



## Parte II: Una mirada a los recursos mundiales de agua dulce

Todos dependemos del mismo elemento vital: el agua. Diferente por su propia naturaleza, puede estar en estado sólido, líquido o en vapor; está en el aire, en la superficie de la Tierra y en su subsuelo. El agua es siempre cambiante y da forma a una espectacular variedad de ecosistemas naturales.

Para los habitantes de la Tierra, la diversidad de este recurso significa también grandes diferencias en el bienestar y el desarrollo. A medida que degradamos la calidad de nuestra agua y modificamos los ecosistemas naturales de los que dependen la población y la vida, también amenazamos nuestra propia supervivencia.

Antes de investigar con detenimiento la compleja relación entre el agua y la población, esta parte ofrece una rápida mirada al estado actual de este recurso finito, pero dinámico y maravilloso, que es el agua dulce.



# 4

## El Ciclo Natural del Agua

Por: UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura)/OMM (Organización Meteorológica Mundial)

### Índice

<b>Medida de los recursos hídricos</b>	<b>67</b>
Tabla 4.1: La distribución del agua en el mundo	68
Figura 4.1: La red hidrológica mundial por tipos	68
Figura 4.2: Disponibilidad de agua en comparación con la población	69
Tabla 4.2: Disponibilidad de agua por persona y año	70
<b>Hidrología y recursos hídricos mundiales</b>	<b>75</b>
Mapa 4.1: La media de recursos hídricos a largo plazo según las cuencas hidrográficas	75
Cambio climático	76
Precipitación	76
Mapa 4.2: Precipitación media anual	77
Evaporación	77
Humedad del suelo	77
Aguas subterráneas	78
<i>La base científica: de mapas a modelos</i>	78
<i>Una gran reserva de agua dulce</i>	78
Tabla 4.3: Algunos grandes acuíferos en el mundo	79
Mapa 4.3: Recursos de aguas subterráneas en el mundo	79
<i>El auge de la explotación de los recursos hídricos subterráneos</i>	78
Tabla 4.4: Uso de las aguas subterráneas para riego en algunas naciones	80
<i>Recarga de los acuíferos; controles e incertidumbres</i>	80
Figura 4.3: Regímenes típicos del flujo de aguas subterráneas y tiempo de permanencia en condiciones climáticas semiáridas	80
<i>Explotación de las aguas subterráneas: el riesgo de la no sostenibilidad</i>	80
Tabla 4.5: Explotación de las aguas subterráneas y problemas asociados	81
<i>Problemas de calidad del agua subterránea natural</i>	81
<i>Vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación</i>	81
<i>El futuro: necesidades de gestión y control</i>	82
Glaciares y placas de hielo	82
Lagos y embalses	82
Tabla 4.6: Los mayores embalses del mundo	83
Caudal de los ríos	83
Mapa 4.4: Escorrentía media a largo plazo en un mapamundi en cuadrículas	84
Tabla 4.7: Los ríos más caudalosos del mundo según la descarga media anual con sus cargas	85

Calidad del agua	85
Tabla 4.8: La composición química del agua de ríos tipo (concentración en miligramos/litro)	85
Tabla 4.9: Los principales problemas de calidad del agua en el mundo	86
Impactos humanos sobre los recursos hídricos	87
Mapa 4.5: Carga de sedimentos por cuencas	88
Recursos de agua desalada	89
<b>La dimensión regional</b>	<b>90</b>
África	90
América del Norte	90
América Latina y el Caribe	90
Asia	91
Europa	91
Oceanía	92
<b>Conclusiones</b>	<b>92</b>
<b>Referencias</b>	<b>93</b>
<b>Algunos sitios web útiles</b>	<b>95</b>

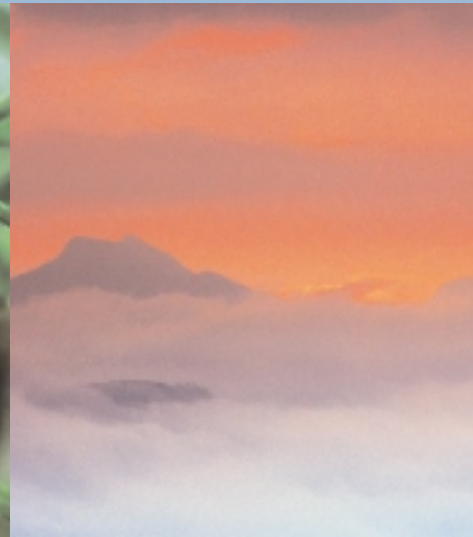


## Hicimos de agua a cada ser vivo

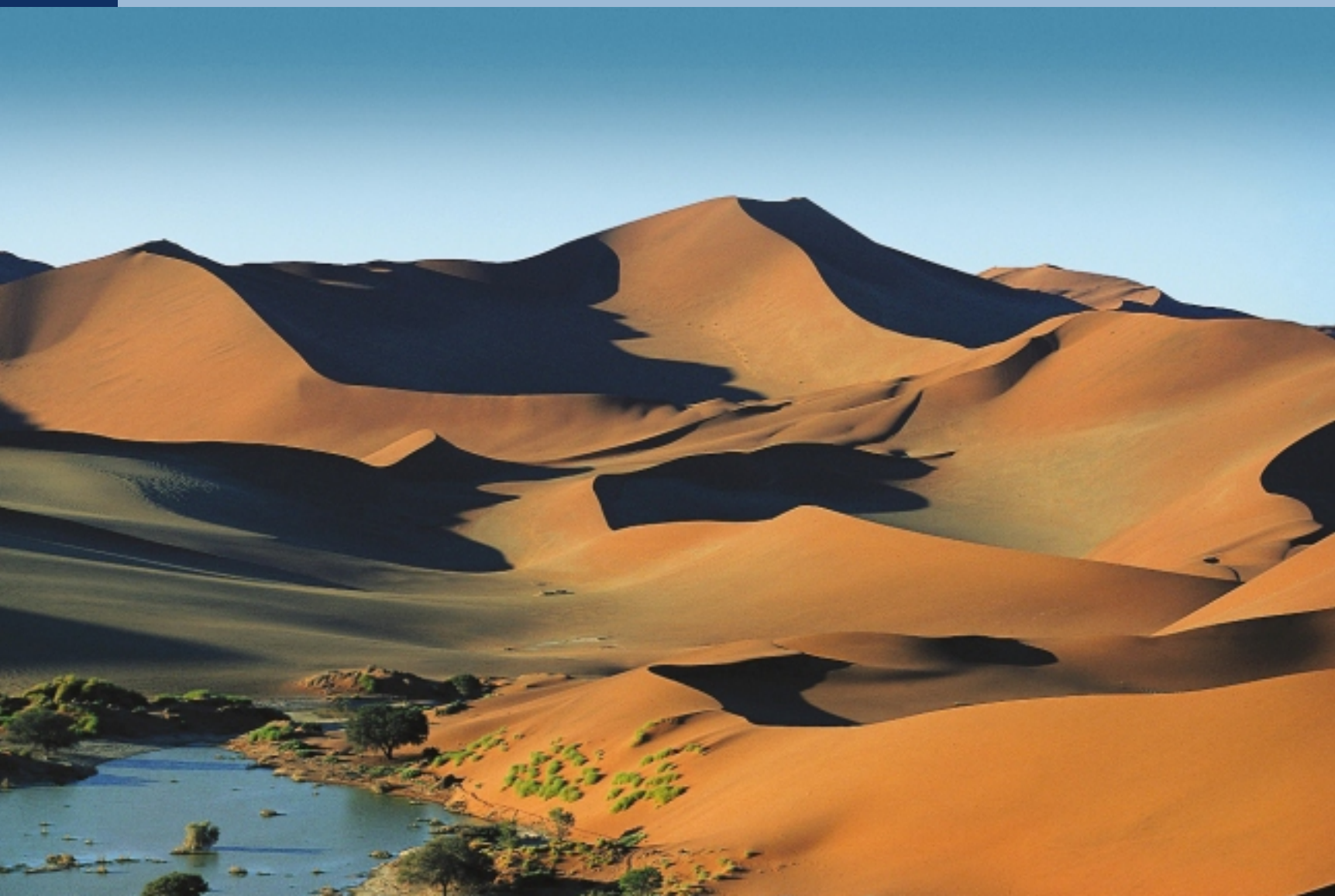
*El Corán (Sura 21:30)*

**EL AGUA ES LA SUSTANCIA MÁS ABUNDANTE** en este planeta. Distribuida en el mundo por el ciclo hidrológico, conducida por el ciclo energético, el flujo del agua impulsa la mayoría de los otros ciclos naturales y de las condiciones climáticas. El agua ha conformado la evolución de la Tierra (Dooge, 1983) y continúa dando forma a sus cambios, en claro contraste con otros cuerpos del sistema solar que carecen de agua.

Aunque la mayor parte del agua en el ciclo hidrológico terrestre es salina, es el agua dulce que se encuentra en la tierra en menor cantidad la que es un catalizador de la civilización. El agua dulce se precipita de la atmósfera a la tierra, donde puede almacenarse de forma líquida o sólida, y moverse lateral o verticalmente y pasa de una fase a otra por evaporación, condensación, congelación o deshielo. En la superficie terrestre, el agua puede viajar a muy diversas velocidades, normalmente por caminos ya establecidos (Young y otros, 1994) que pueden cambiar lentamente a través del tiempo. Estos caminos se combinan para formar redes de arroyos y ríos en las cuencas hidrológicas, de manera que el agua fluye por gravedad desde sus fuentes hasta el mar. Algunas cuencas, como la del Amazonas, son gigantescas, otras diminutas. Dependiendo de la naturaleza de la geología, de los suelos y de las tierras que cubren la cuenca, una variada proporción de este agua puede infiltrarse para recargar los acuíferos subterráneos, algunos de los cuales reemergen posteriormente para alimentar el cauce de los ríos. Estas aguas subterráneas, combinadas con las aguas superficiales, conforman los recursos de agua dulce del mundo; renovables, aunque también finitos, y vitales no sólo para los sistemas humanos, sino también para el medio ambiente terrestre.



La existencia de manantiales y otras fuentes de agua ha jugado un papel fundamental a la hora de determinar los asentamientos humanos. Los ríos y los lagos proporcionaron rutas de transporte para personas y mercancías, y a ellos más tarde se añadieron los canales. Los saltos de agua proporcionaron, y aún lo hacen, energía para la industria. Hoy en día el agua se utiliza con una gran cantidad de fines: la desalinización, el reciclaje y la reutilización de aguas residuales, así como la recogida del agua de lluvia, y métodos similares no convencionales, proporcionan o mejoran los recursos hídricos en ciertas localidades. El valor del agua, su coste y la competencia entre sus diferentes usos, incluyendo sus aspectos estéticos y culturales, añaden una nueva dimensión a la consideración de los recursos hídricos.



**L**OS ESTUDIOS SOBRE EL EQUILIBRIO DEL AGUA EN EL MUNDO comenzaron a finales del siglo XIX, y ejemplos de estos y posteriores estudios se encuentran en la obra de Lvovitch (1970) y Baumgartner y Reichel (1970). Korzun (1978) y más recientemente Shiklomanov (en preparación) han perfeccionado las estimaciones del presupuesto mundial y sus variaciones regionales. La tabla 4.1 muestra los volúmenes aproximados para el planeta y las diferentes fases del ciclo hidrológico, los volúmenes anuales reciclados y sus plazos medios de recuperación. Esta tabla resalta la enorme disparidad entre el inmenso volumen de agua salada y la pequeña fracción de agua dulce, así como el largo tiempo de permanencia del hielo polar y de las aguas subterráneas, frente a la breve permanencia del agua en la atmósfera. Se estima que alrededor del 96,5 por ciento del volumen total de agua en el mundo está en los océanos, y sólo el 2,5 por ciento es agua dulce, pero estas estimaciones y otras similares carecen de precisión. Cerca del 70 por ciento de este agua dulce se encuentra en las placas de hielo y en los glaciares del Antártico, Groenlandia y en las áreas montañosas, mientras que se calcula que algo menos del 30 por ciento del agua del mundo está almacenada en los acuíferos subterráneos. De nuevo, existe una gran diferencia entre estos grandes volúmenes, por un lado, y los mucho menores almacenados en ríos, lagos, embalses y en el suelo, además del agua de las plantas y de la atmósfera.

## Medida de los recursos hídricos

Más importantes aún son las grandes variaciones existentes en la distribución de agua en el planeta a través del tiempo y del espacio, y los problemas que tales variaciones plantean para la fiabilidad de las evaluaciones de los recursos hídricos. Estas evaluaciones dependen en gran medida de los datos hidrológicos obtenidos de las medidas y de los estudios realizados por las redes de instrumentos que se encuentran en la superficie terrestre, de los tomados por los sensores de los satélites y de otras fuentes. Estas evaluaciones son requisitos esenciales para el éxito del desarrollo y la gestión de los recursos hídricos (OMM/UNESCO, 1997).

Aunque se han realizado medidas hidrológicas en Egipto y China durante miles de años, las redes de instrumentos hidrológicos, tal y como las conocemos, se originaron en Europa y América del Norte en los siglos XVIII y XIX. En la actualidad, la mayoría de las redes nacionales constan de estaciones en las que variables como la precipitación, la evaporación, la humedad del suelo, el hielo, el sedimento, la calidad del agua, el nivel de las aguas subterráneas y el nivel y la descarga del agua de los ríos, se miden, de manera continua en algunos casos, y en otros diariamente, mensualmente o con menor frecuencia (OMM, 1994). Se han producido grandes avances en el control y conocimiento de las aguas subterráneas, como consecuencia de la ampliación de la cartografía geológica en el mundo y de la interpretación hidrogeológica de estos mapas. En algunos países, los sistemas terrestres de radar meteorológico se utilizan para determinar la distribución de las precipitaciones, mientras que los datos procedentes de satélites se utilizan para estimar la extensión de la capa de nieve, las precipitaciones, la humedad del suelo y otras variables. Sin embargo, muchas redes nacionales todavía constan de instrumentos y sensores que fueron introducidos por primera vez en el siglo XIX. Muchos de estos instrumentos padecen errores propios; carecen de mantenimiento y no son calibrados de manera regular. Las características de la red y de su desarrollo varían de un país a otro: en algunos, existen medidas de todas las variables hidrológicas y sistemas para acceder a datos recogidos a distancia; en otros casos, únicamente hay redes rudimentarias que toman muestras sólo de unas cuantas variables. La figura 4.1 muestra el número de estaciones de control que constituyen la red hidrológica mundial, por tipo y porcentaje del total (OMM, 1995). Por supuesto, estas redes no se utilizan sólo para evaluar los recursos hídricos, sino también para hacer previsiones y predicciones de inundaciones y sequías, para la protección contra la contaminación, conservación de agua, protección de las aguas subterráneas, navegación interior y también para otros fines.

El conocimiento de los recursos hídricos está en función de los datos disponibles; sin embargo, las distintas evaluaciones de los recursos hídricos que se han llevado a cabo, junto con otros estudios, indican invariablemente que los datos hidrológicos, incluidos los hidrogeológicos, no existen en muchas partes del mundo. De hecho, es una doble paradoja que haya menos datos sobre las áreas con más recursos hídricos, por ejemplo las montañas, y que los países de África, donde la demanda de agua está creciendo rápidamente, tengan menos posibilidades de obtener y gestionar los datos sobre el agua. Esta falta de datos afecta a las aguas superficiales y a las subterráneas, y tanto a la calidad como a la cantidad. De hecho, con la excepción de América Latina, la fiabilidad y la disponibilidad de los datos ha disminuido drásticamente desde mediados de los años 1980, especialmente en África, en Europa Oriental (Rodda, 1998) y en las proximidades del Ártico (Shiklomanov y otros, 2002); esto se debe principalmente a que las redes hidrológicas nacionales y otras asociadas se han degradado debido a la falta de inversión. Existen muchos países que carecen de datos sobre la química del agua, la productividad, la biodiversidad, los cambios temporales y otras expresiones biológicas similares sobre el estado del medio acuático. Los sistemas para almacenar, procesar y gestionar estos datos, así como para utilizarlos para evaluar los recursos hídricos y para otros fines, como la previsión de inundaciones, son a menudo rudimentarios.

Desde los años sesenta, tanto la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) como la Organización Meteorológica Mundial (OMM) han venido desarrollando programas de colaboración que están diseñados para mejorar la capacidad hidrológica nacional, especialmente en las naciones que lo necesitan. Estos son el Programa Hidrológico Internacional (PHI) y el Programa de Hidrología y Recursos Hídricos (HWRP). A escala mundial, el Sistema Mundial de Observación del Ciclo Hidrológico (WHYCOS) de la OMM, intenta estimular la recogida y gestión de datos hidrológicos a tiempo prácticamente real, en una serie de regiones con escasez de datos. Comenzando por Europa y avanzando región por región, el proyecto Regímenes de flujos determinados a partir de series de datos experimentales internacionales y de red (FRIEND) de la UNESCO (Gustard y Cole, 2002; van Lanen y Demuth, 2002; Gustard, 1997) sigue mejorando el proceso de archivo de datos y su uso para evaluar los recursos hídricos, predicción de inundaciones y otros aspectos en Europa, África, Asia y América Latina. En FRIEND participa también la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS), que ha sido socio del PHI desde su fundación en 1965. El PHI ha estimulado la interpretación hidrogeológica de mapas geológicos y otras áreas

Tabla 4.1: La distribución del agua en el mundo

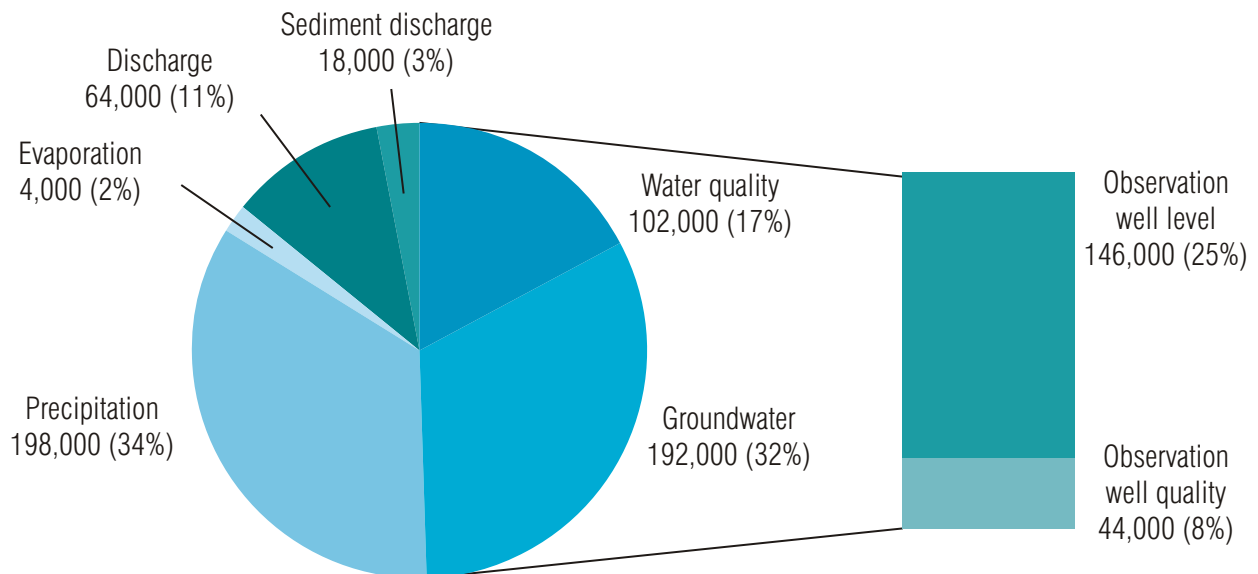
Lugar	Volumen (10 <sup>3</sup> Km <sup>3</sup> )	% del volumen total de la hidrosfera	% de agua dulce	Volumen reciclado anualmente (Km <sup>3</sup> )	Período de renovación, años
Océano	1.338.000	96,5	--	505.000	2.500
Aguas subterráneas (gravedad y capilaridad)	234.001	1,7		16.700	1.400
Aguas subterráneas predominantemente dulces	10.530	0,76	30,1		
Humedad del suelo	16,5	0,001	0,05	16.500	1
Glaciares y nieves perpetuas	24.064	1,74	68,7		
Antártida	21.600	1,56	61,7		
Groenlandia	2.340	0,17	6,68	2.477	9.700
Islas Árticas	83,5	0,006	0,24		
Regiones montañosas	40,6	0,003	0,12	25	1.600
Hielo superficial (permafrost)	300	0,022	0,86	30	10.000
Agua en los lagos:	76,4	0,013	--	10.376	17
Dulce	91	0,007	0,26		
Salada	85,4	0,006	--		
Marismas y pantanos	11,5	0,0008	0,03	2.294	5
Agua de los ríos	2,12	0,0002	0,006	43.000	16 días
Agua biológica	1,12	0,0001	0,003		--
Agua en la atmósfera	12,9	0,001	0,04	600.000	8 días
Volumen total en la hidrosfera	1.386.000	100	--		
Total de agua dulce	35.029,20	2,53	100		

<sup>1</sup> Excluyendo el agua en el Antártico, que se estima en 2 millones de Km<sup>3</sup>, incluyendo el agua predominantemente dulce de aproximadamente 1 millón de Km<sup>3</sup>.

Esta tabla muestra grandes disparidades: entre el gran volumen de agua salada y la pequeña fracción de agua dulce, entre el gran volumen de agua contenida en los glaciares y el agua almacenada en los acuíferos, y entre la cantidad de aguas subterráneas y el pequeño volumen de agua en los ríos, lagos y embalses.

Fuente: Shiklomanov, en preparación

Figura 4.1: La red hidrológica mundial por tipos



Esta figura muestra el número de estaciones de control que constituyen la red hidrológica mundial.

Fuente: OMM, 1995

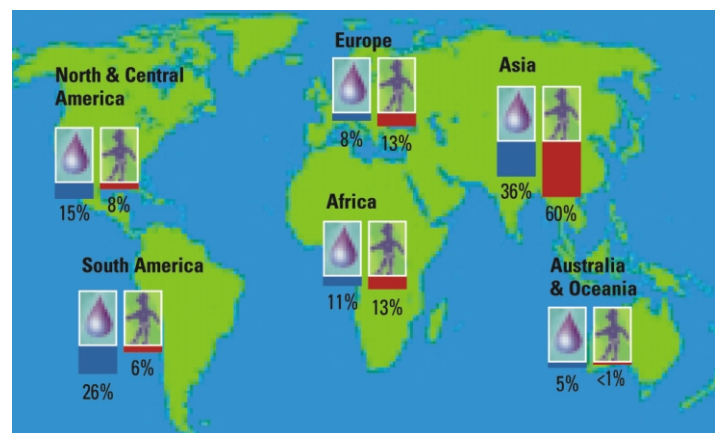


de la hidrogeología, mediante la cooperación con la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) (Struckmeier y Margat, 1995). Otro ejemplo de programa de colaboración es el Sistema de Vigilancia del Medio Ambiente Mundial (GEMS) de PNUMA/OMS/UNESCO/OMM (OMS, 1991) cuyo objetivo es mejorar los datos sobre la calidad del agua del mundo. El archivo del GEMS contiene 1,6 millones de datos, pero su cobertura es pobre para África, Asia Central y las desembocaduras de los ríos. Desgraciadamente, parecen faltar también equivalentes biológicos similares. Sin embargo, existen otras iniciativas internacionales, como por ejemplo el Sistema Mundial de Observación Terrestre (GTOS), que probablemente proporcionarán un mejor control de los sistemas acuáticos. La UNESCO, la OMM y otros organismos de las Naciones Unidas han diseñado una serie de programas de asistencia técnica de ámbito nacional y de las cuencas hidrográficas, que funcionan desde los años 60, para ayudar a los países en desarrollo a gestionar y evaluar sus recursos hídricos de forma más eficaz.

Existe también una serie de avances, producto del uso de sensores remotos que mejoran la posibilidad de controlar un número cada vez mayor de variables hidrológicas, y permiten superar las dificultades para determinar patrones espaciales significativos utilizando los resultados de las observaciones realizadas desde la superficie terrestre (Schultz y Engman, 2001). Los datos proporcionados por los Sistemas de Información Geográfica (GIS), junto con los modelos digitales del terreno, están adquiriendo gran importancia. Por ejemplo, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)/UNESCO han preparado ejercicios de autoaprendizaje en la aplicación de los GIS a temas hidrológicos en África occidental utilizando Arcview (Maiden y Reed, 1996). Los datos obtenidos con técnicas de trazadores han demostrado ser muy útiles para cuantificar las fuentes de las corrientes, los tiempos de permanencia y para explorar el curso de las corrientes. La aparición de centros de datos mundiales, tales como el Centro de Datos Mundiales sobre Escorrentías (GRDC), ha facilitado el problema del acceso a los datos mundiales y nacionales. El Centro Mundial de Climatología de las Precipitaciones (GPCC) recoge datos sobre las precipitaciones, y existe una propuesta para la creación de un centro dedicado al estudio de las aguas subterráneas que tendrá su sede en Holanda, bajo los auspicios de la UNESCO y la OMM. Otro ejemplo es el Servicio Mundial de Vigilancia de Glaciares (WGMS) que recoge datos de las fluctuaciones de determinados glaciares y cuyos datos se han venido publicando desde 1967 (Kasser, 1967). Ahora, la aplicación de imágenes del Landsat, los GIS y los modelos digitales del terreno en ciertas partes del mundo permiten un rápido análisis de los cambios en los glaciares (Paul, 2002). El Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera (IGBP), del Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU), ha fomentado también varias iniciativas dedicadas a la recogida de grupos de datos mundiales, algunos relacionados con la hidrología, y ha colaborado con programas de ayuda en curso, como por ejemplo la Red Mundial de Isótopos en las Precipitaciones (GNIP) (Gat y Oeschger, 1995), que desde 1961 proporciona mensualmente series de datos de isótopos procedentes de 550 estaciones gestionadas por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y la OMM. De hecho, la IAEA ha sido la primera en hacer un esfuerzo para la

aplicación de isótopos en hidrología para, por ejemplo, mejorar la comprensión de los acuíferos en muchos países en desarrollo mediante la recogida y análisis de los datos sobre cantidades, fuentes de recarga y antigüedad de estas aguas subterráneas. Uninayar y Schiffer (1997) crearon un compendio de los sistemas diseñados para observar la atmósfera de la tierra, la hidrosfera y la superficie terrestre, mientras que el Global Databases Metadata System de la IAHS, proporciona un listado de metadatos de los datos principales relacionados con el agua. Internet es una herramienta fundamental para acceder a estos datos, a través, por ejemplo, del AQUASTAT de la FAO o del Sistema de Información de Actividades de Recursos Hídricos y del Ciclo Hidrológico de América Latina y el Caribe (LACHYCIS). La tabla 4.2 y la figura 4.2 presentan una visión general de los recursos hídricos disponibles en el mundo. A lo largo de los últimos veinte o treinta años, se ha producido un considerable avance en la comprensión de los recursos hídricos, especialmente gracias a los avances en los modelos. En la actualidad, existe una amplia variedad de modelos y se están desarrollando más, entre los que se encuentran: modelos de aguas de lluvia y escorrentía, modelos de acuíferos, modelos de ecosistemas y de cuencas, muchos de los cuales incluyen control de la calidad del agua. Existen modelos de procesos, modelos hidroecológicos y modelos de gestión respaldados por sistemas de apoyo a la toma de decisiones y sistemas expertos. Hay modelos estocásticos y deterministas con una complejidad que va desde los más simples a los muy sofisticados, con base física con una alta resolución de la superficie de la tierra, incluyendo la interfaz superficie/suelo/vegetación/atmósfera y los procesos que operan allí. Los datos de los satélites se están empleando en diversos tipos de modelos y demuestran ser muy útiles a la hora de evaluar la calidad del agua en las grandes cuencas.

Figura 4.2: Disponibilidad de agua en comparación con la población



La visión mundial de la disponibilidad de agua en comparación con la población acentúa las diferencias entre los continentes, y en particular la presión sobre el continente asiático, que tiene más de la mitad de la población y sólo un 36% de los recursos hídricos del mundo

América del Norte y Central América del Sur Europa Asia África Australia y Oceanía

Fuente: página web de la UNESCO / PHI, Oficina Regional para América Latina y el Caribe

# El Ciclo Natural del Agua

Tabla 4.2: Disponibilidad de agua por persona y año

Número de orden	Continente	País	Recursos hídricos				Terreno			Población		
			Total de los recursos hídricos internos renovables (Km <sup>3</sup> /año) <sup>1</sup>	Aguas subterráneas: producidas internamente (Km <sup>3</sup> /año) <sup>2</sup>	Aguas superficiales: producidas internamente (Km <sup>3</sup> /año) <sup>3</sup>	Combinación: aguas superficiales y subterráneas (Km <sup>3</sup> /año) <sup>4</sup>	Recursos hídricos: total renovable per cápita (m <sup>3</sup> /año)	Tasa de dependencia (%)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Población en 2000 (1.000 hab.)	Densidad de población en 2000 (hab/Km <sup>2</sup> )	
1	América Central y del Norte	Groenlandia	603	--	--	--	603	10.767.857	0	341.700	56	0
2	América Central y del Norte	Estados Unidos, Alaska	800	--	--	--	980	1.563.168	18	1.481.353	627	0,4
3	Suramérica	Guayana Francesa	134	--	--	--	134	812.121	0	88.150	165	2
4	Europa	Islandia	170	24	166	20	170	609.319	0	100.250	279	3
5	Suramérica	Guyana	241	103	241	103	241	316.689	0	196.850	761	4
6	Suramérica	Surinam	88	80	88	80	122	292.566	28	156.000	417	3
7	África	Congo	222	198	222	198	832	275.679	73	341.500	3.018	9
8	Asia	Papúa N. Guinea	801	--	801	--	801	166.563	0	452.860	4.809	11
9	África	Gabón	164	62	162	60	164	133.333	0	257.670	1.230	5
10	Oceanía	Islas Salomón	44,7	--	--	--	44,7	100.000	0	27.990	447	16
11	América Central y del Norte	Canadá	2.850,00	370	2.840,00	360	2.902,00	94.353	2	9.220.970	30.757	3
12	Oceanía	Nueva Zelanda	327	--	--	--	327	86.554	0	267.990	3.778	14
13	Europa	Noruega	382	96	376	90	382	85.478	0	306.830	4.469	15
14	América Central y del Norte	Belice	16	--	--	--	18,56	82.102	14	22.800	226	10
15	África	Liberia	200	60	200	60	232	79.643	14	96.320	2.913	30
16	Suramérica	Bolivia	303,53	130	277,41	103,88	622,53	74.743	51	1.084.380	8.329	8
17	Suramérica	Perú	1.616,00	303	1.616,00	303000	1.913,00	74.546	16	1.280.000	25.662	20
18	Asia	Laos	190,42	37,9	190,42	37,9	333,55	63.184	43	230.800	5.279	23
19	Suramérica	Paraguay	94	41	94	41	336	61.135	72	397.300	5.496	14
20	Suramérica	Chile	884	140	884	140	922	60.614	4	748.800	15.211	20
21	África	Guinea Ecuatorial	26	10	25	9	26	56.893	0	28.050	457	16
22	América Central y del Norte	Panamá	147,42	21	144,11	17,69	147,98	51.814	0	74.430	2.856	38
23	Suramérica	Venezuela	722,45	227	700,14	204,69	1.233,17	51.021	41	882.050	24.170	27
24	Suramérica	Colombia	2.112,00	510	2.112,00	510	2.132,00	50.635	1	1.038.700	42.105	41
25	Suramérica	Brasil	5.418,00	1.874,00	5.418,00	1.874,00	8.233,00	48.314	34	8.456.510	170.406	20
26	Asia	Bután	95	--	95	--	95	45.564	0	47.000	2.085	44
27	Suramérica	Uruguay	59	23	59	23	139	41.654	58	175.020	3.337	19
28	África	República Centroafricana	141	56	141	56	144,4	38.849	2	622.980	3.717	6
29	América Central y del Norte	Nicaragua	189,74	59	185,74	55	196,69	38.787	4	121.400	5.071	42
30	Asia	Camboya	120,57	17,6	115,97	13	476,11	36.333	75	176.520	13.104	74
31	África	Sierra Leona	160	50	150	40	160	36.322	0	71.620	4.405	62
32	Oceanía	Fiyi	28,55	--	--	--	28,55	35.074	0	18.270	814	45
33	Suramérica	Ecuador	432	134	432	134	432	34.161	0	276.840	12.646	46
34	Europa	Rusia	4.312,70	788	4.036,70	512	4.507,25	30.980	4	16.888.500	145.491	9

35	América Central y del Norte	Costa Rica	112,4	37,3	75,1	0	112,4	27.932	0	51.060	4.024	79
36	África	Guinea	226	38	226	38	226	27.716	0	245.720	8.154	33
37	Asia	Malasia	580	64	566	50	580	26.105	0	328.550	22.218	68
38	Asia	Brunei	8,50	0,1	8,5	0,1	8,5	25.915	0	5.270	328	62
39	África	Guinea-Bissau	16	14	12	10	31	25.855	48	28.120	1.199	43
40	Oceanía	Australia	492	72	440	20	492	25.708	0	7.682.300	19.138	2
41	África	Rep. D. del Congo	900	421	899	420	1.283,00	25.183	30	2.267.050	50.948	22
42	Europa	Croacia	37,7	11	27,2	0,5	105,5	22.669	64	55.920	4.654	83
43	Suramérica	Argentina	276	128	276	128	814	21.981	66	2.736.690	37.032	14
44	Asia	Myanmar	880,6	156,00	874,6	150	1.045,60	21.898	16	657.550	47.749	73
45	Europa	Finlandia	107	2,2	106,8	2	110	21.268	3	304.590	5.172	17
46	África	Madagascar	337	55	332	50	337	21.102	0	581.540	15.970	27
47	Europa	Yugoslavia	44	3	42,4	1,4	208,5	19.759	79	102.000	10.552	103
48	Europa	Suecia	171	20	170	19	174	19.679	2	411.620	8.842	21
49	África	Camerún	273	100	268	95	285,5	19.192	4	465.400	14.876	32
50	Europa	Eslovenia	18,67	13,5	18,52	13,35	31,87	16.031	41	20.120	1.988	99
51	África	Santo Tomé y Príncipe	2,18	--	--	--	2,18	15.797	0	960	138	144
52	América Central y del Norte	Estados Unidos, Hawái	18,4	13,2	5,2	0	18,4	15.187	0	16.636	1.212	73
53	América Central y del Norte	Honduras	95,93	39	86,92	29,99	95,93	14.949	0	111.890	6.417	57
54	Europa	Letonia	16,74	2,2	16,54	2	35,45	14.642	53	62.050	2.421	39
55	África	Angola	184	72	182	70	184	14.009	0	1.246.700	13.134	11
56	Asia	Mongolia	34,8	6,1	32,7	4	34,8	13.739	0	1.566.500	2.533	2
57	Europa	Irlanda	49	10,8	48,2	10	52	13.673	6	68.890	3.803	55
58	Asia	Indonesia	2.838,00	455	2.793,00	410	2.838,00	13.381	0	1.811.570	212.092	117
59	Europa	Albania	26,9	6,2	23,05	2,35	41,7	13.306	35	27.400	3.134	114
60	Asia	Georgia	58,13	17,23	56,9	16	63,33	12.035	8	69.700	5.262	75
61	África	Mozambique	99	17	97	15	216,11	11.814	54	784.090	18.292	23
62	Asia	Vietnam	366,5	48	353,5	35	891,21	11.406	59	325.490	78.137	240
63	América Central y del Norte	Estados Unidos	2.814,40	--	--	--	3.069,40	10.837	--	9.158.960	283.230	31
64	Europa	Hungría	6	6	6	6	104	10.433	94	92.340	9.968	108
65	África	Namibia	6,16	2,1	4,1	0,04	17,94	10.211	66	823.290	1.757	2
66	África	Zambia	80,2	47	80,2	47	105,2	10.095	24	743.390	10.421	14
67	América Central y del Norte	Guatemala	109,2	33,7	100,7	25,2	111,27	9.773	2	108.430	11.385	105
68	Europa	Austria	55	6	55	6	77,7	9.616	29	82.730	8.080	98
69	Europa	Rumania	42,3	8,3	42	8	211,93	9.445	80	230.340	22.438	97
70	Europa	Bosnia- Herzegovina	35,5	--	--	--	37,5	9.429	5	51.000	3.977	78
71	África	Botsuana	2,9	1,7	1,7	0,5	14,4	9.345	80	566.730	1.541	3
72	Europa	Eslovaquia	12,6	1,73	12,6	1,73	50,1	9.279	75	48.080	5.399	112
73	Europa	Estonia	12,71	4	11,71	3	12,81	9.195	1	42.270	1.393	33
74	Asia	Nepal	198,2	20	198,2	20	210,2	9.122	6	143.000	23.043	161
75	África	Mali	60	20	50	10	100	8.810	40	1.220.190	11.351	9
76	Asia	Bangladesh	105	21,09	83,91	0	1.210,64	8.809	91	130.170	137.439	1.056
77	Europa	Suiza	40,4	2,5	40,4	2,5	53,5	7.462	24	39.550	7.170	181

# El Ciclo Natural del Agua

Tabla 4.2: Continuación

Número de orden	Continente	País	Total de los recursos hídricos internos renovables (Km <sup>3</sup> /año) <sup>1</sup>	Recursos hídricos			Recursos hídricos: total renovable per cápita (m <sup>3</sup> /año)	Tasa de dependencia (%)	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Población en 2000 (1.000 hab.)	Densidad de población en 2000 (hab/Km <sup>2</sup> )	
				Aguas subterráneas: producidas internamente (Km <sup>3</sup> /año) <sup>2</sup>	Aguas superficiales: producidas internamente (Km <sup>3</sup> /año) <sup>3</sup>	Combinación: aguas superficiales y subterráneas (Km <sup>3</sup> /año) <sup>4</sup>						
78	América Central y del Norte	Estados Unidos, continental	2.000,00	1.300,00	1.862,00	1.162,00	2.071,00	7.407	3	7.663.984	279.583	36
79	Europa	Luxemburgo	1	0,08	1	0,08	3,1	7.094	68	2.586	437	169
80	Europa	Grecia	58	10,3	55,5	7,8	74,25	6.988	22	128.900	10.610	82
81	África	Reunión	5	2,8	4,5	2,3	5	6.935	0	2.500	721	288
82	Europa	Portugal	38	4	38	4	68,7	6.859	45	91.500	10.016	109
83	Asia	Kazajstán	75,42	6,1	69,32	0	109,61	6.778	31	2.699.700	16.172	6
84	Europa	Lituania	15,56	1,2	15,36	1	24,9	6.737	38	64.800	3.696	57
85	Asia	Tailandia	210	41,9	198,79	30,69	409,94	6.527	49	510.890	62.806	123
86	Asia	Filipinas	479	180	444	145	479	6.332	0	298.170	75.653	254
87	África	Gambia	3	0,5	3	0,5	8	6.140	63	10.000	1.303	130
88	Europa	Países Bajos	11	4,5	11	4,5	91	5.736	88	33.880	15.864	468
89	Europa	Bielorrusia	37,2	18	37,2	18	58	5.694	36	207.480	10.187	49
90	África	Chad	15	11,5	13,5	10	43	5.453	65	1.259.200	7.885	6
91	Asia	Turkmenistán	1,36	0,36	1	0	24,72	5.218	97	469.930	4.737	10
92	África	Costa de Marfil	76,7	37,7	74	35	81	5.058	5	318.000	16.013	50
93	África	Suazilandia	2,64	--	--	--	4,51	4.876	41	17.200	925	54
94	América Central y del Norte	México	409	139	361	91	457,22	4.624	11	1.908.690	98.872	52
95	África	Mauritania	0,4	0,3	0,1	0	11,4	4.278	96	1.025.220	2.665	3
96	África	Senegal	26,4	7,6	23,8	5	39,4	4.182	33	192.530	9.421	49
97	Asia	Kirguistán	46,45	13,6	44,05	11,2	20,58	4.182	0	191.800	4.921	26
98	América Central y del Norte	El Salvador	17,78	6,15	17,6	5,97	25,26	4.024	30	20.720	6.278	303
99	África	Benin	10,3	1,8	10	1,5	24,8	3.954	58	110.620	6.272	57
100	Asia	Azerbaiyán	8,12	6,51	5,96	4,35	30,28	3.765	73	86.600	8.041	93
101	América Central y del Norte	Jamaica	9,4	3,89	5,51	0	9,4	3.651	0	10.830	2.576	238
102	Asia	Corea del Norte	67	13	66	12	77,14	3.464	13	120.410	22.268	185
103	Asia	Turquia	227	69	186	28	229,3	3.439	1	769.630	66.668	87
104	Europa	Francia	178,5	100	176,5	98	203,7	3.439	12	550.100	59.238	108
105	América Central y del Norte	Cuba	38,12	6,48	31,64	0	38,12	3.404	0	109.820	11.199	102
106	Asia	Japón	430	27	420	17	430	3.383	0	364.500	127.096	349
107	Europa	Italia	182,5	43	170,5	31	191,3	3.325	5	294.110	57.530	196
108	Asia	Irak	35,2	1,2	34	0	75,42	3.287	53	437.370	22.946	52
109	Asia	Togo	11,5	5,7	10,8	5	14,7	3.247	22	54.390	4.527	83
110	Europa	Macedonia (ex-República Yugoslava)	5,4	--	5,4	--	6,4	3.147	16	25.430	2.034	80

111	África	Níger	3,5	2,5	1	0	33,65	3.107	90	1.266.700	10.832	9
112	Asia	Afganistán	55	--	--	--	65	2.986	15	652.090	21.765	33
113	América Central y del Norte	Trinidad y Tobago	3,84	--	--	--	3,84	2.968	0	5.130	1.294	252
114	Asia	Pakistán	248	55	243	50	418,27	2.961	41	770.880	141.256	183
115	África	Uganda	39	29	39	29	66	2.833	41	197.100	23.300	118
116	Europa	Ucrania	53,1	20	50,1	17	139,55	2.815	62	579.350	49.568	86
117	Europa	España	111,2	29,9	109,5	28,2	111,5	2.794	0	499.440	39.910	80
118	Asia	Armenia	9,07	4,2	6,27	1,4	10,53	2.780	14	28.200	3.787	134
119	África	Ghana	30,3	26,3	29	25	53,2	2.756	43	227.540	19.306	85
120	Europa	Moldavia	1	0,4	1	0,4	11,65	2.712	91	32.910	4.295	131
121	Europa	Bulgaria	21	6,4	20,1	5,5	21,3	2.680	1	110.550	7.949	72
122	Asia	Sri Lanka	50	7,8	49,2	7	50	2.642	0	64.630	18.924	293
123	Asia	Tayikistán	66,3	6	63,3	3	15,98	2.625	17	140.600	6.087	43
124	África	Tanzania	82	30	80	28	91	2.591	10	883.590	35.119	40
125	África	Nigeria	221	87	214	80	286,2	2.514	23	910.770	113.862	125
126	América Central y del Norte	República Dominicana	21	11,7	21	11,7	21	2.507	0	48.380	8.373	173
127	Europa	Reino Unido	145	9,8	144,2	9	147	2.465	1	240.880	59.634	248
128	Asia	China	2.879,40	891,8	2.715,50	727,9	2.896,57	2.259	1	9.327.420	1.282.437	137
129	África	Sudán	30	7	28	5	64,5	2.074	77	2.376.000	31.095	13
130	África	Uzbekistán	16,34	8,8	9,54	3	50,41	2.026	77	414.240	24.881	60
131	Asia	Irán	128,5	49,3	97,3	18,1	137,51	1.955	7	1.622.000	70.330	43
132	África	Mauricio	2,21	0,68	2,03	0,5	2,21	1.904	0	2.030	1.161	572
133	Asia	India	1.260,54	418,54	1.222,00	380	1.896,66	1.880	34	2.973.190	1.008.937	339
134	Europa	Alemania	107	45,7	106,3	45	154	1.878	31	356.680	82.017	230
135	América Central y del Norte	Puerto Rico	3,4	--	--	--	7,1	1.814	0	8.870	3.915	441
136	Europa	Bélgica	12	0,9	12	0,9	18,3	1.786	34	30.230	10.249	339
137	África	Etiopía	110	40	110	40	110	1.749	0	1.000.000	62.908	63
138	América Central y del Norte	Haití	13,01	2,16	10,85	0	14,03	1.723	7	27.560	8.142	295
139	África	Eritrea	2,8	--	--	--	6,3	1.722	56	101.000	3.659	36
140	África	Comores	1,2	1	0,2	0	1,2	1.700	0	2.230	706	317
141	Asia	Siria	7	4,2	4,8	2	26,26	1.622	80	183.780	16.189	88
142	Europa	Polonia	53,6	12,5	53,1	12	61,6	1.596	13	304.420	38.605	127
143	África	Zimbabue	14,1	5	13,1	4	20	1.584	30	386.850	12.627	33
144	África	Somalia	6	3,3	5,7	3	13,5	1.538	56	627.340	8.778	14
145	África	Malawi	16,14	1,4	16,14	1,4	17,28	1.528	7	94.080	11.308	120
146	Asia	Corea del Sur	64,85	13,3	62,25	10,7	69,7	1.491	7	98.730	46.740	473
147	África	Lesotho	5,23	0,5	5,23	0,5	3,02	1.485	0	30.350	2.035	67
148	Europa	República Checa	13,15	1,43	13,15	1,43	13,15	1.280	0	77.280	10.272	133
149	Asia	Libano	4,8	3,2	4,1	2,5	4,41	1.261	1	10.230	3.496	342
150	África	Suráfrica	44,8	4,8	43	3	50	1.154	10	1.221.040	43.309	35
151	Europa	Dinamarca	6	4,3	3,7	2	6	1.128	0	42.430	5.320	125
152	África	Burkina Faso	12,5	9,5	8	5	12,5	1.084	0	273.600	11.535	42

# El Ciclo Natural del Agua

Tabla 4.2: Continuación

Número de orden	Continente	País	Total de los recursos hídricos internos renovables (Km <sup>3</sup> /año) <sup>1</sup>	Recursos hídricos				Recursos hídricos: total renovable per cápita (m <sup>3</sup> /año)	Tasa de dependencia (%)	Terreno		Población en 2000 (1.000 hab.)	Densidad de población en 2000 (hab/Km <sup>2</sup> )
				Aguas subterráneas: producidas internamente (Km <sup>3</sup> /año) <sup>2</sup>	Aguas superficiales: producidas internamente (Km <sup>3</sup> /año) <sup>3</sup>	Combinación: aguas superficiales y subterráneas (Km <sup>3</sup> /año) <sup>4</sup>	Recursos hídricos: total renovable (Km <sup>3</sup> /año)*			Superficie (Km <sup>2</sup> )	Superficie (Km <sup>2</sup> )		
153	Asia	Chipre	0,78	0,41	0,56	0,19	0,78	995	0	9.240	784	85	
154	África	Kenia	20,2	3	17,2	0	30,2	985	33	569.140	30.669	54	
155	África	Marruecos	29	10	22	3	29	971	0	446.300	29.878	67	
156	África	Egipto	1,8	1,3	0,5	0	58,3	859	97	995.450	67.884	68	
157	América Central y del Norte	Antigua y Barbuda	0,05	--	--	--	0,05	800	0	440	65	148	
158	África	Cabo Verde	0,3	0,12	0,18	0	0,3	703	0	4.030	427	106	
159	África	Ruanda	5,2	3,6	5,2	3,6	5,2	683	0	24.670	7.609	308	
160	América Central y del Norte	San Cristóbal y Nevis	0,02	0,02	0,004	0	0,02	621	0	360	38	106	
161	África	Burundi	3,6	2,1	3,5	2	3,6	566	0	25.680	6.356	248	
162	África	Túnez	4,15	1,45	3,1	0,4	4,56	482	9	155.360	9.459	61	
163	África	Argelia	13,9	1,7	13,2	1	14,49	478	4	2.381.740	30.291	13	
164	África	Yibuti	0,3	0,02	0,3	0,02	0,3	475	0	23.180	632	27	
165	Asia	Omán	0,99	0,96	0,93	0,9	0,99	388	0	212.460	2.538	12	
166	América Central y del Norte	Barbados	0,08	0,07	0,01	0,002	0,08	307	0	430	267	621	
167	Asia	Israel	0,75	0,5	0,25	0	1,67	276	55	20.620	6.040	293	
168	Asia	Yemen	4,1	1,5	4	1,4	4,1	223	0	527.970	18.349	35	
169	Asia	Bahrein	0,004	0	0,004	0	0,12	181	97	690	640	928	
170	Asia	Jordania	0,68	0,5	0,4	0,22	0,88	179	23	88.930	4.913	55	
171	Asia	Singapur	0,6	--	--	--	0,6	149	--	610	4.018	6.587	
172	Europa	Malta	0,05	0,05	0	0	0,05	129	0	320	390	1.219	
173	Asia	Arabia Saudita	2,4	2,2	2,2	2	2,4	118	0	2.149.690	20.346	9	
174	África	Libia	0,6	0,5	0,2	0,1	0,6	113	0	1.759.540	5.290	3	
175	Asia	Maldivas	0,03	0,03	0	0	0,03	103	0	300	291	970	
176	Asia	Qatar	0,05	0,05	0,001	0	0,05	94	4	11.000	565	51	
177	América Central y del Norte	Bahamas	0,02	--	--	--	0,02	66	0	10.010	304	30	
178	Asia	Emiratos Árabes Unidos	0,15	0,12	0,15	0,12	0,15	58	0	83.600	2.606	31	
179	Asia	Franja de Gaza (Palestina)	0,05	0,05	0	0	0,06	52	18	380	1.077	2.834	
180	Asia	Kuwait	0	0	0	0	0,02	10	100	17.820	1.914	107	
181	África	Seychelles	--	--	--	--	--	--	0	450	80	178	
182	Asia	Cisjordania	0,75	0,68	0,07	0	0,75	--	0	5.800	--	--	

2-3-4\* la suma de los datos sólo puede realizarse para los recursos internos de agua renovables y no para los recursos totales de agua renovables, puesto que de otra manera se produciría doble recuento de los recursos de agua compartidos.

(-) No existen datos.

Fuente: Recursos Hídricos: FAO: AQUASTAT 2002; terreno y población: FAOSTAT, excepto para Estados Unidos (continental, Alaska y Hawaii): Oficina del Censo de EE.UU.

Sin embargo, también hay estudios que demuestran que la sofisticación y la semejanza con la realidad de un modelo no implican mayor éxito en la predicción (Naef, 1981). A esto hay que añadir el problema de la escala, cuando los resultados de un experimento limitado, realizado sobre una distancia de decenas de metros, se deben extrapolar a kilómetros mediante modelización. La escala también es un problema que se tiene que resolver cuando hay que combinar distintos tipos de modelos, por ejemplo modelos meteorológicos e hidrológicos, aunque la mayor potencia de los ordenadores está ayudando a resolver esta dificultad. Algunas de estas técnicas se han empleado para estimar los recursos hídricos a escala continental o mundial, produciendo mapas que muestran variaciones en el tiempo (McKinney y otros, 1998).

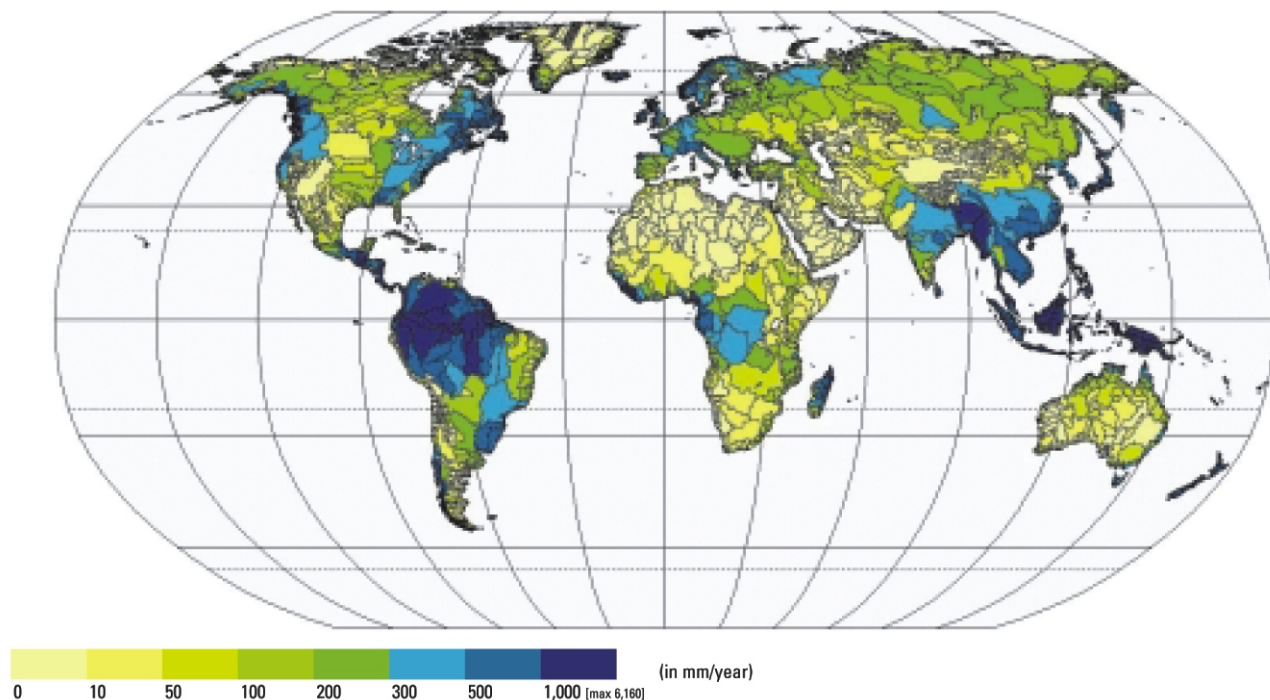
Mejorar el conocimiento de los procesos hidrológicos es esencial para gestionar y salvaguardar los recursos hídricos. Los procesos físicos que operan en la superficie, donde la atmósfera, el suelo y la vegetación se ponen en contacto, son importantes para la generación de escorrentías e infiltraciones, al igual que para desarrollar modelos climáticos destinados a realizar estudios atmosféricos, como por ejemplo los relacionados con el cambio climático. Igualmente, los estudios de la interacción del agua con el medio ambiente biótico son necesarios para una serie de aplicaciones prácticas, como por ejemplo el control de la abundancia de algas y el mantenimiento de las reservas de peces. Los procesos hidrológicos que operan en las masas de aguas superficiales son un factor fundamental en relación con los acuíferos, complejos y estacionalmente dinámicos, asociados a

ellos; por consiguiente, la representación de estos procesos debe ser reflejada adecuadamente en los modelos que aspiran a reproducir estos sistemas.

## Hidrología y recursos hídricos mundiales

La variabilidad en el espacio y en el tiempo es una de las características más obvias de los patrones mundiales del ciclo hidrológico y de sus componentes, que determinan los recursos hídricos (véase el mapa 4.1). Pero el espacio y el tiempo se comportan de forma poco equitativa con ciertas partes del mundo: así, mientras en algunas regiones, y durante ciertos períodos de tiempo se produce escasez de agua, otras están repletas de recursos hídricos. Además de las diferencias de un año a otro y en años sucesivos, es el cambio estacional lo que da un ritmo regular a algunos patrones y por tanto a los recursos hídricos de buena parte del planeta fuera de los trópicos. Las precipitaciones proporcionan el aporte a la fase terrestre del ciclo; la evaporación, la transpiración y la sublimación devuelven buena parte de este agua a la atmósfera, mientras que otra gran parte del agua restante queda almacenada temporalmente en el suelo y en los acuíferos, en los glaciares y en las placas de hielo. Lo que resta fluye hacia el mar en un período de tiempo mucho más corto, con lagos y embalses reteniendo parte del caudal. Los ríos transportan la mayor parte de este flujo desde la tierra, al tiempo que una parte de las aguas subterráneas llega directamente al mar.

Mapa 4.1: La media de recursos hídricos a largo plazo según las cuencas hidrográficas



La media de recursos hídricos a largo plazo según las cuencas hidrográficas se utiliza como indicador del agua disponible para las poblaciones existentes en ellas. El uso de la cuenca hidrográfica como unidad básica agudiza el contraste entre países limítrofes ricos y pobres en agua, en comparación con el mapa 4.4 basado en una escala de cuadrícula.

Fuente: Mapa preparado para el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) por el Centro de Investigación Medioambiental, Universidad de Kassel, basado en Water Gap Versión 2.1.D, 2002

### Cambio climático

El cambio climático es un proceso natural y continuo. Gracias a los progresos que se han producido en una serie de técnicas, la variabilidad del clima en los últimos 500.000 años está bien documentada. Los análisis realizados nos muestran que, una diferencia de unos pocos grados en la temperatura media anual de la tierra, puede producir un fuerte impacto en la extensión de los glaciares, la altura del nivel del mar, los regímenes y la distribución de las precipitaciones, y los patrones de biodiversidad.

Las diferentes evaluaciones realizadas por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) demuestran de manera cada vez más evidente que las emisiones de gases con efecto invernadero, emitidas a la atmósfera desde el siglo XIX y que continuarán en las próximas décadas, aunque la cantidad se reduzca o estabilice, producirán un 'calentamiento global' de la tierra en el período 1990-2100, con un aumento esperado de la temperatura media anual del orden de 1,4° a 5,8°. La velocidad de calentamiento esperada probablemente no tiene precedentes, al menos en los últimos 10.000 años. Entre los efectos asociados está el aumento del nivel de los océanos (entre 0,09 y 0,88 metros para el mismo período) y, como consecuencia, la disponibilidad de más energía en el sistema climático, con una intensificación del ciclo hidrológico mundial. En algunas áreas, esto producirá cambios en la cantidad total de precipitaciones, en su patrón de distribución estacional y en su frecuencia e intensidad. Junto con los cambios en la evapotranspiración, estas nuevas condiciones pueden afectar directamente a la magnitud y a los períodos de las escorrentías, a la intensidad de las inundaciones y de las sequías, además de tener un impacto significativo sobre los recursos hídricos regionales, afectando al abastecimiento tanto de aguas de procedencia superficial como subterránea, para uso doméstico e industrial, regadío, producción de energía hidroeléctrica, navegación, ecosistemas asociados a la cuenca y actividades recreativas asociadas al agua. Las ciencias hidrológicas han recalcado la 'no linealidad' y el 'efecto umbral' en los procesos hidrológicos, lo que significa que el componente terrestre del ciclo hidrológico amplía los aportes climáticos. Las sequías regionales que asolaron el Sahel africano en los años 1970 y 1980 ilustran estos conceptos: mientras que la disminución de las precipitaciones en esta región durante las mencionadas décadas fue del orden del 25 por ciento en comparación con el período de 1950-1969, los principales ríos que fluyen por la región experimentaron reducciones en el caudal anual del orden del 50 por ciento (Servat y otros, 1998). En otras palabras, lo que puede considerarse un cambio menor en el patrón total o temporal de precipitaciones puede, sin embargo, tener efectos tangibles sobre los recursos hídricos. Debido al aumento del nivel del mar, un efecto que se puede apreciar en las tablas hidrográficas es que la interfaz entre el agua dulce y el agua salada se adentrará en la tierra, lo que puede tener una influencia importante en el desarrollo y en la vida de la población de las regiones costeras, así como en las islas pequeñas.

La mayoría de las simulaciones matemáticas ha demostrado que una intensificación del ciclo hidrológico no producirá simplemente un pequeño cambio hacia nuevas condiciones, sino que probablemente se asociará a una mayor variabilidad de los patrones de precipitación en diferentes escalas de tiempo (interanual, estacional, episodios de tormentas individuales).

Por lo tanto, el cambio climático se deberá tener en cuenta a la hora de gestionar la variación de los recursos hídricos en el tiempo y para controlar los riesgos de desastres relacionados con el agua (inundaciones y sequías).

Para los gestores de los recursos hídricos, el impacto del cambio climático es todavía pequeño si se compara con los problemas a los que tienen que enfrentarse debido a la variabilidad actual del clima. Sin embargo, puesto que es probable que la variabilidad aumente debido al cambio climático, el impacto de este último puede convertirse en un problema real para los gestores del agua. De hecho, la mejor opción para hacer frente al cambio climático en el futuro es hacer frente a la variabilidad actual del clima, al tiempo que se aplican principios de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) que tienen en cuenta el riesgo.

### Precipitación

El patrón mundial de precipitaciones (véase el mapa 4.2) muestra grandes cantidades anuales totales en los trópicos (de 2.400 mm y superiores), en latitudes medias y donde existen grandes cadenas montañosas (Jones, 1997).

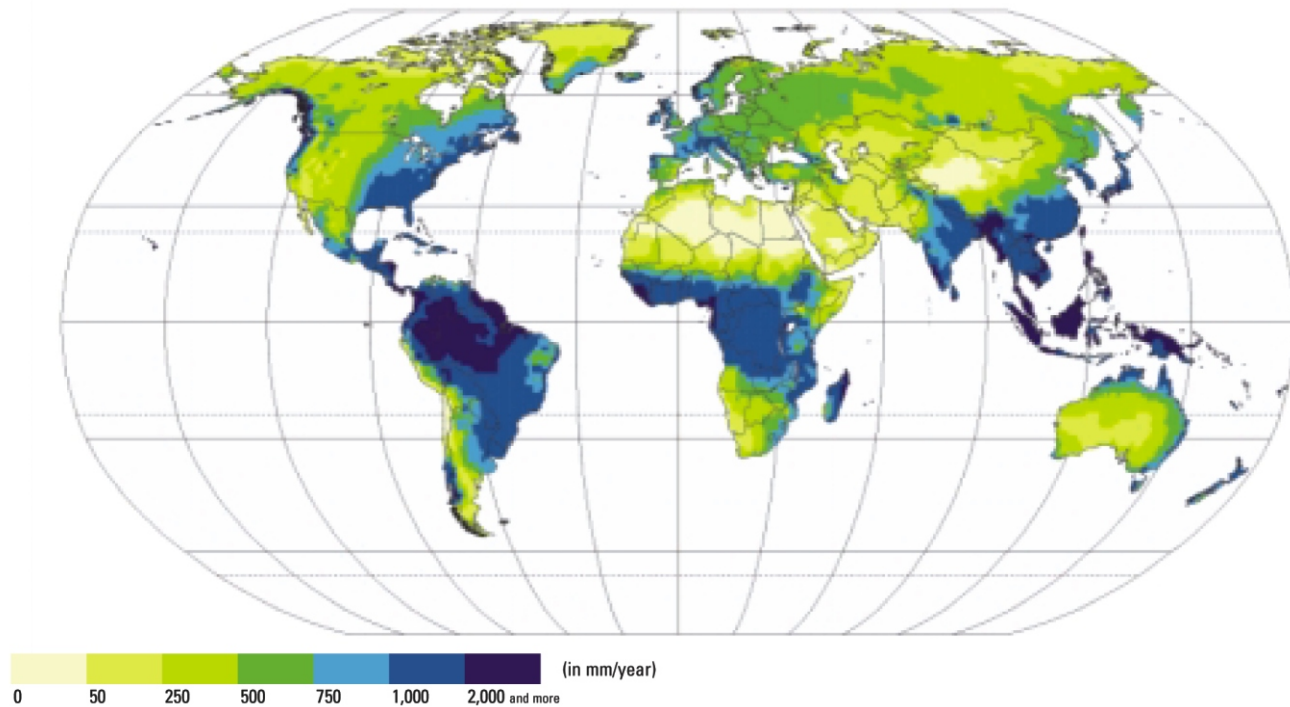
El monzón, los ciclones tropicales y los sistemas frontales y convectivos de tormentas en latitudes medias son mecanismos importantes que controlan las precipitaciones. Asimismo, las elevaciones orográficas constituyen otro elemento de control pluviométrico; a medida que nos acercamos a los polos y con el aumento de altitud, aumenta la proporción de precipitaciones en forma de nieve. La cantidad de nieve que cae anualmente sobre la Tierra es de aproximadamente  $1,7 \times 10^{13}$  toneladas (Shiklomanov y otros, 2002), cubriendo un área que varía de un año a otro entre 100 y 126 millones de Km<sup>2</sup>.

Las menores cantidades de precipitaciones al año (200 mm o menos) se producen en los subtrópicos, en las regiones polares y en las áreas más alejadas de los océanos. Existen también regiones abrigadas de la lluvia en las laderas protegidas de las montañas, como ocurre en los valles al este de Sierra Nevada en el oeste de los Estados Unidos, donde las cantidades totales son pequeñas. Las zonas desérticas y semidesérticas del mundo están situadas en estas áreas: algunas son muy grandes, como el Desierto del Sahara y otras tienen un carácter mucho más local. En ciertas regiones áridas puede no llover durante varios años, en marcado contraste con lugares donde se producen fuertes precipitaciones prácticamente a diario, y cuyas cantidades totales anuales son enormes, por ejemplo en Hawái, Estados Unidos (11.000 mm). Estos extremos en las precipitaciones dan lugar a inundaciones, por un lado, y a sequías por otro, quedando pocos lugares en el planeta inmunes: de hecho, los desiertos pueden sufrir inundaciones repentinas, mientras que las zonas húmedas pueden padecer sequías prolongadas.

Shiklomanov (1998a) estima un total de precipitaciones sobre la superficie terrestre de 119.000 Km<sup>3</sup> al año, mientras que otros cálculos lo estiman entre 107.000 y 119.000 Km<sup>3</sup>.



Mapa 4.2: Precipitación media anual



El patrón mundial de precipitaciones muestra las fuertes diferencias entre las grandes cantidades de lluvia que se registran en los trópicos (algunas áreas reciben más de 10.000 mm), y la escasez que se registra en las regiones áridas y semiáridas (como el Desierto del Sahara). Las diferencias dentro del continente africano son especialmente significativas.

*Fuente:* Mapa preparado para el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) por el Centro de Investigación Medioambiental de la Universidad de Kassel, basado en un análisis realizado por el Centro Mundial de Climatología de las Precipitaciones (GPCC) (datos obtenidos del sitio web del GPCC en 2002 y Rudolf y otros, 1994).

## Evaporación

El patrón de evaporación está condicionado por la disponibilidad de agua que se pueda evaporar. Cuando el agua es fácilmente accesible, por ejemplo en una superficie de agua abierta, la evaporación se produce sin trabas y sólo está restringida por las condiciones atmosféricas. Donde la provisión de agua es limitada, por ejemplo en una zona árida, la tasa de evaporación desde la superficie terrestre es mucho menor que su total potencial. En términos generales, las tasas de evaporación potencial son máximas en los subtropicos áridos (más de 2.000 mm al año), disminuyendo hacia los polos hasta 500 mm, a una latitud de 50°, y también reduciéndose con la altitud. Las tasas reales son más elevadas en los trópicos y en latitudes medias, donde las abundantes precipitaciones aseguran la abundancia de humedad en el suelo. La evaporación de la superficie terrestre ha sido estimada por Shiklomanov (1998a) en 74.200 Km<sup>3</sup> al año, siendo la estimación más baja de 70.000 Km<sup>3</sup>.

## Humedad del suelo

El suelo actúa como un lugar importante de reserva de agua cuando se utiliza adecuadamente, dividiendo las precipitaciones en aguas de escorrentía e infiltraciones, y liberando agua para las plantas. El almacenamiento de humedad en el suelo depende de una serie

de factores, además de las precipitaciones y la evaporación: por ejemplo el tipo de suelo, su profundidad, la vegetación que lo cubre y la pendiente. La consecuencia es que, incluso en cuencas pequeñas, el patrón de humedad del suelo puede ser muy heterogéneo. Por consiguiente, la mejor guía de la distribución mundial de acumulación de humedad en el suelo puede ser el equilibrio entre precipitación y evaporación. Este equilibrio tiene un patrón marcadamente estacional en buena parte del mundo, en lo que se refiere a la parte superior del perfil del suelo. Ésta se seca durante el verano y recupera su humedad en el invierno. Korzun (1974) afirmó que el agua activa del suelo aparece fundamentalmente en los dos metros más próximos a la superficie (a la profundidad de las raíces de la mayoría de las plantas). Sobre esta base, estimó que el volumen total de humedad del suelo en el planeta es de aproximadamente 16.500 Km<sup>3</sup>. Esta cifra supone que la humedad del suelo es de aproximadamente un 10 por ciento en la capa de dos metros más próxima a la superficie, y que el área de suelo que contiene humedad cubre el 55 por ciento de la superficie terrestre, es decir, aproximadamente 82 millones de Km<sup>2</sup>.

## Aguas subterráneas

Desde los tiempos más antiguos, los humanos han obtenido de las fuentes subterráneas buena parte de sus necesidades básicas de agua de buena calidad. Los manantiales, manifestación en la

superficie terrestre de las aguas subterráneas, han jugado un papel fundamental en los asentamientos humanos y en el desarrollo social. Sin embargo, durante muchos milenios, la capacidad para extraer este fluido vital era mínima en comparación con la cantidad existente.

A los importantes avances que se han producido en el conocimiento geológico, construcción de pozos, tecnología de bombeo y producción de energía, que en la mayoría de las naciones datan de los años 50, ha seguido una explotación extensiva de los recursos (Foster y otros, 2000). Hoy, con una tasa de extracción mundial de 600-700 Km<sup>3</sup>/año (Zektser y Margat, en preparación), el agua subterránea es la materia prima más extraída en el mundo y, por ejemplo, constituye la piedra angular de la 'revolución verde agrícola' de Asia, proporciona alrededor del 70 por ciento del abastecimiento de agua corriente en la Unión Europea y sustenta la vida rural en amplias áreas del África subsahariana.

#### *La base científica: de mapas a modelos*

La extensión de los acuíferos es bastante conocida en la mayoría de las zonas del mundo, gracias a los importantes avances que se han realizado en los mapas geológicos y en la interpretación hidrogeológica en los últimos diez a treinta años, estimulados por el PHI y facilitados por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) (Struckmeier y Margat, 1995).

La interpretación hidrogeológica supone construir un modelo conceptual de cómo funciona el sistema de agua subterránea, mediante la identificación de los procesos de recarga, el régimen tridimensional del caudal, las áreas de descarga y la relación con las aguas superficiales. Esto constituye la base científica esencial para la gestión y protección de los recursos hídricos, realizándose cada vez más a través de modelos matemáticos de los acuíferos. No obstante, especialmente en los países en desarrollo, los modelos conceptuales (y por tanto los numéricos) del sistema de flujo subterráneo para los acuíferos localizados no pueden siempre establecerse con suficiente seguridad, o con suficiente detalle debido a:

- Falta de conocimiento de la geología tridimensional.
- Control inadecuado de los niveles de las aguas subterráneas.
- Datos insuficientes sobre las variaciones de la carga hidráulica con la profundidad, que controlan los patrones de flujo desde las zonas de recarga hasta las de descarga.

#### *Una gran reserva de agua dulce*

Sin duda, los sistemas de aguas subterráneas (acuíferos y en algunos casos capas semipermeables entre capas impermeables) constituyen la principal y más estratégica reserva para el almacenamiento de agua dulce en el planeta Tierra, probablemente alrededor del 30 por ciento del total mundial y hasta el 98 por ciento de la parte en estado líquido (Shiklomanov, 1998a). Algunos acuíferos (como los que aparecen en la tabla 4.3 y en el mapa 4.3) se extienden bastante uniformemente por amplias zonas de terreno y tienen almacenada más agua que todos los lagos y embalses del mundo. En agudo contraste con las masas de agua superficiales, los acuíferos apenas si pierden agua debido a la evaporación directa.

De todas maneras, el cálculo del volumen total del agua subterránea almacenada no es en modo alguno directo, y la precisión y utilidad de cualquier cálculo podrán ser inevitablemente cuestionadas. Los cálculos actuales, que arrojan siempre cifras enormes, van desde 7 millones de Km<sup>3</sup> (Nace, 1971) a 23,4 millones de Km<sup>3</sup> (Korzun, 1974), pero todos están sujetos a importantes hipótesis sobre la profundidad y porosidad de las zonas de agua dulce.

#### *El auge de la explotación de los recursos hídricos subterráneos*

La rápida expansión de la explotación de las aguas subterráneas se produjo en muchas naciones industrializadas entre 1950 y 1975, y entre 1970 y 1990 en la mayoría de los países en desarrollo. No se dispone de estadísticas sistemáticas sobre extracción y uso, pero se estima que, en el mundo, el agua subterránea cubre alrededor del 50 por ciento del abastecimiento actual de agua potable, el 40 por ciento de la demanda de las empresas que se autoabastecen y el 20 por ciento del agua utilizada para riego en la agricultura (Zektser y Margat, en preparación). Estas proporciones, sin embargo, varían mucho de unos países a otros. Además, el valor del agua subterránea para la sociedad no se debe medir únicamente en función de la extracción volumétrica relativa. En efecto, si se compara con el agua superficial, el agua subterránea produce importantes beneficios por unidad de volumen, ya que es fácilmente accesible localmente, es muy fiable en épocas de sequía y su buena calidad hace que necesite un tratamiento mínimo. (Burke y Moench, 2000).

La lista de ciudades importantes que dependen considerablemente de este recurso es muy larga (Foster y otros, 1997; Burke y Moench, 2000). Tiene incluso mayor importancia para el abastecimiento de muchas ciudades de tamaño medio; se cree que más de 1.200 millones de habitantes de las ciudades en todo el mundo dependen de pozos y manantiales. En lo que respecta al uso de aguas subterráneas para riego agrícola, la FAO tiene algunos datos de ámbito nacional en su base de datos AQUASTAT para los años 90 (la tabla 4.4 proporciona algunos datos para ciertos países seleccionados).

El caso de la India merece especial mención, porque las aguas subterráneas proporcionan alrededor del 80 por ciento del agua doméstica en las zonas rurales, con entre 2,8 y 3 millones de pozos con bombas manuales que han sido construidos en los últimos treinta años. Además, se estima que de entre 15 y 17 millones de pozos tubulares y pozos perforados se están extrayendo alrededor de 244 Km<sup>3</sup>/año para riego, llegando a utilizarse este agua subterránea para regar hasta un 70 por ciento de la producción agrícola nacional (Burke y Moench, 2000; Foster y otros, 2000).

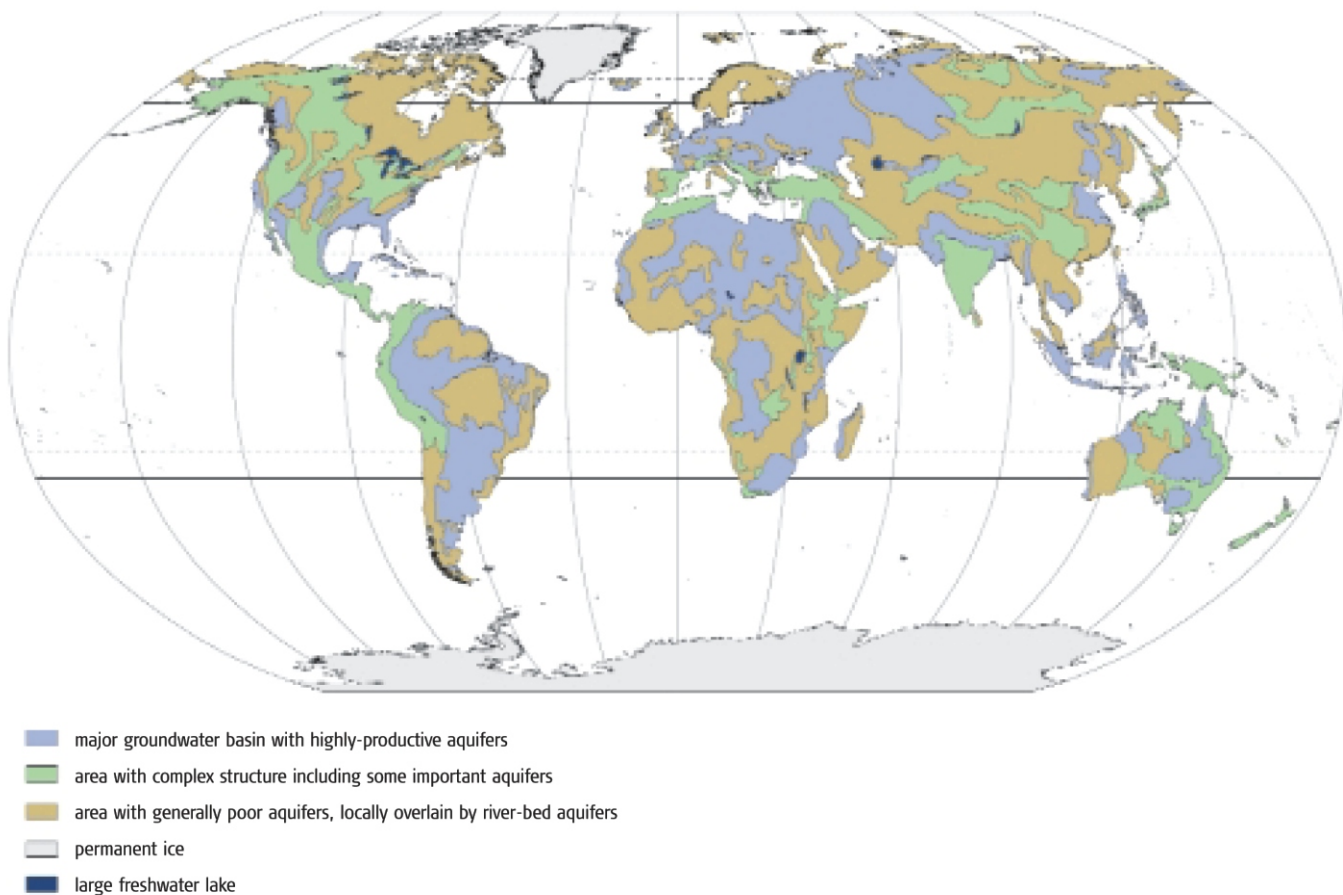
Tabla 4.3: Algunos grandes acuíferos del mundo

Nº	Nombre	Superficie (millones de Km <sup>2</sup> )	Volumen (miles de millones de m <sup>3</sup> )	Tiempo de rellenado (años)	Continente
1	Sistema Acuífero de Areniscas de Nubia	2	75.000	75.000	África
2	Sistema Acuífero del Norte del Sahara	0,78	60.000	70.000	África
3	Sistema Acuífero de las Altas Planicies	0,45	15.000	2.000	Norteamérica
4	Sistema Acuífero Guaraní	1,2	30.000	3.000	Suramérica
5	Sistema Acuífero de la Llanura del Norte de China	0,14	5.000	300	Asia
6	Gran Cuenca Artesiana	1,7	20.000	20.000	Australia

Los mayores acuíferos se encuentran en África, donde constituyen un recurso precioso al no existir prácticamente la lluvia. Sin embargo, es necesario que se realice una cuidadosa explotación de este recurso.

Fuentes: Margat, 1990a, 1990b

Mapa 4.3: Recursos de aguas subterráneas en el mundo



El mapa muestra claramente que las condiciones de almacenamiento de aguas subterráneas varían de una zona a otra. Mientras que algunas regiones tienen por debajo acuíferos que se extienden sobre extensas áreas, otras no tienen aguas subterráneas, excepto los depósitos aluviales de las llanuras que se producen en los grandes ríos. En las regiones montañosas, las aguas subterráneas generalmente se presentan en complejos de rocas duras. Este mapa mundial se basa en importantes programas de cartografía hidrogeológica que se han realizado en todos los continentes menos en la Antártida. Constituye el primer paso en la creación del Programa Mundial de Trazado de Mapas y Evaluación Hidrogeológica (WHYMAP) que la UNESCO, la IAH, la Comisión del Mapa Geológico del Mundo (CGMW), la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y el Instituto Federal Alemán de Ciencias Geológicas y de Recursos Naturales (BRG) han comenzado a elaborar recientemente. En este programa, se va a producir y ofrecer en formato digital una serie de mapas mundiales relacionados con las aguas subterráneas.

Fuente: Mapa preparado para el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) por el Instituto Federal de Ciencias Geológicas y Recursos Naturales (BRG) / Comisión del Mapa Geológico del Mundo (CGMW) / Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) / UNESCO, 2002

Tabla 4.4: Uso de las aguas subterráneas para riego en algunas naciones

País	Superficie regada (millones de Ha.)	Uso para riego (Km <sup>3</sup> /año)	% de aguas subterráneas
India	50,1	460	53
China	48	408	18
Pakistán	14,3	151	34
Irán	7,3	64	50
México	5,4	61	27
Bangladesh	3,8	13	69
Argentina	1,6	19	25
Marruecos	1,1	10	31

El agua subterránea se usa para riego más que el agua superficial en países como India, Bangladesh e Irán. Hay que señalar que los países áridos como Arabia Saudita no se han incluido en la tabla a pesar de que usan casi el 100 por cien del agua subterránea para riego.

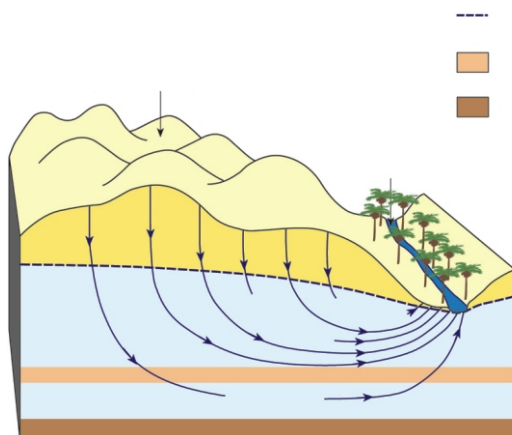
Fuentes: Burke y Moench, 2000; Foster y otros, 2000.

### Recarga de los acuíferos; controles e incertidumbres

Las aguas subterráneas se mueven lentamente desde las zonas de recarga de los acuíferos (que favorecen la filtración del exceso de agua de lluvia y/o escorrentías de superficie) hasta las zonas de descarga, como por ejemplo los manantiales y percolaciones, a los cursos de agua, los humedales y las zonas costeras (Zektser, 1999). La gran capacidad de almacenamiento de muchos acuíferos durante largos períodos de tiempo (véase la tabla 4.3) transforma un régimen altamente variable de recarga en un régimen de descarga mucho más constante.

La tasa de recarga de los acuíferos en la actualidad (relleno por infiltración profunda) se utiliza a menudo como indicador de la existencia de aguas subterráneas. No obstante, la tasa media de

Figura 4.3: Regímenes típicos de flujo de aguas subterráneas y tiempo de permanencia en condiciones climáticas semiáridas



Debido a la gran capacidad de almacenamiento y a la poca velocidad de flujo de los sistemas de aguas subterráneas, los tiempos de permanencia de los acuíferos pueden ser de décadas o siglos, y en algunos casos de milenios.

Fuente: British Geological Survey

recarga del acuífero no es necesariamente un parámetro constante, y además está sujeto a menudo a considerable incertidumbre (Foster y otros, 2000), puesto que varía considerablemente con:

- Cambios en el uso de la tierra y en la vegetación, especialmente con la introducción de cultivos de regadío con agua superficial trasvasada, aunque también por el desmonte, por la compactación del suelo, etc.

- Cambios en el régimen del agua superficial, especialmente la desviación del curso de un río.

- Descenso de la capa freática debido a la extracción de aguas subterráneas y/o al drenaje de terrenos, lo que produce una mayor filtración.

- Ciclos climáticos más largos, lo que mantiene una considerable incertidumbre sobre el impacto del calentamiento mundial en los sistemas de aguas subterráneas.

Estas variaciones significan que las estimaciones de la recarga de aguas subterráneas siempre se han de tratar con precaución.

Debido a la gran cantidad de agua que almacenan los sistemas de aguas subterráneas, los tiempos de permanencia de los acuíferos se cuentan a menudo por décadas o siglos, y en algunos casos por milenios (figura 4.3). Mediante el análisis de los isótopos medioambientales se ha demostrado no sólo esto, sino también la importante influencia del cambio climático sobre la recarga de los acuíferos en la era Cuaternaria.

El desarrollo y la aplicación de estas técnicas, promovidos por la Sección de Hidrología de Isótopos de la IAEA, ha demostrado que buena parte de las aguas subterráneas más profundas de las grandes cuencas geológicas y de los depósitos costeros de gran espesor se originaron como resultado de la recarga que se produjo en épocas más húmedas, a menudo hace 10.000 años o más. En algunas regiones más áridas, estas 'aguas subterráneas fósiles' pueden constituir el único recurso, y por tanto se deben utilizar juiciosamente.

### Explotación de las aguas subterráneas: el riesgo de la no sostenibilidad

La rápida expansión de la explotación de las aguas subterráneas ha producido grandes beneficios sociales y económicos, pero también ha suscitado importantes problemas (véase la tabla 4.5). Por ejemplo, se ha estimado que la extracción de aguas subterráneas se produce a un ritmo de 10 Km<sup>3</sup> al año en la planicie del norte de China en la cuenca del Hai He, y de alrededor de 5 Km<sup>3</sup> en los más o menos 100 acuíferos mexicanos conocidos.

Este ritmo de extracción no es físicamente sostenible a largo plazo. En ambos casos, la mayor parte del agua bombeada va destinada a la agricultura de regadío, aunque también es muy importante la parte destinada al abastecimiento de agua a las ciudades. A esto hay que unir la poca atención que se presta a las aguas residuales en general y a las oportunidades que podría proporcionar una planificación integrada.

Tabla 4.5: Explotación de las aguas subterráneas y problemas asociados

Beneficios socio-económicos	Problemas de sostenibilidad
· suministro económico de agua urbana de buena calidad	· utilización ineficaz generalizada de los recursos
· explotación a bajo coste de abastecimientos de agua en zonas rurales incluso en época de sequía	· aumento de la desigualdad social en el acceso a las aguas subterráneas en algunas regiones
· suministro de agua accesible y fiable para los cultivos de regadío	· niveles de extracción no sostenibles en regiones más áridas
· mejora del drenaje y disminución de la salinidad en algunas áreas	· reducción del caudal de base en tiempo seco en algunas cuencas bajas de los ríos
	· daño localmente irreversible de algunos acuíferos debido a la penetración salina
	· hundimiento localizado del suelo debido a la compactación por la baja permeabilidad de los estratos
	· daño de algunos ecosistemas que dependen de las aguas subterráneas

Fuentes: Alley, 1999; Foster y otros, 2000.

Normalmente, es necesaria una parte importante de la recarga total de los acuíferos para mantener el caudal de los ríos en tiempo seco y/o mantener algunos tipos de ecosistemas acuáticos y terrestres (Foster y otros, 2000; Alley, 1999). La extracción de aguas subterráneas reduce (en algunos casos de manera importante) la descarga natural de los acuíferos en el medio acuático, y la explotación del recurso cuando se consume el agua subterránea (o se exporta desde la subcuenca en cuestión) es la que tiene mayor impacto. Esto es importante en la planificación de los recursos y en la gestión medioambiental, pero se ha pasado por alto a menudo en el pasado.

La integridad de la capa de suelo que cubre los acuíferos juega un papel clave para que se produzca la recarga de las aguas subterráneas. La influencia del hombre puede ser muy importante a este respecto. Por ejemplo, el escudo africano proporciona una clara evidencia de que la eliminación de la vegetación natural ha producido erosión y compactación del suelo. En consecuencia, la infiltración y la recarga y descarga de los acuíferos se han reducido, lo que ha conducido a la disminución, en la época seca, del caudal de muchos ríos pequeños, vitales para la supervivencia y el sustento de los seres humanos.

#### *Problemas de calidad del agua subterránea natural*

Aunque la calidad del agua subterránea no contaminada es generalmente buena, algunas aguas subterráneas contienen elementos traza, que se han disuelto de la propia matriz del acuífero, y que reducen su idoneidad para el uso (Edmunds y Smedley, 1996). Estos elementos pueden plantear problemas para el uso doméstico (hierro) o constituir un peligro para la salud pública (fluoruros, arsénico). Con la introducción de análisis más sistemáticos y completos de las aguas subterráneas, apoyados por la investigación hidrogeoquímica, está aumentando rápidamente el conocimiento detallado de su origen y distribución, con la esperanza de que se puedan evitar en el futuro los problemas asociados o que se puedan tratar de manera adecuada. Existen áreas en el planeta donde se ha producido o ya existía una importante salinización, tanto del suelo como de las aguas subterráneas, como consecuencia de:

- Ascenso de la capa freática en áreas con drenaje natural inadecuado, debido a la introducción de sistemas de riego ineficaces con aguas superficiales importadas;
- La salinidad natural se ha desplazado del entorno, como consecuencia del desmonte con fines agrícolas, produciéndose en

estos casos un aumento de las tasas de recarga de aguas subterráneas.

- Alteración excesiva de la estratificación de la salinidad natural del agua subterránea en el suelo debido a la construcción de pozos y al bombeo incontrolados.

Estas situaciones han demostrado ser costosas de remediar (Foster y otros, 2000)

#### *Vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación*

Los acuíferos son mucho menos vulnerables a la contaminación debida al hombre que las masas de agua superficiales, al estar protegidos de manera natural por el suelo y por las zonas no saturadas subyacentes o los estratos limitrofes. Sin embargo, debido a las grandes cantidades almacenadas y a los largos tiempos de permanencia, cuando los acuíferos se contaminan (ver figura 4.4), esta contaminación se hace persistente y es difícil de eliminar (Clarke y otros, 1996).

Algunos acuíferos son más vulnerables que otros y se pueden ver afectados por gran número de contaminantes que se han descargado en la superficie terrestre o la han atravesado. Además, si hay filtraciones en las áreas de recarga de los acuíferos, la mayoría de ellos se verá afectada (antes o después) por contaminantes relativamente persistentes (como nitratos, salinidad y ciertos productos orgánicos sintéticos).

Los incidentes de contaminación más espectaculares, con fuertes gradientes de alta concentración, están normalmente relacionados con los vertidos accidentales procedentes de industrias o descargas casuales en áreas vulnerables. Sin embargo, los problemas más peligrosos y persistentes están relacionados con las fuentes difusas de contaminación, generadas por la intensificación de los cultivos agrícolas o por las aguas residuales procedentes del desarrollo urbano e industrial. La compilación de mapas de vulnerabilidad de los acuíferos proporciona a los gestores del uso del suelo una herramienta muy valiosa para establecer medidas preventivas y de protección (Vrba y Zaporozec, 1994).

Se han identificado ciertas tendencias claras, como por ejemplo el deterioro generalizado de la calidad de los acuíferos poco profundos, en áreas de rápida expansión urbanística e intensificación agrícola (Foster y Lawrence, 1995). No obstante, no es posible realizar cálculos fiables sobre la proporción de recarga activa o sobre los depósitos de agua subterránea afectados por la

contaminación, ya que muy pocos países poseen redes adecuadas (y creadas con este fin) para el control de la calidad de las aguas subterráneas. Éste es, no obstante, uno de los motores más importantes de la recién aprobada Directiva Marco de la Unión Europea sobre el Agua.

#### *El futuro: necesidades de gestión y control*

Un reto importante para el futuro es estabilizar los acuíferos que sufren un importante desequilibrio hidráulico y, cuando sea posible, restituir cierta descarga al medio acuático de la superficie. Esto solamente se conseguirá aplicando medidas para gestionar de modo realista el equilibrio de la demanda y para aumentar el suministro o la recarga. Para ello se necesita (Foster y otros, 2000):

- Un marco institucional a una escala y con un estilo apropiados.
- Un buen sistema de extracción y derechos de uso de las aguas subterráneas.
- Inversión financiera adecuada en tecnología para el ahorro de agua.
- Participación activa tanto de los usuarios de las aguas subterráneas como de todos aquellos que estén interesados.
- Instrumentos económicos para fomentar la disminución del consumo de agua.
- Incentivos para incrementar la recogida de agua y la recarga de los acuíferos.

Para aumentar la recarga de aguas subterráneas se requiere una buena planificación, un buen diseño y un buen funcionamiento, con un control apropiado que asegure que el método seleccionado es eficaz y sostenible. Hay diversos métodos potencialmente rentables para almacenar el exceso de agua de lluvia, la escorrentía de superficie y las aguas residuales recuperadas en los acuíferos (Bouwer, 2002).

Los principales problemas que han surgido en relación con las aguas subterráneas en el desarrollo urbano (Foster y otros, 1997) derivan del fracaso habitual de los gestores del agua urbana y del medio ambiente a la hora de identificar y gestionar las posibles interacciones negativas entre la eliminación de aguas residuales y el suministro de agua subterránea y para reconocer la conexión entre la extracción de agua subterránea y el drenaje urbano y la infraestructura de las ciudades de poca altitud sobre el nivel del mar.

En cuanto a los peligros de contaminación de las aguas subterráneas, la principal labor de gestión es la de protección. Esto requiere una actuación institucional sostenida para identificar las 'actividades peligrosas' y las 'zonas vulnerables', haciendo públicas estas últimas para 'dar mayor visibilidad a las aguas subterráneas', tanto para los que están particularmente interesados como para el público en general, con el fin de impulsar su participación en el control de la contaminación.

Un requisito fundamental en muchos países será cambiar la función de los departamentos gubernamentales, locales o nacionales, responsables de las aguas subterráneas: desde tener competencia exclusivamente sobre el suministro, a ser

fundamentalmente 'guardianes de los recursos' y 'suministradores de información' (Foster y otros, 2000).

En su mayor parte, el control de la extracción y uso de los acuíferos, de la fluctuación del nivel del agua y de la calidad de la recarga, están lejos de adecuarse a las necesidades de gestión de los recursos hídricos. Esta deficiencia también ha reducido la capacidad actual de realizar una exposición completa y bien fundamentada de la situación mundial de los recursos de agua subterránea y de la importancia del agua subterránea en algunos de los procesos del cambio mundial.

#### **Glaciares y placas de hielo**

El mayor volumen de agua dulce almacenada en el mundo se encuentra en los casquetes polares y en los glaciares, aproximadamente el 90% en el Antártico y casi todo el resto en Groenlandia (véase la tabla 4.1). A pesar de los planes para remolcar los icebergs a zonas costeras situadas en latitudes más bajas, este agua se considera inaccesible e imposible de utilizar. La mayor parte del agua disponible que contribuye a los recursos hídricos procede de placas de hielo más pequeñas y de los glaciares de Norte y Suramérica, Europa y Asia. Se estima que la presente glaciación cubre un área de alrededor de 16,2 Km<sup>2</sup> y se considera que el volumen total de agua en forma de hielo en el planeta excede de 24 millones de Km<sup>3</sup> (Korzun, 1974). Este menor volumen, que se extiende por los distintos continentes y que produce agua por deshielo, alimenta el caudal de los ríos y contribuye a los máximos estacionales. Se estima que, aunque no se produjeran precipitaciones, los 74 Km<sup>3</sup> de agua almacenada en los glaciares suizos serían suficientes para mantener el caudal de los ríos durante cinco años (Bandyopadhyay y otros, 1997). A esto hay que añadir el hielo en el subsuelo en las áreas de permafrost que se extienden por el noreste de Europa, el norte de Asia, incluyendo las islas Árticas, el norte de Canadá y en las zonas próximas a Groenlandia y la Antártida, así como en las zonas más altas de Suramérica. El área total de permafrost es de unos 21 millones de Km<sup>2</sup>, alrededor del 14 por ciento de la superficie de tierra firme. La profundidad del permafrost varía entre 400 y 650 metros. Korzun (1974) ha estimado el volumen de hielo en unos 300.000 Km<sup>3</sup>. Sin embargo, este agua contribuye muy poco a los recursos hídricos.

#### **Lagos y embalses**

En el mundo hay 145 grandes lagos con una superficie de al menos 100 Km<sup>2</sup>, que contienen unos 168.000 Km<sup>3</sup> de agua (Korzun, 1974). Se estima que constituyen el 95% del volumen total de todos los lagos del mundo, cuyo número aproximado es de 15 millones, con un volumen total de agua de 176.000 Km<sup>3</sup> (véase la tabla 4.1). De este total, aproximadamente 91.000 Km<sup>3</sup> es agua dulce y 85.400 Km<sup>3</sup> agua salada. Sin embargo, estas cifras deben tratarse con cautela, ya que no se ha estudiado la hidrología de aproximadamente el 40 por ciento de los grandes lagos del mundo y los volúmenes que se tiene de ellos son aproximados (Shiklomanov, en preparación). La mayoría de los lagos del mundo se encuentra en el hemisferio norte y están situados en zonas de glaciares: por ejemplo, los lagos Superior, Hurón, Michigan, Erie y Ontario, en Estados Unidos, están situados tras las morrenas dejadas por el hielo en recesión. Algunos lagos se encuentran en grandes depresiones tectónicas (Baikal en la Federación Rusa; Victoria y Niasa, en África oriental), otros en valles bloqueados por corrimientos de tierra (Teletskoye en los

montes Altai, Federación Rusa). También hay algunos lagos de origen volcánico, otros creados por la acción del viento y otros resultado del colapso de unos estratos determinados. Entre los mayores lagos del mundo se encuentran el mar Caspio, que contiene alrededor del 90 por ciento del agua salada interior del mundo y el lago Baikal que representa el 27 por ciento del agua dulce de los lagos.

Según la Comisión Mundial de Presas (WCD, 2000), en 1998 había un total de 47.655 grandes presas y unas 800.000 más pequeñas (Hoeg, 2000). Una gran presa, según la definición de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), tiene una altura de más de 15 metros, o tiene una presa de más de 5 metros con un volumen embalsado de más de 3 millones de metros cúbicos de agua ( $Mm^3$ ). Se incluyen algunas presas que se han construido para aumentar la capacidad de lagos ya existentes, por ejemplo la presa de Owen Falls en el Nilo, aguas abajo del Lago Victoria. Las presas se han construido en los valles de los ríos para crear embalses o cascadas de embalses, por ejemplo en el Nilo o en el Colorado. Se han construido embalses a lo largo de los ríos y se han llenado por bombeo. En conjunto, estos embalses retienen un gran volumen de agua y aportan una importante cantidad al volumen de agua almacenada en el mundo (véase la tabla 4.6).

Las primeras presas se construyeron hace unos 5.000 años, pero el auge en la construcción de grandes presas se produjo entre los años 60 y 80, especialmente en China, Estados Unidos, la antigua Unión Soviética y la India. Sin embargo, aunque en 1999 se encontraban en construcción alrededor de 300 presas de más de 60 metros de altura, las autoridades aseguran que se necesitarán muchas más en el futuro para responder a la creciente demanda de agua. Cosgrove y Rijsberman (2000) sostienen que será necesario almacenar otros  $150 \text{ Km}^3$  para el año 2025 sólo para regadío y  $200 \text{ Km}^3$  más para reemplazar el actual consumo excesivo de aguas subterráneas. Claro que los embalses se construyen también para satisfacer otras necesidades: control de inundaciones, suministro de agua potable, recreo, etc.

Vörösmarty y otros (1997) estimaron que existen 633 grandes embalses con capacidad superior a los  $0,5 \text{ Km}^3$  que almacenan un total de casi  $5.000 \text{ Km}^3$ . Se considera que esto representa el 60 por ciento de la capacidad mundial total, que viene a ser una cantidad superior a los  $8.000 \text{ Km}^3$ . Estos grandes embalses regulan alrededor

del 40 por ciento del total de agua de escorrentía de la Tierra, incrementando los tiempos de permanencia en casi cincuenta días y reteniendo alrededor del 30 por ciento del sedimento transportado por los ríos en los que se encuentran. Estos embalses también aumentan la evaporación (puesto que crean una mayor superficie total expuesta a la evaporación) que representan alrededor de  $200 \text{ Km}^3$  al año, según Cosgrove y Rijsberman (2000).

#### Caudal de los ríos

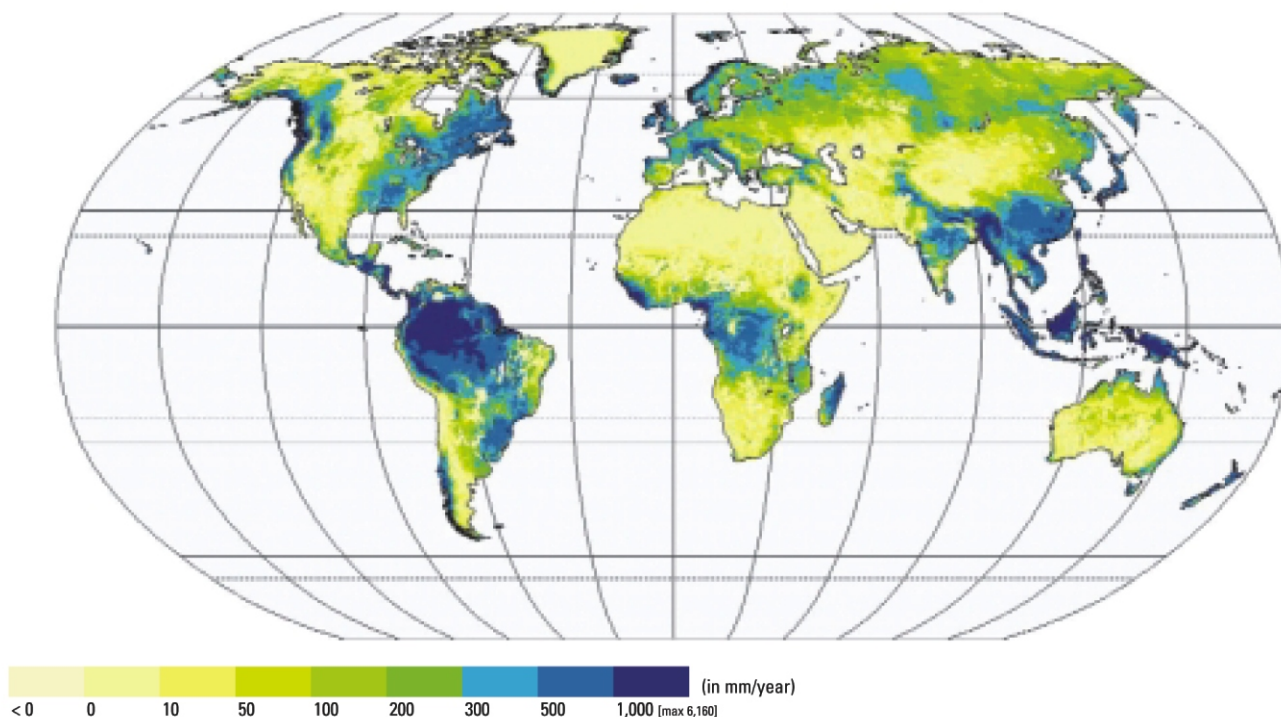
Aunque el volumen de agua en ríos y arroyos es muy pequeño si se compara con el de otros recursos hídricos (véase tabla 4.1), en muchas partes del mundo este agua constituye el recurso más accesible e importante.

El mapa 4.4 muestra cómo el patrón del caudal de los ríos refleja la distribución mundial de las precipitaciones, con zonas de gran caudal en los trópicos y en latitudes medias y caudales pequeños en la mayoría de las zonas restantes. De hecho, alrededor del 40 por ciento del total de la escorrentía llega a los océanos del mundo entre los  $10^\circ \text{ N}$  y los  $10^\circ \text{ S}$ . Sin embargo, no todos los ríos llegan al océano; existen zonas interiores de drenaje que no están conectadas al océano, entre las que se encuentran: la cuenca del mar Caspio, la mayor parte de Asia central, la Península Arábiga, buena parte del norte de África y Australia central. En conjunto, cubren alrededor de 30 millones de  $\text{Km}^2$  (20 por ciento de la superficie de tierra firme), pero producen sólo el 2,3 por ciento (unos  $1.000 \text{ Km}^3$  al año) de la escorrentía (UNESCO, 1993). En estas áreas, las aguas subterráneas son especialmente importantes, aunque es muy difícil evaluar su contribución a los recursos hídricos. En un estudio sobre África, la FAO (1995) estimó los recursos renovables de aguas subterráneas en  $188 \text{ Km}^3$  /año para la totalidad del continente, ó 5 por ciento de la escorrentía. También se pierde agua por la evaporación que se produce en los grandes ríos que cruzan estas zonas áridas y semiáridas y en los embalses y pantanos asociados a ellos, por ejemplo en el Indo (Pakistán), el Níger (África occidental), el Nilo (África oriental) y el Colorado (Argentina). De esta manera se pierden alrededor de  $1.100 \text{ Km}^3$  de escorrentía al año (Shiklomanov, en preparación). En aquellos ríos que cuentan con aguas subterráneas, éstas se tienen en cuenta para realizar el cálculo de su caudal, aunque parte de estas aguas subterráneas llega directamente al océano.

Tabla 4.6: Los mayores embalses del mundo

Embalse	Continente	País	Cuenca	Año de llenado	Altura de la presa (m)	Volumen total ( $\text{Km}^3$ )
Cataratas de Owen (Lago Victoria)	África	Uganda, Kenia, Tanzania	Victoria-Nilo	1954	31	204
Bratskoye	Asia	Rusia	Angara	1967	106	169
Nasser	África	Egipto	Nilo	1970	95	169
Kariba	África	Zambia, Zimbabue	Zambeze	1959	100	160
Volta	África	Ghana	Volta	1965	70	148
Daniel Jonson	Norteamérica	Canadá	Manicouagan	1968	214	141
Guri	Suramérica	Venezuela	Caroni	1986	162	136
Krasnoyarskoye	Asia	Rusia	Yenisey	1967	100	73
Vadi-Tartar	Asia	Irak	Tigris	1956-1976	--	72
WAC Bennett	Norteamérica	Canadá	Peace	1967	183	7

Mapa 4.4: Escorrentía media a largo plazo en un mapamundi en cuadrículas



La enorme variación climática en la Tierra produce gran variabilidad en el caudal, que depende de las precipitaciones caídas. Este mapa muestra patrones similares a los del mapa 4.1

Fuente: Mapa elaborado para el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) por el Centro de Investigación Medioambiental de la Universidad de Kassel, basado en Water Gap Version 2.1.D, 2002

El río más caudaloso del mundo, el Amazonas en América Latina, contribuye con el 16 por ciento del total mundial anual de escorrentía, mientras que los cinco mayores sistemas fluviales (Amazonas, Ganges con el Brahmaputra en la India, Congo en África central, Yangtse en China y Orinoco en Venezuela) aportan en conjunto el 27 por ciento del total (ver tabla 4.7).

Estas cifras proceden del estudio que va a publicar Shiklomanov, en el que ha recogido y analizado los datos sobre el caudal de los ríos de la red hidrológica mundial, divididos en veintiséis regiones de todo el planeta homogéneas y comparables (Shiklomanov, 1998a). Se seleccionaron los 2.500 registros más representativos de esta red y se ajustaron al período 1921 a 1985. Este ajuste fue necesario ya que, aunque algunos datos se referían a períodos más largos de observación, muchos eran de períodos más cortos, otros tenían lagunas y algunos se tuvieron que estimar sobre las precipitaciones totales. Según este estudio, el caudal medio total por año desde la superficie terrestre al océano se estima en 42.800 Km<sup>3</sup>, con pequeñas variaciones de un año a otro.

Hay períodos de años secos y de años húmedos, pero no hay una tendencia clara en este período de sesenta y cinco años. En cuanto a recursos hídricos, la variación de un año a otro es muy importante, pero esta variación puede quedar enmascarada por el promedio de los datos. Esta visión distorsionada afecta particularmente a las regiones áridas y semiáridas, en las que el

coeficiente de variación (Cv) de las descargas anuales es superior al 0,7, y donde, en los años más secos, se puede producir una descarga de menos del 10 por ciento de la media a largo plazo. En las regiones húmedas (con una media de precipitaciones anuales superior a 1.000 mm) la variación anual es suave y los coeficientes de variación son menores (típicamente entre 0,15 y 0,3) y, en los años más secos, en pocas ocasiones es menor del 40 por ciento de la media a largo plazo. La variación más elevada de caudal de un año a otro se registra en los lugares donde los caudales de los ríos son más bajos. Los ríos más pequeños muestran mayor variación anual que los ríos grandes. La escorrentía está distribuida de forma desigual a lo largo del año en la mayoría de las regiones del planeta, produciéndose entre el 60 y el 70 por ciento en primavera y a principios de verano, y entre 2 y 10 por ciento en los tres meses más secos. Por ejemplo, en Rusia y Canadá, entre el 55 y el 70 por ciento de la escorrentía se produce entre mayo y agosto, mientras que entre el 47 y el 65 por ciento de la escorrentía en la India y China se produce entre julio y septiembre. Las inundaciones aportan buena parte del caudal durante estos períodos, cuando transportan la mayor parte de la carga anual de sedimento y materiales en solución (ver tabla 4.8). En los últimos años se ha producido una serie de inundaciones graves, por ejemplo en el Oder (Alemania) en julio de 1997, las producidas por el superciclón en Orissa (India) en octubre de 1999, y las del ciclón Eline, que afectó a Mozambique y a los países vecinos en febrero de 2000 (Cornford, 2001).



Tabla 4.7: Los ríos más caudalosos del mundo según la descarga media anual con sus cargas

Río	Cuenca (Km <sup>2</sup> )	Descarga media anual (m <sup>3</sup> /seg)	Descarga máxima (m <sup>3</sup> /seg)	Descarga mínima (m <sup>3</sup> /seg)	Escorrentía (mm/año)	Volumen (Km <sup>3</sup> )	Sólidos en suspensión (millones de toneladas /año)	Sólidos disueltos (millones de toneladas /año)
Amazonas (Suramérica)	4.640.300	155.432	176.067	133.267	3.653	4.901	275	1.200
Congo (África central)	3.475.000	40.250	54.963	32.873	1.056	1.296	41	43
Orinoco (Venezuela)	836.000	31.061	37.593	21.540	1.172	980	32	150
Yangtze (China)	1.705.383	25.032	28.882	21.377	463	789	247	478
Brahmaputra (India)	636.130	19.674	21.753	18.147	975	620	61	540
Yenisei (Rusia)	2.440.000	17.847	20.966	15.543	231	563	68	13
Lena (Rusia)	2.430.000	16.622	19.978	13.234	216	524	49	18
Paraná (Argentina)	1.950.000	16.595	54.500	4.092	265	516		
Mississippi (Estados Unidos)	3.923.799	14.703	20.420	10.202	118	464	125	210
Obi (Rusia)	2.949.998	12.504	17.812	8.791	134	394		

El río más caudaloso del mundo, el Amazonas, aporta por sí solo alrededor de un 16 por ciento del caudal total de agua de los ríos y, junto con los otros cuatro sistemas fluviales más grandes (Congo, Orinoco, Yangtze, Brahmaputra), aporta el 27 por ciento.

Fuentes: GRDC, 1996; Berner y Berner, 1987.

## Calidad del agua

La calidad del agua natural en los ríos, lagos y embalses, y de las aguas subterráneas depende de una serie de factores interrelacionados. Entre estos factores se encuentran la geología, el clima, la topografía, los procesos biológicos y el uso del suelo, así como el tiempo en el que el agua ha estado retenida. No obstante, en los últimos 200 años, las actividades humanas se han desarrollado hasta el punto de que en este momento quedan pocos ejemplos de masas de agua natural. Esto se debe principalmente al desarrollo urbano e industrial y a la intensificación de las prácticas agrícolas, en combinación con el acarreo de residuos procedentes de estas actividades por las aguas superficiales y subterráneas y por la atmósfera. La escala e intensidad de esta contaminación

varía considerablemente. La tabla 4.8 muestra algunos de los determinantes químicos en los ríos típicos del mundo, tanto naturales como contaminados.

Existen problemas de ámbito mundial como son los metales pesados, problemas regionales como la lluvia ácida, y otros muchos más localizados, como por ejemplo la contaminación de las aguas subterráneas. En muchos lugares, la contaminación de las aguas subterráneas se ha producido debido a las filtraciones de los tanques de almacenamiento, residuos mineros y vertidos accidentales (Herbert y Kovar, 1998).

Tabla 4.8: La composición química del agua de ríos tipo (concentración en miligramos/litro)

	Calcio (Ca <sup>++</sup> )	Magnesio (Mg <sup>++</sup> )	Sodio (Na <sup>+</sup> )	Potasio (K <sup>+</sup> )	Cloro (Cl)	Sulfato (SO <sub>4</sub> )	Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	Total de sólidos disueltos (TSD)
Real	14,7	3,7	7,2	1,4	8,3	11,5	53	10,4	110,1
Natural	13,4	3,4	5,2	1,3	5,8	8,3	52	10,4	99,6

Las diferencias que aparecen en esta tabla entre la composición química natural y real de las aguas de río, subrayan la importancia de la contaminación del agua en el mundo.

Fuente: Meybeck, 1979.

Tabla 4.9: Los principales problemas de calidad del agua en el mundo

Problema	Masas de agua contaminadas	Sector afectado	Espacio de tiempo entre la causa y el efecto	Alcance de los efectos
Contaminación orgánica	ríos ++ lagos + aguas subterráneas +	medio acuático	<1 año	entre local y provincial
Patógenos	ríos ++ lagos + aguas subterráneas +	salud ++	<1 año	local
Salinización	aguas subterráneas ++ ríos +	mayoría de los usos medio acuático salud	1-10 años	entre provincial y regional
Nitratos	ríos + lagos + aguas subterráneas ++	salud	>10 años	entre provincial y regional
Metales pesados	todas	salud medio acuático flujos oceánicos	<1 a >10 años	entre local y mundial
Productos orgánicos	todas	salud medio acuático flujos oceánicos	1 a 10 años	entre local y mundial
Acidificación	ríos ++ lagos ++ aguas subterráneas +	salud medio acuático	> 10 años	entre provincial y regional
Eutrofización	lagos ++ ríos +	medio acuático mayoría de los usos flujos oceánicos	>10 años	local
Carga de sedimento (incremento y reducción)	ríos + lagos	medio acuático mayoría de los usos flujos oceánicos	1-10 años	regional
Desviaciones, presas	ríos ++ lagos + aguas subterráneas ++	medio acuático mayoría de los usos	1-10 años	entre provincial y regional

+ Problema grave a escala mundial

++ Problema muy grave a escala mundial

Contaminantes de distintos tipos encuentran, antes o después, su camino hacia las masas de agua de todos los tipos. Aunque algunos problemas puedan tardar años en hacerse evidentes, la baja calidad del agua afecta tanto a la salud humana como al ecosistema.

Fuente: OMS/PNUMA, 1991.

Esta contaminación da mayor importancia al factor tiempo, ya que los sistemas de aguas subterráneas son casi imposibles de limpiar y muchos contaminantes son persistentes y siguen siendo un peligro durante largos períodos de tiempo, incluso en bajas concentraciones. Hay también zonas del mundo en las que existen elementos traza naturales presentes en las aguas subterráneas, siendo los más importantes el arsénico y los fluoruros. Éstos producen graves efectos sobre la salud. De hecho, en muchos de los problemas relacionados con la calidad del agua en el mundo, mencionados por la OMS/ PNUMA (1991), la salud es un factor fundamental (véase tabla 4.9).

El arsénico está ampliamente extendido en la corteza terrestre y en las aguas subterráneas aparece como resultado de la disolución de minerales. La exposición al arsénico a largo plazo, a través del agua potable, produce cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón, así como otros efectos en la piel, como cambios en la pigmentación y engrosamiento. El cáncer es la expresión última de esta exposición y normalmente tarda más de diez años en desarrollarse. Un estudio reciente (BGS y DPHE, 2001) indica que

Bangladesh hace frente al mayor 'envenenamiento' colectivo de la historia, que puede afectar a entre 35 y 77 millones de habitantes de los 130 millones que tiene el país. En otros países también se plantean problemas similares debido a la excesiva concentración de arsénico en el agua potable. Las cantidades excesivas de fluoruros en el agua potable también pueden resultar tóxicas. La decoloración de los dientes se produce en todo el mundo, pero los efectos negativos sobre el esqueleto, causados por la ingestión a largo plazo de grandes cantidades, son especialmente graves en al menos ocho países, entre los que se encuentra China, donde 30 millones de habitantes sufren de fluorosis crónica. El mejor remedio es encontrar un abastecimiento de agua con niveles seguros de arsénico y fluoruros, pero es posible que la única solución sea eliminar la concentración de estas sustancias.

Las materias orgánicas procedentes de las aguas residuales domésticas, los residuos municipales y los efluentes agroindustriales, son los contaminantes más extendidos en el mundo (PNUMA, 1991). Se vierten en los ríos, lagos y acuíferos sin

tratar, especialmente en las zonas más densamente pobladas de Asia, África y Suramérica y en diversas cantidades, cerca de algunos núcleos urbanos en el resto del mundo. Su volumen ha aumentado en los últimos cien años y es probable que este aumento continúe en el futuro a medida que se acelere el ritmo del desarrollo. Contienen materias fecales, en ocasiones infectadas por organismos patógenos, lo que produce un aumento de la morbilidad y de la mortalidad entre las poblaciones que utilizan esa agua.

Estas materias orgánicas contienen también elevadas concentraciones de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, que producen eutrofización de lagos y embalses, favoreciendo el crecimiento anormal de las plantas y mermando el oxígeno. Los niveles de nitrógeno también se han elevado debido al creciente uso de fertilizantes en agricultura, tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados. Resulta preocupante que la concentración de nitratos en buena parte de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas exceda de la recomendada por la OMS de 10 miligramos por litro. En muchas zonas del mundo, la concentración de ciertos metales pesados en el agua de los ríos ha aumentado debido a la lixiviación de los basureros y al drenaje y la fusión de las minas, hasta el punto de alcanzar entre cinco y diez veces los niveles normales (Meybeck, 1998). También se ha incrementado la concentración de microcontaminantes orgánicos procedentes del uso de plaguicidas, disolventes industriales y materiales semejantes. Resultan preocupantes los efectos sobre la salud de estos y otros contaminantes, pero las consecuencias de la exposición a estas sustancias a menudo no están claras.

La acidificación de las aguas superficiales fue un serio problema para los países desarrollados entre los años 1960 y 1970, especialmente en Escandinavia, en el centro y oeste de Europa y en el nordeste de Norteamérica pero, desde entonces, las emisiones de azufre se han reducido y los problemas de lluvia ácida han disminuido. El impacto principal se produjo en la vida acuática que, en general, no puede sobrevivir con niveles de pH inferiores a 5, pero también hay problemas para la salud porque la acidez elevada aumenta la concentración de metales en el agua potable. La acidificación probablemente continuará en países y regiones donde la industrialización está aumentando, como por ejemplo la India y China.

Para el mundo en desarrollo, el aumento de la salinidad constituye una forma grave de contaminación del agua. En regiones áridas y semiáridas, la escasez de drenaje, el grano fino de sus suelos y las elevadas tasas de evaporación tienden a concentrar sales en los suelos de las zonas de regadío. La salinidad afecta a grandes áreas, a algunas de manera limitada y a otras de forma más grave. En algunos casos, la salinidad natural procede del propio terreno, como resultado del desmonte con fines agrícolas y del incremento de infiltración que esto puede causar. Shiklomanov (en preparación) calcula que alrededor del 30 por ciento de las áreas de regadío del mundo sufren problemas de salinidad, y la solución de este problema se considera muy costosa (Foster y otros, 2000). La mayoría de los ríos transporta sedimentos en forma de materiales en suspensión y materiales de arrastre; en algunos casos estos últimos se cargan de metales y otros materiales tóxicos (véase el mapa 4.5). Esta carga de sedimentos se ajusta al régimen de caudal del río a lo largo del tiempo, y los cambios en este régimen, acompañados por el incremento o la disminución en la carga, pueden producir problemas aguas abajo. Entre estos problemas se pueden mencionar la reducción progresiva del

volumen de los embalses por aterramiento, el arrastre de los canales de los ríos y el depósito de sedimento en ellos, amenazando la protección natural contra las inundaciones, la pesca y otras formas de vida acuática. El desvío de los ríos, incluyendo las presas, puede producir algunos de estos efectos sobre el sedimento, pero además puede alterar las características biológicas y químicas de los ríos en detrimento de las especies autóctonas. El total mundial de sedimento en suspensión transportado a los océanos alcanza los 51.100 millones de toneladas al año (Walling y Webb, 1996).

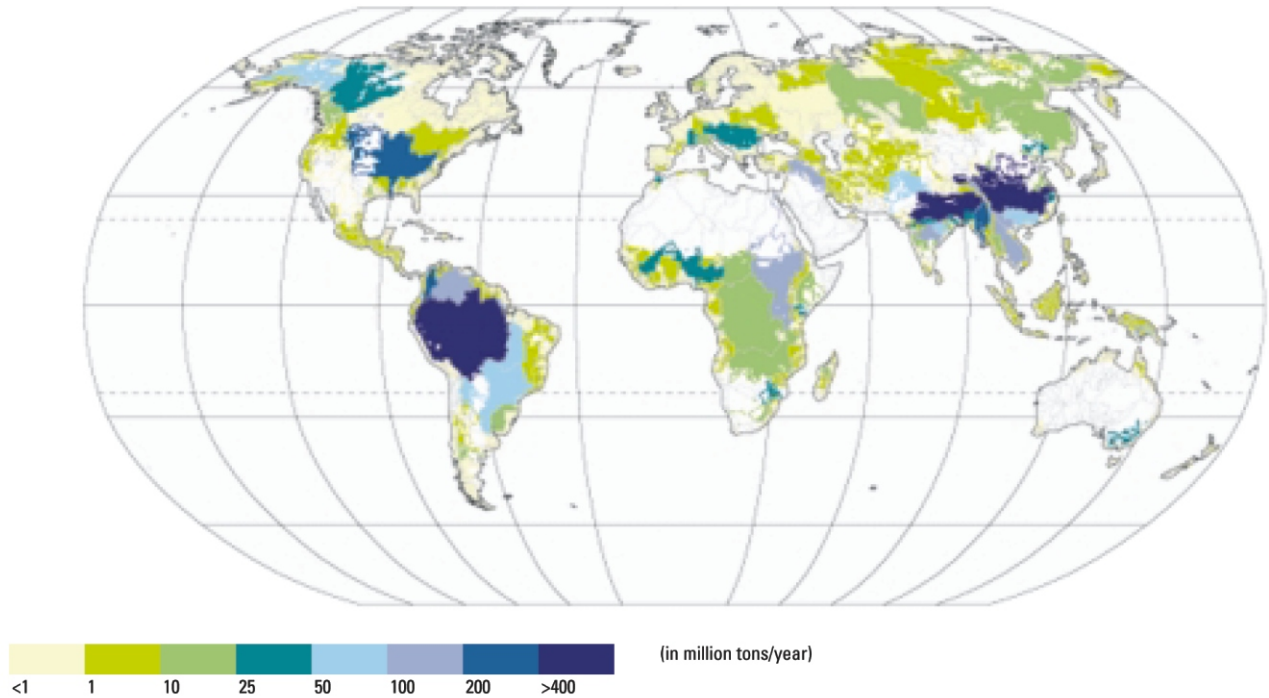
A pesar de los esfuerzos a escala regional y mundial, realizados desde los años 1970 para mejorar la situación, el conocimiento de la calidad del agua todavía es incompleto, especialmente para las sustancias tóxicas y los metales pesados (Meybeck, 1998). Además, no parece haber estimaciones del volumen total mundial de aguas superficiales y subterráneas contaminadas, ni de la gravedad de esta contaminación. Shiklomanov (en preparación) ofrece estimaciones del volumen de aguas residuales producido por cada continente, que en total alcanzó una cantidad superior a los 1.500 Km<sup>3</sup> en 1995. Existe la opinión de que cada litro de agua residual contamina al menos 8 litros de agua dulce; por lo tanto, según esto, unos 12.000 Km<sup>3</sup> de los recursos hídricos del planeta no son aptos para el consumo. Si esta cantidad crece al mismo ritmo que la población, y se prevé que habrá una población de 9 000 millones de habitantes en 2050, los recursos hídricos del mundo se verán reducidos en unos 18.000 Km<sup>3</sup>.

### Impactos humanos sobre los recursos hídricos

En los párrafos anteriores se han comentado varios aspectos de la influencia de las actividades humanas sobre el ciclo hidrológico y sobre los recursos hídricos. A su vez, hay también aspectos relacionados con el uso de la tierra que afectan al ciclo hidrológico. Los humedales, por ejemplo, pueden tener efectos importantes, muchos de ellos beneficiosos para el género humano, como puede ser el control de las inundaciones, el mantenimiento de un caudal bajo, la captación de nutrientes y la fijación de contaminantes (Acreman, 2000). Estos factores son un componente clave de las políticas derivadas del Convenio sobre los Humedales (Davis, 1993) y de numerosas iniciativas nacionales, algunas relacionadas con el valor económico de los humedales (Laurans y otros, 1996).

Los estudios sobre el impacto hidrológico de los cambios en la utilización de la tierra tienen una historia larga y bien documentada (Swanson y otros, 1987; Blackie y otros, 1980; Rodda, 1976; Sopper y Lull, 1967). La técnica de comparar dos cuencas se desarrolló en Suiza en la década de 1890, y subsiguientemente en Japón y Estados Unidos entre 1910 y 1930. Se utilizaron cuencas similares, normalmente pequeñas y contiguas con el mismo uso de la tierra, con el fin de medir su balance hidrológico para cuantificar los efectos del cambio, especialmente en lo que se refiere a la escorrentía. Tras un período de calibración, se cambió el uso de la tierra en una de las cuencas y se cuantificaron las diferencias en el comportamiento hidrológico de las dos cuencas durante el período siguiente. Entre los cambios estudiados estaban el desmonte de los bosques, los efectos del fuego, las diferentes formas de cultivo, el pastoreo y la repoblación forestal. Coweeta en Estados Unidos, Valdai en Rusia, y Jonkershoek en Suráfrica son algunos de los lugares en los que se realizaron estos experimentos en las décadas de 1920 y 1930.

Mapa 4.5. Carga de sedimentos por cuencas



Los cambios en la carga de sedimentos reflejan cambios en las condiciones de las cuencas, como el clima, los suelos, las tasas de erosión, la vegetación, la topografía y el uso de la tierra. La acción del hombre ejerce una gran influencia, por ejemplo, la construcción de presas (véase la elevada carga de sedimentos en China y en la cuenca del Amazonas, donde se han construido grandes presas) y las plantaciones de bosques en cuencas de drenaje.

Fuente: Syvitski y Morehead, 1999

Se realizó un gran número de estudios de este tipo en diferentes partes del mundo en las décadas de 1950 y 1960, y la mayoría contribuyó al programa sobre cuencas representativas y experimentales, que constituyó una parte importante de la Década Hidrológica Internacional (DHI, 1965-1974) de UNESCO. Se intensificó la investigación (Toebe y Ouryaev, 1970) y se compararon los resultados (IAHS/UNESCO, 1970) y, a medida que fue pasando el tiempo, se prestó mayor interés a los asuntos relacionados con la calidad del agua. Los resultados obtenidos de muchas de las cuencas representativas y experimentales se utilizaron en el programa FRIEND, para obtener un mejor conocimiento de los efectos de las actividades humanas sobre el ciclo hidrológico a escala regional, y para mejorar la evaluación de los recursos hídricos. La Red Europea de Cuencas Experimentales y Representativas (ERB), que comenzó a funcionar en 1986, desarrolló un estudio sobre los métodos de comparación de las cuencas hidrológicas (Robinson, 1993). Maksimovic (1996) realizó una revisión de los métodos para investigar la hidrología urbana. A comienzos del siglo XXI, cuando el PHI se ha ampliado para incluir las dimensiones sociales, políticas y medioambientales del agua y de los recursos hídricos, parece oportuno que el Programa sobre Hidrología, Medio Ambiente, Vida y Política (HELP) retome como base para su estudio una red formada por una selección de cuencas fluviales de todo el mundo.

Hay algunos análisis de los resultados de estos diferentes estudios sobre cuencas representativas y experimentales en todo el mundo, por ejemplo el de Falkenmark y Chapman (1989), pero no hay muchas publicaciones recientes. Una razón puede ser que las condiciones varían, hasta tal punto, que las conclusiones obtenidas de un grupo de estudios de cuencas pueden no coincidir con las de otro grupo procedente de una zona climática diferente. Otro problema es que hay muchos resultados para latitudes templadas y relativamente pocos para otras regiones del planeta, a pesar de que ha aumentado la atención que se presta a regiones clave, como pueden ser los trópicos (Bonell y otros, 1993). Sin embargo, Ellis (1999) resumió los resultados de cincuenta y dos estudios relacionados fundamentalmente con el impacto de las zonas urbanas sobre el ciclo hidrológico, concluyendo que:

- La infiltración y la recarga de los sistemas acuíferos se han reducido y la escorrentía superficial ha aumentado, tanto en volumen como en proporción, debido al aumento de las áreas superficiales impermeables, lo que ha producido un aumento de las inundaciones en las cuencas bajas de los ríos;

- Debido a la extracción de aguas subterráneas, se ha producido una disminución de los niveles de agua y un hundimiento del terreno.

- Una mayor cantidad de contaminantes procedentes de la escorrentía superficial y de las descargas del alcantarillado, especialmente durante las tormentas en las zonas urbanas llega a los cursos de los ríos y a las masas de agua.
- Las alcantarillas antiguas y mal conservadas producen filtraciones a las aguas subterráneas.
- Las filtraciones industriales, los vertidos y las sustancias químicas peligrosas, así como la escasez de planificación en la eliminación de basuras sólidas y líquidas, producen la contaminación extensiva de suelos y aguas subterráneas.
- El aumento de la filtración de aguas superficiales artificiales y la recarga mediante mecanismos de control de las fuentes, reducen la calidad del agua subterránea.
- Los hábitats y la diversidad de especies disminuyen en las aguas receptoras.

Hibbert (1967) revisó los resultados de treinta y nueve estudios, principalmente en Estados Unidos, sobre los efectos que la alteración de la cubierta forestal podría producir en la cantidad de agua que retiene una cuenca. Demostró que, en general, la reducción del área de bosque aumenta la cantidad de agua de la cuenca que se retiene, mientras que la reforestación la disminuye. El aumento alcanzó un máximo en el primer año de tala completa, con un límite superior equivalente a una profundidad de 4,5 mm al año por cada reducción porcentual de la cubierta forestal. A medida que el bosque vuelve a crecer, el aumento del caudal disminuye proporcionalmente al porcentaje de bosque recuperado. Dunne y Leopold (1978) alcanzaron conclusiones semejantes y añadieron que el efecto de reducir la cubierta forestal puede tener mucha menor importancia en las regiones áridas. Bosch y Hewlett (1982) revisaron los resultados obtenidos en noventa y cuatro estudios de pares de cuencas en distintas partes del mundo. En el caso de los bosques de pinos y eucaliptos, hallaron que un cambio en la cubierta forestal de un 10 por ciento producía un cambio en la retención media de 40 mm, mientras que las cifras correspondientes en el caso de madera dura y matorral eran de 25 mm y el 10 por ciento. Las investigaciones realizadas posteriormente concuerdan generalmente con estos resultados, pero el énfasis ha cambiado, pasándose de realizar estudios relativamente sencillos sobre la cantidad de agua, a otros sobre los procesos que se producen (Kirby y otros, 1991), incluyendo la hidrobiogeoquímica de las cuencas, en un intento por comprender el mecanismo que opera. Sin embargo, parece que cuanto más se sabe del funcionamiento de una cuenca, más complejos y detallados se muestran los procesos y mayor es el número de cuestiones y dudas que se generan (Neal, 1997).

### Recursos de agua desalada

Con el crecimiento de la población y las preocupaciones cada vez mayores sobre la escasez de agua, en algunos países, especialmente en Oriente Próximo, se están instalando plantas desalinizadoras para convertir el agua salada (por ejemplo agua de mar, aguas salobres o aguas residuales tratadas) en agua dulce. El deterioro de las aguas subterráneas existentes, combinado con una importante reducción de los costes, ha dado un nuevo impulso a esta antigua tecnología considerada antaño un lujo costoso. El mercado mundial de la desalinización se encuentra en este momento en 35.000 millones de dólares anuales y podría

duplicarse en los próximos quince años.

El proceso de desalinización puede aportar mucho a las plantas relativamente pequeñas que producen agua para consumo doméstico, a elevado coste, en regiones en las que escasea el agua. Para el riego, sin embargo, el coste es una limitación importante. Por lo tanto, excepto en situaciones extremas, el agua de mar desalada no se ha utilizado para riego y la contribución del agua de mar desalada a los recursos mundiales disponibles es muy pequeña.

En 2002 había unas 12.500 plantas desalinizadoras en 120 países del mundo. Proporcionaban alrededor de 14 millones de m<sup>3</sup>/día de agua dulce, lo que constituye menos del 1 por ciento del consumo mundial total. Los usuarios más numerosos se encuentran en Oriente Próximo (alrededor del 70 por ciento de la capacidad mundial), sobre todo en Arabia Saudita, Kuwait, los Emiratos Árabes Unidos, Qatar y Bahrein, y en el norte de África (6 por ciento), principalmente en Libia y Argelia. Entre los países industrializados, Estados Unidos es uno de los mayores usuarios (6,5 por ciento, en California y zonas de Florida). La mayoría de los otros países tiene menos del 1 por ciento de la capacidad mundial. Se espera que la demanda de agua de mar desalada aumente en los países que ya la utilizan, y también aparecerá en otras regiones y países a medida que las alternativas menos costosas que utilizan se vayan agotando. Sin embargo, eliminar de manera segura las sustancias químicas tóxicas que se producen en los procesos de desalinización, es todavía un problema.

Entre los distintos procesos de desalinización existentes, los siguientes son los más interesantes para la producción de agua en gran escala: ósmosis inversa (OI), destilación multiefecto (DME), y destilación súbita multietapa (DSME). Esta última se utiliza fundamentalmente en los países productores de petróleo de Oriente Medio. En la actualidad, la ósmosis inversa ofrece las perspectivas más favorables, ya que requiere menos energía e inversión que otras tecnologías. Se necesita mucha energía para desalar el agua, aunque su forma y cantidad dependen del proceso elegido. En el caso de la OI, por ejemplo, se requieren unos 6 kilovatios/hora (KWh) de electricidad para cada m<sup>3</sup> de agua potable producida. En los procesos de destilación, como DME y DSME, la energía que se aplica es principalmente en forma de calor (agua o vapor a 70-130°). Para DME el consumo es del orden de 25-200 KWh/ m<sup>3</sup> y para DSME de 80-150 KWh/ m<sup>3</sup>.

Los países del Golfo, como Arabia Saudita, los Emiratos Árabes Unidos y Kuwait, utilizan plantas con la doble función de desalinización y producción de energía a gran escala. Jordania, Israel y la Autoridad Palestina consideran cada vez más el agua desalada como una solución económica y viable para garantizar su abastecimiento de agua en el futuro. El centro turístico de Túnez, en el norte de África, está investigando esta alternativa a otros grandes programas de transporte de agua. A pesar de los costes, se están construyendo plantas de desalinización en Italia, España, Chipre, Malta, Suráfrica, Argelia, Marruecos, Corea del Sur y Filipinas. En el oeste de Estados Unidos, donde la sequía y la escasez de agua son frecuentes, algunas ciudades como Santa Bárbara en California están invirtiendo, juntamente con las empresas de abastecimiento de agua para incrementar el suministro de agua con agua desalada.

## La dimensión regional

Un análisis de la situación de los recursos de agua dulce en los distintos continentes muestra importantes diferencias que un examen en todo el mundo, basado en valores medios, puede dejar ocultas. Con el fin de obtener una visión real de la situación de los recursos de agua dulce, es importante abordar esta perspectiva regional. A su vez, la apreciación mundial y regional no estaría completa si no se incluyeran datos de ámbito local, como los proporcionados por los ejemplos que aparecen en la correspondiente sección de este informe.

### África

El continente africano ocupa una superficie de 30,1 millones de Km<sup>2</sup> que se extiende alrededor del ecuador. Tiene una población de más de 700 millones que aumenta rápidamente, buena parte de la cual vive en algunos de los países menos desarrollados del mundo. La red hidrológica es también la menos desarrollada del mundo, con cobertura dispersa y registros fragmentarios y cortos, excepto en el caso de la cuenca del Nilo y de ciertos países del norte y del sur del continente. La mayor parte de África está formada por rocas precámbricas duras que forman una plataforma con algunas áreas montañosas situadas sobre todo en la periferia y en la zona donde la falla tectónica cruza el continente. El clima es mucho más variado que el relieve, con el desierto más caluroso y la selva más húmeda; la cantidad y la distribución de las precipitaciones en el espacio y en el tiempo son importantísimas. Las cantidades anuales varían entre los 20 mm al año en la mayor parte del Sahara a 5.000 mm cerca de la desembocadura del Níger (véase el mapa 4.2 que muestra la precipitación media anual). Debido a la gran cantidad de radiación solar y a las altas temperaturas, los índices de evaporación en África son altos. Los desiertos, que cubren alrededor de la tercera parte del continente, en el norte y en el sur, poseen poca agua superficial, pero grandes cantidades de agua subterránea. El Congo (África central) es el segundo río más caudaloso del mundo y el Nilo el más largo (6.670 km), pero los ríos Orange (Suráfrica), Zambeze (África meridional), Níger y Senegal (África occidental), son también importantes. El caudal medio anual de África durante el período 1921-1985 fue de unos 4.000 Km<sup>3</sup>. Muchos de los ríos poseen un considerable potencial de energía hidroeléctrica que ya está siendo explotado en algunas presas y centrales eléctricas como las de Kariba (Zambia) y Asuan (Egipto). Estos programas han propiciado el desarrollo, pero han tenido importantes repercusiones hidroecológicas y sociales. En grandes áreas de regadío han aumentado los niveles freáticos y la salinidad. En los últimos diez años, África ha sufrido cerca de la tercera parte de todas las catástrofes ocasionadas por el agua (inundaciones y sequías, en este caso) que se han producido en el mundo, con cerca de 135 millones de personas afectadas (el 80 por ciento por la sequía).

### América del Norte

América del Norte, incluyendo las islas adyacentes al norte y al sur, tiene una superficie de 24,25 millones de Km<sup>2</sup> y una población de unos 450 millones de habitantes, más de la mitad de los cuales vive en Canadá y Estados Unidos, países ambos altamente desarrollados. Estos países tienen las redes hidrológicas más avanzadas del mundo y utilizan normalmente los datos procedentes de radares y satélites. La estructura

relativamente sencilla del continente, con altas montañas en el tercio occidental y vastas llanuras que se extienden hacia el este, hacia las montañas más bajas, permiten que los extremos climatológicos del Ártico y de los trópicos influyan sobre el clima, por ejemplo, los huracanes que recorren el sur. Las precipitaciones siguen más o menos el mismo patrón que el relieve. En la costa del Pacífico las precipitaciones pueden alcanzar los 3.000 mm, y más en las zonas altas; se pueden producir variaciones considerables entre las montañas del oeste y las mesetas, mientras que hacia el este las precipitaciones oscilan entre 500 y 1.500 mm. En el sur existen zonas muy áridas a caballo entre México y Estados Unidos. El norte está dominado por los Grandes Lagos y un gran número de otros lagos más pequeños; existen además muchos embalses y acuíferos en casi todo el continente. El principal sistema fluvial es el Mississippi-Missouri, seguido por el San Lorenzo, el Mackenzie, el Columbia y el Colorado. En el período 1921-1985, estos ríos y otros muchos más pequeños, llevaron una cantidad media anual de escorrentía de 7.900 Km<sup>3</sup> a los mares que rodean el continente. En los siglos XIX y XX, la actividad humana ha cambiado considerablemente el patrón natural de escorrentía en la mayoría de las cuencas y la situación de los mantos freáticos en muchos acuíferos. En la mayoría de los ríos el caudal está regulado, realizándose muchas extracciones y descargas con diversos fines. En Canadá, se producen trasvases entre grandes cuencas para ayudar a producir energía. La agricultura, principalmente la de regadío en el oeste, causa problemas en los recursos hídricos, y la industria y los residuos procedentes de las minas producen contaminación. En los últimos años se han producido graves problemas de inundaciones en la cuenca del Mississippi, y, en los países ribereños del Caribe, se producen inundaciones recurrentes al paso de los huracanes.

### América Latina y el Caribe

Suramérica tiene una superficie de 17,9 millones de Km<sup>2</sup> y una población de menos de 400 millones de habitantes, alrededor de un 6 por ciento del total mundial; sin embargo, produce alrededor del 26 por ciento de los recursos hídricos del planeta. Posee una moderna red hidrológica de aproximadamente 6.000 estaciones, algunas con datos de más de 50 años de antigüedad. La media de precipitaciones en Suramérica es de alrededor de 1.600 mm al año, con una media de aproximadamente 2.400 mm en la cuenca del Amazonas. En el desierto de Atacama, los totales pueden no llegar a superar los 20 mm, y en los Andes, en el sur de Chile, pueden superar los 4.000 mm. Los índices de evaporación son elevados en la mayor parte del continente y, debido a la variabilidad de las precipitaciones en ciertas áreas, como el noreste de Brasil, las sequías constituyen un problema frecuente. El Amazonas es el río más caudaloso del mundo, además del Río de la Plata y los ríos Orinoco, San Francisco y Paranaíba que son también muy importantes. La escorrentía media en Suramérica para el período 1921-1985 se calculó en unos 12.000 Km<sup>3</sup> al año. Existen acuíferos, lagos y embalses grandes y productivos, pero la elevada densidad de población en ciertas áreas y las aguas residuales sin tratar que se producen, provocan problemas de contaminación en el agua, y en algunos lugares existen problemas similares debido a los efluentes agrícolas y a los residuos mineros.

América Central tiene una superficie de 807.000 Km<sup>2</sup> y una población de 35 millones de habitantes. Varios factores han puesto a prueba sus recursos hidrológicos a pesar de su

abundancia. La cantidad anual de agua disponible per cápita supera los 3.000 m<sup>3</sup>/año, pero sólo el 42 por ciento de la población rural y el 87 por ciento de la población urbana tienen acceso a agua potable. Dos terceras partes de la población vive en áreas que vierten al Pacífico, mientras que sólo el 30 por ciento del agua desemboca en este océano. La otra tercera parte de la población se encuentra en la cuenca del Caribe, que genera el 70 por ciento del agua del istmo. Esta desigual distribución complica la situación de los recursos hídricos de la región.

E1 Caribe tiene una superficie de 269.000 Km<sup>2</sup>. Los países de la zona difieren en tamaño, población y condiciones económicas. La temperatura varía entre los 24° C en febrero y los 31° C en agosto, observándose también una gran variación en la cantidad de lluvia que cae en la región, desde los 500 mm/año en las Antillas Holandesas, hasta los 7.700 mm/año en la República Dominicana. La región tiene agua suficiente, pero el acceso a un agua con garantía de seguridad se está convirtiendo en un importante problema socioeconómico. El crecimiento de la población también ha incrementado la demanda de agua. La calidad del agua es un problema generalizado en toda la región debido a la degradación producida por las sustancias agrícolas tóxicas y a la mala gestión de los residuos sólidos, así como por la actividad minera e industrial.

## Asia

El continente asiático tiene una superficie de 43,5 millones de Km<sup>2</sup>, lo que constituye una tercera parte de la superficie del planeta, y alberga una población de 3.445 millones de personas. Es un continente de grandes contrastes: en su relieve, clima, recursos hídricos, densidad de población y niveles de vida, por ejemplo. También existen contrastes en la red hidrológica: los países ribereños del Pacífico y del Índico, como Japón y Malasia, poseen redes con mucha capacidad y contrastan con los que se encuentran en el interior del continente donde las redes son generalmente deficientes. La geología y el relieve de Asia son muy complicados y el clima es extremadamente variado, dominando el monzón en el sur y el este. Las altas cadenas montañosas y las mesetas intensifican los cambios climáticos, alterando el patrón de precipitaciones que, en general, disminuye de sur a norte y de este a oeste (véase el mapa 4.2 sobre la precipitación anual media).

En la mitad sur del continente, con áreas desérticas en el oeste y en el centro, se registran elevados índices de evaporación. Algunos de los ríos más caudalosos del mundo recorren Asia, desembocando en los océanos Ártico, Pacífico e Índico (véase la tabla 4.7): el Ganges y el Brahmaputra (India); el Yangtse (China); el Yenisei, el Lena, el Obi, el Amur (Federación Rusa); y el Mekong (sureste de Asia), por ejemplo, aunque hay grandes áreas que vierten en el Mar de Aral y en el Caspio y otras interiores en China occidental. El volumen medio anual de escorrentía en Asia para el período 1921-1985 se estima que fue de 13.500 Km<sup>3</sup>, del cual alrededor de la mitad se originó en el sureste de Asia, frente a los 7 Km<sup>3</sup> que se calculan en la Península Arábiga. En Asia hay grandes acuíferos y muchos lagos, como el lago Baikal en la Federación Rusa. China, India, Rusia y Pakistán tienen un gran número de embalses, utilizados fundamentalmente para regadío. El continente se enfrenta a graves problemas de inundaciones y sedimentación, especialmente China, así como a la contaminación del agua, tanto superficial como subterránea, en zonas de alta densidad de población. Los problemas de agua más acusados son los que se producen en la cuenca del mar de Aral.

## Europa

Con una superficie de 10,46 millones de Km<sup>2</sup>, Europa es una de las regiones más densamente pobladas y más desarrolladas del mundo. Tiene una tupida red hidrológica en la que se encuentra una serie de estaciones con datos de 200 años de antigüedad o más. Esta red está más desarrollada en el oeste y menos en el este del continente. Las precipitaciones aumentan, en general, en dirección oeste, hacia la costa atlántica, desde los 400 mm en Rusia y Polonia a más de 4.000 mm al año en Noruega y Escocia (véase el mapa 4.2 sobre la precipitación media anual). También aumentan con la altitud, como ocurre por ejemplo en los Alpes. No obstante, algunas zonas del sur, como España e Italia, reciben poca cantidad de lluvia y experimentan elevados porcentajes de evaporación que dan lugar a problemas en los recursos hídricos. Aunque hay algunos grandes ríos, como el Volga (250 Km<sup>3</sup>), el Danubio (225 Km<sup>3</sup>) y el Rin (86 Km<sup>3</sup>), la mayoría son relativamente pequeños, muchos de ellos con cursos con fuertes pendientes. La escorrentía media anual en Europa, para el período 1921-1985, se estima en 2.900 Km<sup>3</sup> al año, la mayor parte procedente del norte de Europa, y la menor de la zona suroriental del continente. Existen numerosos lagos y embalses y grandes acuíferos. En los últimos 200 años, la industria, la producción de energía, la agricultura y el desarrollo urbano han cambiado los patrones de escorrentía en el continente alterando su calidad. Muchos ríos y lagos estaban altamente contaminados debido al vertido de aguas residuales sin tratar, residuos de minas y efluentes agrícolas.

## Oceanía

Australia es el más pequeño de los continentes, con una superficie de 7,6 millones de Km<sup>2</sup> y una población de cerca de 20 millones de habitantes. No obstante, las islas de Tasmania y Nueva Guinea, las de Nueva Zelanda y las que forman el resto de Oceanía, añaden una extensión de 1,27 millones de Km<sup>2</sup> y alrededor de 10 millones de habitantes. Australia y Nueva Zelanda son países desarrollados con redes hidrológicas avanzadas, pero en el resto de la región está menos desarrollada. Australia es una antigua meseta que se eleva en la parte más oriental, pero la estructura y geología de buena parte del resto de Oceanía es más variada y reciente. Australia es el continente más seco, con una precipitación media anual de entre 200 y 300 mm en la mayor parte del país, pudiendo llegar hasta 1.200 mm e incluso más en el borde oriental, y a 1.000 mm en el extremo suroeste. En contraste, muchas de las islas tienen precipitaciones mucho más elevadas: por ejemplo, en la costa oeste de la isla sur de Nueva Zelanda se han registrado 5.000 mm al año. Los niveles de evaporación son elevados, tanto en Australia como en el resto de la región. Los ríos de Oceanía son cortos y rápidos, y producen una media anual de escorrentía de unos 2.000 Km<sup>3</sup>. La escorrentía media de Australia es de sólo 350 Km<sup>3</sup> al año: exceptuando el Murray-Darling, la mayoría de los ríos son cortos y desembocan en la costa este. Hay considerables cantidades de agua subterránea, pero existen problemas de salinidad, algunos producidos por las prácticas de regadío. Hay relativamente pocos lagos en Australia y muchos de ellos son estacionales.

## Conclusiones

El ciclo natural del agua es complejo, tanto desde el punto de vista espacial como desde el punto de vista temporal. Los seres humanos necesitan un suministro de agua estable y desde hace varios miles de años han venido realizando obras hidráulicas. En este momento, el control de las escorrentías continentales por parte del hombre tiene ámbito mundial. Cada vez más, los seres humanos influyen significativamente en el ciclo hidrológico mundial, definiendo la naturaleza tanto física como química de los hidrosistemas. La alteración de la escorrentía debido a las obras hidráulicas y a la gestión del suelo, dificultará la identificación del impacto del cambio climático sobre los sistemas hídricos y, por tanto, afectará gravemente al abastecimiento de agua. Es muy posible que la presión sobre los sistemas hidrológicos interiores aumente, junto con el crecimiento de la población, el desarrollo económico y los cambios potenciales del clima. Entre los principales retos futuro están: la progresiva escasez de agua, su contaminación y el lento avance hacia el abastecimiento universal de agua limpia y saneamiento. La situación es paradójica: aunque hemos conseguido superar ciertos obstáculos, en la mayoría de los casos las soluciones han creado nuevos problemas.

Se ha producido un progreso significativo en la determinación de la naturaleza del agua en su interacción con el medio ambiente biótico y abiótico. La ecohidrología, que se ocupa de la gestión del agua ecológicamente sana y el funcionamiento de los ecosistemas, se está convirtiendo rápidamente en una disciplina muy activa. Los resultados obtenidos de una mejor comprensión de los procesos hidrológicos básicos han jugado un papel muy importante, hasta el momento, en la adaptación de los recursos hídricos a las necesidades de la humanidad, reduciendo los riesgos de las situaciones extremas. Nuestra capacidad de crear modelos ha mejorado significativamente con los rápidos avances en informática y con las tecnologías GIS. Como resultado, la estimación del impacto del cambio climático sobre los recursos hidrológicos está mejorando.

No obstante, existen aun muchos elementos desconocidos o incontrolados que dificultan la comprensión, como por ejemplo:

▫ Variabilidad en el espacio y en el tiempo:

- En la superficie y en grandes extensiones de terreno, existen fuertes contrastes entre los desiertos muy secos y las selvas lluviosas; en espacios más pequeños, los contrastes existen entre una ladera de una cadena montañosa y la otra, por ejemplo, los flancos sur y norte de la cordillera del Himalaya. También hay diferencias en la accesibilidad al agua subterránea, ya que en algunas zonas se pueden obtener fácilmente abundantes recursos mientras que, otras están casi desprovistas de aguas subterráneas renovables y de fácil extracción.

- En cuanto al tiempo (desde horas a décadas), existen a menudo grandes diferencias: desde precipitaciones de gran intensidad y corta duración, pasando por grandes diferencias entre las precipitaciones que se producen en las distintas estaciones, hasta variación entre distintos años y distintas décadas. Las pruebas testimonian que todas estas variaciones se hacen más intensas a medida que el clima cambia.

▫ La falta de una adecuada base de datos y de una apropiada recogida de datos en varias partes del mundo se hizo patente ya en la Agenda 21. A pesar de los avances en algunas infraestructuras de recogida de datos sobre el agua a escala nacional, nuestra capacidad para describir la situación y las tendencias de los recursos hídricos mundiales está disminuyendo. Todavía desconocemos el comportamiento de algunos de los parámetros hidrológicos en los trópicos húmedos, en las tierras altas y en las tierras llanas, por lo que la investigación y la capacitación son relevantes e importantes.



## Referencias

- Acreman, M. 2000. 'Wetlands and Hydrology'. Conservation of Mediterranean Wetlands, n°. 10. Arles, MedWet, Tour du Valat.
- AIH (Asociación Internacional de Hidrogeólogos). 2002. The State of the Resource Groundwater. Kenilworth.
- Alley, W.-A. 1999. Sustainability of Groundwater Resources. US Geological Survey Circular 1186.
- Bandyopadhyay, J.; Rodda, J.-C.; Kattlemann, R.; Kundzewicz, Z.W.; Kraemer, D. 1997. 'Highland Waters: A Resource of Global Significance'. En: B. Messerli y J.-D. Ives (eds.), Mountains of the World: A Global Priority. Londres y Nueva York, Parthenon Publishing.
- Baumgartner, A. y Reichel, E. 1970. Preliminary Results from a New Investigation of World's Water Balance, Symposium on the World Water Balance. vol. 3, n° 93. International Association of Hydrological Sciences.
- Berner, E.-K. y Berner, R.-A. 1987. The Global Water Cycle: Geochemistry and Environment. Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- BGS (British Geological Survey) y DPHE (Department of Public Health Engineering). 2001. Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. 4 volúmenes. BGS Technical Report WC/00/19. Keyworth, British Geological Survey.
- Blackie, J.-R.; Ford, E.-D.; Horne, J.-E.-M.; Kinsman, D.-J.-J.; Last, F.-T.; Moorhouse, P. 1980. Environmental Effects of Deforestation: An Annotated Bibliography. Occasional Publication n°. 10. Cumbria, Freshwater Biological Association.
- Bonell, M.; Hufschmidt, M.-M.; Gladwell, J.-S. (eds.). 1993. Hydrology and Water Humid Tropics. Cambridge, UNESCO, Cambridge University Press.
- Bosch, J.-M. y Hewlett, J.-D. 1982. 'A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration'. Journal of Hydrology, vol. 55, págs. 323.
- Bouwer, H. 2002. 'Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering'. Hydrogeology Journal, vol. 10, págs. 12142.
- Burke, J.-J. y Mönch, M.-H. 2000. Groundwater and society: resources, tensions and opportunities. United Nations Publication ST/ESA/205.
- Clarke, R.; Lawrence, A.-R.; Foster, S.-D.-D. 1996. Groundwater a threatened resource. Nairobi, Biblioteca del Medio Ambiente del PNUMA 15.
- Cornford, S.-G. 2001. 'Human and Economic Impacts of Weather Events in 2000'. WMO Bulletin, vol. 50, págs. 284300.
- Cosgrove, W.-J. y Rijsberman, F.-R. 2000. World Water Vision: Making Water Everybody's Business. Londres, World Water Council, Earthscan Publications Ltd.
- Davis, T.-J. 1993. The Ramsar Convention Handbook. Gland, Ramsar.
- Dooge, J.-C.-I. 1984. 'The Waters of the Earth'. Hydrological Sciences Journal, vol. 29, págs. 14976.
- . 1983. 'On the Study of Water'. Hydrological Sciences Journal, vol. 28.
- Dunne, T. y Leopold, L.-B. 1978. Water in Environmental Planning. Nueva York, Freeman and Company.
- Edmunds, W.-M. y Smedley, P.-L. 1996. 'Groundwater, Geochemistry and Health'. En: J.D. Appleton, R. Fuge y G.J.H McCall (eds.), Environmental Geochemistry and Health with Special Reference to Developing Countries. Londres, The Geological Society Publishing House.
- Ellis, J.-B. 1999. 'Preface'. En: B.-J. Ellis (ed.), Impacts of Urban Growth on Surface Water and Groundwater Quality. International Association of Hydrological Sciences. Pub. n° 259.
- Falkenmark, M. y Chapman, T. (eds.) 1989. Comparative Hydrology: An Ecological Approach to Land and Water Resources. París, UNESCO
- FAO , 1997. Water Resources of the Near East Region: A Review. Roma.
- . 1995. Water Resources of African Countries: A Review. Roma.
- Foster, S.-D.-D.; Lawrence, A.-R.; Morris, B.-L. 1997. Groundwater in Urban Development: Assessing Management Needs and Formulating Policy Strategies. Nueva York, Banco Mundial. Technical Paper 390.
- Foster, S.-D.-D.; Chilton, P.-J.; Moench, M.; Cardy, W.-F.; Schiffler, M. 2000. Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability. Nueva York. Banco Mundial. Technical Paper 463.
- Foster S.-D.-D. y Lawrence, A.-R. 1995. 'Groundwater Quality in Asia: An Overview of Trends and Concerns'. UNESCAP Water Resources Journal. Serie C, 184, págs. 97110.
- Garmonov, I.-V.; Konplyantsev, A.-A.; Lushnikova, N.-P. 1974. 'Almacenamiento de agua en la parte superior de la corteza terrestre'. En: V.V. Korzun (ed.), El balance mundial de agua y los recursos hídricos de la Tierra. San Petersburgo, Gidrometeoizdat.
- Gat, J. y Oeschger, H. 1995. GNIP: Global Network for Isotopes in Precipitation. IAEA, PAGES, OMM, IAHS.
- GEMS (Sistema de Vigilancia del Medio Ambiente Mundial). 1992. PNUMA/OMS/UNESCO/OMM GEMS Water Operational Guide. Nairobi, PNUMA.
- GRDC (Centro Mundial de Datos sobre Escorrentías). 1996. Freshwater Fluxes from Continents into World Oceans. Informe n° 10. Coblenza, Instituto Federal de Hidrología.
- GTOS (Sistema Mundial de Observación Terrestre), 2002. Biennial Report 20002001. Roma.
- Gustard, A. y Cole, G.-A. 2002. FRIEND A Global Perspective 19982002. Wallingford, UNESCO/V Programa Hidrológico Internacional, Centro de Ecología e Hidrología.
- Gustard, A. (ed.). 1997. FRIEND'97 Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource, Actas de la Conferencia de Postojna, Eslovenia, septiembreoctubre. International Association of Hydrological Sciences Publication n° 246.
- Herbert, M. y Kovar, K. (eds.). 1998. Groundwater Quality: Remediation and Protection. International Association of Hydrological Sciences Publication. n° 250.
- Hibbert, A.-R. 1967. 'Forest Treatment Effects on Water Yield'. En: W.E. Sopper y H.W. Lull. 1976. Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology. Nueva York, Pergamon Press.
- Hoëg, K. 2000. 'Dams: Essential Infrastructure for Future Water Management'. Documento presentado al Segundo Foro Mundial del Agua por la Comisión Mundial de Grandes Presas, 1722 marzo 2000, La Haya.
- Horne, R.-A. 1978. The Chemistry of Our Environment. Nueva York, John Wiley and Sons.
- IAHS/UNESCO (Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas / Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1970. Symposium on the Results of Research on Representative and Experimental Basins. IAHS Pub. n° 96, vols. I y II. Wallingford.
- IJHD (International Journal of Hydropower and Dams). 2000. 'World Atlas and Industry Guide 2000'. págs. 378.
- Jones, J.-A.-A. 1997. Global Hydrology: Processes, Resources and Environmental Management. Londres, Longman.
- Kasser, P. 1967. Fluctuation of Glaciers 19591965. París, International Association of Hydrological Sciences, UNESCO, Series on Snow and Ice, vol. 1.
- Kirby, C.; Newson, M.-D.; Gilman, K. (eds.). 1991. Plynlimon

- Research: The First Two Decades. Wallingford, Centre for Ecology and Hydrology, Informe n° 109.
- Korzun, V.-I. 1978. World Water Balance and Water Resources of the Earth. vol. 25 de Estudios e Informes en Hidrología. París, UNESCO.
- Korzun, V.-I. y otros, 1974. Atlas of the World Water Balance. USSR National Committee for the IHD (International Hydrological Decade). Gidromet. Traducción al inglés: 1977. París, UNESCO.
- Laurans, Y.; Cattan, A.; Dubien, I. 1996. Les Services Rendus par les Zones Humides à la Gestion des Eaux. Evaluation Economique pour le Bassin Seine-Normandie. París, Agencia del Agua del Sena-Normandía-ASCA.
- Llamas, M.-R. y Custodio, E. En prensa. Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities. Rotterdam, Balkema.
- Lvovitch, M.-I. 1986. El agua y la vida. Moscow, Mysl.
- . 1970. World Water Balance (General Report). Simposio sobre el balance mundial del agua. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. n° 93, vol. II, págs. 40115.
- Maidment, D. y Reed, S. 1996. 'El balance del agua en África'. Ejercicios preparados para un curso sobre los GIS en los recursos hídricos de África, 1214 noviembre 1996, Rabat, Direction Générale de l'Hydraulique. FAO y UNESCO.
- Maksimovic, C. (ed.). 1996. Rain and Floods in Our Cities: Gauging the Problem. Ginebra (Organización Meteorológica Mundial) Technical Reports in Hydrology and Water Resources. n° 53.
- Margat, J. 1990a. Les Eaux Souterraines dans le Monde. Orléans, Bureau de recherches géologiques et minières [BRGM], Département eau.
- Margat, J. 1990b. 'Les Gisement d'Eau Souterraine'. La Recherche, n° 221.
- McKinney, D.-C.; Maidment, D.-R.; Reed, S.-M.; Akmansoy, S.; Olivera, F.; Ye, Z. 1998. 'Digital Atlas of the World Water Balance'. En: H. Zebedi (ed.), Water: A Looming Crisis? Actas de la Conferencia Internacional sobre los Recursos Mundiales de Agua a comienzos del siglo XXI. París, UNESCO/Programa Hidrológico Internacional.
- Meybeck, M. 1998. 'Surface Water Quality: Global Assessment and Perspectives'. En: H. Zebedi (ed.), Water: A Looming Crisis? Actas de la Conferencia Internacional sobre los Recursos Mundiales de Agua a comienzos del siglo XXI. París, UNESCO/Programa Hidrológico Internacional.
- . 1979. 'Concentration des Eaux Fluviales en Eléments Majeurs et Apports en Solution aux Océans'. Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique, vol. 21, pçags. 21546.
- Nace, R.-L. 1971. Scientific Framework of the World Water Balance. París, UNESCO, Technical Papers in Hydrology, n° 7.
- Naef, F. 1981. 'Can We Model the Rainfall-Runoff Process Today?' Hydrological Sciences Bulletin, vol. 26, págs. 28189.
- Neal, C. (ed.) 1997. Water Quality of the Plynlimon Catchments. Reino Unido, Hydrology and Earth System Sciences, Número especial, vol. 1, págs. 381763.
- NU (Naciones Unidas). 1992. Agenda 21. Programa de Acción para el Desarrollo Sostenible. Conclusiones oficiales de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED), 3-14 junio 1992, Río de Janeiro.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial ). 1995. 'Infohydro Manual'. Operational Hydrology Report, n° 28. Ginebra.
- . 1994. Guide to Hydrological Practices. 5ª edición. Ginebra.
- OMM/UNESCO (Organización Meteorológica Mundial/Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1997. Water Resources Assessment: Handbook for Review of National Capabilities.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 1991. GEMS/Water 19902000. The Challenge Ahead. UNEP/OMS/UNESCO/OMM Programa sobre Vigilancia y Evaluación de la calidad del agua en el mundo. Ginebra.
- OMS/PNUMA (Organización Mundial de la Salud/ Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 1991. Calidad del Agua. Avances en la ejecución del Plan de Acción de Mar del Plata y estrategia para los años 1990. Nairobi, Earthwatch Global Environment Monitoring System, Organización Mundial de la Salud, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Paul, F. 2002. 'Combined Technologies Allow Rapid Analysis of Glacier Changes'. EOS, Transactions of the American Geophysical Union, vol. 83, págs. 253 y 261.
- Pieyns, S.-A. y Kraemer, D. 1997. 'WHYCOS, a Programme Supporting Regional and Global Hydrology'. En: A. Gustard, S. Blazkova, M. Brilly, S. Demuth, J. Dixon, H. van Lanen, C. Llasat, S. Mkhanda y E. Servat (eds.), Friend '97 Regional Hydrology Concepts and Models for Sustainable Water Resources Management. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. n° 247.
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 1991. Contaminación del agua dulce. Nairobi, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente/Sistema Mundial de Control Medioambiental.
- Postel, S. 1992. Last Oasis: Facing Water Scarcity. The Worldwatch Environmental Alert Series. Nueva York, W.W. Norton & Co.
- Robinson, M. 1993. Methods of Hydrological Basin Comparison. Wallingford, Centre for Ecology and Hydrology, Informe n° 120.
- Rodda, J.-C. 1998. 'Hydrological Networks Need Improving!' En: H. Zebedi (ed.), Water: A Looming Crisis? Actas de la Conferencia Internacional sobre los Recursos Mundiales de Agua a comienzos del siglo XXI. París, UNESCO/ Programa Hidrológico Internacional.
- . 1976. 'Basin Studies'. En: J.-C. Rodda (ed.), Facets of Hydrology. Nueva York, John Wiley and Sons.
- Rodda, J.-C.; Pieyns, S.-A.; Sehmi, N.-S.; Matthews, G. 1993. 'Towards a World Hydrological Cycle Observing System'. Hydrological Sciences Journal, vol. 38, págs. 3738
- Schultz, G.-A. y Engman, E.-T. 2001. 'Present Use and Future Perspectives of Remote Sensing in Hydrology and Water Management'. En: M. Owe, K. Brubaker, J. Ritchie y A. Rango (eds.), Remote Sensing and Hydrology 2000. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. n° 267.
- Servat, E.; Hughes, D.; Fritsch, J.-M.; Hulme, M. (eds.). 1998. Water Resources Variability in Africa During the Twentieth Century. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. n° 252.
- Shiklomanov, I.-A. En preparación. World Water Resources at the Beginning of the 21st Century. Cambridge, Cambridge University Press.
- . 1998a. 'Global Renewable Water Resources'. En: H. Zebedi (ed.), Water: A Looming Crisis? Actas de la Conferencia Internacional sobre los Recursos Mundiales de Agua a comienzos del siglo XXI. París, UNESCO/Programa Hidrológico Internacional.
- . 1998b. World Water Resources a New Appraisal and Assessment for the 21st Century. París, UNESCO/Programa Hidrológico Internacional.
- (ed.). 1997. Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Estocolmo, Instituto del Medio Ambiente.
- Shiklomanov, I.-A.; Lammers, R.-B.; Vörösmarty, C.-J. 2002.

- 'Widespread Decline in Hydrological Monitoring Threatens Pan-Arctic Research'. EOS, Transactions of the American Geophysical Union, vol. 83, págs. 1316.
- Snoeyink, V.-L. y Jenkins, D. 1980. Water Chemistry. Nueva York, John Wiley and Sons.
- Sopper, W.-E. y Lull, H.-W. 1967. Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology. Nueva York, Pergamon Press.
- Struckmeier, W. y Margat, J. 1995. Hydrogeological Maps a Guide and a Standard Legend. International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrology, vol. 17.
- Swanson, R.-H.; Bernier, P.Y.; Woodward P.-D. (eds.). 1987. Forest Hydrology and Watershed Management. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. n° 187.
- Syvitski, J.-P. y Morehead, M.-D. 1999. 'Estimating River-Sediment Discharge to the Ocean: Application to the Eel Margin, Northern California'. Marine Geology, vol. 154, págs. 1328
- Toebes, C. y Ouryvaev, V. 1970. Representative and Experimental Basins: An International Guide for Research and Practice. París, UNESCO Studies and Reports in Hydrology 4.
- Unninayar, S. y Schiffer, R.-A. 1997. In-situ Observations for the Global Observing Systems: A Compendium of Requirements and Systems. Office of the Mission to Planet Earth. NASA.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1993. Descarga de algunos ríos seleccionados del mundo: medias mensuales y descargas extremas (1980-1984). Vol. III. París, UNESCO/Programa Hidrológico Internacional.
- UNESCO/PHI (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura/Programa Hidrológico Internacional). 2001. Balance hídrico superficial de América latina y el Caribe. Montevideo.
- . 1996. Mapa hidrogeológico de Suramérica. Montevideo.
- Van Lanen H.-A.-J. y Demuth, S. 2002. FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. n° 274.
- Vörösmarty, C.-J.; Meybeck, M.; Fekete, B.; Sharma, K. 1997. 'The Potential Impact of Neo-Catorisation on Sediment Transport by the Global Network of Rivers'. En: D.-E Walling y J.-L. Probst (eds.), Human Impact on Erosion and Sedimentation. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. n° 245.
- Vrba, J. y Zaporozec, A. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences.
- Wallace, J. 1996. 'Hydrological Processes'. En: Institute of Hydrology Annual Report 1994/95. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences.
- Walling, D.-E. y Webb, B.-W. 1996. 'Erosion and Sediment Yield: A Global View'. En: D.- E. Walling y B.-W. Webb (eds.), Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. n° 236.
- WCD (Comisión Mundial de Presas). 2000. Dams and Development: A New Framework for Decision-Making. Londres, Earthscan Publications Ltd.
- Wright, J.-F.; Sutcliffe, D.-W.; Furse, M.-T. (eds.). 1997. Assessing the Biological Quality of Fresh Waters. Actas del Seminario Internacional. Ambleside, Cumbria, Freshwater Biological Association.
- Young, G.-J.; Dooge, J.-C.-I.; Rodda, J.-C. 1994. Global Water Resource Issues. Cambridge, Cambridge University Press.
- Zektser, I. 1999. World Map of Hydrogeological Conditions and Groundwater Flow. París, UNESCO.
- Zektser, I. y Margat, J. Forthcoming. Groundwater Resources of the World and Their Use. París, UNESCO/Monografía del Programa Hidrológico Internacional.

## Algunos sitios web útiles

**Centro Mundial de Climatología de las Precipitaciones (GPCC)**

<http://www.dwd.de/research/gpcc/>

Análisis de precipitaciones mundiales para el estudio del clima terrestre.

**Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO): Programa Hidrológico Internacional (PHI)**

<http://www.unesco.org/water/ihp/>

Programa científico intergubernamental de la UNESCO sobre recursos hídricos.

**Organización Meteorológica Mundial (OMM): Centro Mundial de Datos sobre Escorrentías (GRDC)**

<http://www.bafg.de/grdc.htm>

Colección y diseminación de datos de caudal de ríos a escala mundial.

**Organización Meteorológica Mundial (OMM): Programa de Hidrología y Recursos Hídricos**

<http://www.wmo.ch/web/homs/>

Colección y análisis de datos hidrológicos como base para evaluar y gestionar los recursos de agua dulce.

**Organización Meteorológica Mundial (OMM): Programa de Investigación del Clima Mundial (WCRP)**

<http://www.wmo.ch/web/wcrp/wcrp-home.html>

Estudios de la atmósfera mundial, los océanos, mares y hielos terrestres y la superficie terrestre, que conjuntamente constituyen el sistema del clima físico de la tierra.

**Organización Meteorológica Mundial (OMM): Sistema Mundial de Observación del Ciclo Hidrológico (WHYCOS)**

<http://www.wmo.ch/web/homs/projects/whycos.html>

Red mundial de observatorios nacionales hidrológicos.

**Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos /Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (WWAP/UNESCO): Portal del Agua**

<http://www.unesco.org/water/>

Una nueva iniciativa para acceder y compartir los datos y la información sobre el agua de todo el mundo.

**Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA): Portal del Agua Dulce**

<http://freshwater.unep.net>

Información en temas clave de la situación del agua.

**Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA): Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente (GEMS/WATER)**

<http://www.cciw.ca/gems/gems-e.html>

Un programa científico multidisciplinario sobre el agua orientado hacia la comprensión de los temas de calidad del agua en todo el mundo. Las principales actividades incluyen el control, la evaluación y la capacitación.