida o nula ubicada en una zona de baja vulnerabilidad.

Se puede mapear la vulnerabilidad del acuífero y, con este fin, hay varios métodos disponibles. Las técnicas GOD (FOSTER; HIRATA, 1988) e DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) son bastante populares en Brasil y en América Latina. Ambos permiten generar mapas regionales (1:100.000) a semi-regionales (1:50.000). Más recientemente, Foster, Hirata y Andreo (2013) revisaron el alcance práctico de los métodos de vulnerabilidad y concluyeron que dichos mapas sirven para identificar tres clases de acuíferos: a) acuíferos con alta vulnerabilidad, donde un amplio espectro de actividades puede contaminar las aguas subterráneas; b) acuíferos de baja vulnerabilidad, es decir, aquellos donde la actividad antropogénica difícilmente los contaminaría; y c) acuíferos de vulnerabilidad media, que abarcarían todos aquellos que no entran en las dos primeras categorías. En este tercer caso, el peligro estaría más condicionado al tipo de actividad y a su funcionamiento que a las características hidrogeológicas del acuífero (FOSTER; HIRATA; ANDREO, 2013).

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, la estrategia es trazar los Perímetros de Protección de Pozos o manantiales (PPP) mapeando las áreas alrededor de la cuenca, que están asociadas con su recarga, y evitar la instalación de posibles fuentes de contaminación (CARVALHO; HIRATA, 2012; FOSTER *et al.*, 2002).

4.3.1 Gestión de las áreas contaminadas y las aguas subterráneas

Cuando se produce la contaminación, 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. 6°, 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. 6°, 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 de acuerdo con el art. 3° (art. 6°, 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. 6°, 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 Res. Conama n° 420/2009 regula los Valores Orientadores (VO), sin embargo, los estados deben regular el GAC, definiendo sus procedimientos, el organismo competente para

llevarlos a cabo y los Valores de Referencia de Calidad (VRQ), además de establecer VO más restrictivos.

La protección de las aguas subterráneas debe guiarse por la prevención, ya que el daño suele ser irreversible, e incluso puede hacer inviable el uso del agua, dado que el costo de su recuperación o remediación puede ser superior al de las acciones para evitar daños. En muchos casos, incluso con grandes inversiones y la aplicación de las mejores técnicas disponibles, no es posible descontaminar el acuífero, sino sólo reducir los niveles de contaminación. Esta situación generó en el estado de São Paulo varias demandas que discutían si la recuperación de áreas contaminadas debía guiarse por los criterios de los Valores Rectores o el deber de plena reparación ambiental (Box 22). El núcleo de este debate jurídico se refiere al análisis costo-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 el punto de vista medioambiental, 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, especialmente en el caso de acuíferos hidrológicamente complejos (como fracturados, sedimentarios, multicapa o profundos) o cuando existe la presencia de contaminantes muy tóxicos o persistentes, como disolventes organoclorados.

Box 22 – Remediación de áreas contaminadas: valores orientadores versus reparación ambiental integral

Ana Carolina Corberi Famá Ayoub e Silva

La rehabilitación de los acuíferos es compleja. La mayoría de las veces, incluso la aplicación del procedimiento de Gestión de Áreas Contaminadas (GAC) no promueve la restauración completa del suelo o el agua, sino solo la remediación de recursos para lograr estándares legales. El hecho dio lugar a la interposición de demandas por parte del Ministerio Público del estado de São Paulo (MPSP), que incluso cuestionó la constitucionalidad de la Ley Paulista n° 13.577/09, considerada precursora en la materia. La principal discusión judicial se refiere al alcance del GAC, es decir, si debe promover la remediación a través de la aplicación de los Valores Orientadores o la reparación ambiental integral (uno de los principios del Derecho Ambiental).

Para entender este choque, es necesario aclarar el significado y el propósito de los términos *remediación* y *reparación*. La Res. Conama n° 420/2009 conceptualiza la remediación como “una de las acciones de intervención para la rehabilitación de un área contaminada, que consiste en la aplicación de técnicas, tendientes a la remoción, contención o reducción de las concentraciones de contaminantes” (art. 6°, inc. XVII). En un sentido similar, la Ley estatal n° 13577/09, que “establece directrices y procedimientos para la protección de la calidad del suelo y la gestión de las zonas contaminadas”, define la *rehabilitación de las áreas contaminadas* como “la adopción de medidas para eliminar o reducir los riesgos a niveles aceptables para el uso declarado” (art. 3°, inc. XVIII). El término *reparación ambiental integral*, que tiene

por objeto restaurar el medio ambiente, está conceptualizado por la Ley nº 9.985/2000 como la “restitución de un ecosistema o de una población silvestre degradada lo más cerca posible de su condición original” (art. 2º, inc. XIV). En el mismo sentido, la Constitución Federal de 1988, en su art. 225, párrafo 1º, inc. I, al determinar que se restauran los procesos ecológicos esenciales, tiene como objetivo lograr la situación anterior al daño – *status quo ante*. Así, la reparación ambiental integral tiene como objetivo restaurar el equilibrio ecológico (PINHO, 2010; SILVA, 2019).

En el caso específico de la contaminación, la premisa para definir la aplicación de la reparación o remediación completa depende de cómo se trate el daño. Es decir, desde un punto de vista ecológico, el daño ambiental “perjudica las llamadas ‘leyes de la ecología’”, destacando la interdependencia, la autorregulación, la autorregeneración y la función ecológica. El daño legal se produce cuando existe un delito o amenaza a activos legales determinados, en este caso el medio ambiente (SILVA, 2012, 2019).

La reparación de los daños ecológicos parece ideal, ya que tiene como objetivo la restauración del medio ambiente, permitiendo el pleno restablecimiento de las “leyes de la ecología”. Leite y Ayala (2010), sin embargo, afirman que “la naturaleza, al tener sus composiciones físicas y biológicas modificadas por agresiones que no puede tolerar, nunca puede ser verdaderamente restaurada, desde un punto de vista ecológico.” Así, se adopta con mayor frecuencia la visión puramente jurídica, en la que la remediación tiene lugar siguiendo los criterios y límites de los parámetros viables definidos por la norma.

El conflicto de posiciones sobre áreas contaminadas se intensificó con la presentación de la Acción Directa de Inconstitucionalidad (ADI) nº 0210197-50.2011.8.26.0000, por parte de MPSP, alegando la declaración de inconstitucionalidad del art. 10 y único párrafo de la Ley Paulista nº 13.577/09, que admite la posibilidad de exceder los Valores de Prevención mediante la evaluación de la agencia ambiental y el seguimiento de los impactos resultantes. En opinión del MPSP, el dispositivo transformaría la Licencia Ambiental de preventiva a correctiva, enfrentando la Constitución Estatal y el principio de precaución.

A pesar del rechazo de ADI, el MPSP presentó varias demandas (varias aún en curso) contra propietarios de áreas contaminadas. Por lo tanto, asumió una posición contraria a la Ley Paulista y a la Res. Conama 420/2009, argumentando que, al no prever la reparación integral de las funciones ecológicas del suelo y las aguas subterráneas, estas normas contribuyen a la generación de pasivos ambientales para las generaciones presentes y futuras (LUTTI, 2012).

Entre las numerosas demandas interpuestas, destaca la sentencia que negó seguimiento al Recurso Civil nº 1096930-98.2016.8.26.0100, con el reconocimiento de la “Imposibilidad de exigir la adopción de una solución técnica diferente a la impuesta por la agencia ambiental en el tratamiento del área contaminada.” En un precedente similar (Recurso Civil nº 1032789-75.2013.8.26.0100), se decidió que “No es razonable exigir la adopción de una solución técnica diferente a la impuesta por la agencia ambiental, notablemente sin la declaración de inconstitucionalidad de la Ley Estatal nº 13.577/09 y el Decreto nº 59.263/2013.” (TJSP, 2016, 2020).

A partir de estas decisiones, existe una tendencia por parte del Poder Judicial del estado de São Paulo a garantizar la seguridad jurídica de los procedimientos de remediación de áreas contaminadas, marcados exclusivamente por la legislación vigente. Sin embargo, siguen en marcha numerosas medidas que dejan margen para la aparición de nuevos entendimientos. La posición actual garantiza la seguridad jurídica de los procedimientos legales de remediación, que deben guiarse por el equilibrio entre la búsqueda de reparación de la zona y las limitaciones existentes para lograr este objetivo.

El enfoque prioritario del GAC en Brasil es: a) identificar el área contaminada; b) evaluar el riesgo para la salud humana y ambiental; y c) llevar a cabo el 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 del nivel tolerado y no solo una alteración físicoquímica 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.

El estado de São Paulo es considerado una referencia nacional en el GAC, ya que fue la primera Unidad Federativa en implementarlo. Este procedimiento se introdujo en 1999, cuando se publicó el primer Manual de Gestión de Áreas Contaminadas, y en 2002 se publicó el primer informe de zonas contaminadas. El GAC está previsto en la Ley Estatal n° 13.577/2009 y su Decreto Reglamentario n° 59.263/2013. La Compañía Ambiental del Estado de São Paulo (CETESB) -la agencia estatal competente para llevar a cabo el GAC- reguló el procedimiento a través de la Decisión del Consejo Directivo n° 38/2017. Estas bases legales inspiraron varias regulaciones en todo el país.

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, cuando sea necesario. Su inicio es 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. 6°, inc. II de la Res. Conama n° 009). A partir de él, se elabora el plan de investigación confirmatoria.

La **investigación confirmatoria**, a diferencia de la preliminar, requiere la recolección de muestras de suelo y aguas subterráneas, además de otras técnicas invasivas o no invasivas (como la geofísica). El propósito de la investigación es confirmar o no la existencia de contaminación. Es importante señalar que este reconocimiento se realiza comparando los resultados de los análisis químicos de suelos y agua con los Valores Orientadores y de 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 riesgos existentes,

vías de exposición y vías de ingreso” (art. 6°, inc. IX de la Res. Conama n° 420/2009). En esta etapa se establece el nivel y límites de degradación (mapeo de las extensiones del penacho contaminante), además de la cuantificación de la masa presente, así como la dinámica de transporte de estas sustancias. Esta actividad permite evaluar el grado de riesgo al que están expuestos 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 ejecuta el **programa de monitoreo**, que tiene como objetivo asegurar que las metas acordadas se hayan logrado realmente. Si el informe de monitoreo encuentra cumplimiento de las metas, el área es declarada por la agencia ambiental como **rehabilitada para el uso declarado**.

4.4 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, así como a garantizar la seguridad hídrica y alimentaria en diversas partes del Planeta a lo largo de los siglos. El crecimiento de la población y el consumo, la degradación de las reservas superficiales, los avances en el 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). 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 para el uso de la oferta, la agricultura y la industria, la percepción de la dependencia de la población y los beneficios resultantes de su explotación solo se destacaron en la literatura desde la década de 2000 (FOSTER; HIRATA; ANDREO, 2013).

4.4.1 El uso histórico de las aguas subterráneas

El uso de las aguas subterráneas se remonta a los pueblos de la Antigüedad, quienes desarrollaron técnicas para su uso y garantizar una fuente de suministro de calidad. Las antiguas civilizaciones asiria, griega y romana construyeron sistemas de acueductos para transportar agua desde los manantiales hasta los pueblos (DEMING, 2020). El registro de pozos más antiguo se encuentra en la región de Atlit Yam, Israel (año 8000 a. C.) (GALILI;

NIR, 1993). Desde el año 5000 a.C., los chinos perforaron pozos profundos con palos de bambú (REBOUÇAS, 2006), mientras que los persas desarrollaron sistemas de túneles horizontales subterráneos, llamados *qanats*, que se extendieron por los países que formaban parte de las antiguas rutas comerciales, tales como: Afganistán, España, Marruecos, la Península Arábiga, África del

Norte, China, Arabia Saudita y Egipto (VILLAR, 2015). El primer qanat registrado estaba situado en el Noroeste de Irán, en la ciudad de Nínive, y fue construido aproximadamente en el año 800 a. C. (SALIH, 2006; REBOUÇAS, 2006). Con la colonización española, el sistema de qanat fue llevado a Hispanoamérica, siendo utilizado hasta el día de hoy, como lo demuestra el Box 23.

Box 23 – La captación de aguas subterráneas por medio de qanats o galerías filtrantes: ejemplos en América Latina

Jacinta Palerm

La galería filtrante es una técnica milenaria utilizada para obtener agua subterránea. Su origen es el Viejo Mundo, pero tiene una importante presencia en las Américas, ya sea en relación con las galerías construidas durante el Período Colonial o las de los tiempos actuales.

En México, las primeras galerías conocidas se utilizaron para el suministro urbano. Probablemente, las primeras construcciones se hicieron en las ciudades de Aguascalientes (1730), Guadalajara (1730), Parras de la Fuente (1825), San Luis Potosí (1828) y Querétaro (1852). También hay reportes de galerías de filtrado construidas en el siglo XIX por agricultores que buscaban garantizar agua a la ganadería en los estados de San Luis Potosí y Jalisco, así como para la agricultura en el valle de Tehuacán, ubicado en el estado de Puebla (PALERM, 2020). Aparentemente, las galerías de los estados de San Luis Potosí y Jalisco fueron construidas con gran inversión de capital, y bajo la guía de especialistas. En el caso del valle de Tehuacán, los campesinos locales se han apropiado de la técnica de construcción y hasta el día de hoy implementan galerías filtrantes. Hay cientos de galerías de filtrado en esta región, que son administradas por los campesinos.

Existe mucha incertidumbre respecto a las fechas de construcción de las primeras galerías filtrantes en América, incluyendo la posibilidad de un origen prehispánico, especialmente en el caso de las galerías Nazca en Perú (BARNES; FLEMING, 1991). Las pruebas sugieren, sin embargo, que los primeros qanats son de origen colonial.

Los estudios sobre la gestión de las galerías filtrantes son limitados, sin embargo, existen. Destacamos, por ejemplo, estudios sobre las galerías del valle de Tehuacán (CAMPOS *et al.*, 2000), así como un estudio sobre Pica, en Chile (CERNA, 2003). La técnica de captación de aguas subterráneas por gravedad tiene varios nombres regionales, por ejemplo: en Perú y Chile se le llama *puquios*; en el norte de México, se le llama *tajos*. También existen variantes de la técnica, como las que utilizan aguas subterráneas situadas bajo el cauce de los ríos.

Para obtener más información, consulte: Barnes y Fleming (1991), Campos *et al.* (2000), Cerna (2003) y Palermo (2002, 2004 y 2020).

4.4.2 El papel de las aguas subterráneas como medio para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El agua subterránea se consideró la forma más rápida y barata de lograr los objetivos de acceso al agua y combatir el hambre, previstos en los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) (LLAMAS; MARTINEZ-CORTINA, 2002), que fueron asumidos por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (GUPPY *et al.*, 2018).

La Cumbre de las Naciones Unidas, celebrada en 2012 en la ciudad de Río de Janeiro, también conocida como Río+20, se comprometió a formular un conjunto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para guiar el desarrollo global (GLASER, 2012). Como resultado, en 2015, las Naciones Unidas adoptaron la Resolución 70/1 – *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. La Agenda 2030 consta de 17 objetivos y 169 metas que deben alcanzarse para 2030. Los 17 ODS se muestran en la Figura 47.



Figura 47 – Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Fuente: Naciones Unidas Brasil (2015).

El objetivo de la Agenda 2030 es servir de marco de referencia para la acción de los países e integrar las dimensiones económica, social y medioambiental. El ODS 6 – *Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos* – se dedica directamente al agua, las aguas superficiales y subterráneas, y sus principales desafíos se relacionan con aspectos de cantidad y calidad, acceso al agua potable y el saneamiento, acciones para abordar los riesgos del agua (sequías e inundaciones) y aguas transfronterizas (UNSDSN, 2013). El objetivo 6.6 menciona expresamente las aguas subterráneas y los acuíferos, estableciendo lo siguiente: “Para 2020, proteger y restaurar los ecosistemas relacionados con el agua, incluidas las montañas, los bosques, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos”.

El agua subterránea es clave para cumplir con los objetivos del ODS 6, particularmente con respecto a garantizar el acceso universal al agua potable, el saneamiento y la higiene. Su importancia, sin embargo, trasciende este ODS. Aunque la estructura de los ODS se organiza a través de objetivos individuales e independientes, existe una interconexión muy presente entre ellos (BHADURI *et al.*, 2016). El agua es un elemento central para el desarrollo sostenible y fundamental para todos los demás ODS, principalmente ODS-1, ODS-2, ODS-3, ODS-5, ODS-11, ODS-13, ODS-14 y ODS-15.

Además, las aguas subterráneas contribuyen a la lucha contra la pobreza, a la seguridad alimentaria, hídrica y sanitaria de miles de personas, especialmente

en las zonas rurales, áridas y semiáridas. También son menos susceptibles a la variabilidad climática, lo que permite fomentar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Y en algunas regiones, estas aguas tienen el potencial de generar energía geotérmica.

El uso de los recursos de aguas subterráneas, sin embargo, para promover los ODS, requiere una estructura de gobernanza capaz de implementarlos e integrarlos a través de instituciones, políticas y prácticas de gestión (BERNSTEIN, 2017), así como un proceso de gestión que promueva el uso sostenible y la protección del recurso. Las aguas subterráneas han ayudado a varios países a alcanzar los objetivos internacionales relacionados con la ampliación del acceso al agua. En el caso de Brasil, cabe destacar el Programa de Agua Dulce, cuya iniciativa promueve el desarrollo socioeconómico y, a través de los acuíferos salobres, el acceso al agua para las poblaciones más vulnerables del Semiárido. Esta experiencia se explica en detalle en el Box 24. El Programa surgió ante la necesidad de corregir los errores de gestión del Programa Agua Buena (PAB) y reutilizar los pozos salobres abandonados.

El PAB fue implementado por el Ministerio de Ambiente/Secretaría de Recursos Hídricos Urbanos (MMA/SRHU) a finales de 1990, con el objetivo de instalar desaladores en áreas críticas desde el punto de vista hídrico, con pozos salobres o salinos. Sin embargo, hay problemas de aplicación, ya sea desde el punto de vista operacional o social. Por ejemplo, hubo fallas en el destino de los concentrados de sal generados, lo

que contribuyó al aumento de la desertificación y la erosión en las zonas cercanas a las captaciones. No se contemplaba el mantenimiento preventivo ni la gestión de los sistemas de desalinización, lo que provocaba la pérdida de la calidad del agua o la desactivación de parte de los equipos (AZEVEDO, 2015).

El PAB y PAD demuestran que incluso las aguas subterráneas salobres y los acuíferos con bajos caudales

pueden ser utilizados en el suministro, contribuyendo a garantizar la seguridad hídrica de las poblaciones, especialmente en situaciones de crisis hídrica y en 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, contribuyen a la seguridad alimentaria de las poblaciones.

Box 24 – Programa de Agua Dulce

*Wilson Rodrigues de Melo Júnior
Alexandre Saia*

El Programa de Agua Dulce (PAD) es una acción del Gobierno Federal, coordinada por el Ministerio de Desarrollo Regional (MDR), en asociación con instituciones federales, estatales, municipales y de la sociedad civil. Su objetivo es establecer una política pública permanente de acceso al agua de calidad para el consumo humano a través del uso sostenible de las aguas subterráneas, incorporando la atención técnica, ambiental y social en la implementación y gestión de los sistemas de desalación en la región semiárida brasileña, teniendo en cuenta la característica de la presencia de sales en las aguas subterráneas de esta región.

La formulación del Programa buscó construir una metodología que proporcionara mayor sostenibilidad a la implementación de sistemas de desalinización, dado que muchos sistemas ya se habían implementado en el Semiárido brasileño desde la década de 1990, careciendo del cuidado técnico, social y ambiental necesario. Debido a esto, en poco tiempo muchos dejaron de funcionar y los que quedaron descargaron sus efluentes en el medio ambiente, sin una eliminación adecuada.

Considerando que alrededor del 70% de los pozos en la Región Semiárida de Brasil tienen aguas salobres o salinas, y que el agua subterránea es a menudo la única fuente disponible para las comunidades, correspondía al Ministerio del Ambiente estructurar un método para que esta tecnología fuera más exitosa en su implementación, y las comunidades recibieran permanentemente agua potable (Figura 48).

Uno de los principales diferenciales del Programa de Agua Dulce es la disposición ambientalmente adecuada de los efluentes generados en el proceso de desalinización. En la mayoría de los casos, el efluente se descarga en un tanque de contención para su evaporación, evitando la degradación del suelo. Sin embargo, dependiendo de las características fisicoquímicas de este concentrado, puede utilizarse para otros fines, como el abrevado de animales o el riego de la agricultura biosalina.

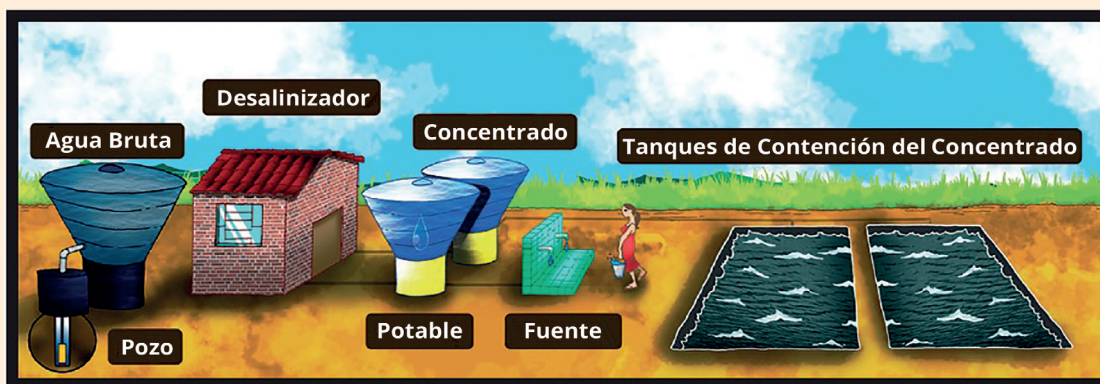


Figura 48 – Esquema ilustrativo de las infraestructuras del PAD

Fuente: Imágenes de la colección del MDR

Las comunidades que tienen pozos con caudales superiores a 5.000 l/h y suelos con una profundidad superior a 1,00 m pueden recibir un sistema de producción integrado. El sistema fue desarrollado por la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa) y aprovecha los efluentes resultantes del proceso de desalinización para la producción de tilapia y riego de cultivos adaptados a la salinidad del agua, cuyos productos pueden alimentar rebaños locales (Figura 49).



Figura 49 – Esquema ilustrativo del sistema desarrollado por Embrapa

Fuente: Imágenes de la colección del MDR

Otra diferencia es la gestión compartida de los sistemas de desalinización, con la participación efectiva de las comunidades y los representantes de los municipios, los estados y el gobierno federal. En cada comunidad se construyen *acuerdos de gestión compartida*, instrumentos que definen las responsabilidades de las partes en la gestión (Figura 50).



Figura 50 – Gestión compartida de los sistemas de desalinización

Fuente: Imágenes de la colección del MDR

A partir de 2011, el Programa de Agua Dulce entró en su fase de escala, pasando a formar parte del Programa Agua para Todos a través del Decreto n° 7.535, de 26 de julio de 2011, con recursos del Programa de Seguridad Alimentaria y Nutricional. A partir de entonces, se implementaron los Planes Estatales del Programa de Agua Dulce, y el programa fue institucionalizado por decreto de los gobernadores, quienes también instituyeron los núcleos de gestión y las coordinaciones estatales.

El Programa Agua Dulce se ejecuta mediante asociaciones con todos los estados del Nordeste (Alagoas, Bahía, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Río Grande do Norte y Sergipe) y Minas Gerais. Actualmente se encuentran en ejecución 10 convenios del Programa de Agua Dulce, con una inversión aproximada de R\$ 260 millones de reales, destinados a abastecer de agua de calidad a 1.200 comunidades rurales del Semiárido brasileño.

En cuanto a la implementación de los acuerdos firmados en el marco del Programa de Agua Dulce, 3.677 comunidades han sido diagnosticadas hasta el momento en los 291 municipios más críticos del Semiárido brasileño. Alrededor de 2.400 operadores también recibieron capacitación para operar en los 895 sistemas de desalinización en funcionamiento. La implementación del Programa en cada estado se divide en tres fases:

- 1) llevar a cabo diagnósticos para definir, a través de criterios técnicos, pruebas de flujo, análisis físico-químicos de agua de pozo y caracterización socioambiental de las comunidades, para identificar aquellas que serán atendidas;
- 2) la implantación de sistemas de desalinización; y
- 3) mantenimiento y seguimiento de los sistemas.

En cuanto a la operación diaria del sistema, la gestión compartida implementada por el PAD sugiere que un miembro de la comunidad se haga cargo de la operación del equipo, y los costos de electricidad son asumidos por el municipio o por la propia comunidad, de acuerdo con el acuerdo de gestión. Con este fin, en cada lugar, se fomenta la creación de un fondo de reserva, gestionado por la propia comunidad, para hacer frente a los costos de funcionamiento (electricidad y compensación al operador) y reparaciones menores. La cantidad mensual pagada por cada familia es definida por la propia comunidad.

Considerando el caudal mínimo de referencia de aproximadamente 1.000 l/h para el uso de un pozo profundo que suministra un sistema PAD – que representa una gran parte de los pozos ubicados en el semiárido brasileño – un sistema Pad tiene el potencial de producir hasta 4.000 litros de agua desalada por día. Esto permite el suministro de 10 litros/día de agua potable por persona, y sirve hasta 400 personas/día que viven en comunidades rurales. Los sistemas de desalinización implementados hasta ahora han instalado capacidad para producir alrededor de 3.2 millones de litros de agua potable por día y benefician a aproximadamente 320.000 personas.

Como perspectiva, está el desafío de avanzar en el uso de la energía solar para alimentar los sistemas de desalación implementados por el Programa, como el proyecto piloto solar fotovoltaico implementado en el municipio de João Câmara, en Río Grande do Norte. Finalmente, existe la posibilidad de avanzar en el uso de la agricultura biosalina, a través de Unidades Demostrativas del Programa de Agua Dulce combinadas con la difusión de cultivos apropiados al Semiárido brasileño que utilicen aguas salinas o salobres en el proceso de riego.

El éxito de la metodología del Programa de Agua Dulce fue reconocido con su premio por la Asociación Internacional de Desalinización (IDA) durante el Congreso Mundial de Desalinización, celebrado en octubre de 2017, en São Paulo (SP). Además, se destaca la participación del PAD en un evento paralelo al Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas (ONU), celebrado en mayo de 2017 en Nueva York, donde el Programa fue reconocido como una iniciativa que adopta un enfoque integrado para el desarrollo sostenible y la lucha contra la pobreza. Como resultado del Congreso Mundial de Desalinización, celebrado en octubre de 2017, se estableció una asociación entre el PAD, IDA y la Asociación Latinoamericana de Desalinización (ALADYR).

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

Brasil carece de estudios que analicen la dimensión social de las aguas subterráneas, como su papel en el desarrollo socioeconómico, especialmente de los grupos vulnerables. La gobernanza debe incluir en sus debates a la masa de personas que utilizan manantiales, pozos excavados o pequeños flujos. La mayoría de las veces, estos usos son irregulares, 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, § 1º de la Ley nº 9.433/1997, por ser un contingente completamente desconocido, cuya subsistencia depende de las aguas subterráneas. Lamentablemente, el Poder Público no alienta la creación de organizaciones de usuarios de pozos, a diferencia de lo que sucede en otros países. Los *usuarios sociales* del agua son los más amenazados por la degradación del acuífero en vista de su limitada capacidad para obtener otras fuentes de agua, revertir la situación de degradación del acuífero, enfrentar los

daños causados por la disminución o pérdida de agua, y hacerse oír por la gestión (VILLAR, 2016).

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 buscando extracciones compatibles con la recarga, desarrollando planes de extracción a largo plazo, o adoptando 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, sin embargo, ya existen registros de situaciones preocupantes, como el caso de Ribeirão Preto (SP), Recife (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2017), São José do Rio Preto (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015) y Acuífero Urucuiá. La literatura internacional trae varios casos de advertencia sobre las pérdidas económicas causadas por la explotación insostenible del recurso. La prosperidad regional puede verse comprometida o resultar inviable si se agotan las fuentes de agua que la sustentan, como en el caso del acuífero de Ogallala en los Estados Unidos.

El acuífero de Ogallala es la principal unidad hidrogeológica del Sistema Acuífero High Plains, que abarca ocho estados norteamericanos: Dakota del Sur, Nebraska, Wyoming, Colorado, Kansas, Oklahoma, Nuevo México y Texas. Este acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua pública y agrícola. Durante casi un siglo, las aguas subterráneas han sostenido el desarrollo económico mediante cultivos agrícolas de regadío. Sin embargo, la insostenibilidad de las pautas de uso conlleva el riesgo de agotamiento, lo que hace inviable el suministro y la producción agrícola. Las principales medidas propuestas para mantener las reservas de agua y reducir las pérdidas son: reducción de la explotación, adopción de nuevas tecnologías de riego y sustitución del tipo de agricultura. Deines *et al.* (2020) afirman que si no se modifican los límites de exploración, el 24% del área regada puede verse obligada a adoptar cultivos de baja demanda de agua o pastizales, cuyo retorno económico es menor. Además, el 13% de las zonas ya no podrían mantener la productividad agrícola. La realidad hídrica del acuífero y la contención de este proceso de degradación requiere un proceso de adaptación, definición de escalas de acción y estudios sobre las posibilidades de reemplazar el uso de la tierra para planificar la estrategia de desarrollo local (DEINES *et al.*, 2020).

La pérdida de un acuífero significa una menor calidad de vida y sustento de toda una comunidad, sin embargo, los efectos causados por la degradación del recurso no llegan a todos los usuarios de la misma manera. Los grandes usuarios son más resilientes, ya que pueden perforar pozos más profundos o buscar otras fuentes de agua, mientras que los *usuarios sociales* son los primeros en perder su fuente de agua. Además, su capacidad financiera para buscar alternativas es limitada, e incluso puede hacer inviable su permanencia en el lugar. Los efectos de la sobreexplotación

de los acuíferos pueden generar pérdidas socioeconómicas que van más allá de los usuarios del agua, como es el caso de la ciudad de Yakarta, Indonesia (Recuadro 25).

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 perjudicados por la degradación; *d)* la gestión de las aguas subterráneas, especialmente en áreas críticas, requiere una planificación que busque alternativas económicas con 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 tomar décadas y requerir altos costos; y *f)* la prevención de la degradación de los acuíferos siempre es la mejor alternativa.

Box 25 – La sobreexplotación del acuífero de Yakarta y sus impactos en la ciudad

Dua Kudushana Singgih Yejezkial Klaas

Yakarta, la ciudad más grande del sudeste asiático, es una megaciudad en crecimiento económico, con cerca de 11 millones de habitantes registrados. La capital de Indonesia es un área administrativa vinculada a otras áreas de apoyo, que forman el área metropolitana de Jabodetabek, cuya población total supera los 30 millones de habitantes. Con un modesto crecimiento de la población de 1.35% por año, la ciudad depende en gran medida de la extracción de agua subterránea del sistema acuífero confinado superior de la Cuenca Hidrogeológica de Yakarta (JGB). Con un espesor total de unos 300 m, este sistema consiste en un conjunto de acuíferos multicapa homogéneos y anisotrópicos del Plioceno marino y de arena cuaternaria y depósitos aluviales separados por arcilla marina como capas confinantes. El agua es recogida directamente por los habitantes y por las industrias, autoadministrándose, en su mayoría, sin el permiso del gobierno, en ausencia de inspección y regulación clara para su apropiación.

El bombeo continuo de aguas subterráneas para fines domésticos e industriales dio como resultado una rápida disminución de los niveles hidráulicos, el comprometimiento de la resistencia del suelo y su compactación como una forma de soportar las cargas superpuestas. El impacto directo del rápido agotamiento de las aguas subterráneas, causado por la sobreexplotación de las partes más profundas del sistema acuífero, fue la caída de la línea piezométrica regional a niveles por debajo de la línea del mar (SCHMIDT; SOEFNER; SOEKARDI, 1990) y la subsidencia de vastas porciones de tierra, con tasas promedio de hundimiento de entre 1 y 15 cm por año (ABIDIN *et al.*, 2011). Esta situación ha convertido a Yakarta en la ciudad que más se hunde en el mundo. Estructuras como los edificios se hundieron en el suelo, causando el abandono de los asentamientos y el desplazamiento de las comunidades, con sus consiguientes impactos sociales, como la pérdida de medios de subsistencia y la desarticulación social. Estas consecuencias directas de la reducción de tierras son particularmente visibles en la parte norte de la ciudad, que es adyacente a la costa. En esta zona, a medida que el agua dulce retrocede aguas arriba debido a la rápida caída del nivel del agua subterránea, avanza la intrusión salina, habiendo invadido más de 14 km hacia el interior (YUWANDARI *et al.*, 2020), creando un grave problema para el ecosistema dependiente del agua subterránea y su calidad.

Los problemas subterráneos inducidos por la extracción excesiva e incontrolada de aguas subterráneas se ven exacerbados por las inundaciones anuales del régimen monzónico que, en la temporada de lluvias, inundan la ciudad, dañando los negocios, la educación, la salud y el sector gubernamental. Los modelos sugieren que la ciudad se hundiría completamente en 2050, lo que llevó al actual gobierno nacional a iniciar el programa de evacuación, determinando el traslado de la capital nacional, incluidas sus oficinas, al otro lado del mar, en la ciudad de Penajam, en la isla Kalimantan, ubicada a unos 1.200 km de la actual capital. Solo ese traslado costaría a la nación \$ 32,7 billones, que es casi el 20% del presupuesto anual del estado.

Además, los egos provinciales y sectoriales involucrados en la fragmentación política y las regulaciones en conflicto sobre la responsabilidad de la gestión de los recursos hídricos subterráneos, no solo en Yakarta, sino también en Indonesia en general, han sido el principal impedimento para lograr la gestión sostenible del agua en este país tropical, donde a menudo ocurren condiciones climáticas extremas, lo que lo hace vulnerable a las consecuencias del cambio climático.

Hacer frente a esta situación requiere un esfuerzo conjunto promovido por los diferentes actores sociales para considerar la compleja interacción entre las aguas superficiales y subterráneas en el proceso de recarga en el área (KLAAS *et al.*, 2018). Sin embargo, no existe un programa de recarga de agua subterránea bien definido que promueva un esfuerzo constructivo para inyectar agua de forma natural o artificial en el acuífero.

4.5 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 de la gobernanza, puede clasificarse como un derecho fundamental, previsto en el orden constitucional brasileño (PRETTY, 1995; MELO; SCHIER, 2017). Esta participación puede definirse como un proceso relacionado con 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). Las partes interesadas o actores sociales 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).

El poder de participación de los actores sociales está directamente relacionado con su capacidad para interactuar con agencias gubernamentales, líderes políticos y organizaciones que crean o implementan políticas públicas, y su participación en estas políticas (QUICK; BRYSON, 2016). El universo de actores sociales relacionados con el agua es amplio. En el caso de las aguas subterráneas, destacan: las empresas de perforación de pozos; los usuarios de pozos profundos; las comunidades o individuos que dependen enteramente del pozo o manantial para su subsistencia; las universidades e institutos de investigación; el Ministerio Público; las asociaciones técnicas profesionales, principalmente las relacionadas con la Ingeniería y la Geología; y las organizaciones no gubernamentales relacionadas con los recursos hídricos, especialmente la Asociación Brasileña de Aguas Subterráneas (ABAS), descritas en el Box 26.

Box 26 – Asociación Brasileña de Aguas Subterráneas (ABAS)

João Carlos Simanke Souza

La Asociación Brasileña de Aguas Subterráneas (ABAS) fue fundada el 19 de septiembre de 1978 en una reunión histórica celebrada en el auditorio de la Compañía Ambiental del Estado de São Paulo (CETESB). La comunidad hidrogeológica deseaba poner las aguas subterráneas en una condición de destaque junto a los organismos gubernamentales y la sociedad brasileña. São Paulo era el lugar donde la actividad de perforación de pozos era más fuerte e intensa, por eso muchas empresas pleiteaban una mejor regulación del sector, luchando contra la irregularidad de los pozos.

El llamado de los perforadores también se hizo eco con la universidad, el gobierno y los consumidores, lo que permitió establecer un Comité Organizador que lideró el proceso de creación de la ABAS. El propio Comité convocó una reunión el 21 de agosto de 1978, mediante la publicación del aviso en los periódicos Folha de São Paulo, O Estado de São Paulo, Gazeta Mercantil, O Globo, Diário do Comércio e Indústria y Jornal do Brasil.

El Comité Organizador estuvo liderado por el ingeniero Renato João Baptista Della Togna, presidente de la CETESB quien, por aclamación, fue elegido el primer presidente de la Asociación, junto con el Consejo Directivo y el Consejo Deliberante, y el vicepresidente, ingeniero Euclydes Cavallari, del Departamento de Agua y Electricidad (DAEE). La ABAS, por lo tanto, nació de la feliz combinación de esfuerzos de la comunidad empresarial de perforadores de pozos tubulares, prominentes figuras gubernamentales y técnicos e investigadores de universidades. Esta pluralidad de sectores fue uno de sus baluartes en el momento de su creación, cuya característica la Asociación aún conserva en la actualidad.

En los años siguientes, bajo el mando de varios líderes de la ABAS, se solicitó una ley específica de aguas subterráneas, que fue procesada sin éxito durante 10 años en el Congreso Nacional, hasta que se creó la Ley n° 9.433/1997 (Ley de Aguas), que instituyó la Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) y el Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (SINGREH). En la Constitución de 1988 y en la Ley de aguas se reconoció que la protección del agua debía ser parte integrante del medio ambiente. Así, se introdujeron los conceptos de usos múltiples y sostenibles de los recursos hídricos, gestión descentralizada y participación de todos los actores, incluidos los usuarios, la sociedad civil y el gobierno en el proceso de gestión y gobernanza del agua. La ABAS participó en la construcción de este hito en el sector de los

recursos hídricos. Más recientemente, desempeñó un papel importante en la creación del Nuevo Marco Jurídico para el Saneamiento y en la Ordenanza GM-MS 888/2021 de la Norma para la Potabilidad del Agua para el Consumo Humano, asegurando el acceso de los usuarios a las aguas subterráneas, con responsabilidad y cuidado ambiental. Hoy en día, la ABAS está representada por sus núcleos en todos los estados brasileños, tiene asociados de varios sectores, tiene un papel internacional e incluso es reconocido como el capítulo brasileño de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH).

La ABAS es responsable de organizar y promover el Congreso Brasileño de Aguas Subterráneas, el Congreso Internacional de Ambiente Subterráneo y el Encuentro Nacional de Perforadores, así como simposios regionales, cursos y conferencias. También edita la principal publicación técnica del sector, *Revista Água Subterrânea*. Por lo tanto, es imposible pensar en la historia de las aguas subterráneas en Brasil sin la ABAS, ya que estuvo presente en los principales momentos de la Hidrología Moderna del país, cuyo protagonismo trajo mayor visibilidad al recurso hídrico subterráneo, además de hacer su uso más responsable, equitativo y socioambientalmente sostenible.

La literatura sobre la gobernanza del agua destaca el papel central de la participación social en el éxito o el fracaso de las políticas hídricas. A continuación, se presentan los beneficios y desafíos en la materialización de los procesos participativos en las políticas públicas de agua (Tabla 13).

Beneficios potenciales de la participación social	Problemas en la ejecución
Permite un proceso de toma de decisiones transparente y mejor informado con soluciones creativas.	Gobierno centralizador o reacio que solo recibe propuestas, pero no da respuestas ni seguimiento, generando decepciones y menos aceptación de las decisiones.
Mayor aceptación de las decisiones, mayor confianza en el gobierno y reducción de los problemas de implementación.	Respuestas limitadas y con poca representatividad.
Proceso de aprendizaje social.	Tiempo y costos.
Práctica gubernamental más abierta e integrada.	Mala calidad de la respuesta social.
Fortalecimiento de la democracia.	Proceso de toma de decisiones inconsistente.
Una gestión más integral del agua que tenga en cuenta las cuestiones económicas, sociales y ambientales.	Concesión de privilegios a ciertos grupos, sin una justificación bien articulada.

Tabla 13 Beneficios y dificultades de la participación social

Fuente: Mostert (2003, p. 181).

La sobreexplotación de los acuíferos requiere la cooperación de actores no gubernamentales, especialmente usuarios, compañías de perforación, consejos de clase y universidades (BARTHEL; FOSTER; VILLHOLTH, 2017). En el caso específico de las aguas subterráneas, se pueden destacar los siguientes beneficios de la participación social:

- 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.) (GARDUNO; 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 Gobierno en la promoción de la supervisión (GARDUNO; 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 (GARDUNO; STEENBERGEN; FOSTER, 2010);

- facilita la coordinación de las decisiones relacionadas con el agua y la planificación espacial, incluida la ayuda para reducir las contradicciones entre las políticas (GARDUNO; 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 trata con manantiales y pozos excavados (QUEVAUVILLER; BATELAAN; HUNT, 2016).

El formato y el nivel de participación dependen de la estructura institucional, jurídica y política de los gobiernos

y órganos de gestión (RUIZ-VILLAYERDE; GARCÍA-RUBIO, 2016). Varios autores han analizado cómo se estructuran estos niveles de participación pública. Entre los más conocidos se encuentra el ejemplo de la escala de participación ciudadana de Arnstein Ladder (ARNSTEIN, 1969). Además de este sistema, la escala Pretty (1995) clasifica la participación de acuerdo con la participación en las actividades de gestión y el control del resultado final, que va desde la manipulación hasta la automovilización. Michener (1998) define la participación en dos categorías: a) el enfoque centrado en el planificador; y b) el enfoque centrado en las personas. Ruiz-Villaverde y García-Rubio (2016), con base en Mostert (2003), ilustran los niveles de participación (Figura 51).

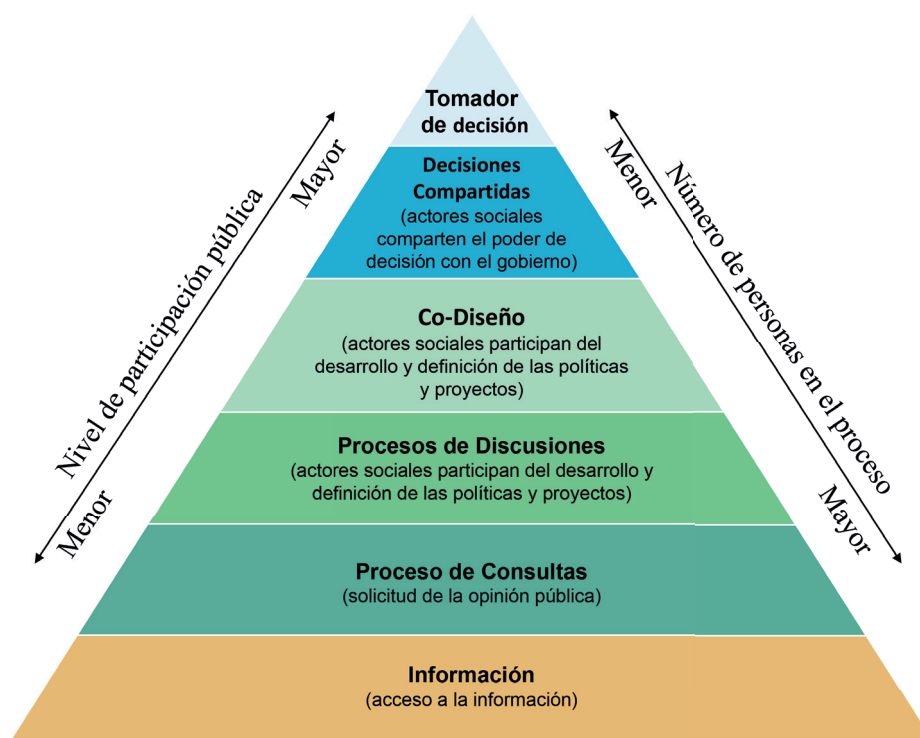


Figura 51 – Diferentes niveles de participación pública

Fuente: Ruiz-Villaverde y García-Rubio (2016, p. 5), adaptado y traducido por Pilar Carolina Villar.

A través de la participación pública, las partes interesadas pueden interactuar con agencias gubernamentales, líderes políticos, organizaciones sin fines de lucro y organizaciones empresariales, que crean o implementan políticas y programas públicos. La legislación brasileña incorpora varios niveles de participación en el ejercicio de la gobernanza del agua. Como ejemplo, podemos mencionar los procesos de consulta en la

elaboración del Plan Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040, las discusiones realizadas dentro del alcance de los CCHs o, también, los Acuerdos de Gestión Compartida del Programa de Agua Dulce.

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 la gestión o implementación de estas políticas (PIYAPONG *et al.*, 2019). Esto se debe en gran parte a los siguientes aspectos: a) la falta de información y conocimiento social sobre el tema; b) el carácter extremadamente técnico del debate sobre las aguas subterráneas; y c) la irregularidad del uso.

El acceso a la información es la primera condición de cualquier proceso participativo (RUIZ-VILLAYERDE; GARCÍA-RUBIO, 2016). Si la sociedad no conoce los acuíferos o solo tiene una comprensión básica de los recursos hídricos subterráneos, es poco probable que se establezca un sentido de urgencia para incluirlos en las políticas públicas, o la responsabilidad de cumplir con las reglas, ni surge el deseo de involucrarse en el desarrollo de políticas públicas o contribuir a su implementación (JANMAIMAOOL *et al.*, 2019). Este escenario favorece la exploración irregular, que “tiene lugar de una manera no relacionada con la disponibilidad local de agua, irrespeta el derecho de uso de terceros y evita que se haga 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 es fundamental para cambiar esta realidad. Lamentablemente, faltan iniciativas que se centren en la realidad de los acuíferos y que busquen enfoques diferentes, según el público al que van dirigidas: gestores, usuarios, empresas de perforación o sociedad. El Box 27 trae una acción en esta dirección, incluyendo el Acuífero Guaraní en escuelas secundarias en Santa Catarina.

El debate sobre las aguas subterráneas está marcado por un discurso técnico, cuya complejidad, en muchos casos, aleja la participación social o la relega a una postura pasiva y sumisa de este conocimiento técnico. El conocimiento técnico-científico es fundamental para orientar la gestión, pero la toma de decisiones es un proceso político (FORSYTH, 2011). Si los actores sociales no entienden la razón de estos datos científicos o las consecuencias de no guiar sus acciones por este conocimiento, difícilmente adoptarán comportamientos que, a corto plazo, puedan parecer perjudiciales para sus intereses, como, por ejemplo, reducir el volumen extraído, especialmente cuando hay fallas en la fiscalización, como es el caso en Brasil. Además, pocos gestores tienen los conocimientos técnicos necesarios para proponer acciones específicas a las aguas subterráneas.

Finalmente, la falta de adhesión a las políticas públicas, materializada por la prevalencia de usuarios irregulares, también dificulta la gestión, porque: a) oculta

la importancia de las aguas subterráneas en la gestión del agua; b) vacía el debate sobre el recurso; c) impide que los intereses y conflictos existentes por el uso de las aguas subterráneas sean discutidos de manera transparente entre todos los que puedan verse afectados; d) dificulta o impide el establecimiento de alianzas en las acciones necesarias para proteger el acuífero; y e) perjudica la organización de los usuarios y la construcción de una responsabilidad colectiva por el uso del recurso.

A diferencia de países como México, Perú y Chile, la legislación brasileña no ha establecido la condición jurídica de las organizaciones usuarias de pozos. Estas organizaciones son grupos de usuarios de aguas subterráneas que pueden, de acuerdo con la legislación de cada país, funcionar como entidades de gestión (otorgar derechos de uso del agua) o como asociaciones u organizaciones no gubernamentales que buscan defender sus intereses en relación con el uso o, incluso, recaudar fondos para llevar a cabo obras que benefician al grupo (por ejemplo, sistemas para recargar o perforar nuevos pozos). La mera disposición legal, sin embargo, no garantiza el éxito de este tipo de acuerdo cooperativo, como lo demuestra el caso de las Comunidades de Aguas Subterráneas de Chile, expuesto en la galería de casos. A diferencia de las aguas superficiales, los usuarios de aguas subterráneas no están motivados para organizarse. Los casos de Chile y México demuestran que las organizaciones de usuarios desempeñan un papel importante para hacer frente a las situaciones de degradación del acuífero.

En Brasil, las entidades gestoras son las agencias estatales de recursos hídricos o las agencias de cuenca, sin embargo, nada impide que los usuarios constituyan organizaciones de derecho privado con el objetivo de promover acciones complementarias a la gestión de las aguas subterráneas. También hay algunas experiencias de organizaciones de usuarios de riego³ que pueden contribuir a promover el uso sostenible del recurso, siempre que su desempeño esté guiado por la explotación sostenible del agua y con un enfoque en objetivos a largo plazo.

La participación social en las aguas subterráneas de Brasil es un tema poco explorado. 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.

3. Estas iniciativas se centran en el riego basado en las aguas superficiales. Ejemplos son: la Asociación de Usuarios del Perímetro de Riego de Tourão (AUPIT) (BA) y la Asociación de Usuarios del Perímetro de Riego de Arroio Duro (RS). Sin embargo, faltan estudios científicos sobre esas iniciativas.

Box 27 – La experiencia del Proyecto de Educación Ambiental para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, en la Zona de Recarga Directa, en el Estado de Santa Catarina/Brasil

Marcio Cardoso
Daniel José da Silva

Este proyecto se llevó a cabo de mayo de 2005 a febrero de 2007, con el equipo que ejecuta el Instituto Autopoiésis Brasilis – Organización de la Sociedad Civil de Interés Público – y el Programa de Postgrado en Ingeniería Ambiental de la Universidad Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC). Su realización contó con la colaboración de la Fundación de Medio Ambiente del Estado de Santa Catarina (FATMA), el Municipio de Urubici, el Grupo de Apoyo Local en Urubici (GAL) y la Asamblea Legislativa del Estado de Santa Catarina (ALESC). La coordinación general estuvo a cargo de Marcio Cardoso (Instituto Autopoiésis) y Daniel José da Silva (UFSC). El Proyecto desarrolló un modelo de Educación Ambiental formal, no formal y difusa para incluir el tema de protección ambiental y desarrollo sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en los currículos escolares y las políticas públicas municipales en la región de su cobertura en Santa Catarina (Figura 52).

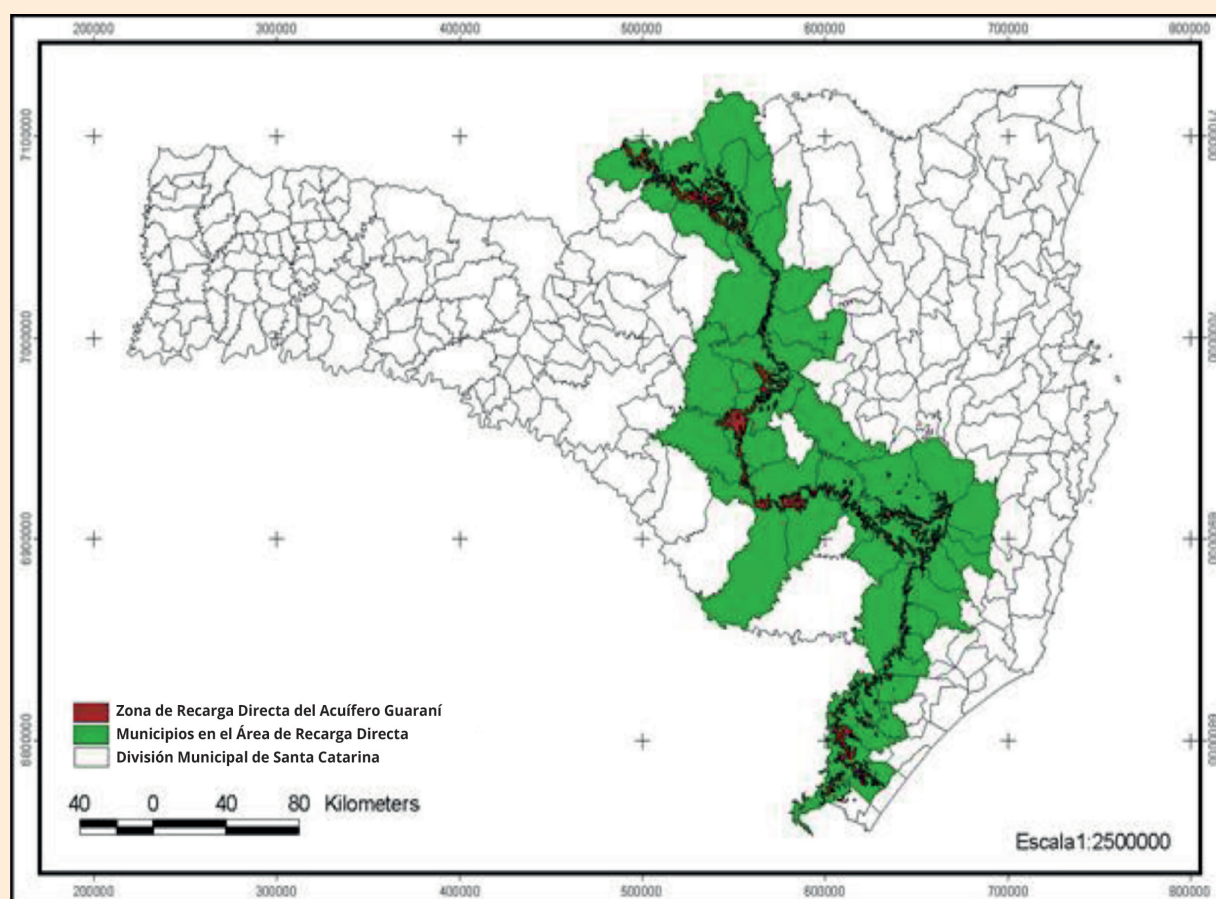


Figura 52 – Área de recarga del Sistema Acuífero Guaraní en Santa Catarina

Fuente: elaborado por los autores.

Los objetivos específicos del proyecto son promover: 1) la **Educación Ambiental Formal** a través de la inclusión de los contenidos de protección ambiental y desarrollo sostenible del SAG en el Proyecto Político Pedagógico del Municipio de Urubici; 2) **Educación Ambiental No Formal** a través de la construcción social de un proyecto de ley municipal para la protección ambiental y desarrollo sostenible del SAG,

involucrando concejales, gestores públicos, sociales y privados del Municipio de Urubici; 3) **Educación Ambiental Difusa** en los 47 municipios ubicados en la Zona de Recarga Directa del SAG, en el estado de Santa Catarina, a través de la difusión de materiales pedagógicos y seminarios.

Las actividades se estructuraron en cinco etapas: 1) *Investigación y producción de información* – informe de perfil y vulnerabilidad de los 47 municipios, mapas temáticos, historia del SAG, sitio web del SAG; 2) *Materiales pedagógicos y de comunicación* – folder, afiche de presentación, folleto del SAG, manual metodológico, folder y afiche del seminario; 3) *Capacitación de educadores e inclusión del tema del SAG en las escuelas* – taller de capacitación de educadores en el Municipio de Urubici, participación de escuelas y ONG en la Región; 4) *Taller de Capacitación Gestores Públicos y Sociales y Legisladores* – estrategias para la inserción del tema del SAG en las escuelas y políticas municipales; 5) *Seminario para la difusión e intercambio de experiencias del SAG en SC* – Seminario para 350 participantes, difusión de materiales pedagógicos, difusión e intercambio de información entre SC, Brasil, Uruguay, Argentina, Paraguay.

Las principales recomendaciones para los próximos proyectos de SC incluyeron la elaboración de varios instrumentos y la promoción de eventos, tales como: 1) material pedagógico para la educación formal en las escuelas; 2) material pedagógico para la educación no formal de jóvenes y adultos; 3) material pedagógico para la inclusión del tema Protección y Desarrollo Sostenible del SAG en las Políticas Públicas municipales y estatales; 4) material informativo para la orientación de los propietarios rurales, agricultores, ganaderos, industriales, mineros y otros empresarios, en el ajuste de la conducción del uso sostenible del SAG; 5) material informativo para la inclusión del SAG en los planes maestros municipales, unidades de conservación y cuencas hidrográficas; 6) material de comunicación social para las escuelas y comunidades, tales como: folleto pedagógico del SAG, folder, cartel, videos, programas de radio y televisión; 7) promoción de Seminarios Estatales Anuales y Seminarios Nacionales e Internacionales para intercambiar experiencias sobre mejores prácticas, materiales pedagógicos producidos y construcción de redes sociales y asociaciones; 8) expansión del Proyecto de Educación para la Protección del SAG a otros municipios de Santa Catarina y estados brasileños, miembros del SAG⁴.

4.6 COOPERACIÓN ENTRE LAS DIVERSAS ENTIDADES ADMINISTRATIVAS Y ATENCIÓN PRIORITARIA A LA GESTIÓN LOCAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS⁴

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 (SNRH), 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 CCH. Así, 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, se tomen al nivel político más bajo posible, es decir, por aquellos que están lo más cerca posible de las decisiones que se definen, toman y ejecutan (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. La cuenca trasciende los límites administrativos clásicos, ya que su territorialidad se basa en 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 estos cuerpos hídricos (GRANJA; WARNER, 2006).

Los acuíferos se insertaron en esta gestión por cuencas, aunque su territorialidad no converge con

4. Para obtener más información sobre esta experiencia, consulte el documental *Acuífero Guaraní: Gigante Desconocido*, disponible on-line en: <https://vimeo.com/83763069>.

ellas. A pesar de ello, la cuenca sigue siendo el mejor territorio para su manejo, ya que los principales servicios ecosistémicos de los acuíferos y los impactos del uso de su agua o suelo se producen, principalmente, en la territorialidad de la cuenca hidrográfica. Como se puede observar en la Figura 53, 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 impensable para un país que ni siquiera ha podido implementar plenamente la gestión de cuencas hidrográficas.

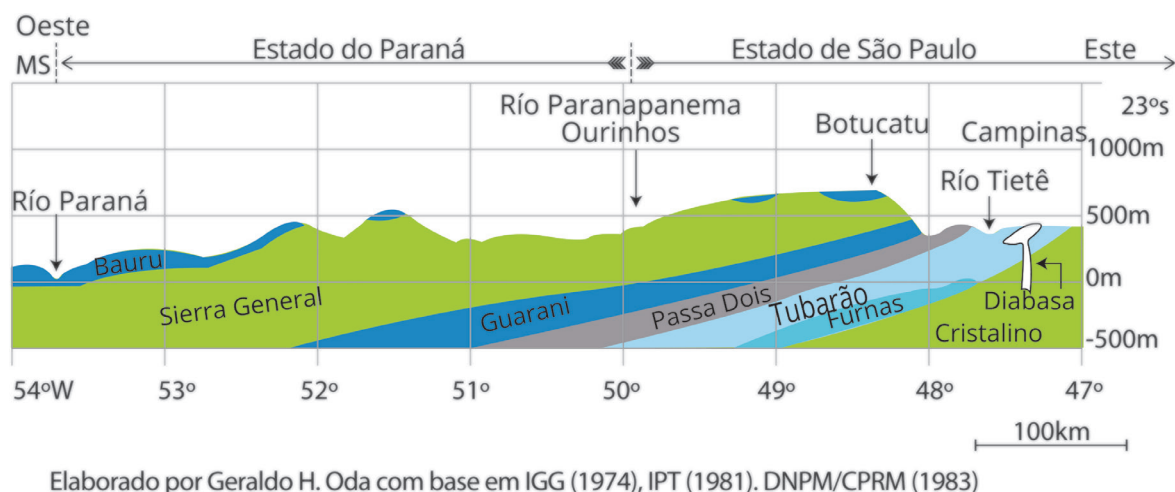


Figura 53 – Sección geológica esquemática del estado de São Paulo y sus sistemas acuíferos

Fuente: São Paulo (2014, p. 29).

El Capítulo 3 demostró que la CNRH estableció los principales lineamientos que guían el desempeño de las unidades federales, municipios y los CCH en el manejo conjunto de cuencas y acuíferos, sin embargo, existe una falta de estudios que analicen *cómo* y *si* esto se hizo (VILLAR; HIRATA, 2022). Además, sería importante que el CNRH y los Consejos Estatales determinaran áreas prioritarias para el control de las extracciones acuíferas, cuyos efectos podrían ir más allá de la cuenca en la que se lleva a cabo la gestión. Esta definición contribuiría a estimular la cooperación entre las diversas entidades administrativas y los diversos CCH involucrados. Dichas acciones de cooperación pueden incluir: a) la idealización de estudios y monitoreo conjunto; b) la adopción de metodologías conjuntas para determinar la disponibilidad de agua y controlar las extracciones; c) la creación de salas de situación para acuíferos; o d) la idealización de acuerdos intercuenas o internacionales. En este sentido, la experiencia del Sistema Acuífero Guaraní es bastante ejemplar en cuanto a la importancia

de articular y coordinar acciones a las diversas escalas de gestión.

4.6.1 Acuíferos transfronterizos e interestatales: el caso del Sistema Acuífero Guaraní (SAG)

La Res. CNRH 202/2018, en el art. 2º, 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; [...].

Varios acuíferos brasileños son interestatales. Desafortunadamente, aún no se ha producido un mapa exclusivo para demostrar estos acuíferos, lo que ayudaría a los estados y CCH a cumplir con las acciones conjuntas. Brasil tiene 11 acuíferos transfronterizos (Figura 54): Amazonas, Aquidauana, Boa Vista, Bauru-Caiuá, Roraima, Pantanal, Permo-Carbonífero, Costeiro, Litorâneo, Serra Geral y Guaraní.

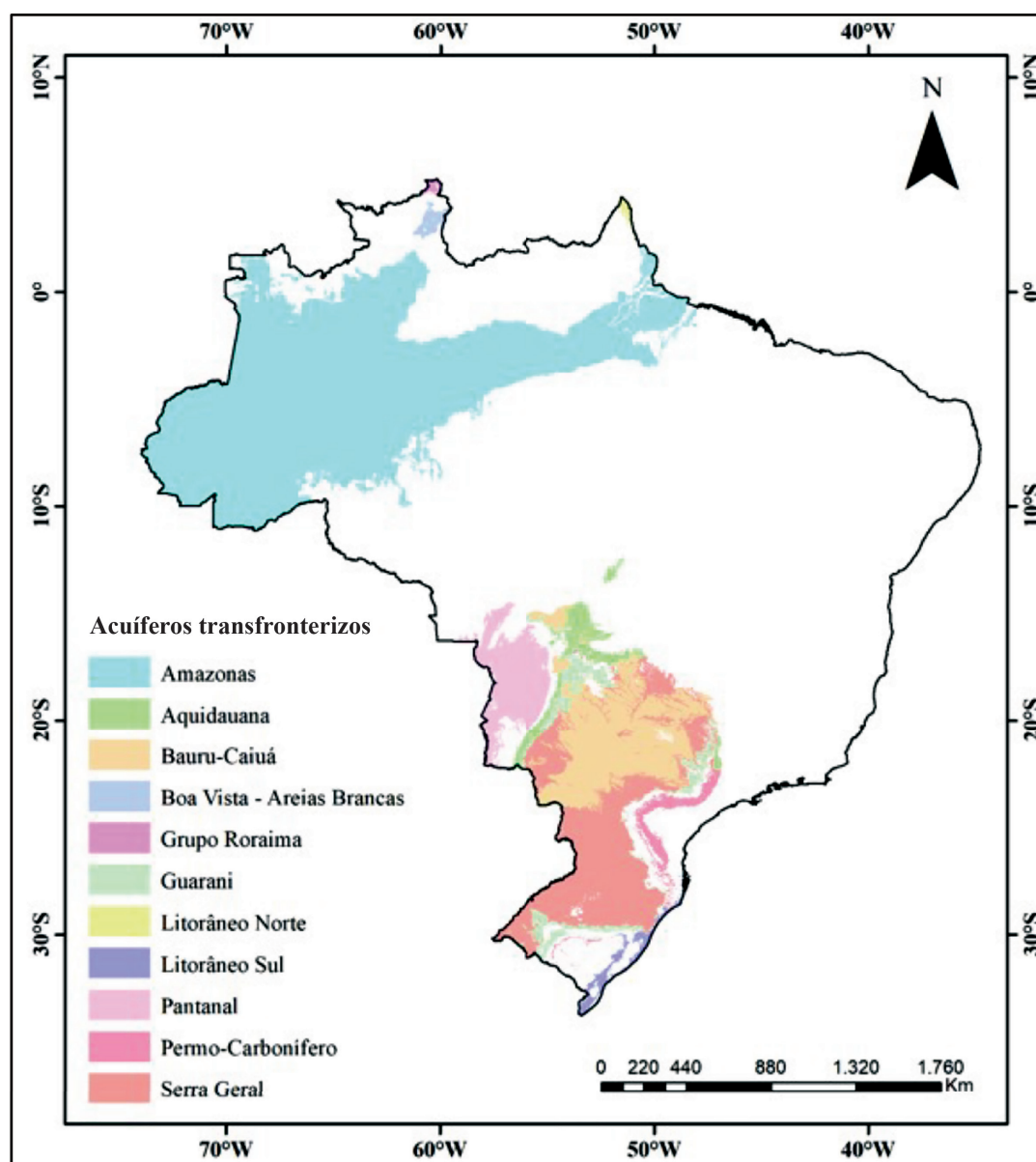


Figura 54 – Acuíferos transfronterizos en el territorio brasileño

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

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG), sin duda, es el más conocido y el único que tiene un Acuerdo Internacional (Box 28). Como se muestra en la Figura 54, este acuífero transfronterizo está superpuesto por otros dos acuíferos también transfronterizos: el Serra Geral y el Bauru-Caiuá, por lo que esta Figura demuestra solo sus áreas de afloramiento.

Su área ocupa 1.087.879 km², comprendiendo el territorio de Argentina (225.500 km²), Brasil (735.918 km²), Paraguay (71.700 km²) y Uruguay (45.000 km²)

(OAS, 2009, p. 62) (Figura 55). Brasil posee la mayor parte del acuífero (61.65%) que, en el territorio brasileño, está clasificado como un acuífero interestatal porque 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, que representan el 80% del uso brasileño (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).

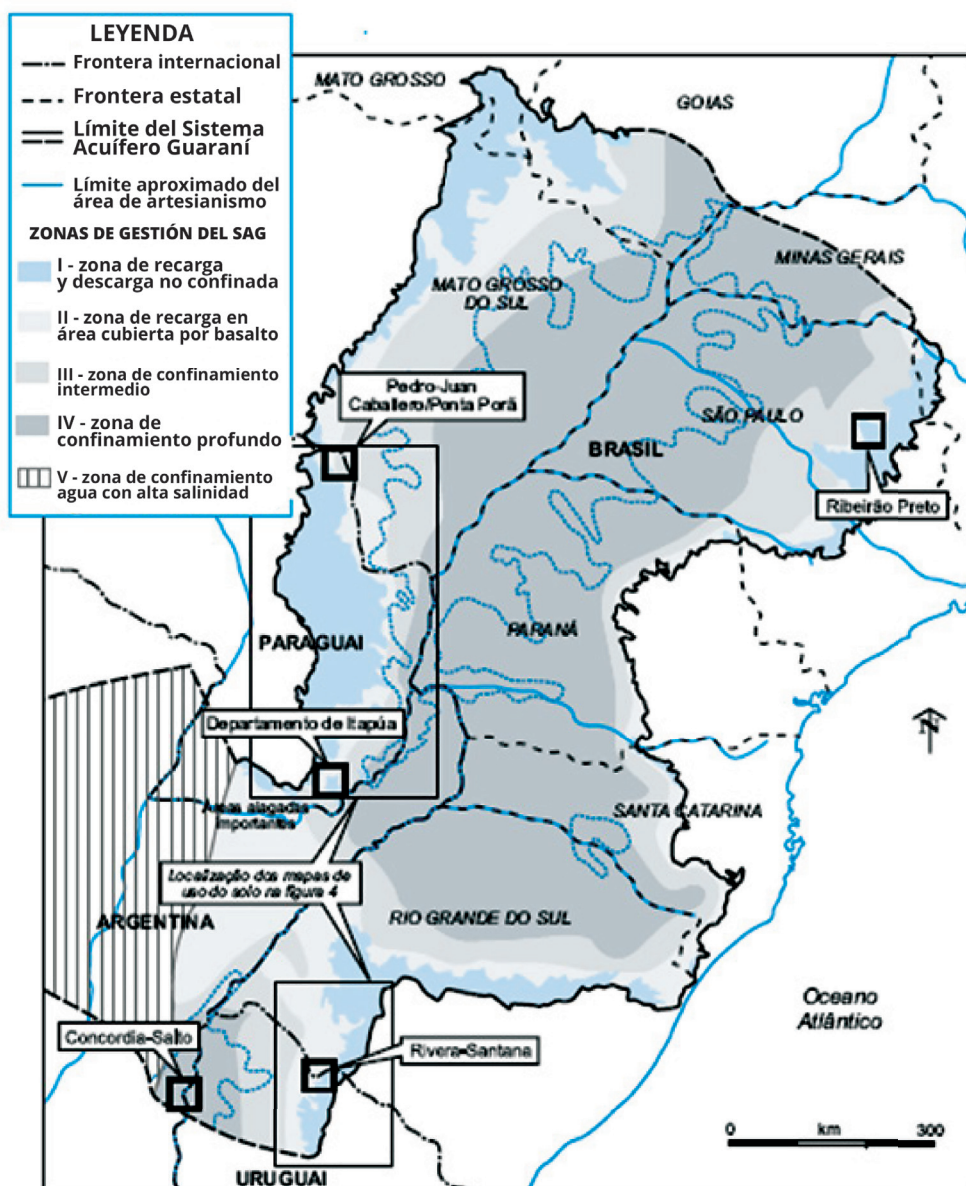


Figura 55 – El Sistema Acuífero Guaraní y sus Zonas de Gestión

Fuente: Foster *et al.* (2009, p. 11).

A diferencia de las descripciones difundidas comúnmente en medios no técnicos, el SAG no es una estructura uniforme, como una esponja o un lago/río subterráneo. Por el contrario, el acuífero es bastante heterogéneo, ya sea en relación con la formación rocosa que lo compone, o con las características de sus aguas. Tiene áreas de afloramiento y regiones cubiertas por basaltos de diversos espesores, que pueden superar los 1.500 m de profundidad (OAS, 2009; BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). Esta característica influye en el tiempo de residencia de las aguas, que

puede ser de meses o más de cientos de miles de años, lo que indica tasas de recarga extremadamente bajas, además de condicionar las características geoquímicas del agua, con porciones de excelente calidad y otras con alta salinidad o anomalías naturales relacionadas con altas concentraciones de flúor y salinidad (OAS, 2009, p. 66; BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). En este sentido, la Figura 55 ilustra esta heterogeneidad, proponiendo cinco Zonas de Gestión que demuestran la necesidad de enfoques de planificación distintos (FOSTER *et al.*, 2009):

- I. **zona de recarga y descarga no confinada:** el acuífero aparece en la superficie, por lo que el agua se repone continuamente, contribuyendo a los recursos hídricos superficiales. Por otra parte, es vulnerable 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 confinamiento intermedio:** 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. Riesgo muy bajo de contaminación antropogénica. Posibilidad de problemas de calidad del agua por tiempo de residencia y 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 m. El costo de extracción imposibilita la explotación, excepto para uso hidrogeotérmico;
- V. **zona de confinamiento con alta salinidad:** además del confinamiento, en esta región las aguas tienen alta salinidad, y pueden ser utilizadas para fines hidrogeotérmicos o después de tratamientos, si es económicamente factible.

Aunque esta división sugiere cierta homogeneidad, todavía hay heterogeneidades que solo pueden evaluarse a nivel local. Por ejemplo, en el municipio de Ribeirão Preto (SP), 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 del SAG en Ribeirão Preto puede comprometer el acuífero en las ciudades vecinas, pero no influye en la explotación de otro país o estado brasileño.

La región de Ribeirão Preto, además de ser un área piloto del Proyecto del Sistema Acuífero Guaraní, fue objeto de un Término de Cooperación Técnica entre el estado de São Paulo y el de Baviera (Alemania), denominado “*Sistema Piloto de Información para la Gestión Ambiental de los*

Recursos Hídricos Subterráneos en el Área de Afloramiento del Sistema Acuífero Guaraní en el Estado de São Paulo”. Las recomendaciones de este estudio contribuyeron a la creación del Área de Restricción y Control del Uso de Aguas Subterráneas en el municipio de Ribeirão Preto (SP) (VILLAR; RIBEIRO, 2011).

Aunque las formaciones geológicas se extienden más allá de los límites nacionales, el flujo de agua tiene características locales, por lo que “los efectos transfronterizos actuales y potenciales del SAG se limitan 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). Los problemas transfronterizos en el SAG pueden ocurrir si extensas áreas con explotación intensa se encuentran cerca de la frontera, lo que podría resultar en reducciones significativas en el nivel potenciométrico del acuífero, trayendo pérdidas a estas áreas y, en consecuencia, a los países vecinos.

La lógica de los flujos locales se mantiene en las Unidades Federativas Brasileñas. Por lo tanto, desde el punto de vista de la cooperación interestatal, es importante delimitar las áreas con exploraciones extensas e intensas cerca de los límites interestatales. En la lógica de la gestión estatal, los Estados deben definir las áreas en las que se comparten los flujos subterráneos precisamente para promover la cooperación entre cuencas y proponer acciones conjuntas. El Plan Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) y los Planes Estatales de Recursos Hídricos (PERH) tienen un papel destacado en la promoción de esta coordinación.

Brasil es responsable de la mayor parte de la explotación del SAG, pero los problemas de sobreexplotación todavía están localizados y restringidos al estado de São Paulo. Aunque no existen problemas transfronterizos significativos (VILLAR; RIBEIRO, 2011; VILLAR, 2015; HIRATA; FOSTER, 2020; HIRATA; KIRCHHEIM; MANGANELLI, 2020), este acuífero ha logrado la notable hazaña de darse a conocer a la sociedad y fomentar acciones dirigidas a las aguas subterráneas. Esto se justifica en gran medida por la realización del Proyecto de Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (también conocido como Proyecto Sistema Acuífero Guaraní – PSAG), entre 2003 y 2009. Este proyecto internacional contó con la participación de todos los 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). Su ejecución solo fue posible gracias a una historia previa de cooperación impulsada por las universidades de los países que se dieron cuenta de la posibilidad de una conexión hidrogeológica entre formaciones geológicas compartidas por los países (VILLAR, 2015). A partir de ahí, se logró movilizar a organismos internacionales y estados (VILLAR, 2015; FIDUCIARIO; HIRATA; MANGANELLI, 2018),⁵

culminando con la creación de un Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas en América Latina y el Caribe (CeReGAS), descrito en el Box 29. El SAG será el objetivo de un nuevo proyecto internacional de mediano tamaño⁵, llamado “Programa Estratégico de Acción del Acuífero Guaraní: Viabilizando Acciones Regionales”, organizado por los estados, el GEF y el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF).⁶

Box 28 – El Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní

Pilar Carolina Villar

El acuerdo sobre el Acuífero Guaraní fue firmado por los países involucrados el 2 de agosto de 2010, en la ciudad de San Juan (Argentina), siendo muy celebrado por la comunidad hídrica, debido a que: a) configura un acuerdo específico para un acuífero transfronterizo, algo raro en el contexto mundial; b) menciona, en su preámbulo, la Resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas n° 63/124 (2008), reforzando la importancia de este documento; c) incluye los principios del Derecho Internacional de Aguas Dulces, evidenciando su aplicabilidad a los acuíferos; d) es el primer acuerdo específico de un acuífero en América Latina, que puede fomentar la conclusión de otros acuerdos; e) representa la continuidad del proceso de cooperación establecido entre los países dentro del ámbito del Proyecto⁶ del Sistema Acuífero Guaraní; y f) es un ejemplo de diplomacia preventiva, ya que no hubo conflictos sobre el uso de las aguas subterráneas (VILLAR; RIBEIRO, 2011).

El largo proceso de ratificación enfrió el optimismo inicial. En octubre de 2020, Paraguay depositó el último instrumento de ratificación, lo que permite la entrada en vigor del acuerdo. Su objeto es “los recursos hídricos transfronterizos del Sistema Acuífero Guaraní” (art. 1°), y representa una herramienta de cooperación flexible que obliga a los estados a gestionar las aguas subterráneas, de acuerdo con los estándares del Derecho Internacional (VILLAR, 2016).

La entrada en vigor del Acuerdo permite a los Estados profundizar el procedimiento de cooperación. Para ello, sin embargo, son necesarias las siguientes acciones: a) creación de una comisión para el Acuífero Guaraní; b) implementación de programas de cooperación de aguas subterráneas; c) identificación de áreas críticas, especialmente en áreas fronterizas, que son aquellas que efectivamente tienen un flujo compartido entre los estados; y d) definición del procedimiento de arbitraje para la resolución de disputas a través de la edición de un Protocolo Adicional (art. 19). Entre estas acciones, la más urgente, sin duda, es la creación de la Comisión, responsable de coordinar la cooperación de conformidad con los principios y objetivos del Acuerdo. Sin la regulación de su estatuto, definiendo su estructura y atribuciones, el Acuerdo tendrá una efectividad limitada en el contexto regional (VILLAR, 2020).

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

6. Ver: <http://www.oas.org/DSD/WaterResources/projects/Guarani/SAP-Guarani.pdf>.

Box 29 – Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas en América Latina y el Caribe (CeReGAS): ejemplo práctico de la importancia de la cooperación internacional

Alberto Manganeli

Como consecuencia del impulso dado por el Proyecto Sistema Acuífero Guaraní (2003-2009) y en vista de la necesidad de contar con una oficina regional de articulación para promover la cooperación entre los países de la región en relación con la gestión y manejo de los recursos hídricos subterráneos, particularmente los transfronterizos, la propuesta de crear el Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas en América Latina y el Caribe (CeReGAS) fue presentada en 2011 ante la mesa del Programa Hidrológico Intergubernamental de la Unesco (PHI-LAC). Tras un largo proceso de aprobación, en marzo de 2014 se firmó el Acuerdo entre el Gobierno de la República Oriental del Uruguay y la Unesco para el establecimiento de CeReGAS como Centro de Categoría II. El propósito de CeReGAS es generar capacidades científicas y técnicas que contribuyan al desarrollo sostenible, la gestión y la gobernanza de las aguas subterráneas, así como a la protección ambiental de los acuíferos desde una visión integrada. Entre sus objetivos estratégicos figuran los siguientes:

- impulsar la cooperación entre los países de la región en relación con la gestión de los recursos hídricos subterráneos, en particular en el caso de los recursos hídricos transfronterizos;
- promover la creación y/o el fortalecimiento de redes temáticas de investigación regionales e internacionales sobre el tema;
- desarrollar y/o promover la creación de herramientas de gestión y formar a profesionales e investigadores para que las utilicen;
- difundir los conocimientos generados sobre el tema y promover acciones de sensibilización pública sobre el uso sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

En cuanto a la estructura, su órgano superior está representado por el Consejo de Administración, el cual, según los Acuerdos Uruguay y Unesco, está integrado por un representante del gobierno uruguayo, uno de la Unesco, así como representantes de los siguientes países: Argentina, Bolivia, Brasil, México y Paraguay. El CeReGAS promueve, participa y articula proyectos a nivel regional y nacional, como el Proyecto Sistema Acuífero Guaraní II (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay) y el Proyecto Laguna Merín (Brasil y Uruguay). Además, imparte cursos propios o en asociación con diferentes instituciones regionales, entre las que destacan: *Gestión Integrada de Aguas Subterráneas en América Latina y Gobernanza de Acuíferos Transfronterizos*, ambos con alcance regional en América Latina y el Caribe. El CeReGAS también coordina el grupo de trabajo del Programa *International Shared Aquifer Resources Management* (ISARM) Américas, de la Unesco, que se desarrolla como un esfuerzo colectivo de los países del continente, con el objetivo de identificar y evaluar los sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas.

4.7 MONITOREO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS

El monitoreo de las aguas subterráneas se lleva a cabo mediante la vigilancia de los parámetros hidráulicos y/o biofísico-químicos en el tiempo y el espacio, con varios objetivos que van desde la caracterización inicial de un acuífero, hasta como parte de una estrategia de protección o rehabilitación de las aguas subterráneas.

Así, diferentes objetivos imponen diferentes programas de monitoreo, los cuales deben considerar: *i)* ubicación del punto a monitorear; *ii)* densidad de puntos monitoreados y perfil constructivo de pozos o características hidrogeológicas del punto de agua; *iii)* frecuencia de medición; *iv)* parámetros de análisis;

v) datos a recolectar y definición de su forma de organización y validación, entre otros.

El monitoreo de las aguas subterráneas utilizada para caracterizar aspectos de cantidad (disponibilidad de recursos) o calidad (contaminación natural y antropogénica) tiene una restricción intrínseca: la baja capacidad de los pozos de vigilancia o pozos de producción de agua (utilizados para el monitoreo) para caracterizar los fenómenos que se producen en el acuífero.

Estos fenómenos, como la contaminación, generan plumas específicas que apenas llegan a más de 1-2 km de la fuente causal. Por otro lado, los pozos únicos para el monitoreo estático (a diferencia de los pozos de bombeo) solo pueden identificar la pluma que los alcanza, es decir, si el límite de un penacho se encuentra a pocos metros

del pozo, no se identificará. Por lo tanto, 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 frontalmente a la pluma, no se detectará.

El monitoreo asociado a la caracterización de eventos de contaminación a partir de fuentes puntuales está bien desarrollado en el país. Y, a pesar de requerir un gran número de pozos para determinar los límites de las plumas contaminantes, existen varios procedimientos estandarizados. Las principales acciones sugeridas por los hidrogeólogos para el monitoreo de la contaminación y la remediación de fuentes puntuales son la adopción de tecnologías de perforación de pozos, la instalación de pozos multinivel y el uso de equipos adecuados para la recolección de muestras de agua representativas.

A su vez, cuando la vigilancia de la calidad del agua entraña fuentes dispersas y multipunto, es necesaria una alta densidad de pozos para reconocer el alcance de los daños al acuífero, lo que, en la práctica, hace que la vigilancia sea ineficaz o tenga costos muy elevados. Generalmente, la contaminación de este tipo genera plumas extensas y muy heterogéneas en términos de concentración, lo que hace que la interpretación de los datos sea aún más compleja.

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 tiene los mismos problemas. Por lo tanto, sería importante monitorear el nivel potenciométrico en el tiempo, lo que requeriría mediciones periódicas y sistemáticas para evaluar variaciones a largo plazo, como, por ejemplo, cambios en la recarga debido al cambio climático, o para identificar problemas de sobreexplotación. En este último caso, los pozos de monitoreo deben instalarse donde se encuentran los pozos de extracción de agua. La

interpretación de los datos, a su vez, debe aislar aquellos que surgen de la interferencia hidráulica de una cuenca cercana o de un drenaje regional, que debe cuantificarse. Para ello, se requieren mediciones mensuales o incluso semestrales, comunes a los programas de monitoreo regional, así como monitoreo piezométrico por hora o al menos diario, requiriendo la instalación de transductores de presión y varios pozos en una región.

Por lo tanto, 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 sigue la geoquímica de 316 puntos activos de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas (CETESB, 2020). Considerando que cada pozo puede monitorear lo que ocurre en un radio de 200 m, el área que cada pozo evalúa es de 0,13 km². Por lo tanto, la red está monitoreando solo el 0,02% del área estatal (~41 km²). Estas cifras dan la dimensión de la baja representatividad de las redes regionales de calidad del agua y la necesidad de redimensionar las redes regionales de este tipo y con este enfoque. 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 de la supervisión 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.

Ya el RIMAS, del Servicio Geológico de Brasil, expuesta en el Box 30, es más regional y más amplia. En este caso, el objetivo es monitorear la evolución de los niveles de agua subterránea en áreas naturales alejadas de la ocupación humana, junto con estaciones meteorológicas, tratando de rastrear la evolución de los niveles potenciométricos en el tiempo, indicando, por ejemplo, las variaciones esperadas por el cambio

climático global. Por lo tanto, incluso con un menor número de pozos, la caracterización de *background* y su evolución a largo plazo de los niveles potenciométricos determina la idoneidad de dicha escala y técnica para el propósito previsto.

Superar la baja representatividad de los pozos de monitoreo en las redes regionales es un desafío, especialmente cuando las inversiones son bajas. 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 por aguas subterráneas. La legislación exige que los puntos de la red de agua de una ciudad sean monitoreados periódicamente y que la información sea enviada 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, cuyas variaciones en la concentración de los elementos a lo largo del tiempo podrían indicar la degradación del acuífero o parte de este.

Una forma de evaluar los problemas de la sobreexplotación de los acuíferos sería utilizar los datos contenidos en los informes de construcción de pozos tubulares. Las compañías de perforación de pozos deben estar obligadas a realizar la entrega obligatoria de esta información, así como la fecha de perforación, el nivel del terreno, el nivel estático y dinámico, y el flujo del pozo, así como su profundidad total.

En áreas con evidencia de extracciones intensas (por la densidad de pozos o por reportes de conflictos), una estrategia de monitoreo sería establecer la malla de puntos, dividirla en cuadrados de 500 m x 500 m o 250 m x 250 m y en cada uno de ellos evaluar sistemáticamente los decaimientos de los niveles potenciométricos a lo largo del tiempo (cada cinco años, por ejemplo) (Método MetQ). En las plazas donde hay una caída significativa de los niveles, la persona responsable del monitoreo podría seleccionar un pozo o incluso instalar otro pozo dedicado a la instalación de transductores de presión, y monitorear periódicamente el nivel potenciométrico en relación con el tiempo. El objetivo principal es optimizar los datos que no suelen ser utilizados por la agencia ambiental y permitir la extensión de las redes de monitoreo convencionales.

Box 30 – Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (Rimas)

*Daniele Tokunaga Genaro
Frederico Cláudio Peixinho
Maria Antonieta A. Mourão
João Alberto Oliveira Diniz*

La Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (Rimas) surgió de la necesidad de ampliar el conocimiento de los principales acuíferos en Brasil y el requisito, presente en varios instrumentos legales de los órganos de gestión estatales, de una herramienta de acción para subsidiar la gestión de los recursos de aguas subterráneas. Su propósito es registrar las variaciones naturales del nivel del agua para estimar la recarga, parámetros hidráulicos y cálculo del balance hídrico, además de monitorear la variación del nivel del agua en condiciones influenciadas por la intensa explotación y ocupación del suelo (MOURÃO; PEIXINHO, 2012). Rimas también ayuda en la identificación de variaciones en la calidad de las aguas subterráneas monitoreadas, ya que realiza análisis químicos y fisicoquímicos completos en la instalación del pozo y durante la operación de la red, a partir de la determinación *in situ* de parámetros considerados indicadores (pH, conductividad eléctrica y temperatura). En segundo lugar, monitorea los parámetros climatológicos (precipitaciones, humedad relativa y temperatura del aire) en los lugares donde se instalan los pozos de observación.

El monitoreo se realiza en todo el territorio nacional, cumpliendo con los siguientes criterios de priorización:

- pozos/piezómetros dedicados (exclusivamente) a la actividad de monitoreo;
- acuíferos sedimentarios libres (zona de recarga);
- la importancia socioeconómica del agua;

- el uso del agua para el abastecimiento público;
- aspectos de la vulnerabilidad natural y riesgos; y
- representatividad espacial del acuífero.

La Rimas es una red automática de registros horarios de niveles de agua. Su operación y mantenimiento se divide entre las ocho Superintendencias y tres Residencias Regionales del Servicio Geológico de Brasil (SGB-CPRM), que son responsables de tres a cinco itinerarios de operación y mantenimiento, a menudo reevaluados de acuerdo con las condiciones financieras, el personal operativo (colaboradores) y la inclusión de nuevos puntos de monitoreo. También dependiendo de la particularidad de cada itinerario, las visitas alternan entre dos y cuatro veces por pozo/itinerario.

Después de las visitas en las que se extraen los datos del nivel de agua (de los *dataloggers*), los equipos regresan a las oficinas, realizan la consistencia de los datos y su sintetización (mediana diaria). Posteriormente, los datos están disponibles en la página web de Rimas (<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/>), a través de la cual se puede visualizar la evolución del nivel del agua en gráficos analíticos y temporales, con posibilidad de *download*, según el periodo de interés.

La red de monitoreo cuenta con más de 400 pozos ubicados en 24 acuíferos, en su porción libre, además de algunas unidades confinadas y semi confinadas, coberturas sedimentarias indiferenciadas y acuíferos cristalinos. Además, cuenta con aproximadamente 100 plataformas para la recolección automática de datos de precipitación, temperatura y humedad relativa, específicos del proyecto, y está presente en 21 Unidades Federativas Brasileñas.

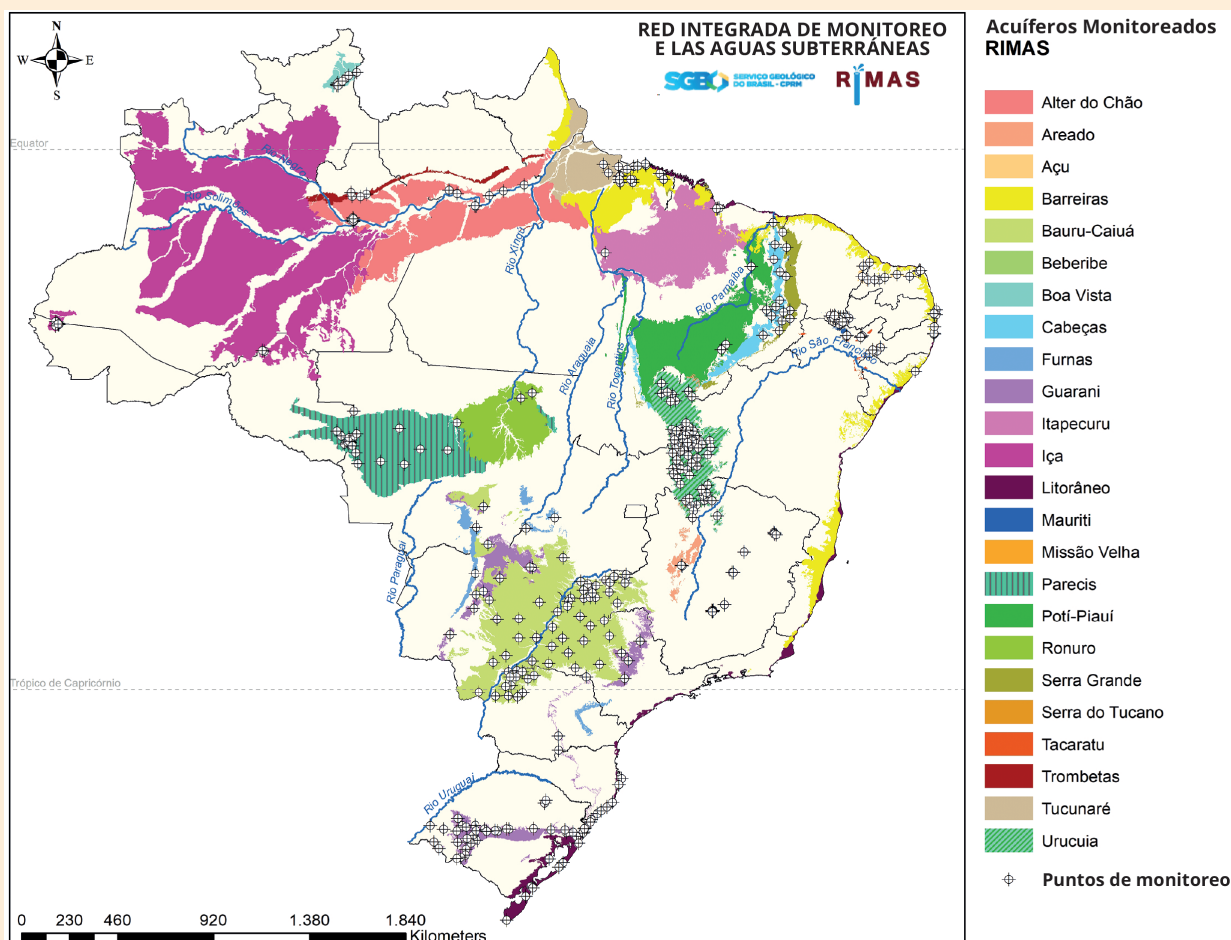


Figura 56 – Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (Rimas)

Fuente: SGB-CPRM (2021).

Parte de Rimas funciona de manera integrada con la Red Hidrometeorológica Nacional (RHN), en asociación con la Agencia Nacional de Agua y Saneamiento (ANA), en la zona del acuífero de Urucuia (al oeste de Bahía) y en las cuencas de los ríos Verde Grande y Carinhonha (frontera entre Bahía y Minas Gerais). Entre sus objetivos específicos, cabe destacar los siguientes:

- promover una evaluación confiable del estado cuantitativo de los cuerpos de agua subterránea, incluida la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico;
- establecer evaluaciones de las tendencias a largo plazo, tanto como resultado de los cambios en las condiciones naturales como derivadas de las actividades antropogénicas;
- definir el estado cualitativo de los cuerpos de agua;
- identificar tendencias significativas en la concentración de contaminantes y el aumento de la disminución del nivel del agua;
- evaluar la inversión de las tendencias en las condiciones cualitativas y/o cuantitativas tras la aplicación de las medidas de mitigación;
- establecer el grado de interacción entre las aguas subterráneas y las superficiales.

La continuidad y expansión de la vigilancia de las aguas subterráneas es esencial para ampliar los conocimientos sobre los acuíferos y evaluar la influencia ejercida por diversos factores, como el crecimiento demográfico, la explotación intensiva y el cambio climático. Esta información proporciona subsidios fundamentales para la planificación, implementación y evaluación de la efectividad de los procedimientos de gestión.

4.8 GALERÍA DE CASOS

4.8.1 La gestión de áreas complejas contaminadas por múltiples fuentes: el caso de la región del Distrito Industrial de Jurubatuba, São Paulo

Marcos B. Barbosa

Reginaldo A. Bertolo

El antiguo Distrito Industrial de Jurubatuba, ubicado en la ciudad de São Paulo, tiene varias propiedades que contienen fuentes de contaminación por compuestos organoclorados. La distribución geográfica de estas fuentes caracteriza a la región como un área contaminada extensa y compleja (ITRC, 2017). Este término se refiere a áreas en las que la recuperación ambiental es incierta y se espera que el logro de los objetivos ambientales se produzca dentro de plazos considerables, es decir, del orden de varias décadas. Las complejas áreas presentan numerosos desafíos técnicos y no técnicos que contribuyen a la existencia de incertidumbres en su recuperación ambiental.

En la región de Jurubatuba, los desafíos técnicos del manejo de áreas contaminadas son numerosos: ocurrencia de acuíferos fracturados; contaminación de los niveles de acuíferos profundos (hasta 300 m); variación de los niveles de aguas subterráneas debido al bombeo de pozos tubulares irregulares; existencia de contaminantes

densos en fase líquida no acuosa; condiciones complejas de degradación de estos contaminantes; existencia de múltiples fuentes de contaminación y plumas de contaminación extensas y combinadas; además de la existencia de receptores de contaminación.

Los desafíos no técnicos en Jurubatuba también son numerosos y causan gran incertidumbre sobre el éxito de su gestión ambiental. Entre los principales desafíos, se destacan los siguientes: *a)* múltiples responsables legales en litigio; *b)* dificultades para identificar a otros responsables legales; *c)* existencia de áreas contaminadas huérfanas; *d)* conflictos de entendimiento entre autoridades públicas sobre la gestión ambiental del área; *e)* judicialización de conflictos entre organismos públicos y contaminadores; *f)* gestión ambiental realizada individualmente (sin acciones coordinadas para comprender los desafíos técnicos a la escala adecuada); y *g)* falta de recursos financieros y una política que facilite el acceso a fondos de financiamiento para recuperar los impactos ambientales.

Paralelamente a los problemas de gestión ambiental, la existencia de estas áreas contaminadas también causó conflictos entre usuarios y propietarios de pozos tubulares, constituidos por las propias industrias, empresas comerciales y condominios. La contaminación del agua del acuífero por compuestos organoclorados llevó a la interdicción de decenas de

pozos tubulares privados en 2005, y al establecimiento, por parte de los cuerpos gestores, de una gran área de restricción del uso de aguas subterráneas (Figura 57). Esta Deliberación se encuentra en proceso de revisión general coordinada por la Cámara Técnica de Aguas Subterráneas (CTAS) del CCH del Alto Tietê (CCH-AT), y la propuesta principal es la flexibilidad del uso de aguas subterráneas para fines no potables después del tratamiento, aunque presente algún signo de contaminación de origen industrial. Se espera que esa medida contribuya a mitigar los efectos de la gran demanda de recursos hídricos en la región.

La gestión de problemas ambientales de esta naturaleza, en lugares de fuerte demanda de

recursos hídricos, es uno de los mayores desafíos de los organismos de gestión pública en Brasil y en el mundo. El avance de las tecnologías digitales e Internet representa un paso hacia la practicidad en la gestión de estos problemas, ya que el manejo de la información se puede hacer de una manera más fácil, ágil y exhaustiva. Sin embargo, la falta de un sistema integrado de datos y de personal capacitado es un problema que persiste en la gestión ambiental de esas zonas complejas. Todo el enfoque eficiente para hacer frente a estos casos hace uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG), ya que la información se asocia invariablemente con una ubicación en el espacio físico (LONGLEY *et al.*, 2005).

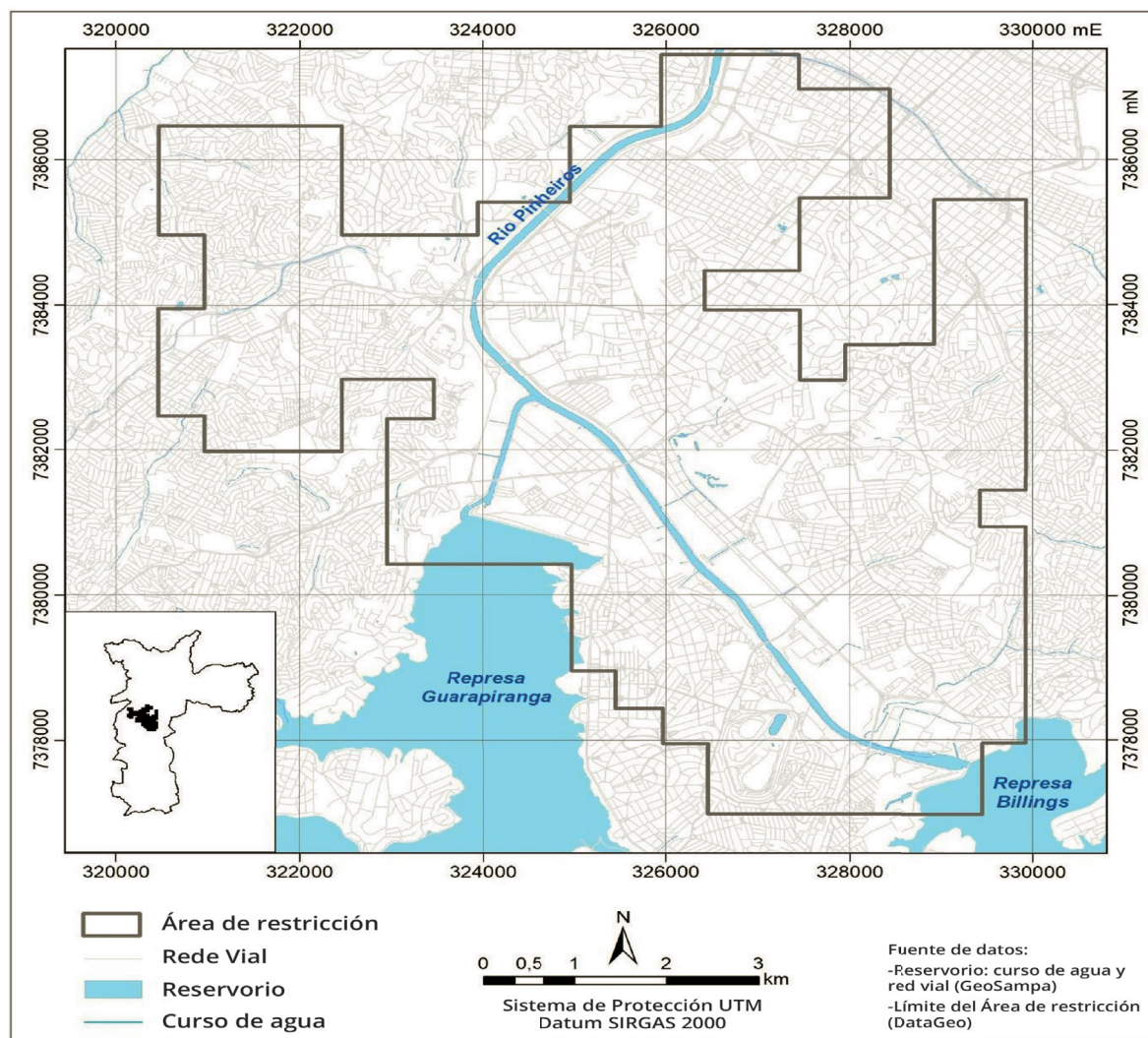


Figura 57 – Límites del Área de Restricción y Control (ARC) de abstracción y uso de aguas subterráneas en la región de Jurubatuba

Fuente: CCH-AT (2021).

En el caso de ARC DE Jurubatuba, se organizó una base de datos espacial para sistematizar toda la información disponible y relevante sobre áreas contaminadas y pozos tubulares (BARBOSA; BERTOLO; HIRATA, 2017). Esta integración permitió

gestionar una gran cantidad de datos que anteriormente estaban desconectados, lo que proporcionó nuevas interpretaciones a partir de la información existente, además de permitir una comprensión más amplia de la contaminación del área (Figura 58).

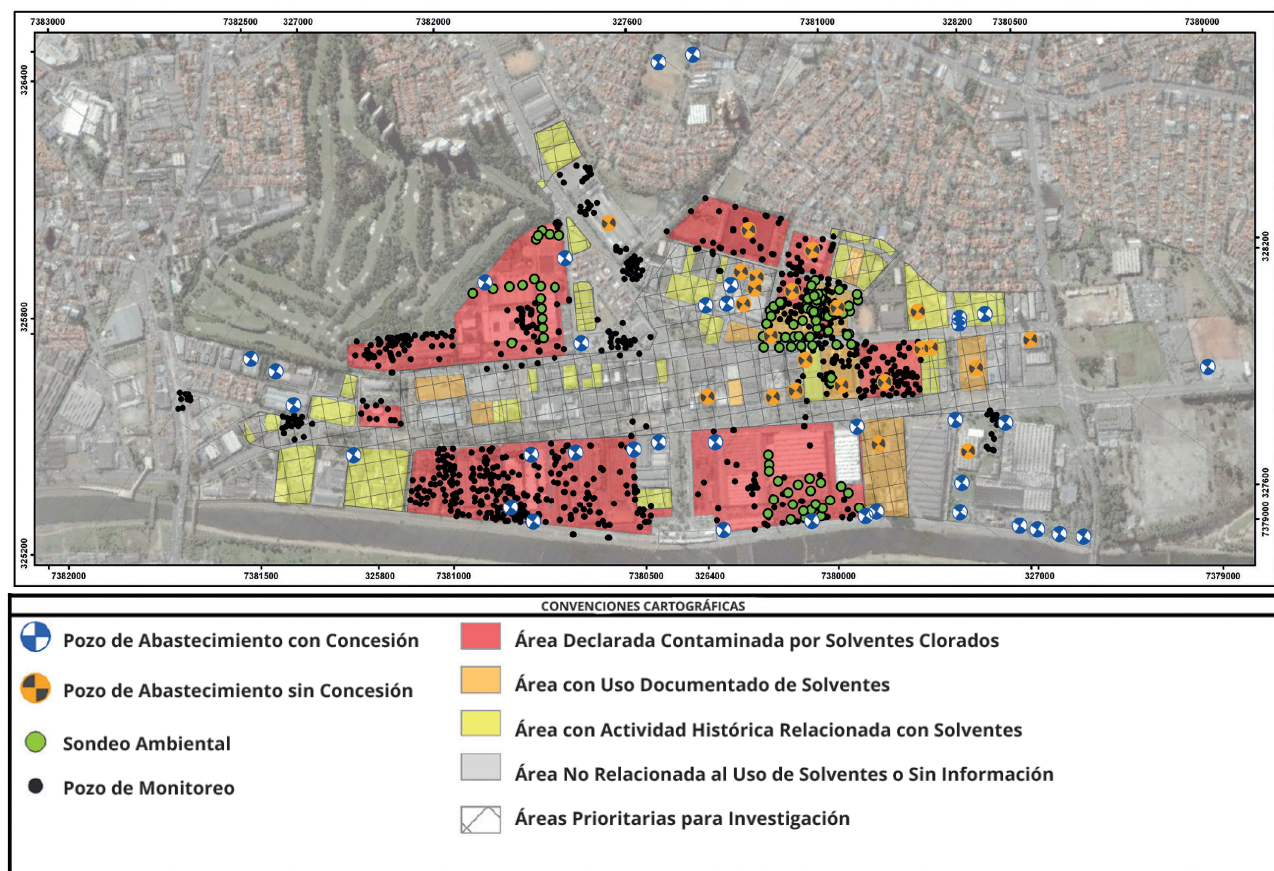


Figura 58 – Análisis y procesamiento de datos basados en el cruce de la información disponible en el SIG del Proyecto Jurubatuba, integrando datos de áreas contaminadas, sistema de gestión ambiental de la CETESB, registro de pozos tubulares y recolección de datos de campo

Fuente: Barbosa, Bertolo e Hirata (2017, p. 329).

Los principales resultados obtenidos en este trabajo fueron:

- 1) evidenciar aspectos críticos de los datos, tales como: distribución espacial y temporal; formato y cantidad; y confiabilidad;
- 2) indicar los ámbitos prioritarios que deben investigarse;
- 3) minimizar la inconsistencia de los datos de más de mil pozos de monitoreo y perforación, así como delimitar de manera confiable las principales unidades litológicas que ocurren en el área de estudio;
- 4) comprender la dinámica del flujo de aguas subterráneas a escala del Proyecto, lo que indica que el río Pinheiros es de hecho una zona de descarga de acuíferos poco profunda, y sugiere que la recarga del acuífero cristalino puede estar bajo la influencia de los embalses de Billings y Guarapiranga;
- 5) delimitar cinco lugares donde estaban presentes concentraciones de compuestos organoclorados, tanto en el acuífero sedimentario como en el acuífero fracturado (a través de los pozos tubulares profundos);

- 6) identificar sitios con altas concentraciones de compuestos organoclorados en el acuífero fracturado (en pozos tubulares), cercanos a áreas que han manejado estos compuestos en el pasado, sin que se hayan producido investigaciones hasta entonces.

La ausencia de una red de monitoreo de la calidad del agua con cobertura espacial y temporal dificulta el establecimiento de una estrategia de investigación compatible con la magnitud del problema en la ARC Jurubatuba. En este caso, una estrategia semi-regional o semi-local e integrada podría resultar en menos pozos, ubicados en puntos estratégicos, conformando una red de monitoreo más representativa de diferentes acuíferos, con mayor eficiencia y menor costo.

El enfoque de trabajo adoptado en ARC Jurubatuba, aunque estructurado para casos de contaminación de múltiples fuentes, puede aplicarse en el manejo de áreas contaminadas para todo el estado de São Paulo, facilitando el proceso de identificación de nuevas áreas complejas y adoptando estrategias de manejo ambiental más eficientes.

La sistematización e importación de datos son actividades complejas y laboriosas, cuya responsabilidad recae en la entidad que produce o contrata el servicio de recolección de datos. La gestión de la información, una vez integrada en la base de datos, debe ser responsabilidad del administrador del sistema (por ejemplo, el propio organismo medioambiental). Los datos pueden ser introducidos directamente en el SIG, validados por un gestor y evaluados por un técnico de la agencia ambiental. En la estructuración del SIG es posible crear reglas de validación con el fin de minimizar los errores asociados a este proceso. La Figura 59 presenta un modelo de gestión de la información que se puede desarrollar y aplicar al proceso de gestión de áreas contaminadas.

Uno de los pasos más laboriosos, que podría incorporarse al SIG, sería la entrada de datos de perforación y análisis químicos. En el caso de los laboratorios, ya cuentan con un sistema de base de datos en *Structured Query Language* (SQL), y su importación podría realizarse directamente, reduciendo en gran medida los volúmenes impresos y digitales enviados para su análisis por la agencia ambiental.

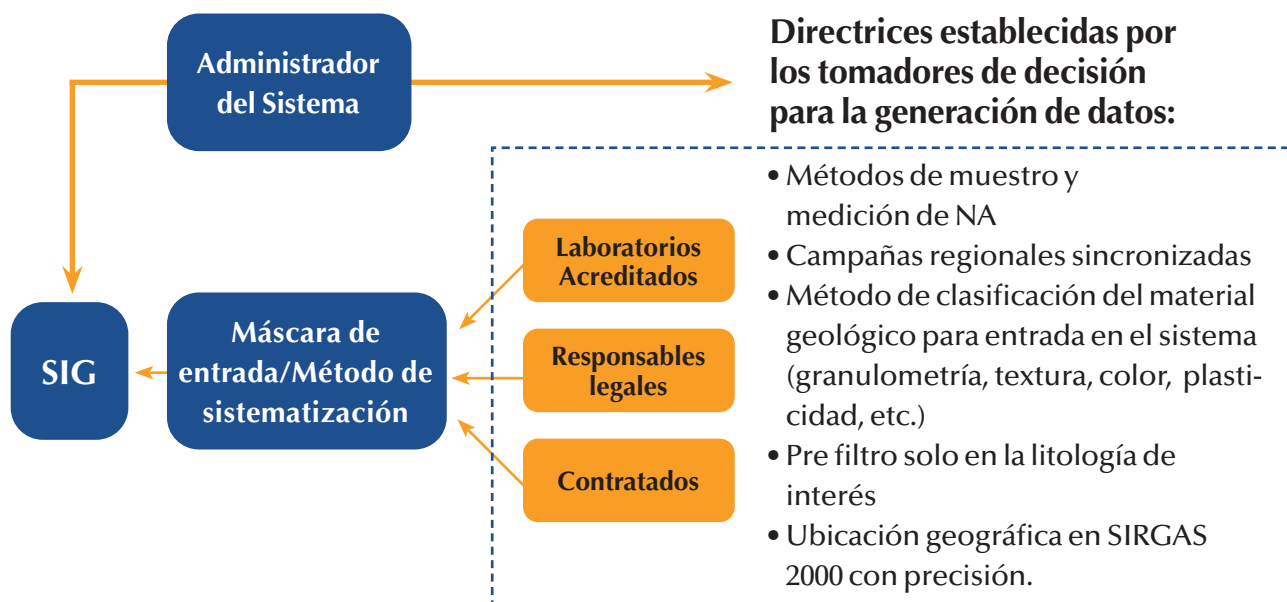


Figura 59 – Modelo de gestión de la información aplicado a la gestión de áreas críticas

Fuente: Barbosa, Bertolo e Hirata (2017, p. 335).

La adopción e implementación de un SIG representa un paso importante en la gestión integrada del problema ambiental y el uso de los recursos hídricos subterráneos en la región, cuya recuperación ambiental solo se logrará en las generaciones futuras debido a la complejidad de los desafíos. El SIG también contribuye a la adopción de decisiones con miras a un enfoque más eficaz de los problemas técnicos señalados, así como a la utilización racional de los recursos disponibles. También contribuye a resolver retos no técnicos, aportando mayor claridad en la comunicación entre las diferentes partes involucradas en los conflictos, responsables de resolver los problemas ambientales.

4.8.2 Gestión y recuperación del agua del acuífero de Santo Domingo, Comondú, Baja California del Sur, México

Zulema Guadalupe Lazos Ramírez

En el Valle de Santo Domingo, en Baja California Sur, México, la baja precipitación media anual de 170 mm/m² reduce la posibilidad de utilizar lluvia y agua superficial. La principal fuente de abastecimiento para los diferentes usos del agua (principalmente agrícola) es el acuífero de Santo Domingo (Figuras 60 y 61). Históricamente, la situación local plantea grandes desafíos para la gestión y manejo del agua, con el fin de asegurar el desarrollo de esta cuenca y el fortalecimiento de su economía, considerando el crecimiento poblacional (Tabla 1).

Municipio	Localidad	1990	2000	2010	2020
Comondú	Ciudad de Constitución	34,692	35,589	40,935	43,805
	Ciudad de Insurgentes	8,463	7,654	8,741	9,133

Tabla 1 – Población de las principales localidades del Valle de Santo Domingo

Fuente: INEGI (1990, 2000, 2010 y 2020).



Figura 60 – Ubicación del Acuífero de Santo Domingo, Baja California del Sur, México

Fuente: Conagua (2020).

El 2 de julio de 1954, el Decreto Presidencial estableció el Distrito Nacional de Riego de Baja California Sur, formado por un área delimitada en la que se encuentra la zona de riego abastecida por el agua extraída del Acuífero Santo Domingo. La acción contribuyó al desarrollo agrícola, dando como resultado el crecimiento económico y demográfico de la comunidad. Sin embargo, con el tiempo, sin embargo, *surgieron* problemas debido a la mala gestión y la falta de control sobre el uso de las aguas subterráneas. La extracción de agua excedió la recarga del acuífero, cuyos niveles de agua resultaron en una caída de tres a 15 metros por año.

Teniendo en cuenta que el Acuífero de Santo Domingo es de tipo costero, se produjo la migración de la cuña de sal, lo que aumentó significativamente la salinidad de las aguas subterráneas. Algunos pozos han alcanzado niveles de mineralización de 3.000 ppm, lo que hace que la calidad del agua sea inadecuada para el consumo humano y el uso agrícola. La consecuencia de esta extracción exacerbada fue el desequilibrio del ecosistema, que se reflejó en el aumento de la salinidad, afectando la cantidad y calidad del agua del acuífero para su uso en actividades agrícolas, que son la base de la economía del Valle de Santo Domingo.

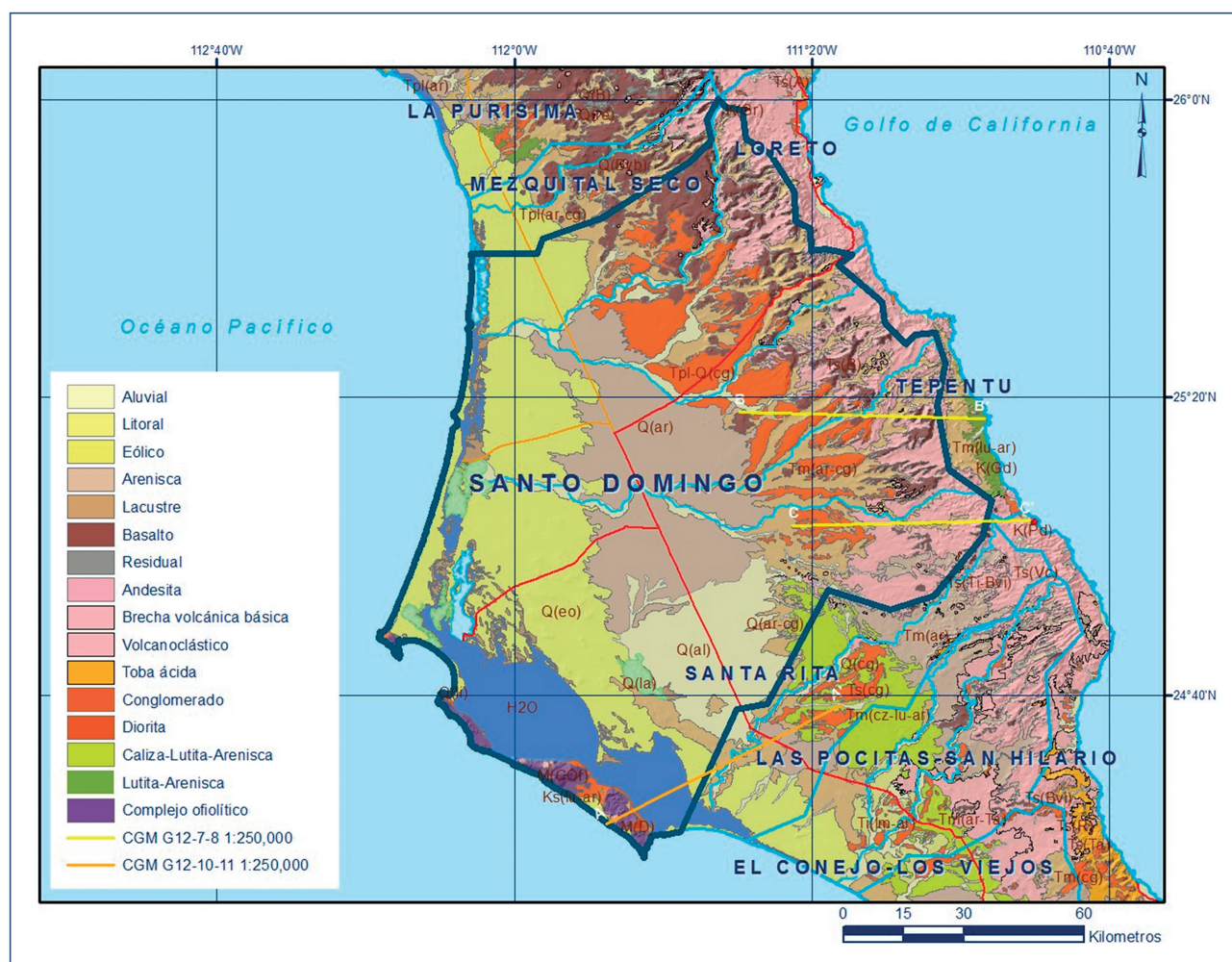


Figura 61 – Geología del Acuífero de Santo Domingo

Fuente: Conagua (2020).

Debido a esta situación, el 14 de agosto de 1992 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el “*Reglamento para el uso, explotación y aprovechamiento de las aguas subterráneas en la zona conocida como Vale de Santo Domingo, municipio de Comondú, en el Estado de Baja California del Sur, y que establece la respectiva reserva de agua potable*”⁷. A partir de ese año, la Autoridad del Agua en México contó con la participación de los Organismos y Asociaciones de Usuarios del Acuífero, para que pudieran proponer soluciones relacionadas con el problema del agua, así como comprometerse a promover la gestión eficiente del agua y la protección del acuífero.

Santo Domingo fue el primer acuífero en ser regulado en el país, permitiendo la reducción de los volúmenes extraídos, pero solo alcanzó el volumen necesario para la estabilización del ecosistema en 2004, cuando las extracciones se estabilizaron. Sin embargo, la reducción del nivel piezométrico del acuífero siguió profundizándose en la parte central. Con base en este hallazgo, en el año 2010, debido a los impactos observados en el acuífero, la dependencia hídrica y la responsabilidad comunitaria en la gestión del agua, llevaron a cabo el Proyecto de Recuperación del Acuífero Valle Santo Domingo con la participación de la sociedad, con el objetivo de reducir los niveles de reducción a través de acciones de monitoreo y medición de la cantidad y calidad del agua (CONAGUA, 2010).

Con la participación de diferentes instituciones de los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal) y, principalmente, de los usuarios de las aguas nacionales,

pertenecientes principalmente al sector agrícola, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) organizó mesas de trabajo con el objetivo de definir un programa que integre tanto a los actores responsables del proceso de toma de decisiones, como a quienes realizan acciones en beneficio del acuífero, con el fin de dar visibilidad a la situación del agua y, a partir de ahí, establecer soluciones.

La organización de las mesas de trabajo permitió el desarrollo de una matriz de planificación operativa, así como la construcción, de manera participativa, de una estructura de ejecución de proyectos, con actores comprometidos a continuar la ejecución, monitoreo e inspección de los acuerdos suscritos para la recuperación del acuífero. El resultado de estas acciones se formalizó en un documento (CONAGUA, 2010).

Los datos más representativos de los efectos positivos de la participación ciudadana se revelan en el mantenimiento de los volúmenes anuales de extracción de agua del acuífero, de los cuales cerca del 94% se refieren al uso agrícola, que consume el equivalente a 165,12 millones de m³ de agua. La Figura 62 muestra la estabilización de las extracciones anuales de volúmenes de agua para la agricultura. La recuperación del acuífero aún no se ha logrado, sin embargo, ya está en camino, gracias al apoyo de diferentes acciones que deben implementarse, tales como: preparación de estudios y proyectos, promoción de la capacitación de productores para el conocimiento de las normas y cultura del agua, expansión de macro y micro mediciones de extracciones de agua, manejo de recursos hídricos, etc.

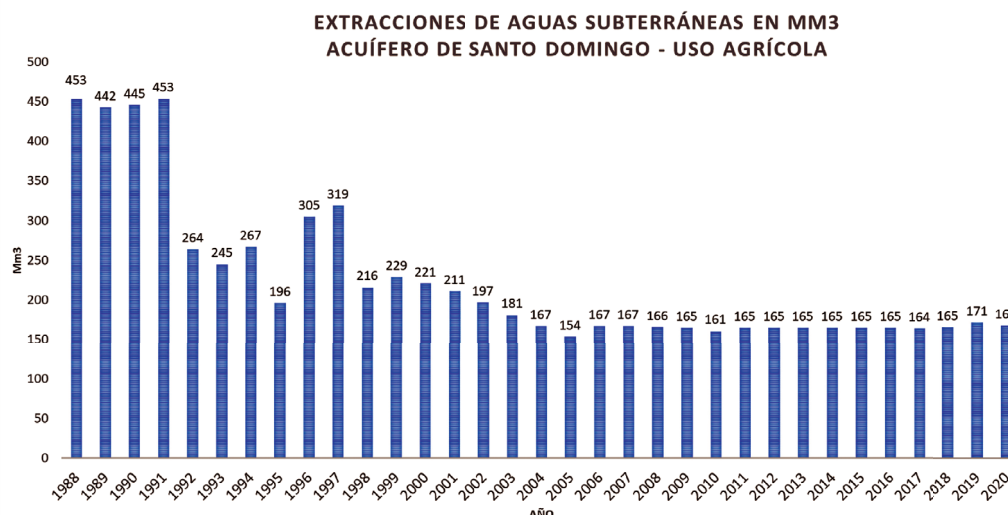


Figura 62 – Extracciones de aguas subterráneas en Mm3 en el Acuífero de Santo Domingo (uso agrícola)

Fuente: Conagua (2020).

7. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4682007&fecha=14/08/1992.

En el “*Proyecto Emblemático para la Recuperación del Acuífero del Valle de Santo Domingo, Ciudad Constitucional, Baja California Sur*”, la población del Valle de Santo Domingo es un ejemplo de compromiso y participación en la promoción del desarrollo económico, ambiental y social, ya que la comunidad participa, se involucra, decide, verifica el cumplimiento de los objetivos propuestos y se compromete con programas dirigidos a la eficiencia del uso del agua, ya sea para fines agrícolas o para actividades domésticas.

El 17 de septiembre de 2020, Conagua emitió, a través del Diario Oficial de la Federación, el Acuerdo en el que actualiza la disponibilidad promedio anual de agua subterránea de los 653 acuíferos en los Estados Unidos Mexicanos. En este escenario, el Acuífero Santo Domingo tiene un volumen de extracción de aguas subterráneas de 176.771 m³ por año, mientras que la recarga del acuífero es de 146,4 Mm³ por año. Por lo tanto, es necesario seguir las acciones de recuperación e integrar nuevas medidas para alcanzar los objetivos propuestos de manera más eficaz y rápida.

La recuperación del Acuífero de Santo Domingo es un proceso complejo y, debido a la participación de la comunidad, sabe y entiende que este trabajo tomará muchos años en lograrse, principalmente debido a las condiciones geológicas del acuífero, su capacidad de recarga, las condiciones atmosféricas y las actividades humanas en el Valle de Santo Domingo. Sin embargo, aunque el proceso de recuperación requiere tiempo y el desarrollo continuo de acciones, el compromiso de la comunidad contribuye al cuidado y uso eficiente del agua en la región. El éxito de esta experiencia está directamente relacionado con la participación de la comunidad, que está comprometida con las acciones necesarias para lograr la sostenibilidad del uso de los recursos hídricos.

4.8.3 Comunidades de Aguas Subterráneas (CAS) en Chile

Ovidio Alejandro Melo Jara
Jose Luis Arumi

El modelo chileno

Chile cuenta con un modelo especial para la gestión de sus recursos hídricos, caracterizado por otorgar los Derechos de Uso del Agua (DAA) a las personas de manera gratuita, perpetua y sin instrumentos de caducidad o revocación que protejan el interés público. Sin embargo, la única mención que hace la Constitución Política en relación con las aguas continentales es garantizar la propiedad privada de estos derechos.

El Estado, por tanto, no se ve obligado a velar por el bien común. Por el contrario, ofrece al mercado libertad y flexibilidad para hacer frente a los conflictos generados por el mantenimiento de un sistema, que puede ser desigual y ecológicamente irresponsable, cuyo propósito es lograr la optimización económica resultante de esta libertad de transacción y la seguridad jurídica generada por el modelo.

Una vez otorgados estos DAA, las competencias asignadas al Estado en relación con la gestión de los recursos hídricos se reducen considerablemente, dejando al mercado (la transferencia) y a los individuos las principales funciones relacionadas con la gestión de los usos. En este sentido, las personas titulares de DAA constituyen las denominadas Organizaciones de Usuarios de Agua (OUA), que son entidades reguladas por el Código de Aguas, dotadas de personalidad jurídica, cuyo objetivo es capturar las aguas del flujo matricial, dividir las entre los titulares de derechos, construir, explorar, conservar y mejorar las obras de abstracción, acueductos y demás que sean necesarias para su uso. En el caso de los cursos de agua naturales, las OUA se configuran como una Junta de Vigilancia, mientras que en los canales artificiales se organizan comunidades de aguas y asociaciones de canales.

En el caso de las aguas subterráneas, mediante acto de autoridad pública, sustanciado y materializado mediante Resolución de la Dirección General de Aguas (DGA), se declara como zona de restricción o zona de prohibición de extracción un determinado Sector Hidrológico de Uso Común (SHAC), lo que da lugar a la formación de una Comunidad de Aguas Subterráneas (CAS) para el SHAC en cuestión.

Este modelo asume que existen OUA funcionales y empoderadas en el cumplimiento de su función, y que constituyen interlocutores válidos ante las instituciones y actores sociales relevantes en cada uno de los territorios bajo su jurisdicción. La existencia misma de estas organizaciones, sin embargo, no está garantizada, ya que solo el 40% de las cuencas hidrográficas del país cuentan con alguna Junta de Vigilancia para el manejo de sus aguas. Además, menos del 10% de los SHACs se declararon como áreas restringidas o zonas prohibidas, organizadas como CAS (SCHNEIDER; RIBERA, 2021).

Es en este contexto que, durante las últimas décadas, el Estado, a través de la Comisión Nacional de Riego, ha desarrollado programas para fortalecer a las OUA en gran parte del territorio nacional, aumentando el número de estas organizaciones, fortaleciendo su estructura organizativa y dinámica, mejorando su

participación y, por lo tanto, contribuyendo a la gestión del agua. Asimismo, la DGA creó el Departamento de Organizaciones de Usuarios, que ha contribuido considerablemente a este fortalecimiento. Sin embargo, las brechas en este modelo son el principal desafío en relación con la gobernanza del agua en el país.

La falta de interés de los usuarios en formar parte de una CAS

Según la Universidad de Concepción (2019), es común observar que en los cursos de aguas superficiales siempre hay interesados en constituir la respectiva OUA. En el caso de las aguas subterráneas, sin embargo, existe una considerable falta de interés de las partes en llevar a cabo esta acción, lo que puede explicarse por la ausencia de incentivos. En el caso de las aguas superficiales, siempre hay usuarios que necesitan a la Organización, especialmente aquellas ubicadas aguas abajo de los cursos de agua, que notan un impacto negativo producido por aquellos ubicados aguas arriba. Además, el simple hecho de compartir un curso de agua genera numerosas necesidades organizativas, tales como: limpieza, mantenimiento de infraestructura, mejora de obras comunes, distribución de agua y financiamiento de acciones, entre muchas otras.

Una CAS surge de la obligación legal de proteger el bien común y los ecosistemas relevantes para las generaciones futuras, y no de las necesidades de los individuos. A pesar de ello, no es fácil encontrar los elementos catalizadores que motivan la creación de estas organizaciones -como con las aguas superficiales- por lo que el interés en crearlas prácticamente no existe.

Por lo tanto, no es sorprendente que de los más de 170 SHAC declarados como Área de Restricción o Zona de Prohibición de Extracción a escala nacional, solo 14 se hayan organizado como CAS. Sólo después del inicio de los procedimientos judiciales para la constitución de una CAN y cuando su conformación se hace inevitable es el interés de algunos usuarios con un mayor nivel de información que principalmente pretenden ocupar los espacios de poder (dirección) y aprobar los estatutos pertinentes. La legislación vigente busca eludir esta falta de interés en organizarse, ya que basta con que una persona solicite al juez competente que forme una organización y ésta se materialice. Además, en caso de ausencia de los solicitantes, DGA puede hacer dicha solicitud.

En consecuencia, dado el interés público que supone la organización de una CAS, parece lógico que el Estado continúe brindando los instrumentos necesarios

para materializar su organización en SHAC declarada como Área de Restricción o Zona de Prohibición de Extracción, a pesar del desinterés de los usuarios al respecto. Además, debe promover cambios en la legislación que generen incentivos para la organización de CAS, como, por ejemplo, algún tipo de requisito para llevar a cabo procedimientos de interés, como el traslado de los puntos de captura por parte de los usuarios.

Por último, como en el proceso de adopción de decisiones en la OUA sólo participan los miembros que tienen DAA, se plantea el desafío de incluir a otros actores sociales pertinentes del territorio que representan intereses diferentes, como el de las generaciones futuras, los ecosistemas y la sociedad en su conjunto.

La gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas

Según Melo (2019), en 2005 se modificó el Código del Agua de 1981 para incluir la gestión de los acuíferos en la administración de las OUA. En primer lugar, el art. 186 estableció que el origen de una OUA también puede ser el acuífero. Además, en el art. 263 definió que las Juntas de Vigilancia (JV) están formadas por aquellos que aprovechan la superficie o aguas subterráneas de la misma cuenca hidrográfica. A su vez, en el art. 266, el Código establece que la finalidad de la JV es administrar las aguas a las que tienen derecho sus miembros, a partir de fuentes naturales. Ya el art. 22 determinó que, para constituir los DAA, la autoridad debe considerar la “relación entre las aguas superficiales y subterráneas”.

Esta legislación ha permitido la aparición de un modelo de gestión en el que las JV no solo gestionan las aguas superficiales, sino también, conjuntamente, las subterráneas. Sin embargo, la forma de materializar esta integración no estaba regulada en ninguno de los aspectos fundamentales de la gestión llevada a cabo por la OUA. Por ejemplo, la incorporación de las aguas subterráneas a la JV se realiza de forma individual o a través de CAS organizadas, a través de la regulación de la participación corporativa o la equivalencia de los derechos de las aguas subterráneas en relación con las superficiales o incluso cuáles son los aspectos esenciales para la toma de decisiones, y cómo se produce el financiamiento dentro de la organización.

En consecuencia, solo más de 10 años después de la promulgación del Reglamento surgieron las primeras acciones dirigidas a materializar una gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas, todas ellas experiencias muy incipientes, lo que permite un pequeño avance, pero sin alcanzar un mínimo desarrollo organizativo.

4.8.4 El Acuífero de Ginebra (Suiza-Francia): un éxito en la cooperación transfronteriza a nivel local

Gabriel de los Cobos

El lago Lemán y el acuífero de Ginebra (Suiza-Francia) suministran agua potable a casi 700.000 habitantes de la región franco-genovesa, compartidos por el Cantón de Ginebra (Suiza) y el Departamento de Alta Saboya

(Francia), y explotados conjuntamente a través de 10 pozos en Suiza y cuatro en Francia (situación en 2017). El acuífero de Ginebra se extiende durante 19 km de longitud, entre el lago Lemán y el extremo occidental del cantón y parte del territorio francés de la Alta Saboya (Figura 63). Su anchura varía entre 1 y 3,5 km, y el espesor de la grava saturada alcanza los 50 m (Figuras 64 y 65). El nivel medio del agua es de entre 15 y 80 metros de profundidad, dependiendo de las condiciones topográficas.



Figura 63 – Ubicación del Acuífero de Ginebra

Fuente: Service de géologie, sols et déchets (s.d.).

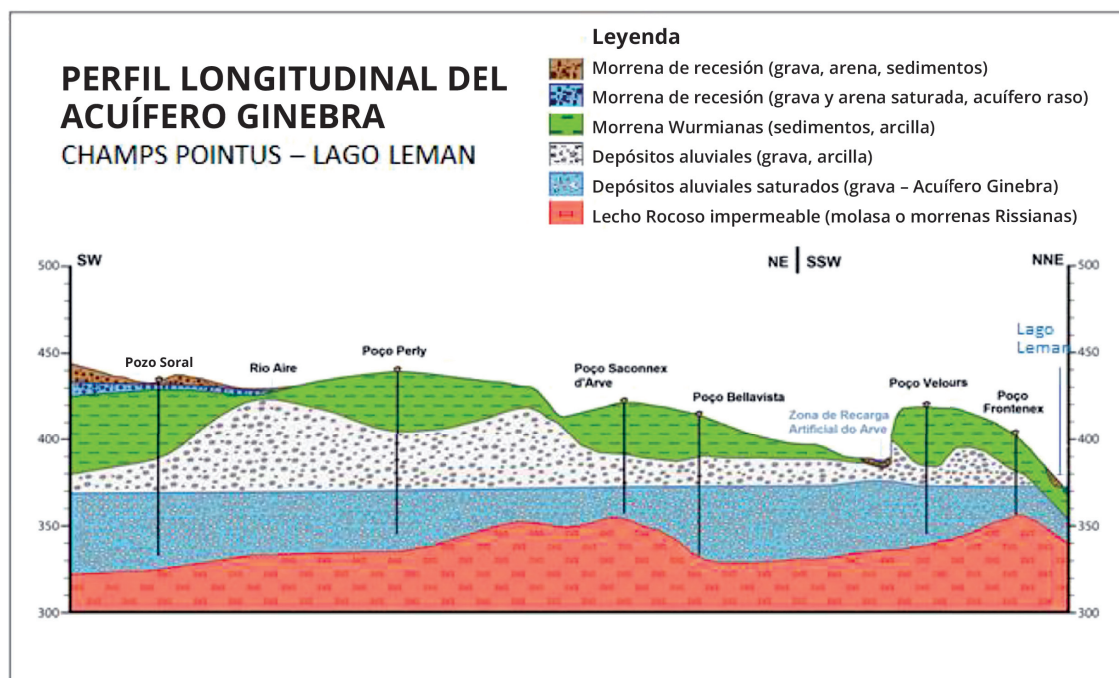


Figura 64 – Perfil longitudinal del Acuífero de Ginebra

Fuente: Service de géologie, sols et déchets (s.d.).

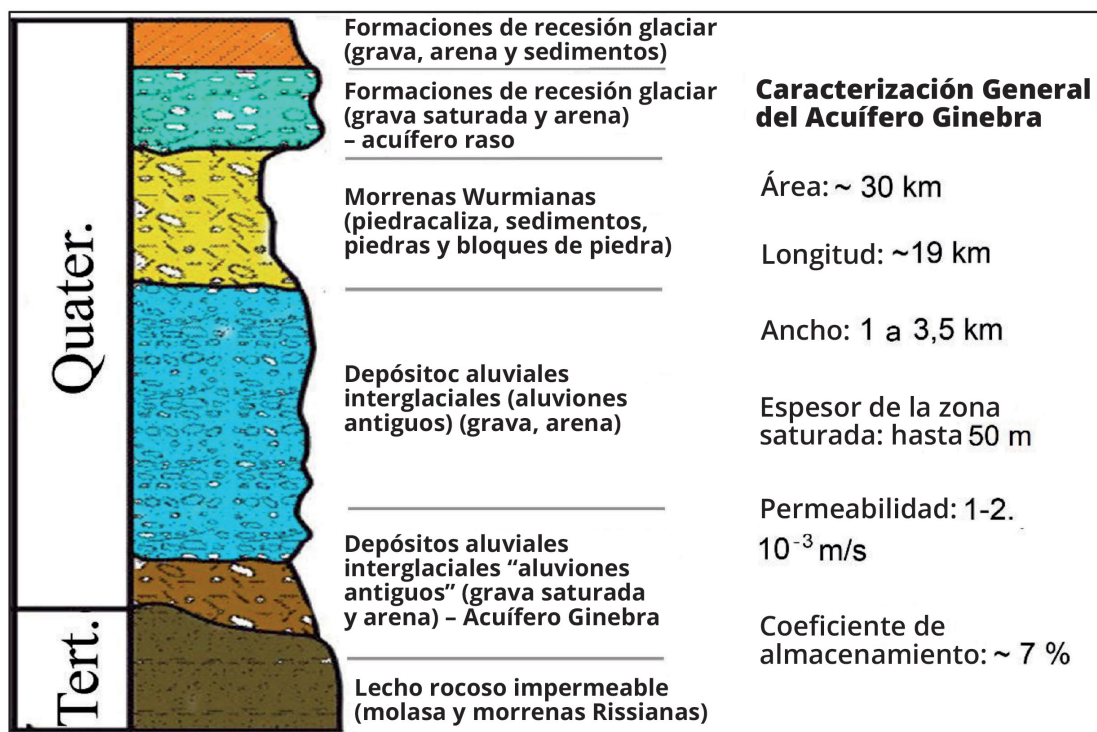


Figura 65 – Sección litoestratigráfica de las unidades componentes del Acuífero de Ginebra

Fuente: Service de géologie, sols et déchets (s.d.).

Entre 1940 y 1960, la extracción de agua subterránea del Acuífero de Ginebra estuvo muy cerca del flujo medio explotable ($7,5 \text{ mm}^3/\text{año}$). Se observa una lenta tendencia a la baja en los niveles de las aguas subterráneas, sin que haya indicios de una amenaza grave. Entre 1960 y 1980, sin embargo, el acuífero fue sobreexplotado, con extracciones que alcanzaron, en 1971, 14 Mm^3 por año, casi el doble de las cantidades disponibles. El nivel medio del agua del acuífero ha caído de 6 a 7 m en 20 años, con el uso de alrededor de un tercio de las reservas totales.

La gestión hidráulica resultó urgente, con dos opciones: a) la reducción de la retirada, explotando otro recurso, lo que requeriría la construcción de una nueva estación de filtración y tratamiento de agua en el lago; o b) el fortalecimiento de la capacidad natural del acuífero a través de la recarga artificial. La elección no fue fácil: por un lado, había una técnica bien conocida (estación de filtración en el lago); por otro, la recarga artificial, rodeada de incertidumbres en la ecuación de equilibrio. La recarga artificial se eligió en base a dos criterios: a) criterios de seguridad del suministro (diversificación de recursos); y b) criterio económico (el alto costo de construcción y la implementación de una nueva estación de filtración).

Paralelamente a la preparación de los estudios y pruebas en la estación experimental, surgió la voluntad política de desarrollar el proyecto conjuntamente entre las fronteras, aunque aproximadamente el 90% de la superficie del acuífero se encuentra en el territorio del Cantón de Ginebra, y solo el 10% restante se encuentra en el territorio francés. Se celebraron varias reuniones y debates en el marco de los estudios técnicos y la preparación de un proyecto con el fin de obtener:

- restricciones operativas mientras el acuífero, que debía agotarse, no se recargara artificialmente;
- distribución equitativa de los costes de construcción que, una vez terminados y operativos, beneficiarían a los operadores situados a ambos lados de la frontera.

Desde las primeras reuniones francosuizas en 1972, el agotamiento de las aguas subterráneas en el acuífero de Ginebra fue evidente, ya que el nivel del agua disminuyó regularmente. El problema afecta no sólo a la región de Ginebra, sino también a la parte francesa. Entre 1973 y 1974, las actividades se centraron en el inventario de los recursos de agua potable en la región, así como en aspectos hidrogeológicos, como pérdidas,

recarga natural, bombeo futuro (y aplicación de las tasas correspondientes). Todo el conjunto de cuestiones que deberían considerarse en ese momento se abordó con el fin de sentar las bases para un posible acuerdo franco-suizo.

En 1975, la parte francesa declaró su intención de abandonar la explotación de los recursos hídricos subterráneos y de utilizar otros recursos hídricos situados en territorio francés. Sin embargo, expresó el deseo de mantener la posibilidad de una participación posterior en la recarga y los beneficios conexos. En 1977, se evaluaron los beneficios de la recarga artificial para todos los usuarios. Por último, el 19 de junio de 1978 se firmó un Acuerdo entre el Cantón de Ginebra (Suiza) y la Región de Alta Saboya (Francia), válido por un período de 30 años.

Acuerdo de 1978 entre el Estado de Ginebra y la región de Alta Saboya

El acuerdo entre el Consejo de Estado de la República del Cantón de Ginebra y el Alcalde de la Alta Saboya estuvo motivado principalmente por la “necesidad de establecer una explotación coordinada del acuífero de Ginebra a fin de salvaguardar este recurso natural y preservar la calidad de sus aguas”. Este acuerdo abarcaba los siguientes aspectos:

- el programa anual de manejo del acuífero, es decir, los flujos reservados para cada usuario, de acuerdo con la disponibilidad y reservas del acuífero, y las necesidades de cada uno, teniendo en cuenta las disposiciones emitidas;
- una lista de instalaciones para la recarga artificial;
- los derechos de agua de cada usuario;
- el precio del agua (calculado sobre la base de los costos de construcción de la estación).

Se esperaba que los costos de recarga (depreciación, intereses, renovación y gastos de funcionamiento del equipo) se imputaran a todas las captaciones, independientemente de la fuente de agua (recarga natural o artificial). Sin embargo, la parte francesa obtuvo un bombeo máximo de 5 millones de m^3 , con una concesión anual de 2 millones de m^3 . Por encima de esta cuota, el precio de m^3 se calcularía de acuerdo con una ecuación establecida de acuerdo con varios parámetros, como los costos de bombeo y operación.

Se creó una comisión franco-suiza para la explotación de las aguas subterráneas, que debería examinar periódicamente la situación del recurso, de

conformidad con el bombeo y la recarga artificial. Este comité estaría integrado por representantes nombrados por el Consejo de Estado de Suiza y el subprefecto de distrito (*sous-préfet*) de la parte francesa. Además de los aspectos relacionados con el programa anual de recarga artificial, el presupuesto, los proyectos de reparación y mantenimiento, la Comisión debe dar aviso previo de todos los asuntos que se le presenten en el contexto de la gestión y protección del acuífero de Ginebra.

La renovación del Convenio de 1978: el Convenio de 2008

Entre 2007 y 2008, la Comisión responsable de la explotación de las aguas subterráneas en el acuífero de Ginebra creó un grupo de trabajo francosuizo para elaborar un documento básico sobre la gestión de los

recursos de aguas subterráneas en los próximos 30 años. La asistencia jurídica se incluyó como medio de garantizar que las características técnicas aceptadas por las partes se enmarcaran en un contexto político y administrativo reconocido a nivel mundial.

Los primeros pasos consistieron en aplicar el marco jurídico transfronterizo en el que debe basarse el nuevo Acuerdo. De hecho, el Acuerdo de 1978 no tenía fundamento en instrumentos jurídicos para la cooperación transfronteriza por la sencilla razón de que no existían en ese momento. Desde 1980 han surgido numerosos instrumentos que han sido ratificados tanto por Suiza como por Francia. La Figura 66 contiene los principales instrumentos jurídicos relacionados con la promoción de la cooperación internacional, que sirvieron de apoyo a la Convención de 2008.

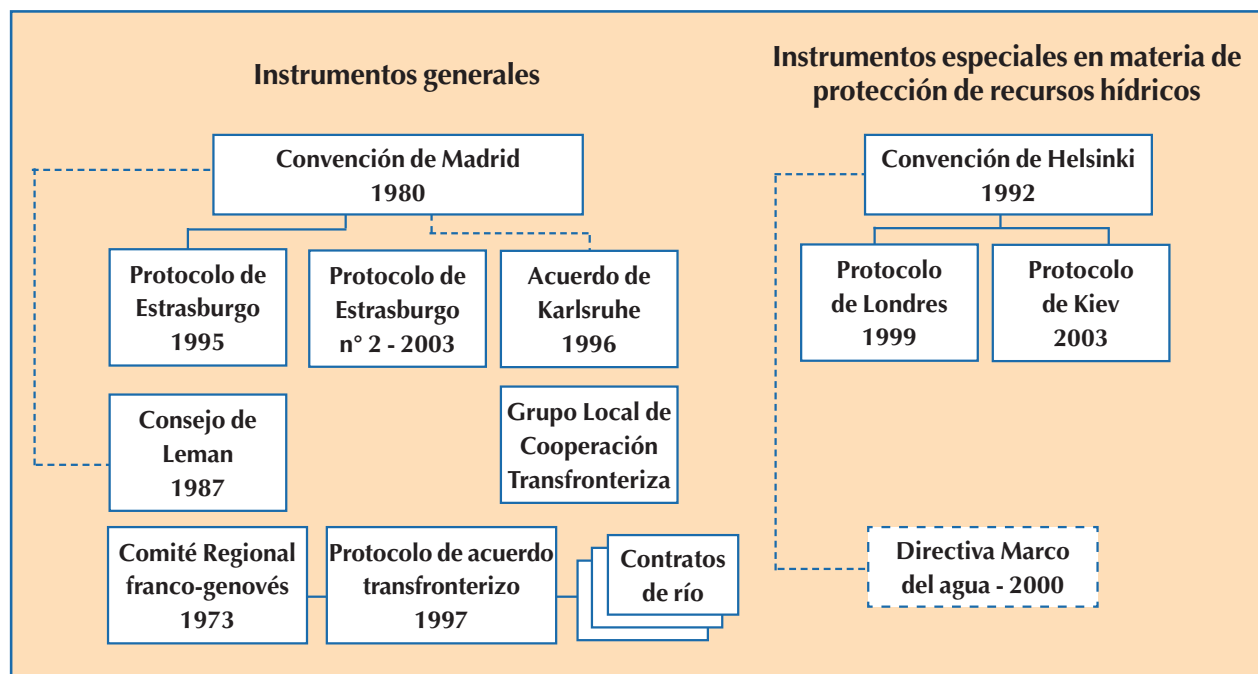


Figura 66 – Instrumentos jurídicos relacionados con la promoción de la cooperación internacional para el Acuífero de Ginebra

Fuente: elaborado por Gabriel de los Cobos.

Basado en el Acuerdo de Karlsruhe, específicamente con respecto a la posibilidad prevista en su art. 5°, que permite la delegación de una misión en una de las autoridades locales, fue posible llegar a un acuerdo entre el Cantón de Ginebra y las tres autoridades francesas implicadas (*Annemasse Agglo*, *Community of Communes du Genevois* e *Commune de Viry*).

Al igual que en el Convenio de 1978, esta Convención se estableció con el objetivo común de garantizar la sostenibilidad del acuífero de Ginebra y garantizar así, en la medida de lo posible, la capacidad de captación de agua necesaria para garantizar el suministro de agua potable a las poblaciones. Se han definido las disposiciones administrativas, jurídicas, técnicas y financieras necesarias

para la correcta ejecución de esta tarea. Este Acuerdo sustituyó al Convenio de 1978 y entró en vigor el 1 de enero de 2008, con una duración de 30 años.

Evaluación de 40 años de gestión compartida

El Acuerdo para la gestión del Acuífero de Ginebra es uno de los pocos ejemplos existentes de un instrumento jurídico dedicado a un acuífero transfronterizo a nivel local, es decir, entre comunidades pertenecientes a Francia y el Cantón suizo. Por lo tanto, es el resultado de lo que puede considerarse la validación jurídica de un enfoque pragmático. Desde una perspectiva política transfronteriza, la gestión satisfactoria del acuífero de Ginebra constituye la base para el establecimiento de una comunidad acuífera transfronteriza, formalizada mediante la firma de un memorando de entendimiento para la cooperación en materia de aguas transfronterizas el 12 de diciembre de 2012.

REFERENCIAS

- ABIDIN, H. Z.; FUKUDA, Y.; ANDREAS, H.; POHAN, Y. E.; GUMILAR, I.; DEGUCHI, T. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, v. 59, n. 3, 2011, pp. 1753-1771. doi:10.1007/s11069-011-9866-9.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J. **Drastic**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. United States Environmental Protection Agency, 1987 (EPA/600/2-85/018).
- ALMEIDA, L. **Estudo da aplicabilidade de técnicas de recarga artificial de aquíferos para a sustentabilidade das águas termais da região de Caldas Novas, GO**. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB). Brasília, 2011. 153p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **A água no cenário da cooperação técnica internacional**. ABC/ANA, 2017. Disponible en: <http://www.abc.gov.br/impressa/mostrarconteudo/726>.
- ARNSTEIN, S. R. A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of Planners*, v. 35, n. 4, 1969, pp. 216-224.
- 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. **Avaliação dos mecanismos de recarga natural e estabilidade hidroquímica em aquíferos rasos, sul do estado do Tocantins**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências. Universidade de Brasília (UnB). Brasília, 2012. 83p.
- BARBOSA, M.; BERTOLO, R.; HIRATA, R. A method for environmental data management applied to megasites in the state of Sao Paulo, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 9, n. 3, 2017, pp. 322-338.
- BARNES, M.; FLEMING, D. Filtration-gallery irrigation in the Spanish New World. *Latin American Antiquity*, v. 2, n. 1, mar./1991, pp. 48-68.
- BARTHEL, R.; FOSTER, S.; VILLHOLTH, K. G. Interdisciplinary and participatory approaches: the key to effective groundwater management. *Hydrogeology Journal*, v. 25, n. 7, 2017, pp. 1923-1926. doi:10.1007/s10040-017-1616-y.
- BERNSTEIN, S. The United Nations and the Governance of Sustainable Development Goals. In: KARNIE, N.; BIERMANN, F. **Governing Through Goals: Sustainable Development Goals as Governance Innovation**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2017, pp. 213-240.
- BHADURI, A. et al. Achieving sustainable development goals from a water perspective. *Frontiers in Environmental Science*, v. 4, n. 64, 2016.
- BORGHETTI, N.; BORGHETTI, J. R.; ROSA, E. F. F. **A integração das águas: revelando o verdadeiro Aquífero Guarani**. Curitiba: Edição da Autora, 2011.
- CADAMURO, A. L. M. **Proposta, avaliação e aplicabilidade de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados para condomínios residenciais do Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2002. 130p.
- CADAMURO, A. L. M.; CAMPOS, J. E. G. Recarga artificial de aquíferos fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 1, 2005, pp. 89-98.
- CAMPOS, F.; HENAO, L. E.; ENGE, K.; WHITEFORD, S. El valle de Tehuacán. In: PALERM, J.; SALDAÑA, T. M. (Eds.) **Antología sobre pequeño riego**. Organizaciones autogestivas. Colegio de Postgraduados/Plaza y Valdés, v. II, 2000, pp. 253-344.
- 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).
- CBH-AT. Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. **Consulta Pública da Deliberação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê CBH-AT, de 10/05/2021**. Rerratifica a área de restrição e controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba e dá outras providências.
- CERNA, C. F. Galerías filtrantes en el Oasis de Pica: tecnología y conflicto social, siglos XVII-XVII. In: PALERM, V.; PALERM, J.; BLANCO, R. G. (Eds.). **Memorias Simposio El agua: un problema histórico y actual**. 51 Congreso Internacional de Americanistas. *Anais...* Santiago de Chile, 14 al 18 de julio 2003. Colegio de Postgraduados, México. ISBN 968-839-392-4.
- 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. Disponible en: <https://cnrh.mdr.gov.br/aguas-subterraneas/1715-resolucao-153-recarga/file>.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. **Dirección Local en Baja California Sur, 2020**. Piezometría, Hidrometría de las Extracciones en el Acuífero Santo Domingo. Disponible en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCaliforniaSur/DR_0306.pdf.

- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. **Recuperación del Acuífero del Valle de Santo Domingo, B.C.S.** Proyecto Emblemático, 2010. Disponible en: https://remexcu.org/documentos/conagua/bcc/pg/cotas/2011_PG_Comondu.pdf.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Res. Conama 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. Disponible en: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-ac.s.pdf>.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama 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. Disponible en: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=545.
- 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* (Online), v. 93, 2021, pp. 9-16.
- CONTI, K. I. **Norms in Multilevel Groundwater Governance & Sustainable Development.** (PhD thesis) – Faculty of Social and Behavioural Sciences. Amsterdam Institute for Social Science Research (AISSR), 2017.
- DEINES, J. M.; SCHIPANSKI, M. E.; GOLDEN, B.; ZIPPER, S. C.; NOZARI, S.; RÖTTLER, C.; SHARDA, V. Transitions from irrigated to dryland agriculture in the Ogallala Aquifer: land use suitability and regional economic impacts. *Agricultural Water Management*, v. 233, 30 abril 2020, 106061. doi:10.1016/j.agwat.2020.106061.
- DEMING, D. The aqueducts and water supply of Ancient Rome. *Groundwater*, Jan./Feb. 2020, v. 58, n. 1, pp. 152-161.
- DILLON, P.; STUYFZAND, P.; GRISCHEK, T.; LLURIA, M.; PYNE, R. D. G.; JAIN, R. C.; BEAR, J.; SCHWARZ, J.; WANG, W.; FERNANDEZ, E.; STEFAN, C.; PETTENATI, M.; VANDER GUN, J.; SPRENGER, C.; MASSMANN, G.; SCALON, B. R.; XANKE, J.; JOKELA, P.; ZHENG, Y.; ROSSETTO, R.; SHAMRUKH, M.; PAVELIC, P.; MURRAY, E.; ROSS, A.; BONILLA VALVERDE, J. P.; PALMA NAVA, A.; ANSEMS, N.; HÁ, K.; Martin, R.; Spiano, M. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27:1-30, 2019.
- EMERSON, K.; NABATCHI, T.; BALOGH, S. An integrated framework for collaborative governance. *Journal of Public Administration Research and Theory*, v. 22, n. 1, 2012, pp. 1-29.
- FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology.** 4th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, 2001. 598p.
- FORSYTH, T. Expertise needs transparency not blind trust: a deliberative approach to integrating science and social participation. *Critical Policy Studies*, v. 5, n. 3, 2011, pp. 317-322. doi:10.1080/19460171.2011.606305.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, 2013, pp. 737-750.
- 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. 103p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. **The Guarani Aquifer Initiative** – Towards realistic groundwater management in a transboundary context. Briefing Note 15. The World Bank, GW-MATE, 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.; KOUNDOURI, P.; TUINHOF, A.; KEMPER, K.; NANNI, M.; GARDUÑO, H. **Groundwater dependent ecosystems** – the challenge of balance assessment and adequate conservation. Briefing Note 15. Washington DC: GW-MATE/World Bank, 2006.
- FOSTER, S.; STEENBERGEN, F. Conjunctive groundwater use: a “lost opportunity” for water management in the developing world? *Hydrogeology Journal*, v. 19, 2011, pp. 959-962.
- 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.
- 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.
- Service de géologie, sols et déchets (GESDEC). Disponible online: <https://www.kvu.ch/fr/adresses/geneve?id=509>
- GLASER, G. Base sustainable development goals on science. *Nature*, v. 491, n. 35, 2012. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/491035a>.
- 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.
- GUPPY, L.; UYTENDAELE, P.; VILLHOLTH, K. G.; SMAKH-TIN, V. **Groundwater and Sustainable Development Goals:** analysis of interlinkages. Hamilton, Canadá: United Nations University Institute for Water, Environment and Health, 2018 (UNU-INWEH Report Series, Issue 04).
- HIRATA, R.; FOSTER, S. Guarani Aquifer System: from regional reserves to local use. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 53, 2020, p. qjehg2020-091.
- HIRATA, R.; FOSTER, S.; OLIVEIRA, F. **Águas subterráneas urbanas no Brasil:** avaliação para uma gestão sustentável. São Paulo: Fapesp e IGC-USP, 2015, 111p.
- 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 subterráneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.** São Paulo: Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, 2019.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. **Censos Generales de Población y Vivienda** (1990, 2000, 2010 e 2020).

- ITRC. Interstate Technology Regulatory Council. **Remediation Management of Complex Sites**. Washington, DC: ITRC. Disponible en: <https://rmcs-1.itrcweb.org/>.
- JANMAIMAOOL, P.; BUNSRI, T.; CHONTANAWAT, J.; 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, n. 10, 2019.
- KLAAS, D. K. S. Y.; IMTEAZ, M. A.; ARULRAJAH, A.; SUDIAYEM, I.; KLAAS, E. M. E.; KLAAS, E. C. M. Evaluation of the effects of surface slope in discretization of groundwater models. **Earth and Environmental Science**, v. 151, 2018, 012012 (IOP Conference Series). doi: 10.1088/1755-1315/151/1/012012.
- 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), 2008.
- LEITE, J. R. M.; AYALA, P. A. **Dano ambiental: do individual ao coletivo extrapatrimonial**. Teoria e prática. 3. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2010.
- LLAMAS, M. R.; MARTINEZ-CORTINA, L. Groundwater irrigation and poverty alleviation. **Proc. IWRA Regional Symposium: Water for Human Survival**, 27-30 November. New Delhi: Central Board for Irrigation and Power, v. 2, 2002, pp. 134-143.
- LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems and Science**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- LUTTI, J. E. I. Resolução Conama 420/2009 (LGL/2009/2401) e Lei Estadual 13.577/2009: inconstitucionalidade da “remediação para uso declarado”. **Revista de Direito Ambiental**. São Paulo, ano 17, v. 65, jan.-mar. 2012, pp. 13-25.
- 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.
- MELO, O. Experiencias de integración de la gestión de las aguas superficiales y subterráneas. **Revista Agryd**, n. 30, año 12, dez./2019, pp. 22-24.
- MICHENER, V. J. The participatory approach: contradiction and co-option in Burkina Faso. **World Development**, v. 26, n. 12, 1998, pp. 2105-2118. doi:10.1016/s0305-750x(98)00112-0.
- MONTENEGRO, S. G.; MONTENEGRO, A. A.; CAVALCANTI, G. L.; MOURA, A. E. S. Recarga artificial de aquíferos com águas pluviais em meio urbano como alternativa para a recuperação dos níveis potenciométricos: estudo de caso na planície do Recife (PE). 5º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva. **Anais...** Teresina, 2005. 10p.
- MOSTERT, E. The challenge of public participation. **Water Policy**, v. 5, n. 2, 2003, pp. 179-197. doi:10.2166/wp.2003.0011.
- MOURÃO, M. A. A.; PEIXINHO, F. C. A Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil: desafios e estágio atual de implantação. **Águas Subterrâneas**, 2012. Disponível en: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27659>.
- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Como as Nações Unidas apoiam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2015. Disponível en: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.
- NUNES, M. D. X. **Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2016. 75p.
- OAS. Organization of American States. **Guarani Aquifer: strategic action program**. Aquífero Guaraní: programa estratégico de acción. Bilingual edition. Brazil: OAS, 2009. Disponível en: http://iwlearn.net/iw-projects/Fsp_112799467571/reports/strategic-action-program/view.
- PALERM, J. **Cuadro localización galerías filtrantes (qanats) en México**. 2020. Disponível 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. Disponível 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? **Environmental Science & Policy**. Crossed analysis in Recife, NE, Brazil, 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.
- PINHO, H. G. **Prevenção e reparação de danos ambientais: as medidas de reposição natural, compensatórias e preventivas e a indenização pecuniária**. Rio de Janeiro: GZ, 2010, pp. 319-320.
- 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.
- PRETTY, J. N. Participatory learning for sustainable agriculture. **World Development**, v. 23, n. 8, 1995, pp. 1247-1263.
- 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**. Massachusetts: 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.
- RUIZ-VILLAYERDE, A.; GARCÍA-RUBIO, M. A. Public Participation in European Water Management: from Theory to Practice. **Water Resources Management**, v. 31, n. 8, 2016, pp. 2479-2495. doi:10.1007/s11269-016-1355-1.
- SALIH, A. Qanats a unique groundwater management tool in arid regions: the case of Bam Region in Iran. **International Symposium on Groundwater Sustainability**, 2006, pp. 79-87.
- SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. **As águas subterrâneas do estado de São Paulo**. Governo do estado de São Paulo, 2014.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R.; COOK, P. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, 2002, pp. 18-39.
- SCHMIDT, G.; SOEFNER, B.; SOEKARDI, P. Possibilities for groundwater development for the city of Jakarta, Indonesia. **Proceedings of the Duisberg Symposium: Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas**. IAHS Publication n. 198, 1990, pp. 233-242.
- SCHNEIDER, V. P. D.; RIBERA, J. L. A. **El modelo chileno de regulación de las aguas subterráneas: críticas desde el derecho ambiental y las ciencias ambientales**. España: Tirant Lo Blanch, jul./2021.
- SILVA, A. C. C. F. A. **Dano por derramamento de óleo no mar: responsabilidade e reparação**. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2019.
- SILVA, A. C. C. F. A. Remediação de áreas contaminadas no estado de São Paulo sob os aspectos jurídicos, ecológicos e econômicos. Artigo defendido no 17º Congresso Brasileiro de Direito Ambiental. **Anais...** São Paulo, 2012, pp. 201-208.
- SILVA, P. S. **Avaliação de viabilidade de aplicação de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados, Petrolina, PE**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2016. 113p.
- 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.
- SOUZA, C. **Coordenação de políticas públicas**. Brasília: Enap, 2018.
- TJSP. Tribunal de Justiça de São Paulo. **Processo nº 1032789-75.2013.8.26.0100**. 1ª Câmara Reservada ao Meio Ambiente. Relator Rui Alberto Leme Cavalheiro, julgado em 03/03/2016.
- TJSP. Tribunal de Justiça de São Paulo. **Processo nº 1096930-98.2016.8.26.0100**. 1ª Câmara Reservada ao Meio Ambiente. Relator Nogueira Diefenthaler, julgado em 16/07/2020. Data de Registro: 24/07/2020.
- TOPPER, R.; BARKMANN, P. E.; BIRD, D. R.; SARES, M. A. Artificial groundwater recharge and management. In: SEWRPC. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission. **State-of-the-art of water supply practices**. Technical Report nº 43, Chapter VI – Artificial Groundwater Recharge and Management (preliminary Draft). 2006, pp. 67-104. Disponível em: http://www.sewrpc.org/SEWRPCFiles/Publications/TechRep/tr-043_water_supply_practices.pdf.
- 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 1. The World Bank, 2006. Disponível em: <http://web.worldbank.org/archive/website00667/WEB/PDF/BN1.PDF>.
- UN/WWAP. United Nations/World Water Assessment Programme. **Water for people, water for life**. Paris: Unesco, 2003. Disponível em: <http://www.unesco.org/publishing>.
- UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. El desafío de organizar las comunidades de aguas subterráneas. **Revista Red Agrícola**, nº107, out./2019, pp. 46-49.
- UNSDSN. United Nation Sustainable Development Solutions Network. **An Action Agenda for Sustainable Development**. Report for the UN Secretary General. New York: UNSDSN, 2013.
- VILLAR, P. C. **Aquíferos transfronteiriços: governança das águas e o Aquífero Guarani**. Curitiba: Juruá, v. 1, 2015. 288p.
- VILLAR, P. C. International cooperation on transboundary aquifers in South America and the Guarani Aquifer case. **Revista Brasileira de Política Internacional** (Online), v. 59, 2016, pp. 1-20.
- VILLAR, P. C. The Agreement on the Guarani Aquifer enters into force: what changes now? **International Water Law Project Blog**. 2020. Disponível em: <https://www.internationalwaterlaw.org/blog/2020/11/16/the-agreement-on-the-guarani-aquifer-enters-into-force-what-changes-now/>.
- 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.
- VRIES, J. J.; SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. **Hydrogeology Journal**, v. 10, 2002, pp. 5-17.
- YUWANDARI, M.; ISKANDARSYAH, T. Y. W. M.; BARKAH, M. N.; SETIAWAN, T.; NABABAN, J. R. S. Zonasi intrusi air laut pada sistem akuifer tertekan atas Cekungan Air Tanah Jakarta [Zoning of seawater intrusion in upper confined aquifer system of Jakarta Groundwater Basin]. **Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi**, v. 11, n. 2, 2020, pp. 97-113. doi: 10.34126/jlbg.v11i2.310.

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 de apoyo 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, las agencias 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 otorgados son la excepción, ya que la mayoría absoluta de los usuarios son irregulares y no ven ningún beneficio en su legalización. Por otro lado, existe tolerancia por parte del Poder Público en relación a esta situación ante las dificultades que enfrentan los órganos

de dirección para promover la fiscalización. En muchos casos, se han otorgado subvenciones sin las evaluaciones hidrogeológicas necesarias para determinar el caudal explotable de los acuíferos a fin de protegerlos de la sobreexplotación. La clasificación de los cuerpos de agua subterránea no salió del proyecto, incluida la falta de regulaciones estatales para su aplicabilidad. El cobro, a su vez, cuando existe, es ineficaz frente al escenario de apropiación irregular de agua.

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.



Bebé jugando en el área de recarga del acuífero Guarani en Ribeirão Preto (SP)
Foto: Pilar Carolina Villar / Banco de Imágenes ANA

En cooperación



MINISTERIO DE
DESARROLLO REGIONAL

