

Hidrogeología del Brasil: una breve crónica de las potencialidades, problemática y perspectivas

R. Hirata⁽¹⁾, J.L. Zoby⁽²⁾, A. Fernandes⁽³⁾ y R. Bertolo⁽¹⁾

(1) Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo
E-mails: rhirata@usp.br - bertolo@igc.usp.br

(2) Agência Nacional de Água
E-mail: jlzoby@ana.gov.br

(3) Instituto Geológico. Secretaria do Meio Ambiente de São Paulo
E-mail: ameliajf@igeologico.sp.gov.br

RESUMEN

Brasil siempre ha vivido una gran contradicción en relación con el recurso hídrico. Es el país con mayor abundancia hídrica del planeta (12% ó 179.374 m³/s y una disponibilidad de 33.000 m³/hab/año), resultado de una precipitación media de 1.797 mm/año en una superficie de 8,52 millones de km²; sin embargo, enfrenta serios problemas por falta de agua, debido a la demanda excesiva en áreas urbanizadas y a la falta de inversión en infraestructura en regiones pobres. La recarga media de los acuíferos es de 42.289 m³/s y éstos abastecen al 30 a 40% de la población brasileña, a través de 400.000 sondeos y centenares de miles de pozos excavados. Dada la gran extensión del país, existen grandes unidades acuíferas distribuidas en diversas cuencas sedimentarias y en los escudos cristalinos. La calidad de las aguas subterráneas es generalmente buena y apta para consumo, con problemas localizados de flúor (Sistema Acuífero Guaraní y Serra Geral), cromo (noroeste del Sistema Acuífero Bauru), hierro y manganeso (en unidades sedimentarias cenozoicas) y salinidad (semiárido de la Región Noreste). La contaminación antrópica está presente en los grandes centros urbanos, a pesar de que falten estudios sistemáticos para una evaluación más precisa. El nitrato es el contaminante más común, asociado a las actividades agrícolas y a la falta de red pública de alcantarillado. Otros contaminantes importantes son: combustibles líquidos de petróleo, solventes aromáticos, PAHs, metales pesados y solventes halogenados, asociados a las estaciones de servicio, rellenos sanitarios, basureros a cielo abierto e industrias.

Palabras clave: Brasil, contaminación de las aguas subterráneas, gestión de las aguas subterráneas, hidrogeoquímica, hidrogeología regional

Brazilian hydrogeology: a short chronicle of its potentialities, problems and perspectives

ABSTRACT

Although Brazil has the largest amount of water resources in the world (12% or 179374 m³/s and an availability of 33000 m³/inhab/y), which results of a precipitation averages of 1707 mm/y in an area of 8.52 million km², this country faces serious problems of lack of water. This is due to: great demands in very large urban areas, low infra-structure investments on poor regions, and the concentration of the water resources is heterogeneous and does not accompany the concentration of population. The average for aquifer recharge is 42289 m³/s and this supply water to 30-40% of the Brazilian population, by means of 400000 boreholes and thousands of hundreds of dug wells. There is a great amount of aquifer units distributed in the sedimentary basins and Precambrian basement that occupy the great extension of Brazil territory. The water quality is usually good and suitable for drinking. Concentrations above the potable standards for some elements, such as fluorite (Guarani Aquifer System), chromium (northwest portion of Bauru Aquifer System), iron and manganese (Cenozoic Aquifers) occur at the local scale. Salinity is a common problem of the Northeast Region where dry climates predominate. Anthropogenic originated contamination of nitrate, due to the lack of septic systems, seems to be most common in large urban centers; however systematic investigations are necessary in order to evaluate its extension. Agricultural activities are also a common source of nitrate contaminations. Besides, other significant contaminants are: oil liquid fuels, aromatic solvents, PAHs, heavy metals and halogenated solvents, being derived from gas stations, waste disposal facilities, and industries.

Key words: Brazil, groundwater contamination, groundwater management, hydrogeochemistry, regional hydrogeology

Introducción

Brasil es un país con una población de 180 millones de personas, que se distribuye de forma muy hetero-

génea, se concentra en los estados del Sureste y Sur, así como en las capitales de la costa de los estados de Noreste (Fig 1). Su economía es muy diversificada y acumula una producción anual bruta de US\$ 500.000

millones, destacándose los sectores servicios y comercio (71%), industrial (20%), agropecuario (7%) y minero (2%). El país, debido a su extensión territorial, de más de 8,52 millones de km², y a su clima, entre tropical húmedo y ecuatorial, ofrece una inusual disponibilidad hídrica comparada con los demás países del mundo. El 12% del agua dulce del planeta (cerca de 180.000 m³/s), corre por su territorio. Este número se eleva a 18%, si se consideran los ríos que nacen en otros países y que recorren tierras brasileñas.

El poco uso del agua superficial y subterránea en el país, inferior al 1%, no evidencia los problemas de carencia de agua potable que sufre Brasil, originados en la desigual distribución entre la disponibilidad hídrica y la concentración poblacional. Ciudades capi-

tales de la Región Administrativa Noreste incluyendo Fortaleza, Natal y Recife, sufren en la actualidad problemas de escasez hídrica. En la Región Sureste, se pueden incluir las ciudades de São Paulo, Belo Horizonte y Río de Janeiro (Fig 1).

Las aguas subterráneas desempeñan un importante papel en el abastecimiento público y privado. Se estima que de 30 a 40% del agua suministrada a la población es de origen subterráneo.

Este trabajo presenta los principales acuíferos del país y sintetiza sus características de explotación, potencial de productividad e hidrogeoquímica. Adicionalmente evalúa a nivel regional los principales problemas relacionados con la disponibilidad y la gestión que el país ha enfrentado en relación al tema.

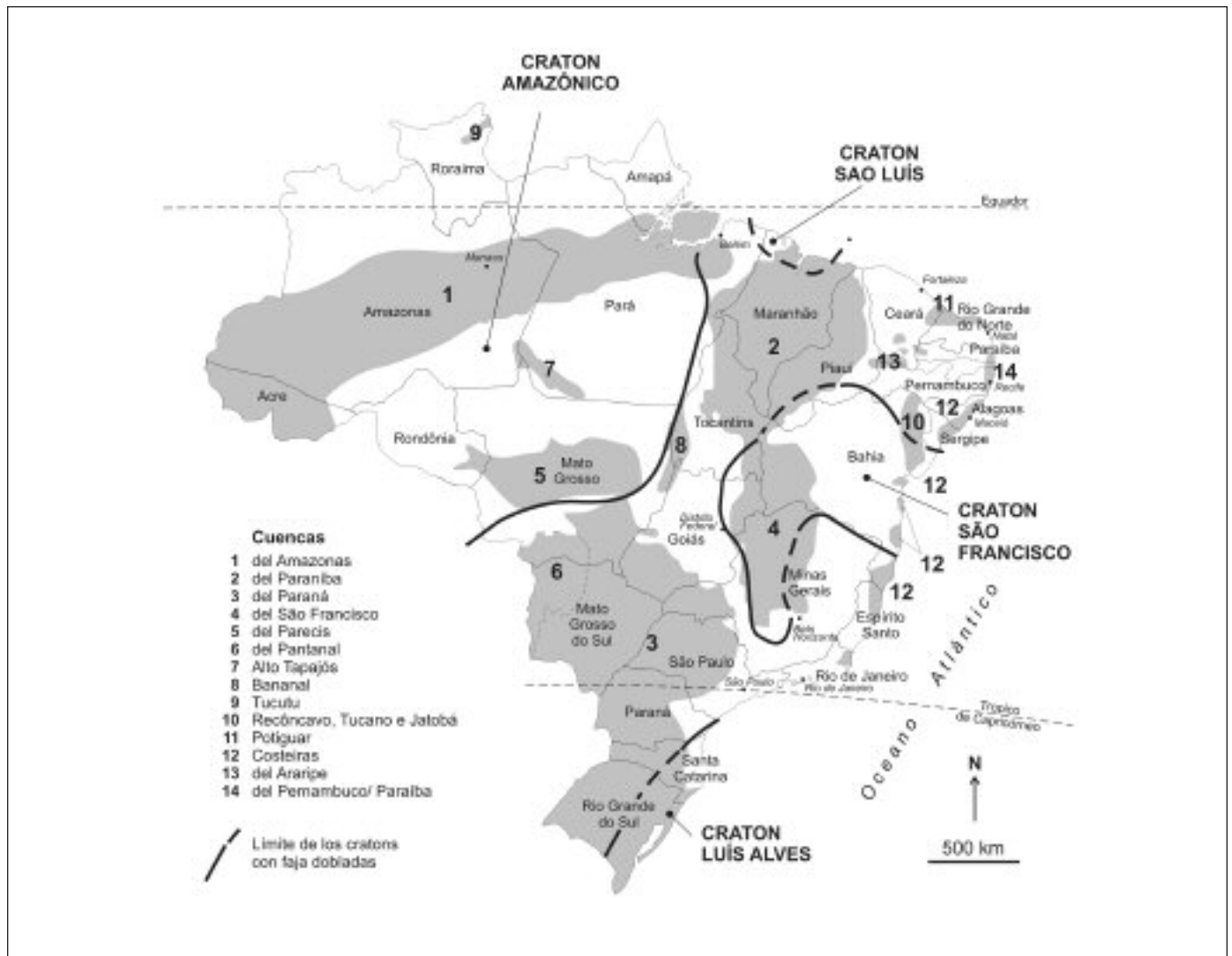


Fig. 1. Principales cuencas sedimentarias y cratones con cinturones plegados de Brasil (Zalan *et al.*, 2004; Cordani *et al.*, 2000)
 Fig. 1. Main Brazilian sedimentary basins and cratons with fold belts (Zalan *et al.*, 2004; Cordani *et al.*, 2000)

Marco institucional

La Constitución Federal de 1988 establece que las aguas son un bien de dominio público. Las aguas subterráneas son consideradas como pertenecientes a los Estados, a diferencia de las aguas superficiales, que pueden ser de los Estados o de la Unión, cuando rieguen más de un Estado.

Una situación legal conflictiva con relación a las aguas subterráneas, no solucionada aún, tiene que ver con las aguas minerales (aguas de bebida envasada). De acuerdo con la Constitución Federal de 1988 y con el Código de Aguas Minerales de 1945, las fuentes de aguas minerales son entendidas como bienes minerales, por lo tanto, controladas por la Unión. Por otro lado, la misma Constitución de 1988 establece la potestad de las aguas por parte de los Estados.

El marco institucional legislativo sobre recursos hídricos es la Ley 9433 de 1997, que establece la Política Nacional de Recursos Hídricos y crea el Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos (SNGRH). Entre sus principios figura la descentralización de dicha gestión la cual deberá hacerse de forma participativa y adoptando a la Cuenca Hidrográfica como unidad de planificación. El SNGRH está compuesto por el Consejo Nacional de Recursos Hídricos, la Agencia Nacional de Aguas, los Consejos de Recursos Hídricos de los Estados, los Comités de Cuencas Hidrográficas y los organismos de poder público cuya competencia se relaciona con la gestión de los recursos hídricos.

El Consejo Nacional de Recursos Hídricos y la Agencia Nacional de Aguas fueron creados, respectivamente, en los años 1998 y 2000. Brasil posee actualmente siete Comités de Cuencas Federales y 99 Comités Estatales. De los 27 estados, siete tienen Planes Estatales de Recursos Hídricos hasta el año 2005. El Plan Nacional de Recursos Hídricos está en fase de elaboración y deberá ser concluido al final de 2005.

Climatología

Brasil posee varios regímenes climáticos en función de su gran extensión territorial, cubriendo latitudes subtropicales a ecuatoriales (Fig. 1). El sur de Brasil se caracteriza por una mayor influencia de latitudes medias, con eventos frontales más frecuentes, causantes de lluvias durante todo el año (media anual 1.500 a 2.250 mm/año). En la Región Norte del país, el clima reinante es el ecuatorial lluvioso (>2.000 mm/año), prácticamente sin estación seca. En el Noreste, se observan regímenes de lluvia más limita-

dos (<1.000 a 1.750 mm/año, en el litoral) y en regiones del interior se presenta un clima semiárido (<500 mm/año). El resto del país, regiones Sureste y Centro-Oeste, se caracteriza por la influencia de sistemas tropicales y latitudes medias, presentando inviernos secos y veranos lluviosos bien definidos (1.200-2.000 mm/año), con incidencia de lluvias convectivas (Dias y Marengo, 1999).

Hidrogeología descriptiva: sistemas acuíferos

A continuación se presenta una descripción de los principales dominios hidrogeológicos del país y sistemas acuíferos teniendo como principal base, el estudio realizado por la Agencia Nacional de Aguas (ANA, 2005a).

Acuíferos en formaciones sedimentarias

Los terrenos sedimentarios ocupan cerca de 4.130.000 km², el 48.5% de la nación, y corresponden a grandes cuencas sedimentarias del Proterozoico/Paleozoico, Proterozoico/Mesozoico y Paleozoico, y cuencas menores del Mesozoico y Cenozoico (Fig. 1). En estos terrenos se encuentran 27 sistemas acuíferos de porosidad granular y, subordinadamente, kárstica/fracturada, su área total de recarga de 2.761.100 km² (32% del país). La gran presencia de cuencas sedimentarias en el territorio brasileño, sumada a las condiciones climáticas favorables, evidencia un gran potencial para aguas subterráneas (Tabla 1).

La principal cuenca sedimentaria proterozoica brasileña es la del São Francisco (Fig. 1), la cual comprende dos importantes sistemas acuíferos de dimensiones regionales:

- *Sistema Acuífero Bambuí*, conformado por el Grupo Bambuí (Neoproterozoico), con una superficie de 175.000 km²; espesor variable que puede alcanzar hasta 2500 m, porosidad kárstica-fracturada, y productividad, en general buena, aunque muy variable;
- *Sistema Acuífero Urucua-Areado* constituido por rocas del Cretácico que suprayacen al Grupo Bambuí.

Las mayores cuencas sedimentarias brasileñas son del Paleozoico, denominadas de Paraná, del Parnaíba y del Amazonas (Fig. 1).

La Cuenca sedimentaria del Amazonas (Ordovícico al Terciario), de una superficie de 1.300.000 km² está dividida por estructuras regionales en cuencas menores: Acre, Solimões y Amazonas. Ocupa buena parte

CUENCA	Caracterización general		Productividad de pozos				P			
	Sistema Acuífero	Tipo de Acuífero	Litología	Prof (m)	Acuífero libre Q (m ³ /h)	Acuífero libre Q/d (m ³ /h/m)		P	Acuífero confinado Q (m ³ /h)	Acuífero confinado Q/s (m ³ /h/m)
AMAZONAS	BOA VISTA	Poroso y libre	Arenas, concreciones lateríticas y niveles conglomeráticos	33-40 (34)	19,8-40,0 (30)	2,41-8,89 (3,15)	9			
	SOLIMÕES	Poroso y libre	Lutitas y bancos de areniscas	38-62 (45)	10,2-36,7 (24,5)	0,97-5,22 (1,63)	36			
	ALTER DO CHÃO	Poroso y libre	Areniscas arcillosas y lutitas	85-189 (140)	9,4-68,0 (26,4)	0,35-2,26 (0,94)	145			
PARECIS	PARECIS	Poroso y libre	Areniscas finas a medias, niveles conglomeráticos y lentejones de lutitas y limolitas	100-112 (104)	72,0-283,0 (128,4)	5,76-15,36 (9,1)	8			
MESOZOICAS/ CENOZOICAS	BARREIRAS	Poroso, libre y confinado	Areniscas con limo-arcillosas y lutitas	20-51 (33)	4,0-18,0 (9,3)	0,31-4,83 (2,11)	140	2,6-10,6 (5,0)	0,16-1,35 (0,56)	167
	BEBERIBE	Poroso, libre y confinado	Areniscas con intercalaciones de limolitas y lutitas	162-220 (200)	23,3-36,8 (26,0)	0,96-1,42 (1,10)	4	31,7-113,1 (72,0)	1,36-3,87 (2,59)	21
	JANDAÍRA	Kárstico-Fraturado	Calizas con intercalaciones de lutitas, arcillas limolitas y areniscas calcáreas	72-120 (100)	2,2-7,2 (4,5)	0,07-2,46 (0,29)	180			
	AÇU	Poroso y confinado	Areniscas finas y limo-arcillosas y niveles de lutitas	98-150 (118)	6,8-22,6 (12,7)	0,53-3,27 (1,35)	43	6,4-32,2 (11,0)	0,65-4,78 (1,24)	16
	MARIZAL	Poroso, libre y confinado	Areniscas gruesas a conglomeráticas con niveles de arcillas y calizas	83-152 (119)	10,0-26,8 (16,5)	0,46-3,72 (2,06)	59	7,4-21,2 (13,5)	0,52-2,78 (0,95)	42
	SÃO SEBASTIÃO	Poroso, libre y confinado	Areniscas medias a gruesas con niveles de lutitas y arcillas	83-136 (118)	2,1-4,0 (3,3)	0,13-0,35 (0,24)	30	13,6-44,0 (24,0)	0,62-2,95 (1,38)	109
	INAJÁ	Poroso, libre y confinado	Areniscas finas a medias con niveles de arcillas y limos	50-134 (73)	2,5-7,0 (5,0)	0,21-0,62 (0,47)	27	7,1-15,8 (10,2)	0,26-1,47 (0,77)	7
	TACARATU	Poroso y libre	Areniscas finas a gruesas con niveles de conglomerados y arcillas	76-83 (80)	4,2-8,6 (5,1)	0,43-0,85 (0,57)	3	4,1-19,0 (12,0)	0,29-2,57 (1,38)	15
	MISSÃO VELHA	Poroso y confinado	Areniscas, conglomerados, lutitas	100-175 (134)	5,8-26,4 (13,0)	0,18-1,76 (0,5)	165			
	SÃO PAULO'	Poroso, semi confinado								

Tabla 1. Caracterización general y productividad de acuíferos sedimentarios brasileños. Los valores de profundidad de pozos (Prof), caudal (Q) y caudal específico (Q/d) representan los percentiles (25 y 75%) y la mediana. P = número de pozos consultados
 Table 1. General characterization and productivity of Brazilian sedimentary aquifers. The values of depth of wells (Prof), flow (Q) and specific flow (Q/d) represent the percentiles (25 and 75%) and the median. P = number of wells

CUENCA	Caracterización general		Productividad de pozos				
	Sistema Acuífero	Tipo de Acuífero	Litología	Prof (m)	Acuífero libre Q (m ³ /h) Q/d (m ³ /h/m)	Acuífero confinado Q (m ³ /h) Q/s (m ³ /h/m)	P
PARANÁ	TAUBATÉ ²	Poroso, semi confinado	areniscas, conglomerados, lutitas	124-175 (150)	16,1-58,0 (30,0) 0,59-6,00 (2,1)	111	
	BAURU	Poroso y libre	Areniscas finas a medias con intercalaciones de lutitas y limos	101-160 (140)	8,0-20,7 (14,4) 0,22-0,96 (0,43)	119	
	GUARANI	Poroso, libre y confinado	Areniscas finas a medias	85-136 (103)	5,4-18,7 (10,2) 0,25-0,99 (0,49)	87	111-242 (154) 18,4-60,0 (35,7) 0,87-2,91 (1,82)
	TUBARÃO ³	Poroso, libre, semiconfinado	Areniscas finas a medias, diamictitas, ritmitas	117-201 (151)	3-13,2 (6,8) 0,06-0,31 (0,12)	831	
PARNAÍBA	PONTA GROSSA	Poroso y libre	Arcillas con intercalaciones de areniscas finas	118-192 (135)	1,2-6,0 (2,4) 0,02-0,12 (0,06)	9	
	FURNAS	Poroso, libre y confinado	Areniscas medias a gruesas	85-150 (115)	9,3-27,0 (11,6) 0,54-1,94 (1,20)	21	135-265 (175) 12,0-23,4 (15,4) 0,73-1,22 (0,94)
	ITAPECURU	Poroso y libre	Areniscas finas a gruesas con niveles de arcilolitas y limolitas arcillosas	60-100 (79)	5,1-16,0 (9,1) 0,25-2,35 (1,03)	116	
	CORDA	Poroso, libre y confinado	Areniscas medias a conglomeráticas	72-112 (84)	4,0-18,0 (8,0) 0,40-1,87 (1,07)	35	147-250 (170) 7,2-20,0 (12,0) 0,29-1,14 (0,47)
SÃO FRANCISCO	MOTUCA	Poroso y libre	Areniscas finas a medias	63-122 (80)	3,6-11,8 (6,1) 0,49-2,91 (1,90)	22	
	POTI-PIAUI	Poroso, libre y confinado	Areniscas finas a medias con niveles de arcillas y limolitas	93-157 (122)	6,0-18,0 (10,0) 0,34-1,46 (0,59)	49	111-346 (159) 13,4-40,3 (31,5) 0,92-2,91 (1,12)
	CABEÇAS	Poroso, libre y confinado	Areniscas finas a gruesas con niveles de limolitas y arcillas	79-130 (100)	4,0-13,1 (6,0) 0,49-2,16 (1,00)	87	153-399 (233) 8,3-53,8 (26,4) 1,01-10,08 (4,37)
	SERRA GRANDE	Poroso, libre y confinado	Areniscas finas a medias con niveles conglomeráticos	107-200 (170)	2,0-6,0 (3,2) 0,06-0,33 (0,13)	111	120-180 (150) 5,9-21,0 (9,8) 0,63-2,42 (1,29)
BAMBUÍ	URUCUIA-AREADO	Poroso y libre	Areniscas finas a medias y niveles de lutitas y conglomerados	50-117 (86)	5,5-14,7 (7,8) 0,19-1,15 (0,53)	28	
	FRATURADO	Kárstico-Fraturado	Metacalizas, margas, metalimolitas y meta-arcillas	60-100 (80)	3,3-15,7 (8,8) 0,10-3,17 (0,51)	159	

Datos de Zoby y Matos (2002) y ANA (2005 a) y donde se señalan: ¹Campos y Albuquerque Filho (2004), ²Mancuso (2004), y ³Oda (2004)

Tabla 1 (continuación). Caracterización general y productividad de acuíferos sedimentarios brasileños. Los valores de profundidad de pozos (Prof), caudal (Q) y caudal específico (Q/d) representan los percentiles (25 y 75%) y la mediana. P = número de pozos consultados
 Table 1 (continuation). General characterization and productivity of Brazilian sedimentary aquifers. The values of depth of wells (Prof), flow (Q) and specific flow (Q/d) represent the percentiles (25 and 75%) and the median. P = number of wells

de la Región Norte del Brasil y coincide en gran proporción con la cuenca hidrográfica del río Amazonas. La secuencia paleozoica a mesozoica (Ordovícico al Cretácico) alcanza 7.000 m de espesor, estando cubierta por sedimentos terciarios con espesor medio de aproximadamente 600 m. Aunque la información hidrogeológica es escasa, los sistemas acuíferos más importantes son el Solimões y Alter del Chão.

La Cuenca del Parnaíba (Silúrico al Cretácico) es la principal de la Región Noreste teniendo en cuenta su potencial de agua subterránea. Su espesor máximo alcanza cerca de 3.000 m y un área de 600.000 km². Los cuatro sistemas acuíferos regionales más importantes de esta cuenca, utilizados principalmente por el Estado de Piauí, son: Cabezas, Serra Grande, Poti-Piauí y Itapecuru. En el Estado de Maranhão debido a las condiciones geomorfológicas son explotados los acuíferos más someros y libres de Motuca, Corda y Itapecuru.

Por último, otra gran cuenca paleozoica es la del Paraná (Ordovícico al Cretácico), que comprende cerca de 1.000.000 km² en territorio brasileño y se extiende hacia Argentina, Paraguay y Uruguay, ocupando parte de las regiones Centro-Oeste, Sureste y Sur del país. Tiene espesor máximo de 8.000 m y comprende importantes sistemas acuíferos como el Guaraní, uno de los mayores acuíferos del mundo, constituido por las formaciones Piramboia (Eotriásico) y Botucatu (Neojurásico-Eocretácico); Bauru, conformado por los grupos homónimos (Neocretácico); y, en los límites de frontera de la cuenca, Furnas (Eodevónico), Ponta Grossa (Mesoneodevónico) y Tubarão (Permo-Carbonífero). La Cuenca del Paraná comprende aún el Acuífero Serra Geral (basaltos eocretácicos) de tipo fracturado y que será caracterizado más adelante.

Las cuencas sedimentarias del Mesozoico, en general de dimensiones inferiores a las del Paleozoico, se concentran en la región costera o próxima a ella, y son, en general, de gran espesor, pudiendo alcanzar algunos miles de metros (Fig. 1). Estas cuencas, junto a las cenozoicas, en relación al potencial hidrogeológico, están enumeradas en la Tabla 2.

Acuíferos en materiales fisurados

Los terrenos cristalinos precámbricos, que se comportan como acuíferos fracturados típicos y ocupan cerca de 4.380.000 km² (aproximadamente el 51,5% del territorio nacional) (Fig. 1), coinciden en gran parte con el Cratón del Amazonas y con cinturones de plegamientos del Neoproterozoico, englobando parte del basamento del Cratón del São Francisco. El basa-

mento de los cratones y cinturones de plegamientos está constituido predominantemente por rocas de alto grado de metamorfismo (gneis-migmatita-granito-granulita) con rocas máficas y ultramáficas subordinadas, además de restos de asociaciones meta-vulcanosedimentarias de bajo a medio grado. Los cinturones de plegamientos son intruidos por granitos y están constituidos por rocas metasedimentarias (terrígenas y carbonáceas) o meta-vulcanosedimentarias (volcánicas, terrígenas y carbonáceas) en facies metamórficas variadas que van de esquistos verdes a anfibolitas. Los caudales de las captaciones en estos terrenos son muy variables, entre 1 y 17m³/h (Tabla 3).

Los basaltos y diabasas de la Formación Serra Geral (Eocretácico) de la Cuenca del Paraná (Acuífero Serra Geral), en conjunto con las rocas precámbricas, mencionadas anteriormente, constituyen los acuíferos fracturados principales del país. La Tabla 3 ilustra las producciones y profundidades de los pozos en estos acuíferos, que, exceptuando los basaltos, con caudales específicos (Q/s) bastante variables (rangos de 7 a 35 m³/h/m), presentan, en general, potencial de producción inferior al de los acuíferos sedimentarios (Tabla 1). Las diabasas presentan producciones semejantes a las de los gneises precámbricos.

Algunos factores ejercen mayor o menor influencia sobre la producción de agua subterránea en terrenos cristalinos o fracturados. Tales factores son: presencia y espesor de la capa inconsolidada (suelo, roca alterada en profundidad y coberturas cenozoicas de poco espesor), morfología del terreno, litología, fracturas, y tectónica cenozoica (Fernandes y Rudolph, 2001). En los últimos años la influencia de la tectónica cenozoica sobre la circulación del agua en medios fracturados también ha sido investigada en el país (Jardim de Sá, 2000; Fernandes y Rudolph, 2001).

Acuíferos en formaciones no consolidadas

Con relación a las capas no consolidadas, en las regiones de clima tropical, existen condiciones favorables para el desarrollo de perfiles de alteración que pueden alcanzar algunas decenas de metros de espesor, cubriendo rocas cristalinas no alteradas. En estas áreas no consolidadas los caudales específicos están entre 2 a 17m³/h/m (medianas de 3 a 8 m³/h/m), se forman dos tipos de acuíferos, hidráulicamente conectados:

- fracturado en la sección más profunda, no alterada
- poroso, en la capa no consolidada. Algunos autores, como Fernandes y Rudolph (2001), muestran que la capa de alteración no produce caudales

Cuenca	Área (km ²)	Principales acuíferos
Potiguar	25.000	Açu y Jandaíra
Pernambuco y Paraíba	9.000	Beberibe y Barrreiras
Araripe	9.000	Exu y Missão Velha
Jatobá	5.600	Tacarutu
Tucano	28.400	Inajá y Tacarutu (Paleozoico); Marizal y São Sebastião (Cretáceo); Barreiras (Cenozoico)
Recôncavo	11.000	Marizal y São Sebastião (Cretáceo)
São Paulo	1.000	São Paulo
Taubaté	2.340	Taubaté

Tabla 2. Cuencas mesozoicas y cenozoicas y sus principales acuíferos
 Table 2. Mesozoic and Cenozoic basins and main characteristics of aquifers

Unidad Geológica	Estado, Región o Sistema Acuífero	Pozos	Percentiles y Mediana								
			Profundidad (m)			Caudal (m ³ /h)			Caudal específico (m ³ /h/m)		
			25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
Fajas de plegamientos y porciones de Cratón del San Francisco	Región Nordeste	8.329	48	59	70	0,8	2,1	5,1	0,03	0,10	0,38
	Estado de Minas Gerais (1)	128	-	-	-	1,1	2,8	5,0	0,03	0,13	0,35
	Estado do Río de Janeiro (2)	110	57	80	102	4,0	7,0	11,5	0,12	0,28	0,64
	Estado de São Paulo (3)	1.201	110	150	198	2,6	6,0	12,1	0,03	0,09	0,30
	São Paulo-PC1	256	130	162	210	2,0	3,8	7,5	0,02	0,05	0,12
Cuenca del Paraná	São Paulo-PC2	633	108	150	200	2,7	6,0	12,6	0,03	0,09	0,27
	São Paulo-PC3	303	100	134	168	4,0	8,5	16,6	0,07	0,17	0,53
	Serra Geral-Basalto	278	100	127	163	7,1	15,3	35,0	0,21	0,63	2,12
*	Serra Geral-Diabasio	49	90	121	157	1,8	5,5	11,0	0,02	0,13	0,4

Para cálculo de los percentiles y de la mediana del Escudo Oriental Semiárido no fueron computarizados los pozos secos
 Fuentes: (1) Hidrosistemas/COPASA (1995). (2) Río de Janeiro (2001). (3) Fernandes *et al.* (2005). *Las diabasas son intrusivas en las fajas de plegamientos del Estado de Sao Paulo

Tabla 3. Sistemas acuíferos fracturados precámbricos y volcánicos del Eocretácico
 Table 3. Pre-Cambrian fractured and Eocretaceous volcanic aquifer systems

elevados, como los debidos a las fracturas, sin embargo pueden ser suficientes para suplir a pequeñas propiedades.

En el Noreste brasileño, una región de clima semiárido con cerca de 600.000 km² donde predomina la meteorización física con relación a la química, las capas inconsolidadas tienen poco espesor (1 a 3 m) o no existen, restringiendo aún más la potencialidad de estos terrenos cristalinos. Los percentiles de caudales de los pozos están entre 1 y 5 m³/h y las aguas presentan elevada salinidad (más de 50% con TDS > 1.000 a 2.000 mg/L), comúnmente por encima del límite de potabilidad. A pesar de esto, en muchas pequeñas comunidades del interior de la Región Noreste, estos pozos constituyen una fuente de abastecimiento disponible. No obstante, en la Tabla 3 se nota que los caudales específicos de los pozos de la región semiárida son semejantes a las de los estados de clima tropical. Esto se debe a que gran parte de los pozos perforados –muchas veces más del 30%– están secos o presentan agua excesivamente salinizada y no son registrados por los perforadores y por lo tanto no son considerados en el análisis.

El factor morfológico fue considerado como el más influyente para la elevación del potencial de producción en la elaboración del mapa de potencialidad del Estado de Río de Janeiro (Río de Janeiro, 2001), donde las áreas de menor inclinación son consideradas como más favorables. Por otro lado, en la Región Noreste semiárida, las serranías cuarcíticas y graníticas sostienen manantiales de caudales disponibles largo tiempo después del período de la estación lluviosa (Neves y Albuquerque, 2004).

En términos de litología, las rocas metamórficas son consideradas como más productivas que los granitos (Hirata y Ferreira, 2001; Fernandes *et al.*, 2005). En el Estado de São Paulo, la mediana del caudal específico para los granitos, macizos o laminados, es de 0,06 m³/h/m, siendo la de los gneises de 0,09 m³/h/m. Las rocas metamórficas de bajo grado presentan valores de mediana semejantes a los de los gneises, aunque su producción varía más, con valores inferiores similares a los de granitos y superiores parecidos a los de los gneises, o incluso superándolos. A pesar de haberse detectado una variación de la producción con relación a la litología, esta variación

se ha caracterizado mejor en bloques geológicos que siguen, en parte, los límites dados por zonas de cizallamiento dúctil y en parte por lineamientos y límites cenozoicos importantes (Fernandes *et al.*, 2005). De esta forma fueron estipuladas tres categorías de producción (PC1, PC2 y PC3) para las rocas precámbricas del Estado de São Paulo, con medianas de caudal específico de 0,04, 0,08 y 0,18 m³/h/m e intervalos de caudales predominantes de 1 a 6, 1 a 12 y 3 a 23 m³/h, respectivamente (Tabla 3). Es interesante observar que el Estado de Río de Janeiro, donde se registraron las mayores producciones de pozos de los terrenos cristalinos analizados, está en continuidad con una de las áreas más productivas del Estado de São Paulo (Fernandes *et al.*, 2005), sugiriendo una situación tectónica semejante para estas áreas.

Cantidad

El Brasil presenta una precipitación media anual de 1.797 mm y evapotranspiración media anual de 1.134 mm, el 63% de la precipitación. El caudal medio de largo período es de 179.374 m³/s, que corresponde a aproximadamente 12% de la disponibilidad mundial de agua dulce. Si se considera la contribución de caudales de territorios extranjeros, el valor de caudal medio anual alcanza 267.000 m³/s, que corresponden al 18% de la disponibilidad mundial (ANA, 2005a). Las reservas renovables de agua subterránea del país alcanzan 42.289 m³/s (1.334 km³/año) y corresponden, por lo tanto, al 24% de la escorrentía de los ríos en territorio nacional. Solamente los 27 sistemas acuíferos sedimentarios del país, que ocupan un área de cerca de 32% del territorio nacional, totalizan 20.473 m³/s de reservas.

Brasil es considerado rico en términos de dotación media disponible por habitante, con cerca de 33.000 m³/hab/año. Sin embargo, la distribución del agua en el territorio brasileño es bastante heterogénea espacial y temporalmente (ANA, 2005a).

La región hidrográfica amazónica, con un área que corresponde a 45% del país, tiene el 73,6% de los recursos hídricos superficiales. Los rendimientos específicos medios varían desde menos de 2 L/s·km², en las cuencas de la región semiárida del Noreste, hasta más de 40 L/s·km², en el noroeste de la región Amazónica, siendo la media nacional igual a 21 L/s·km².

El menor caudal medio por habitante se observa en la Región oriental de Noreste, con media inferior a 1.200 m³/hab/año. En algunas cuencas de esta región, son registrados valores menores a 500 m³/hab/año. Un escenario crítico también es observado en las

regiones en que existe una correspondencia entre una elevada densidad poblacional y una baja disponibilidad hídrica. Es el caso de la cuenca del Alto Tietê, que incluye la ciudad de São Paulo, y de los ríos que desaguan en la bahía de Guanabara, en la región de la ciudad de Río de Janeiro, alcanzando valores inferiores a 500 m³/hab/año.

Redes de control de aguas subterráneas y superficiales

La red de control hidrológico nacional cuenta con 4.791 estaciones hidrométricas y 9.072 pluviométricas, totalizando 13.863 estaciones en operación en 2005. El país no posee una red de control nacional de aguas subterráneas, inclusive por la atribución legal de dominio de las aguas subterráneas a los estados. El único Estado con red de control de aguas subterráneas es el de São Paulo. Ésta fue creada en 1990 y contaba con 162 pozos en 2003, cuando se dio inicio al monitoreo de la Región Metropolitana de São Paulo. La red es destinada a la calidad de agua, siendo analizados 40 parámetros con frecuencia semestral (CETESB, 2004).

Recientemente, han sido instaladas otras tres redes de calidad de las aguas subterráneas. Se inició el monitoreo semestral del sistema acuífero cárstico-fracturado Jandaíra, en la región de Baraúna, en el Estado de Río Grande do Norte (Castro *et al.*, 2004). Una red telemétrica, que analiza la conductividad eléctrica de las aguas y mide la profundidad de los niveles fue instalada en la Región Metropolitana de Recife, cuyo principal sistema acuífero es el Beberibe (Costa y Costa Filho, 2004). En el Estado de Minas Gerais, fue instalada en 2004 una red de control de la calidad del agua en tres cuencas, una de las cuales es la del río Verde Grande, donde se encuentra el acuífero cárstico-fracturado del Bambuí. El monitoreo fue iniciado en 2005.

Calidad natural de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas presentan una buena calidad natural en casi todos los acuíferos brasileños. La química de las aguas está controlada básicamente por las rocas y sedimentos que conforman el acuífero y por el clima dado en el área de recarga (Tabla 4). Las unidades hidrogeológicas de la Región Norte del país, por ejemplo, donde las lluvias son abundantes, presentan aguas ácidas, bicarbonatadas y de baja mineralización. Las rocas cristalinas se caracterizan por presentar aguas bicarbonatadas cálcicas y cálcico-

Rocas/Mineralogía	Características y Procesos Hidrogeoquímicos Controladores
Cuenca Amazónica	<p>Agua subterránea de baja mineralización (TDS<30 mg/L), ácida (pH=5) de acuíferos someros y de rápido tiempo de tránsito, percolando minerales de rocas/sedimentos poco reactivos. Minerales estables son la caolinita y gibsita.</p>
Escudo Central	<p>Acuíferos someros: procesos actuales son los mismos del contexto de la Cuenca Amazónica, o sea, agua subterránea ácida, de baja mineralización y de rápido tiempo de tránsito. Acuíferos profundos (>100 m): aguas bicarbonatadas cálcicas y cálcico-sódicas con mayor mineralización, asociadas a la meteorización de aluminosilicatos, produciendo arcillominerales tipo caolinita.</p>
Cuencas Costeras	<p>Aguas de circulación somera, baja mineralización (TDS = 50 mg/L), ácida (pH=5), cloruradas sódicas, con fuerte influencia marina. Contribución marina e intercambio catiónico de sodio por calcio en la matriz del acuífero. Aguas bicarbonatadas-cloruradas sódicas de circulación profunda (>100 m).</p>
Cuenca Paranaíba	<p>Aguas de baja mineralización en los límites de la cuenca y en las unidades acuíferas superficiales. La mineralización se incrementa en profundidad y en la dirección del interior de la cuenca, hasta condiciones de salinización.</p>
Escudo Noreste	<p>Agua subterránea en áreas próximas al litoral son de baja mineralización y sufren influencia marina más intensa que la meteorización de aluminosilicatos. Estas aguas son de circulación somera y semejantes a las aguas tipo 1 de las cuencas Costeras. Áreas de clima semiárido presentan agua con elevada salinización por evaporación.</p>
Escudo Sureste	<p>Disolución de aluminosilicatos. Aguas de circulación somera son más sódicas (albita), TDS=50 mg/L, pH=5.7 y la caolinita es el mineral estable. Aguas profundas (>100 m.) son más cálcicas (anortita, piroxenos y anfíboles), TDS=100 mg/L, pH=6.8. Esmeclitas estables. Aguas fuertemente influenciadas por las rocas alcalinas. Bicarbonatadas sódicas (feldspatoides, feldspatos y piroxenos) o cálcicas (carbonatitas). Sulfato originado por oxidación de pirita. Fluoruro y bario respectivamente por disolución de fluorita y barita. Aguas de elevada radioactividad temporal natural. Aguas bicarbonatadas cálcicas a cálcico-magnésicas originadas por la disolución de minerales carbonatados. En general, TDS=200 mg/L, pH=7.8. Sulfato originado por oxidación de pirita, cuya acidez originada es neutralizada en la disolución de carbonatos. Soluciones saturadas en calcita y dolomita. Disolución de aluminosilicatos. Aguas de circulación somera con pH bajo y CO₂ disuelto más elevado, debido a la degradación de materia orgánica; la caolinita es un mineral estable en este contexto. El hierro y el manganeso pueden presentar concentraciones anómalas en cuencas cuaternarias. Las aguas de circulación profunda (>100 m) poseen probable aporte de sodio por intercambio iónico, siendo las esmeclitas estables.</p>
Cuenca del Paraná	<p>Aguas de circulación somera del contexto del área de recarga del acuífero, son bicarbonatadas cálcicas, TDS=80 mg/L, pH=6.5. Influencia de la geoquímica de silicatos, sin contribución de carbonatos, sulfatos y cloruros. Las aguas de circulación muy profunda (>1000 m) poseen geoquímica más compleja: carbonatos saturados e intercambio iónico de sodio por el calcio, anomalías de fluoruro, TDS=250 mg/L, pH>8.5. Aguas de flujo somero e intermedio (< 150 m) son bicarbonatadas cálcicas, originadas por interperismo de plagioclasa cálcica (TDS=100 mg/L, pH=7). Caolinita estable. Aguas de flujos muy profundos son bicarbonatadas sódicas, semejantes a las aguas del Acuífero Guarani confinado – probable flujo ascendente a través de fracturas. Las aguas de flujo somero son bicarbonatadas cálcicas a cálcico-sódicas (TDS=85 mg/L, pH=6.3). Las aguas de flujo profundo (>100 m) son bicarbonatadas sódicas (TDS=120 mg/L, pH>8). Carbonatos saturados en profundidad; enriquecimiento de sodio en profundidad debido a intercambio iónico de sodio por calcio.</p>
Sedimentos compuestos por arenas cuarzosas, arcillominerales (caolinita) poco reactivos y gibsita, resultado de la hidrólisis total de aluminosilicatos	
Rocas ígneas y metamórficas variadas, fuertemente lixivias e intemperizadas (lateritas) en superficie.	
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo 1 – arenas, limos, arcillas y cascalhos, con mineralogía poco reactiva a los procesos de intemperismo • Tipo 2 – sedimentos de las aguas Tipo 1, más probable influencia de rocas gneissicas del basamento cristalino 	
Espesa secuencia de formaciones sedimentarias compuestas por areniscas, limolitas, arcillas y calizas	
Gneises y granitos. La meteorización química prevalece en el litoral (más húmedo); la meteorización física prevalece en el interior (clima semiárido)	
<ul style="list-style-type: none"> • Esquistos, gneises, migmatitas y granitos del basamento cristalino, conteniendo feldespato potásico, albita, anortita, micas, piroxenos y anfíboles • Rocas alcalinas raras (Araxá y Poços de Caldas): flogopitas/carbonatitas y foiaitos/fonólitos, pudiendo contener minerales accesorios importantes, como barita, pirita y fluorita • Rocas metasedimentarias de bajo grado (incluye Cuenca de San Francisco). • Dolomitas, filitas dolomíticas, calcáreos, sílice y minerales de hierro con pirita • Depósitos fluviales cenozoicos: arenas, limos y arcillas. Niveles de materia orgánica potencialmente asociados con depósitos arcillosos. 	
• Acuífero Guarani: Arenas cuarzosas fluviales y eólicas	
• Acuífero Serra Geral: Basaltos toleíticos con plagioclasa cálcica y piroxeno (augita)	
• Acuífero Baurú: Arenitas fluviales con lentejones de limolitas y arcillolitas con cementación caliza	

Tabla 4. Geología y procesos hidrogeoquímicos actuantes en las principales provincias acuíferas brasileñas
Table 4. *Geology and hydrogeochemistry processes of the main Brazilian aquifers*

co-magnésicas. Acuíferos próximos a la región costera, en oposición a las aguas interiores, son más ricos en iones cloruro y sodio.

Regionalmente, es posible identificar problemas asociados al exceso de algunos iones. En algunas áreas de la Cuenca del Paraná, se observan concentraciones excesivas de flúor (hasta 13 mg/L), principalmente en el Sistema Acuífero Guaraní, y en las rocas basálticas de la Formación Serra Geral. En el Noreste brasileño, en la región interior, debido al clima semiárido, existen extensas áreas de aguas con elevada salinización. El hierro y el manganeso también se constituyen en contaminantes naturales en áreas restringidas de acuíferos sedimentarios cenozoicos, incluyendo los litorales.

Usos del agua

El caudal extraído por fuentes superficiales y subterráneas para usos consuntivos en Brasil, tomando como referencia el año 2000, es de 1.592 m³/s. Cerca de 841 m³/s (53% del total) son efectivamente consumidos y 751 m³/s retornan a las cuencas. La irrigación es la principal consumidora de agua, respondiendo por 69% del caudal efectivamente consumido (580 m³/s). El abastecimiento urbano representa el 11%, el ganadero también otro 11%, el industrial un 7% y el rural, 2% (ANA, 2005a). Para el año 2000, se prevé una superficie regada de, aproximadamente, 3,7 millones de hectáreas en el Brasil (ONS, 2003).

A pesar de que no se dispone de datos específicos sobre la demanda de agua subterránea en el país, es evidente el importante papel que desempeñan. Se estima que existen por lo menos 400.000 captaciones en Brasil (Zoby y Matos, 2002). El 15,6% de los domicilios utilizan exclusivamente agua subterránea, 77,8% usan red de abastecimiento de agua (sin precisar el origen) y 6,6% usan otras formas de abastecimiento (IBGE, 2002b). Es importante destacar que, entre los domicilios que poseen red de abastecimiento de agua, una parte significativa usa agua subterránea. Datos no oficiales apuntan a que de 30 a 40% de la población brasileña se abastece a través de aguas subterráneas.

En los estados del Maranhão y Piauí más del 70% y 80%, respectivamente, de las ciudades usan agua de pozos y sondeos. En el Estado de São Paulo, cerca de 5,5 millones de personas son abastecidas diariamente por agua subterránea. De los 645 municipios de este Estado, 462 (71,6%) son abastecidos total o parcialmente con aguas subterráneas y 308 (47,7%) son totalmente abastecidos por este recurso hídrico (Silva *et al.*, 1998).

El agua subterránea también se emplea para el abastecimiento de comunidades rurales del semiárido de la Región Noreste y de la población urbana de diversas capitales del país, como Manaus, Belém, Fortaleza, Recife, Natal y Maceió (ANA, 2005b). En la Región Metropolitana de São Paulo, el agua subterránea es utilizada ampliamente por usuarios privados, en industrias, manzanas, residencias de alto standing y hoteles. Se estima que existen aproximadamente 9.000 captaciones de agua subterránea en operación (Hirata *et al.*, 2002), explotando 7,9 m³/s. En el año 2000 fueron perforados 400 nuevos sondeos solamente en esta región metropolitana. En la Región Metropolitana de Recife, se estima la existencia de 4.000 pozos, abasteciendo cerca de 60% de la población (Costa, 2000).

Las aguas minerales movilizan un mercado en torno de US\$ 450 millones/año, con crecimiento anual de 20% desde 1995. Existen 156 distritos hidrominerales con una producción del orden de 5.000 millones de L/año (Queiroz, 2004). El agua subterránea contribuye además al turismo a través de las aguas termales, en ciudades como Caldas Nova en el Estado de Goiás, Araxá, Poços de Caldas, São Lourenço y alrededores, en el Estado de Minas Gerais, y en varias ciudades del Estado de São Paulo, como Lindóia y Águas da Prata.

Problemática de origen antrópico

No existe en la actualidad un trabajo que sistematice los problemas de contaminación antrópica en el país. El Estado de São Paulo, donde existe un mayor número de fuentes potencialmente contaminantes del suelo y del agua subterránea, ha iniciado programas de caracterización de fuentes y estudios de caso de degradación de acuíferos. En este Estado se realizó la primera cartografía de vulnerabilidad de acuíferos y evaluación de cargas contaminantes (Hirata *et al.*, 1997).

El ión nitrato es la sustancia contaminante de mayor presencia en acuíferos, teniendo su origen en sistemas de saneamiento in situ y en el uso no controlado de fertilizantes nitrogenados en la agricultura. Esto se deriva del hecho de ser Brasil uno de los mejores productores agrícolas mundiales y tener un 50% de su población sin sistemas adecuados de alcantarillado.

Después del nitrato, los contaminantes más frecuentes son los combustibles líquidos, solventes aromáticos, PAHs, metales pesados, y solventes halogenados. Las bacterias y virus también son bastante comunes en sondeos y pozos mal construidos

y/o mantenidos. Esta situación es particularmente común en áreas periféricas de centros urbanos, donde las fosas negras y sépticas se encuentran a poca distancia de las captaciones de agua.

En áreas urbanas, las fuentes de contaminación más frecuentes son las fugas de combustibles en gasolineras. A pesar de que no representan el mayor y más problemático caso, el número de estaciones de servicio y la manipulación inadecuada de productos tóxicos ha hecho de esta actividad una fuente bastante común. Otro origen frecuente de contaminación son los vertidos, muchas veces no controlados, de residuos sólidos municipales (áreas de basureros y rellenos sanitarios), los cuales pueden contener productos peligrosos.

Perspectivas

Es creciente el uso de agua subterránea para el abastecimiento público y privado en todo el país. La baja disponibilidad y el alto costo del agua tratada, distribuida predominantemente por las compañías estatales y municipales de agua y alcantarillado, han contribuido a que la perforación de nuevos pozos sea ampliamente incrementada en las grandes ciudades. En la zona rural, la gran mayoría de las viviendas es abastecida por fuentes subterráneas. El uso agrícola de las aguas subterráneas es bastante limitado, aunque ha encontrado adeptos entre las culturas de mayor valor. Estudios de reconocimiento del potencial hídrico nacional se limitan a algunos estados brasileños y no a la totalidad del país. El mismo problema se experimenta para la calidad de las aguas de los acuíferos.

Esta falta de evaluación amplia y sistemática del potencial de los acuíferos es al mismo tiempo causa y efecto de la falta de políticas para el sector. Los programas de protección de acuíferos están, aún, muy desfasados respecto a la importancia real del recurso. En este sentido, la definición e implementación de políticas consistentes y pragmáticas de protección de las aguas subterráneas, en todos los estados brasileños, es urgente. Estas políticas deben priorizar la definición de áreas o zonas críticas donde:

- la explotación del agua subterránea es realizada intensivamente,
- el recurso es insustituible,
- existe una clara presencia de fuentes potenciales de contaminación, que pongan en peligro los acuíferos (Foster *et al.*, 2002).

Una gestión consecuente de la cantidad deberá partir del conocimiento de la hidráulica y del potencial acuífero, además de un inventario de usuarios y

de la adopción de autorización de perforación y de explotación de nuevas fuentes. En la gestión de calidad, la delimitación de áreas críticas deberá realizarse a través de mapas de vulnerabilidad de la contaminación de acuíferos, de la definición de perímetros de protección de captaciones para abastecimiento urbano, del reconocimiento y clasificación de las cargas contaminantes potenciales. Muy a pesar de que algunos estados ya dispongan de leyes específicas para las aguas subterráneas y reconozcan la importancia de su protección, inclusive con el establecimiento de perímetros de protección de pozos, ninguno de ellos adopta de forma práctica y eficiente este instrumento de protección.

El modelo adoptado en Brasil, de gestión de las cuencas hidrográficas, basada en comités y en agencias, ha demostrado ser adecuado para la superación de grandes desafíos de la sociedad brasileña en el sector de aguas subterráneas. Estos comités, con participación tripartita de la sociedad organizada (incluyendo usuarios), de los municipios que componen las cuencas y del Estado, ha permitido que los problemas de las mismas sean discutidos de forma más democrática y con responsabilidad compartida.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar sus agradecimientos a Doris Liliana Otalvaro (consultora privada) por sus sugerencias al texto y su traducción al castellano y a Thelma Samara (IGC-USP) por la ilustración.

Referencias

- ANA-Agência Nacional de Águas. 2005a. *Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil*. Brasília, 124 pp. Brasil, 15/09/2005, http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/Tela_Apresentacao.htm. e-mail: jlgzoby@ana.gov.br
- ANA-Agência Nacional de Águas. 2005b. *Panorama da qualidade das águas subterrâneas do Brasil*. Brasília, 74 pp. Brasil, 15/09/2005, http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/Tela_Apresentacao.htm. e-mail: jlgzoby@ana.gov.br
- Campos J. y Albuquerque Filho J. 2004. Aquífero São Paulo. En: *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. DAAE/IG-SMA/IPT/CPRM, São Paulo, Nota Explicativa.
- Castro, V.L.L., Oliveira, W., Lizárraga, G., Carlos, M., Diniz Filho, J. y Melo, J. 2004. Ações e procedimentos de gestão adotados no aquífero Jandaíra – Região de Baraúna/RN. *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Cuiabá, 13, CD-ROM.
- CETESB-COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. 2004. *Qualidade das águas subterrâneas*

- no Estado de São Paulo – 2001-2003. CETESB, São Paulo, 106pp.
- Cordani U., Sato K., Teixeira W., Tassinari, C. y Basei M. 2000. Crustal evolution of the South American Plate. En: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (ed.) *The Tectonic Evolution of South America*, Rio de Janeiro, 19-40.
- Costa, W.D. y Costa Filho, W.D. 2004. A gestão dos aquíferos costeiros de Pernambuco. *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Cuiabá, 13. CD-ROM.
- Costa, W.D. 2000. Riscos potenciais e reais decorrentes da super-exploração das águas subterrâneas no Recife – PE. *Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas*, 1. y *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Fortaleza, 11. ABAS/AHLSUD/IAH, CD-ROM.
- Dias, P. y Marengo, J. 1999. Águas atmosféricas. In Rebouças, A. Braga, B. Tundisi, J. *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. Ed. Escrituras. São Paulo. 65-114.
- Fernandes A., Perrotta M., Salvador E., Azevedo S., Gimenez A., Stefani F.L. y Paulon N. 2005. Aquíferos fraturados. En: *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. Governo do Estado de São Paulo. DAEE/IG-SMA/IPT/CPRM, São Paulo, Nota Explicativa.
- Fernandes A.J. y Rudolph D. 2001. The influence of Cenozoic Tectonics on the groundwater-production capacity of fractured zones: a case study in São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 9, 151-167.
- Foster, S., Hirata, R., D'Elia, M. y Paris, M. 2002. *Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environments agencies*. The World Bank Group. Washington (DC). 103 pp.
- Hidrosistemas/COPASA. 1995. *Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte.
- Hirata, R. y Ferreira, L. 2001. Os aquíferos da bacia hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, 31 (1), 43-50.
- Hirata, R., Ferrari, L., Ferreira, L. y Pede, M. 2002. La explotación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Alto Tietê: crónica de una crisis anunciada. *Boletín Geológico Minero*, 113 (3), 273-282.
- Hirata, R., Bastos, C. y Rocha, G. 1997. *Mapa de vulnerabilidade e risco de contaminação das águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. IG-SMA; CETESB; DAEE. São Paulo, 2 vol.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2002b. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – 2002*. Rio de Janeiro, CD-ROM.
- Jardim de Sá, E.F. 2000. Fraturamento no embasamento cristalino do Nordeste do Brasil: cronologia da deformação frágil, reativação neotectônica e implicações hidrogeológicas. *Joint World Congress on Groundwater*, Fortaleza, 1, CD-ROM.
- Mancuso, M. 2004. Aquífero Taubaté. In: Governo do Estado de São Paulo, *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. DAEE/IG-SMA/IPT/CPRM, São Paulo, Nota Explicativa.
- Neves, B. y Albuquerque, J. 2004. Tectônica e água subterrânea em rochas pré-cambrianas do nordeste do Brasil-a diversidade do sistema aquífero. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, 4 (2), 71-90.
- Oda, G. 2004. Aquífero Tubarão. In: Governo do Estado de São Paulo, *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. DAEE/IG-SMA/IPT/CPRM, São Paulo, Nota Explicativa.
- ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico. 2003. *Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água nas principais bacias do Sistema Interligado Nacional – SIN*. ONS/FAHMA-DREER/ANA/ANEEL/MME. Brasília.
- Queiroz, E. 2004. Diagnóstico de águas minerais e potáveis de mesa do Brasil. *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Cuiabá, 13, CD-ROM.
- Rio de Janeiro. 2001. *Projeto Rio de Janeiro*. CPRM/EMBRAPA/DRM-RJ, Rio de Janeiro, CD-ROM.
- Silva, M., Nicoletti, A., Rocca, A. y Casarini, D. 1998. Uso e qualidade das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo. *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, São Paulo, 10, ABAS, CD-ROM.
- Zalan, P.V. 2004. Evolução fanerozoica das bacias sedimentares brasileiras. In: V Mantesso-Neto, A Bartorelli, CDR Carneiro, BB de Brito-Neves (Org.), *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca Produções Culturais Ltda.
- Zoby, J.L.G. y Matos, B. 2002. Águas subterrâneas no Brasil e sua inserção na Política Nacional de Recursos Hídricos. *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Florianópolis, 12, ABAS, CD-ROM.

Recibido: octubre 2005.

Aceptado: diciembre 2005.