



# RECURSOS HIDRICOS

**Sueli Yoshinaga Pereira**  
*Geóloga de la UNICAMP*

**Geroncio Albuquerque Rocha**  
*Geólogo, Dpto. de Aguas y Energía Eléctrica - DAEE de São Paulo,  
Asistente del Comité de la Cuenca Hidrográfica do Alto Tietê*

## 1. INTRODUCCION

El agua es uno de los recursos fundamentales para la vida en la tierra, siendo el componente básico de los ciclos ecológicos.

La cuestión de la disponibilidad de agua para el consumo humano en el mundo, es un tema que hoy provoca discusión, aunque existe unanimidad en cuanto a la necesidad de su gestión y racionalización.

El vertiginoso crecimiento de las actividades humanas, acompañado por el crecimiento poblacional, por el consumo para la producción de bienes y por la contaminación generada, han comprometido la disponibilidad de ese recurso.

El agua dulce es considerada un recurso renovable, su formación y renovación está regida

por el ciclo hidrológico y las condiciones fisiográficas, que a su vez distribuye el agua de forma irregular en toda la superficie terrestre.

La escasez de agua dulce es un factor limitante para el desarrollo regional, pudiendo ser de origen natural, donde las condiciones fisiográficas limitan la disponibilidad del recurso, o ser provocada por el hombre, por sus actividades y por la densidad poblacional. La escasez de agua dulce por actividades humanas es provocada por los índices de consumo (cantidad), fundamentalmente por la degradación de la calidad del agua dulce debido a la contaminación.

Las principales causas de esta escasez son: el problema de la contaminación de ríos y manantiales de aguas superficiales y subterrá-

neas, la contaminación del agua, por actividades agropecuarias en zonas rurales, y principalmente en grandes centros urbanos, con la disposición *in natura* de los desechos domésticos, la ocupación desordenada por la disposición de efluentes de la industria, basuras, etc. así como por el consumo indiscriminado.

Esta escasez nos ha llevado a la discusión, a la reelaboración y acción de planes de gestión de los recursos hídricos, englobando no sólo a los órganos públicos (alcaldía/estado/gobierno federal), sino también a la comunidad representada por los usuarios del agua: las industrias, las actividades agropecuarias y los ciudadanos.

En la conferencia de Mar del Plata (1977, en Heathcote 1998) fueron elaboradas grandes líneas para la gestión del agua, que en síntesis serían: 1) la necesidad de que cada país tuviese un estatuto nacional sobre el uso, la gestión y conservación del agua para la implementación de una política y un plan de uso del agua; 2) una institución responsable de la investigación, desarrollo y gestión de los recursos hídricos; 3) la elaboración y mantenimiento de una base legal de estructuras administrativas para la gestión y planificación; 4) esfuerzos para que haya una participación efectiva de usuarios y autoridades en la toma de decisiones.

Los resultados de la Conferencia de Río (Eco-92), claramente apuntan a la necesidad de gestión de sistemas, no solamente de algunos de sus componentes (Heathcote 1998). En vistas de esa tendencia, los recursos hídricos tienen como unidad de gestión la cuenca

hidrográfica (*watershed management*), entendido como un sistema integrado, hoy de consenso mundial (Heathcote, 1998).

La gestión de cuencas también debe ser multiparticipativa, donde en las decisiones de acción deben estar incluidos todos los interesados, la comunidad (ciudadanos, empresas, organizaciones no gubernamentales, etc.) y los tomadores de decisiones (órganos públicos municipales, estatales, federales).

## 2. EL RECURSO AGUA

El agua es distribuida irregularmente en toda la Tierra, debido a los diversos factores físicos que influyen en esa distribución. El patrón de precipitaciones en todo el mundo es causado por la circulación de la atmósfera que distribuye la humedad y la energía (UNESCO, 1997).

La mayor abundancia de lluvias se presenta en las regiones intertropicales y templadas de la Tierra.

En la tabla 1, Rebouças, Braga y Tundisi (1999) presentan los flujos de agua por regiones climáticas (Km<sup>2</sup>/año) a nivel global, demostrando la irregularidad de la distribución natural de las precipitaciones y consecuentemente en la disponibilidad del agua en las diversas regiones de la Tierra.

Tabla 1. Flujos de agua por regiones climáticas (Km<sup>2</sup>/año)

Zonas Climáticas	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía total de los ríos	Escorrentía de Base
Zonas templadas (N y S)	49.000	27.800	21.200 (48%)	6.500
Zonas áridas y semi-áridas	7.000	6.200	800 (2%)	200
Zonas intertropicales	60.000	38.000	22.000 (50%)	6.300
Total (mundo)	116.000	72.000	44.000 (100%)	13.000

Fuente: Rebouças, Braga y Tundisi (1999)

En general los mayores valores de disponibilidad de agua se encuentran en la faja entre el Trópico de Cáncer y de Capricornio; sin embargo, la situación climática y, consecuentemente, la disponibilidad de agua de una región está relacionada con las condiciones fisiográficas.

Las aguas subterráneas poseen sus mayores reservas en regiones húmedas, sin embargo, su mayor disponibilidad es también función de la capacidad de almacenamiento y transmisión de agua de las rocas reservorios (Rebouças, Braga y Tundisi 1998)

Las reservas de agua en el mundo poseen la siguiente distribución: 97,2 % del total de agua pertenecen a los océanos, seguidos por los glaciares (2,14 %). El agua subterránea corresponde a 0,61 % de ese total, las aguas superficiales 0,009%; la humedad del suelo (0,005%) y el agua de la atmósfera 0,001 %. El agua subterránea corresponde a 98% del agua potable disponible en la tierra (Fetter, 1994).

El ciclo hidrológico es el responsable de la distribución del agua y de su renovabilidad. En síntesis, el ciclo comienza por el movimiento

del agua en sus diversos estados físicos: ella es evaporada por los océanos y se mueve a través de la atmósfera. El agua después se condensa y cae en forma líquida en el océano, en el continente o revaporiza sin llegar a la tierra o el mar. La precipitación que llega al continente hace varias trayectorias del ciclo hidrológico. Una parte se condensa en estado sólido y forma los glaciares, o precipita en forma de nieve, o la lluvia y/o deshielo se escurre y forma un canal de drenaje. El canal de drenaje formará ríos, lagos, etc... y esos cursos de agua podrán llegar hasta el mar reiniciando el ciclo, o evaporarse, volviendo el agua a la atmósfera.

Si la superficie del suelo es porosa, el agua penetra en el suelo a través de la infiltración (Fetter, 1994). El agua infiltrada podrá volver a la atmósfera por la transpiración de las plantas, penetrar en el suelo y salir para un curso de agua (tales como manantiales, lagos, por ejemplo), como también infiltrarse hasta llegar al agua subterránea. En esa zona saturada, el agua podrá moverse hasta llegar al área de descarga, que podrá ser el océano nuevamente, reiniciando el ciclo. La figura 1 presenta el ciclo hidrológico clásico.

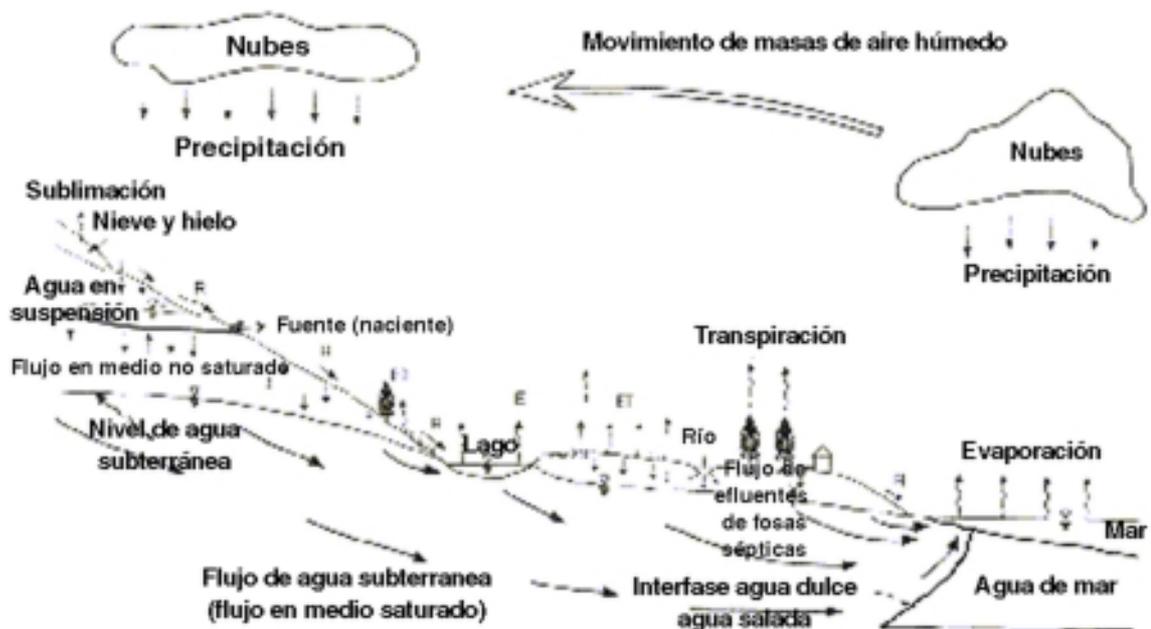


Figura 1. El Ciclo Hidrológico

En las áreas urbanas el ciclo hidrológico sufre muchas interferencias antrópicas, como la impermeabilización de los suelos, pérdida de las conductoras de agua y alcantarillado, evaporación de las aguas por las industrias, etc.

Los procesos principales del ciclo hidrológico son la evaporación/condensación, evapotranspiración, precipitación y escorrentía superficial.

La Evaporación, el proceso físico del pasaje del agua del estado líquido al gaseoso, ocurre continuamente, absorbiendo 590 calorías de la superficie sujeta a la evaporación por gramo de agua por metro cúbico del aire. La evaporación continúa hasta que el aire se satura de humedad medida en humedad absoluta (masa de aire en número de gramos de agua por metro cúbico del aire). El valor máximo de humedad del aire, a una cierta temperatura, alcanza la humedad de saturación que es directamente proporcional a la temperatura del aire. La humedad relativa para una masa de aire se define como la razón percentual de la humedad absoluta por la humedad de saturación, por la temperatura de la masa de aire (Fetter, 1994).

La Condensación ocurre cuando la masa de aire no consigue soportar más su humedad, la masa se enfría y la humedad de saturación cae. Si el valor de la humedad absoluta permanece constante, la humedad relativa crece. Cuando ese valor alcanza 100 %, algún enfriamiento podrá traer como resultado la condensación. El punto de rocío para una masa de aire es la temperatura en la cual comienza la condensación (Fetter, 1994).

La Transpiración es el proceso por el cual las plantas continuamente captan agua del suelo y la lanzan hacia la atmósfera. Ese proceso es función de la densidad y del tamaño de la vegetación.

La Evapotranspiración es un término introducido que trata los procesos de evaporación y transpiración conjuntamente, una vez que bajo condiciones de campo no es posible separar totalmente la evaporación de la transpiración. Thornthwaite define un valor máximo para las pérdidas de agua en un ecosistema por evapotranspiración, denominado Evapotranspiración Potencial. Las pérdidas en su mayoría ocurren en los meses de verano con menor o ninguna pérdida en el invierno. El término Evapotranspiración Real es utilizado para describir la cantidad de evapotranspiración que ocurre bajo condiciones de campo (Fetter, 1994).

Según Manoel Filho (CPRM, 1997), la Evapotranspiración Real puede ser estimada por la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. Si el resultado de la diferencia entre la precipitación y evapotranspiración potencial fuera mayor que cero, la evapotranspiración real es igual a la potencial, en el caso que el valor de esa diferencia fuera negativa, la evapotranspiración real es igual a la precipitación.

La Escorrentía Superficial se define conceptualmente cuando el valor de la precipitación sobrepasa la capacidad de infiltración de un determinado suelo, y parte del agua o su totalidad permanece en la superficie del suelo. La precipitación, al alcanzar el suelo, puede infiltrarse en suelos permeables que poseen una capacidad finita de absorber agua (Fetter, 1994). Cuando el suelo está seco, la capacidad de infiltración es alta, y a medida que el suelo se humedece, esa capacidad decrece hasta alcanzar un valor más o menos constante, o de equilibrio (Fetter, 1994). Si el índice de precipitación en esas condiciones, es mayor que ese equilibrio, el agua permanece en la superficie del suelo iniciando el proceso de escorrentía, que fluye por la acción de la gravedad de las partes más altas hacia las más bajas (Manoel Filho, en CPRM 1997).

El agua que se infiltra y que alcanza el nivel freático será almacenado en el reservorio de agua subterránea, que posee un movimiento constante (Fetter, 1994).

Para los estudios del ciclo hidrológico en el continente, la cuenca hidrográfica es la unidad de estudio de la ciencia hidrológica. Se define como la ecuación hidrológica que sigue a la ley de conservación de las masas, demostrada simplificada por la ecuación 1 (Fetter, 1994).

Entrada = salida ± Cambios en el Almacenamiento (Ecuación 1)

Las entradas de agua pueden ser: precipitación, escorrentía superficial, flujo de agua subterránea que entra en la cuenca, importación superficial de agua. Las salidas son: evapotranspiración, evaporación de los cuerpos de agua, escorrentía de aguas superficiales, salida de aguas subterráneas y exportación artificial del agua. Los cambios pueden ser: agua de drenaje, ríos, lagos y represas, humedad del suelo en la zona vadosa, almacenamiento temporario, irrigación, entre otras.

Las aguas también pueden provenir de magmas situados a grandes profundidades de la corteza terrestre. Esas aguas magmáticas pueden alcanzar la superficie de la tierra y ser incluidas en el ciclo hidrológico.

La Cuenca Hidrográfica está limitada por los divisores topográficos, y es el área donde los canales de escorrentía de las aguas se dirigen hacia un punto particular de descarga.

En el caso del agua subterránea, se utiliza el concepto de cuencas de aguas subterráneas, definida como un área bajo la superficie donde el agua se mueve a un punto de descarga particular y está limitada por divisores de agua subterránea.

Los hidrogramas de un curso principal de agua son gráficos que muestran la descarga de un río a un punto del área en función del tiempo. En ese punto, representan el resultado del comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica (Magalhães 1989).

La separación de los componentes del hidrograma tiene como objetivo, definir los parámetros de escorrentía básica, bajo superficial y superficial.

La gestión de los recursos hídricos es un campo de la hidrología resultante de los problemas que vienen creciendo a lo largo de los años, relacionado a las causas del deterioro de los cuerpos de agua, que afectan el abastecimiento humano.

Según Ramos (1989) la gestión de los recursos hídricos posee tres aspectos básicos: la legislación, las informaciones y los métodos o modelos de evaluación y decisión.

De acuerdo con Gleick (1993) el recurso hídrico para el consumo humano proveniente de los ríos y lagos se estima en 90.000 Km<sup>3</sup>, o 0,26 % de la reserva total de agua dulce del mundo.

La renovabilidad del agua puede darse en 16 días (media de los ríos) y en el orden 8 días, para el agua en la atmósfera. Sin embargo, el período puede ser largo en los glaciales, aguas subterráneas, océanos y en los grandes lagos.

En números estimados, un volumen equivalente a 505.000 Km<sup>3</sup> se evapora anualmente de la superficie del océano, donde el 90% (458.000 Km<sup>3</sup>) retorna a los océanos en forma de precipitación y el 10% (50.500 Km<sup>3</sup>) cae en los continentes (Gleick, 1993).

En los continentes, 119.000 Km<sup>3</sup> (o 1000 mm/año) por año de agua precipita de la atmósfera

(contabilizadas 68.500 Km<sup>3</sup> provenientes de precipitación local), donde 47.000 Km<sup>3</sup> (35%) retorna a los océanos en forma de ríos, suelos y escorrentía glacial. Hay un total de 1.130 mm de precipitación media que cae en la superficie de la tierra, o el volumen de 577.000 Km<sup>3</sup>.

Los ríos son la mayor fuente de agua dulce, utilizado extensivamente por la población humana.

Los estudios de los recursos hídricos incluyen no solamente su evaluación en estado natural, sino también las interferencias que actúan en los procesos causados por las actividades humanas.

A pesar de su característica de renovabilidad, los impactos causados por las actividades humanas afectan los regímenes de los ríos, su caudal medio anual y su calidad.

Según Shiklomanov (en Gleivk, 1993), se definen factores que pueden ser combinados de acuerdo con la naturaleza y su efecto en los procesos hidrológicos en cuatro grupos:

1. Factores que principalmente afectan el flujo por los desvíos directos de agua de fuentes (red de drenaje, lagos, acuíferos, etc.), el uso de esos estoques y cursos y la descarga de agua en el sistema del río (aguas retiradas para irrigación, para usos industriales y municipales, abastecimiento de agua para la agricultura y desvío de cursos de ríos).
2. Factores que afectan el ciclo hidrológico y el recurso hídrico como resultado directo de la transformación de la red de drenaje (construcción de reservorios y presas, represamiento y estrechamiento de canales, excavaciones en las márgenes de los ríos, etc.).
3. Factores que alteran las condiciones de formación del flujo y otros componentes del balance hídrico afectando las cuencas de drenajes superficiales (medidas agrotécnicas, drenaje de pantanos y ciénagas, deforestación o reforestación, urbanización, etc.)
4. Factores de actividades económicas que afectan el curso, balance hídrico y el ciclo hidrológico a través de las alteraciones generales de características climáticas a escala global o regional, como resultado de las modificaciones antropogénicas de la composición de la

atmósfera y de la contaminación del aire, así como de los cambios de las características del ciclo hidrológico debido al incremento de la evaporación resultante del desarrollo en larga escala de medidas de gestión del agua.

El uso del agua es función de los siguientes factores: el nivel de desarrollo económico, población y las peculiaridades fisiográficas (clima principalmente) del territorio en cuestión (Shiklomanov, en Gleick 1993).

La tabla 2 representa una evolución del consumo mundial de recurso hídrico en escenarios de uso de 1900 al año 2000. En valores totales, la tendencia es de crecimiento de la demanda de agua para el año 2000, de sus valores totales e irrecuperables, en 3320 a 5190 Km<sup>3</sup>/año y en 1950 a 2900 Km<sup>3</sup>/año, respectivamente, a pesar que en algunas regiones del mundo, es visible la tendencia de estabilización de los valores de la demanda. El mayor consumidor del recurso continúa siendo la agricultura, con grandes valores de uso irrecuperables, seguido por las industrias con uso irrecuperable relativamente menor que la primera activi-

dad. La agricultura es responsable por el consumo de 69% del recurso total y 89% del uso irrecuperable (1730 Km<sup>3</sup>/año)

La tabla 3 muestra informaciones sobre la escurrentía media de los ríos por regiones del mundo, sus índices de aridez y consumo de agua (total e irrecuperable) en los años de 1980, 1990 y 2000.

A nivel mundial, existe la tendencia de aumento de la demanda del uso del agua, característica de todas las regiones, con expectativas de mayores porcentajes de consumo en África y América del Sur y decrecimiento de los valores en los países desarrollados (Shiklomanov, en Gleick 1993).

El clima también tiene influencia directa en el uso del agua. En climas áridos, en que el recurso hídrico es mínimo, el déficit es alto pues se verifica el crecimiento del consumo en esas regiones, causado por el desarrollo económico de las actividades humanas en esas condiciones (Shiklomanov, en Gleick 1993).

**Tabla 2 - Uso del agua por actividades humanas en el mundo (Shiklomanov, en Gleick 1993)**

Usuário del agua	1900 (Km <sup>3</sup> /año)	1940 (Km <sup>3</sup> /año)	1950 (Km <sup>3</sup> /año)	1960 (Km <sup>3</sup> /año)	1970 (Km <sup>3</sup> /año)	1975 (Km <sup>3</sup> /año)	1980 (Km <sup>3</sup> /año)	%	1990 (Km <sup>3</sup> /año)	%	2000 (Km <sup>3</sup> /año)	%
<b>Agricultura</b>												
Consumo	525	893	1130	1550	1850	2050	2290	69,0	2680	64,9	3250	62,6
Irrecuperable	409	679	859	1180	1400	1570	1730	88,7	2050	86,9	2500	86,2
<b>Industria</b>												
Consumo	37,2	124	178	330	540	612	710	21,4	973	23,6	1280	24,7
Irrecuperable	3,5	9,7	14,5	24,9	38,0	47,2	61,9	3,2	88,5	3,8	117	4,0
<b>Municipal</b>												
Consumo	16,1	36,3	52,0	82,0	130	161	200	6,0	300	7,3	441	8,5
Irrecuperable	4,0	9,0	14	20,3	29,2	34,3	41,1	2,1	52,4	2,2	64,5	2,2
<b>Reservorios</b>												
Consumo	0,3	3,7	6,5	23,0	66,0	103	120	3,6	170	4,1	220	4,2
Irrecuperable	0,3	3,7	6,5	23,0	66,0	103	120	6,2	170	7,2	220	7,6
<b>Total</b>												
Consumo	579	1060	1360	1990	2590	2930	3320	100	4130	100	5190	100
Irrecuperable	417	701	894	1250	1760	1760	1950	100	2360	100	2900	100

**Tabla 3. Escorrentía anual y consumo de agua por continentes y por regiones fisiográficas y económicas del mundo (Gleick, 1993).**

Continentes y Región	Escorrentía Media Anual (Km <sup>3</sup> / año)		Índice de Aridez (R/LP)	Consumo de Agua (Km <sup>3</sup> /año)					
				1980		1990		2000	
				Total	Irrecup.	Total	Irrecup.	Total	Irrecup.
Europa	310	3210		435	127	555	178	673	222
· Norte	480	737	0,6	9,9	1,6	12	2,0	13	2,3
· Central	380	705	0,7	141	22	176	28	205	33
· Sur	320	564	1,4	132	51	184	64	226	73
· Europa URSS (Norte)	330	601	0,7	18	2,1	24	3,4	29	5,2
· Europa URSS (Sur)	150	525	1,5	13	50	159	81	200	108
América del Norte	340	8200		663	224	724	255	796	302
· Canadá y Alaska	390	5300	0,8	41	8	57	11	97	15
· Estados Unidos	220	1700	1,5	527	155	546	171	531	194
· América Central	450	1200	1,2	95	61	120	73	168	93
África	150	4570		168	129	232	165	3117	211
· Norte	17	154	8,1	100	79	125	97	150	112
· Sur	68	349	2,5	23	16	36	20	63	34
· Este	160	809	2,2	23	18	32	23	45	28
· Oeste	190	1350	2,5	19	14	33	23	51	34
· Central	470	1909	0,8	2,8	1,3	4,8	2,1	8,4	3,4
Asia	330	14410		1910	1380	2440	1660	3140	2020
· China del Norte y Mongolia	160	1470	2,2	395	270	527	314	677	360
· Sur	490	2200	1,3	668	518	857	638	1200	865
· Oeste	72	490	2,7	192	147	220	165	262	190
· Sudeste	1090	6650	0,7	461	337	609	399	741	435
· Asia Central	70	170	3,1	135	87	157	109	174	128
· Siberia y Extremo Este	230	3350	0,9	34	11	40	17	49	25
· Trans- Cáucaso	410	77	1,2	24	14	26	18	33	21
América del Sur	660	11760		111	71	150	86	216	116
· Área Norte	1230	3126	0,6	15	11	23	16	33	20
· Brasil	720	6148	0,7	23	10	33	14	48	21
· Oeste	740	1714	1,3	40	30	45	32	64	44
· Central	170	812	2,0	33	20	48	24	70	31
Australia y Oceanía	270	2390		29	15	38	17	47	22
· Australia	39	301	,0	27	13	34	16	42	20
· Oceanía	1560	2090	0,6	2,4	1,5	3,3	1,8	4,5	2,3
<b>Total</b>		<b>44500</b>		<b>3320</b>	<b>1450</b>	<b>4130</b>	<b>2360</b>	<b>5190</b>	<b>2900</b>

R/LP = relación entre R (balance de la radiación de la superficie húmeda), L (calor específico de evaporación) y P (precipitación)

La tabla 4 presenta la disponibilidad calculada para las diversas regiones del mundo. Esa disponibilidad depende de los factores naturales (clima, régimen de los ríos, etc.) como también del uso de las actividades humanas que modifican esos factores naturales.

Los más bajos valores de disponibilidad se encuentran en África del Norte, Asia Central, seguidos por las regiones del Norte de China y Mongolia, Sur y Oeste Asiáticos, Europa Central y Sur de la Unión Soviética (Europa), Sur,

Oeste y Este de África y Sudeste y Asia Transcaucásica.

Los valores más altos se concentran principalmente en las regiones de Canadá y Alaska, Norte de Europa, América del Sur, Australia y Oceanía, Siberia y Extremo Este de Asia.

Shiklomanov (en Gleick, 1993) apunta que esa distribución no uniforme de la oferta de recursos hídricos y la disminución de la disponibilidad frente al crecimiento del consumo de las actividades humanas, es nítida.

Tabla 4. Disponibilidad de agua en las diferentes regiones del Mundo (Gleick, 1993).

Continente y Región	Área (10 <sup>6</sup> Km <sup>2</sup> )	Disponibilidad de agua (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> por año per capita)				
		1950	1960	1970	1980	2000
Europa	10,28	5,9	5,4	4,9	4,6	4,1
· Norte	1,32	39,2	36,5	33,9	32,7	30,9
· Central	1,86	3,0	2,8	2,6	2,4	2,3
· Sur	1,76	3,8	3,5	3,1	2,8	2,5
· Europa URSS (Norte)	1,82	33,8	29,2	26,3	24,1	20,9
· Europa URSS (Sur)	3,52	4,4	4	3,6	3,2	2,4
América del Norte	24,16	37,2	30,2	25,2	21,3	17,5
· Canadá y Alaska	13,67	384	294	246	219	189
· Estados Unidos	7,83	10,6	8,8	7,6	6,8	5,6
· América Central	2,67	22,7	17,2	12,5	9,4	7,1
África	30,10	20,6	16,5	12,7	9,4	5,1
· Norte	8,78	2,3	1,6	1,1	0,69	0,21
· Sur	5,11	12,2	10,3	7,6	5,7	3,0
· Este	5,17	15,0	12	9,2	6,9	3,7
· Oeste	6,96	20,5	16,2	12,4	9,2	4,9
· Central	4,08	92,7	79,5	59,1	46,0	25,4
Asia	44,56	9,6	7,9	6,1	5,1	3,3
· China del Norte y Mongolia	9,14	3,8	3,0	2,3	1,9	1,2
· Sur	4,49	4,1	3,4	2,5	2,1	1,1
· Oeste	6,82	6,3	4,2	3,3	2,3	1,3
· Sudeste	7,17	13,2	11,1	8,6	7,1	4,9
· Asia Central	2,43	7,5	5,5	3,3	2,0	0,7
· Siberia y Extremo Este	14,32	124	112	102	96,2	95,3
· Trans-Cáucaso	0,19	8,8	6,9	5,4	4,5	3,0
América del Sur	17,85	105	80,2	61,7	48,8	28,3
· Area Norte	2,55	179	128	94,8	72,9	37,4
· Brasil	8,51	115	86	64,5	50,3	32,2
· Oeste	2,33	97,9	77,1	58,6	45,8	25,7
· Central	4,46	34	27	23,9	20,5	10,4
Australia y Oceanía	8,59	112	91,3	74,6	64,0	50,0
· Australia	7,62	35,7	28,4	23	19,8	15,0
· Oceanía	1,34	161	132	108	92,4	73,5

En América Latina la situación de la utilización de los recursos hídricos se representa en la tabla 5 donde se contabiliza la situación de extracción anual de agua per capita, por país latinoamericano. En la tabla, la disponibilidad de los recursos del continente per capita es demostrada para los países de América Latina.

Los países de mayor consumo de agua en América Latina, Argentina y Chile, no poseen un valor de disponibilidad per capita correspondiente. La situación más crítica es la de México, el tercer país de mayor consumo, siendo también uno de los países de menor disponibilidad per cápita.

Brasil se encuentra con bajo índice per capita de consumo y buena disponibilidad de recursos hídricos. No obstante, esos valores

poseen gran variación dentro del país, dada por la extensión territorial, diversidad de climas y distribución poblacional y socioeconómica diferentes.

Además de las áreas de clima semiárido, así como, en otro extremo, regiones de alta pluviosidad, que influyen en la escasez o abundancia del recurso, las actividades económicas, principalmente en grandes centros urbanos intervienen, sobremanera, la disponibilidad del área.

El caso del Estado de São Paulo es uno de los ejemplos en que la alta tasa de población acoplada al desarrollo industrial y agropecuario reduce la disponibilidad del recurso hídrico en las regiones metropolitanas.

Tabla 5. Extracción Anual per capita y Disponibilidad per capita de los Recursos Hídricos en América Latina (UNESCO, 2000).

País	Extracción anual per capita (m <sup>3</sup> )	País	Disponibilidad per capita (m <sup>3</sup> )
Belice	104	Perú	1,8
Paraguay	110	El Salvador	3,5
Guatemala	139	México	4,1
Colombia	172	Honduras	11,6
El Salvador	184	Guatemala	11,9
Bolivia	245	Uruguay	18,9
Uruguay	245	Paraguay	20,8
Brasil	245	Argentina	21
Perú	301	Ecuador	28,4
Nicaragua	320	Costa Rica	29,8
Venezuela	382	Colombia	32
Honduras	510	Brasil	33,7
Ecuador	567	Chile	34,4
Panamá	744	Bolivia	39,9
Costa Rica	780	Venezuela	42,4
México	875	Nicaragua	44,3
Argentina	1042	Panamá	57,3
Chile	1523	Belice	80,8

En esas regiones ya se observan situaciones críticas, aun cuando las condiciones fisiográficas son favorables, donde hay necesidad de una gestión del recurso hídrico efectivo intentándose racionalizar el uso, evitando desperdicios y mejorando la calidad de sus aguas, con la implementación de políticas de uso y decisión multiparticipativa.

### 3. EL RECURSO AGUA SUBTERRANEA

#### a) Introducción

El estudio del agua subterránea, que en este trabajo lo mostramos con mayor detalle, tiene por objetivo presentar los principios básicos que rigen esa área del conocimiento científico, suministrando las bases para la planificación y la gestión de este recurso hídrico.

Según Domenico y Schwartz (1998), la Hidrogeología puede ser definida como *“el estudio de las leyes que gobiernan el movimiento de las aguas subterráneas, las interacciones mecánicas, físicas y termales de esa agua con el sólido poroso y el transporte de la energía, constituyentes químicos y materia particulada por el flujo”*.

Actualmente la hidrogeología es una ciencia amplia que comprende varios enfoques. Fetter (1994), divide el trabajo del hidrogeólogo en tres campos: investigación, resolviendo problemas referentes al abastecimiento y control del agua para consumo y resolviendo problemas de contaminación del agua subterránea.

Este capítulo puede ser dividido en dos partes, el primero aborda los conceptos fundamentales de la hidrogeología, su participación en el ciclo hidrológico, la dinámica física y química y sus principios y técnicas de

análisis. En la segunda parte, el agua subterránea es evaluada como recurso hídrico, donde son presentados los estudios dirigidos hacia la gestión del recurso, tales como el análisis de su potencialidad, disponibilidad y calidad, así como los métodos de abordar los mismos.

**b) El agua subterránea en el ciclo hidrológico**

En este capítulo se describen los procesos principales del ciclo hidrológico, la trayectoria del agua bajo la superficie, por el proceso de infiltración, básicos para la comprensión de la formación del recurso hídrico subterráneo.

El perfil de infiltración del agua es mostrado en la Figura 2. El agua del ciclo hidrológico que se infiltra en el suelo atravesando dos grandes zonas del perfil de infiltración: la Zona de Aireación (denominada Zona No Saturada o Vadosa) y la Zona Saturada o de Saturación.

El agua subterránea, como parte integrante del ciclo hidrológico sufre la influencia de los procesos de superficie, que interferirá en el comportamiento de la recarga de los acuíferos y las características del agua subterránea.

La Zona No Saturada es la región situada entre la superficie del terreno y la zona de saturación del agua. Se caracteriza por la presencia de poros rellenos por aire y agua. Ella puede ser dividida en:

- 1) Zona de agua del suelo o zona de evapotranspiración, limitada por la superficie del terreno y los extremos radicales de la vegetación (CPRM 1997), cuyo espesor puede variar de pocos centímetros hasta varios metros. Se caracteriza por la presencia del fenómeno de evapotranspiración causada por las plantas.
- 2) Zona Intermedia, caracterizada por la presencia de capilaridad del agua, que no se mueve debido a las fuerzas higroscópicas y capilares. Ella se extiende de la base de la zona de agua del suelo hasta la parte de la Zona Capilar
- 3) Zona Capilar, es la última subdivisión de la zona de aireación, y se caracteriza por la presión existente ser menor que la atmosférica y su límite superior poseer forma irregular. La variación de la espesor de esa zona es función de las propiedades y de la homogeneidad del suelo. En materiales gruesos, el tamaño de la zona es prácticamente cero mientras que puede variar para más de 3 metros en materiales finos.

La Zona Saturada se sitúa debajo de la superficie freática y se caracteriza por el relleno de todos los poros vacíos por agua y es área de estudio de la hidrogeología.

La figura 3 presenta los tipos de acuíferos y capas confinantes.

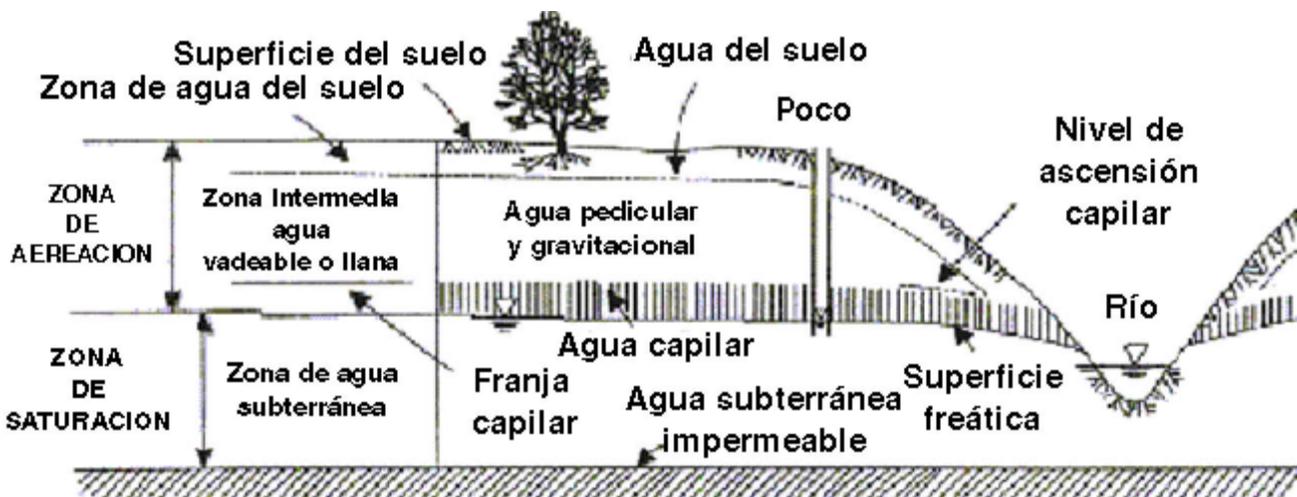


Figura 2. Perfil de Infiltración del Agua (CPRM 1997, modificado de Bear y Verruijt 1987)

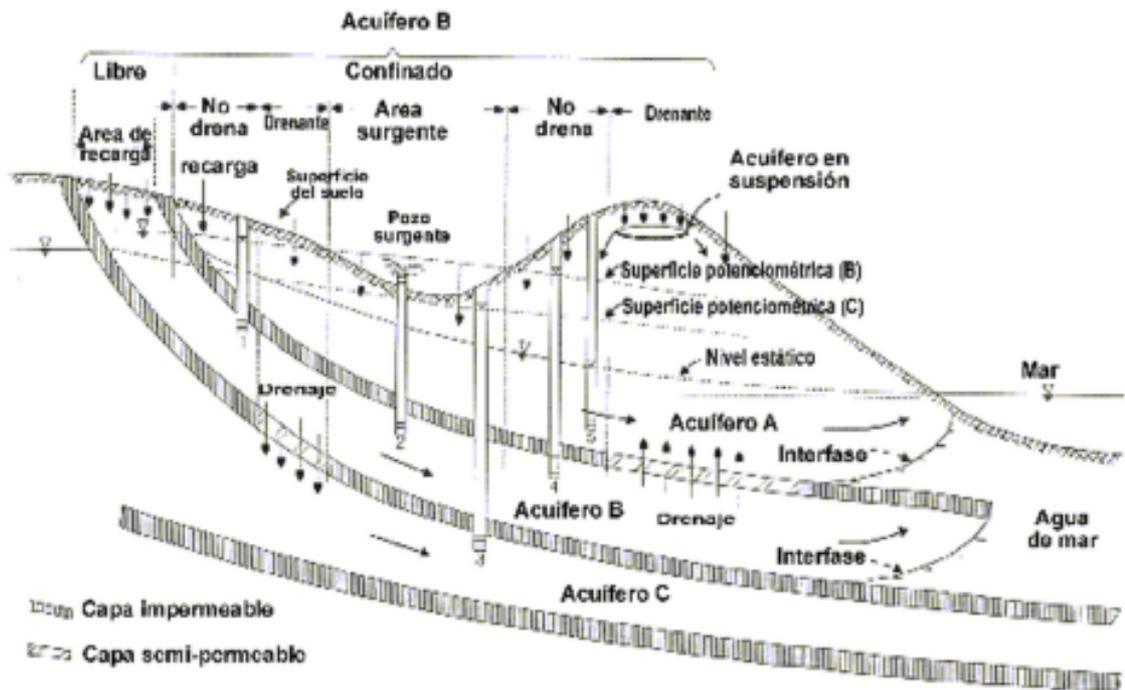


Figura 3. Tipos de acuíferos

En esta zona se definen los siguientes tipos de rocas relativos a la capacidad de almacenamiento y transmisión de agua.

ACUÍFERO es el término usado para la formación geológica o grupo de formaciones, que almacenan agua y permiten el movimiento de determinado volumen bajo condiciones naturales suministrando agua en cantidades significativas.

El Acuífero es LIBRE cuando su límite superior es la superficie freática, y su movimiento es controlado por la inclinación de la superficie freática, bajo condiciones de presión atmosférica. Un tipo especial de acuífero libre es el Acuífero SUSPENDIDO, definido como un área de acumulación de agua por encima de una capa impermeable de corta extensión, en la zona no saturada.

El Acuífero es CONFINADO cuando la roca acuífera es limitada por las capas confinantes (impermeables) y esta bajo una presión interna mayor que la atmosférica.

La SUPERFICIE POTENCIOMÉTRICA es definida como una superficie imaginaria que se encontrará a una altura correspondiente a la presión hidrostática causada por el confinamiento del acuífero.

La condición de ARTESIANISMO ocurre cuando la superficie potenciométrica se encuentra encima de la elevación del terreno.

Los ACUÍFEROS COSTEROS se sitúan en la región litoral y son casos especiales de estudio debido a su comunicación con el agua de mar. El agua dulce flota por encima del agua salada, por diferencia de densidad y están separadas por una zona difusa (denominada de interfase salina o cuña salina).

La relación Ghiben – Heizberg:

$$H_{\text{salada}} = r_{\text{dulce}} \cdot H_{\text{dulce}} / (r_{\text{salada}} - r_{\text{dulce}}) = 40 H_{\text{dulce}}$$

Ejemplifica la problemática de explotación de este tipo de acuífero, pues cada metro de columna de agua dulce equivale a 40 metros de agua salada.

En la zona saturada existen formacio-

nes geológicas que no se identifican como acuíferos, o sea, no almacenan ni transmiten agua:

Estos reciben las siguientes denominaciones:

**ACUICLUDO** – se caracteriza por su incapacidad de poder transmitir grandes cantidades de agua, pero es capaz de almacenarlas; serían las capas confinantes de un acuífero confinado.

**ACUITARDO** – es una clasificación intermedia entre el término acuífero y acuícludo, definida como una capa semi-permeable, que almacena y transmite lentamente agua en una cantidad menor que el acuífero.

**ACUÍFUGO** – es una capa impermeable, que ni contiene ni transmite agua.

### c) **Propiedades de los Acuíferos y Flujo de agua subterránea**

Los principios fundamentales del movimiento del agua subterránea son descritos en este ítem y comprenden la definición de las características del acuífero, que controlan el almacenaje y la transmisión del agua y las leyes que rigen el flujo de las aguas subterráneas.

El acuífero puede estar caracterizado por las siguientes propiedades:

La porosidad de la roca acuífera, la propiedad que caracteriza a los espacios vacíos por donde pasa el agua, puede ser clasificada en cuanto a su origen en primaria y secundaria. La porosidad primaria de un acuífero es aquella que se formó al mismo tiempo que la roca acuífera. Consisten en poros de las rocas sedimentarias. La porosidad secundaria es aquella que se forma después que se formó la roca acuífera, y en general son fisuras, fracturas, juntas y canales de disolución, entre otros.

La porosidad es un parámetro cuantificable y los siguientes parámetros se expresan así:

1. **Porosidad ( $h$ ):** es el vacío de las rocas o del suelo, expresado en porcentaje. Es denominado también Porosidad Total.

$h = 100 V_v/V$ , donde  $h$  es la porosidad (en porcentaje), (ecuación 1)

$V_v$ : es el volumen de espacio vacío en unidad de volumen de material ( $L^3$ )

$V$ : es la unidad de volumen del material,

incluyendo vacíos y sólidos ( $L^3$ )

2. **Porosidad Efectiva ( $h_e$ ):** es la porosidad por donde el fluido pasa, y se expresa por la ecuación:

$h_e = V_D/V$ , donde  $h_e$  es la porosidad efectiva,  
 $V_D$ : es el volumen de agua drenada por gravedad y  $V$ , el volumen total del cuerpo rocoso

La porosidad total y efectiva son grandezas adimensionales y pueden ser expresadas en porcentaje.

La porosidad total puede ser expresada por:

$$h = S_y + S_r$$

Donde:

$S_y$ = Caudal específico

$S_r$  = Retención específica

El Caudal Específico, también denominado porosidad efectiva, se define como el volumen efectivo de agua que puede ser suministrada por un determinado material rocoso.

3. **Retención Específica ( $Re$ ):** es el porcentaje de volumen de agua que queda retenida.

La Porosidad Total es, por tanto, la suma de la Porosidad Efectiva y la Retención Específica.

La tabla 6 presenta algunos valores de almacenamiento específico encontrados en la literatura científica (Fetter, 1994).

4. **Movimiento de las aguas subterráneas:** es explicado por la Ley de Darcy (1856), que afirma que la cantidad de flujo en un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional al largo de la trayectoria del flujo.

Henry Darcy, ingeniero hidráulico francés, dedujo su ecuación a través de estudios experimentales en columna de arena.

En la columna de arena de la sección transversal  $A$  y con una distancia  $L$  entre dos piezómetros, se escurrió un volumen  $Q$  de agua.

En la ecuación de Bernoulli, se representan, entonces, las cargas totales de la relación en un plano referencial (Todd 1959).

$$p_1/g + v_1^2/2g + z_1 = p_2/g + v_2^2/2g + z_2 + h_1$$

Donde:

$p$  = presión

$g$  = peso específico del agua

$v$  = velocidad del agua

$g$  = aceleración de la gravedad

$z$  = elevación con relación al plano de referencia (Datum)

$h_1$  = pérdida de carga

Las velocidades  $v_1$  y  $v_2$  son despreciadas pues tienen valores muy bajos. La ecuación queda:

$$h_1 = (p_1/g + z_1) - (p_2/g + z_2)$$

La pérdida de carga se define como la pérdida de potencial dentro del cilindro de arena. Esta pérdida de potencial es causada por la pérdida de energía a través de la resistencia al movimiento.

Darcy, entonces, muestra que el flujo  $Q$  es proporcional a la pérdida de carga ( $h_1$ ) e inversamente proporcional a  $L$ .

$$Q \sim h_1 \text{ e } Q \sim 1/L$$

De esta manera, con la constante  $K$ , la ecuación se expresa como:

$$Q = K.A.h_1/L \text{ (L}^3/\text{T)}, \text{ o}$$

$$Q = K.A.dh/dl, \text{ y}$$

$$v = Q/A = K.dh/dl,$$

Donde:

$dh/dl$  es el GRADIENTE HIDRÁULICO

$v$  = velocidad del flujo o velocidad aparente o velocidad de Darcy (L/T)

$K$  = Conductividad Hidráulica (L/T)

La velocidad de Darcy es en realidad una tasa volumétrica de flujo por unidad total de área (L<sup>3</sup>/T/L<sup>2</sup>) (Cleary en Ramos *et al.*, 1989). El área total de la sección transversal de la columna de arena calculada por Darcy contabiliza el volumen ocupado también por los granos.

Por tanto, la velocidad real del flujo varía de acuerdo con el medio y se expresa así:

$$v_{\text{real}} = v/h_e,$$

Donde  $h_e$  = porosidad efectiva del medio poroso

La ley de Darcy es válida para la mayoría de las velocidades y litologías diferentes (Cleary en Ramos *et al.*, 1989). Pues  $v$  aumenta gradualmente con el gradiente. Esta ley no es válida tanto en velocidades muy bajas (se desvía del comportamiento de la recta), en arcillas muy compactas o en velocidades muy altas, como en ciertos casos de acuíferos fracturados (Cleary en Ramos *et al.*, 1989).

5. **Conductividad Hidráulica (K):** expresa la facilidad con la cual el fluido es transportado a través del medio poroso

Tabla 6. Valores de Almacenamientos Específicos para algunos tipos de materiales (Fetter, 1994).

Material	Almacenaje Específico		
	Máximo	Mínimo	Media
Arcilla	5	0	2
Arcilla arenosa	12	3	7
Limo	19	3	18
Arena fina	28	10	21
Arena media	32	15	26
Arena gruesa	35	20	27
Arena muy gruesa	35	20	25
Gravas finas	35	21	25
Gravas medias	26	13	23
Gravas gruesas	26	12	22

(Bear, 1979). Posee dimensión escalar (L/T) y es dependiente de la matriz y de la propiedad del fluido. Puede ser definida también como la tasa volumétrica de flujo por unidad de área por unidad de gradiente (Cleary en Ramos *et al.*, 1989). El valor de este parámetro está en función del material geológico, cuanto mayor es la permeabilidad del material, mayor es su conductividad hidráulica.

$$K = k g / m \text{ (L/T)}$$

Donde:

k = es la permeabilidad intrínseca

m = viscosidad dinámica del fluido

g = peso específico;  $g = r g$ , en que r

es la densidad y g, la aceleración de la gravedad.

La permeabilidad intrínseca (k) es dependiente de la roca matriz y posee unidad (L<sup>2</sup>). El cálculo de k puede ser dado a través de varias expresiones, empíricas, por derivaciones teóricas de la Ley de Darcy o por consideraciones dimensionales con verificaciones experimentales (Bear, 1979). En la industria del petróleo, la unidad de medida de la permeabilidad intrínseca es el darcy, que es equivalente a  $9,87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$ .

**Tabla 7- Variación de la permeabilidad intrínseca y conductividad hidráulica para sedimentos no consolidados (Fetter, 1994)**

Material	Permeabilidad Intrínseca (darcys)	Conductividad Hidráulica (cm/s)
Arcilla	$10^{-6}$ a $10^{-3}$	$10^{-9}$ a $10^{-6}$
Limo, limos arenosos, areno arcillosos, arenas y till	$10^{-3}$ a $10^{-1}$	$10^{-6}$ a $10^{-4}$
Arenas limosas, arenas finas	$10^{-2}$ a 1	$10^{-5}$ a $10^{-3}$
Arenas bien seleccionadas, sedimentos glaciales	1 a $10^{-2}$	$10^{-3}$ a $10^{-1}$
Gravas bien seleccionadas	10 a $10^{-3}$	$10^{-2}$ a 1

La tabla 7 presenta variaciones de las permeabilidades intrínsecas y conductividades hidráulicas para sedimentos no consolidados.

6. **Transmisividad (T):** es el flujo de agua que se escurre a través de una faja lateral vertical de ancho unitario y espesor de camada saturada, cuando el gradiente hidráulico es igual a 1. La unidad de medida es (L<sup>3</sup>/T.L).

Su valor varía de valores menores que 0,50 a mayores que 500 m<sup>3</sup>/h.m. En el primer caso, el acuífero con aquel valor de transmisividad atendería apenas las necesidades domésticas, en el otro extremo, podrían atender a las industrias, irrigación o al abastecimiento público.(CETESB, 1974).

La Transmisividad puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$T = K.b \text{ (L}^3\text{/T.L)}$$

Donde:

K = conductividad hidráulica (L/T)

b = espesor saturada del acuífero

La transmisividad indica, así, cuál es el volumen de agua que se moverá en el acuífero.

7. **Coficiente de almacenamiento (S):** se define como el volumen de agua que sale o que entra en el acuífero por unidad de área horizontal o por unidad de variación de rebajamiento (CETESB, 1974). Es el volumen de agua que una

unidad permeable absorbe o trasmite del reservorio por unidad de área por unidad de cambio en la carga hidráulica, siendo adimensional (Fetter, 1994).

En la zona saturada, la carga hidráulica crea presión, afectando el acomodo de los granos minerales y la densidad del agua en sus vacíos; con el aumento de la presión, el esqueleto de la roca se expande, o se retrae con el cese de la presión. Por otro lado, el agua se contraerá con el aumento de la presión y/o se expandirá cuando ésta cese.

De este modo, cuando la carga hidráulica se reduce, el esqueleto de la roca se comprime, reduciendo la porosidad efectiva y exhalando agua. El agua adicional es liberada cuando el agua de poros se expande, debido a la baja de presión (Fetter, 1994).

El Almacenamiento Específico ( $S_y$ ) es por tanto el volumen de agua por unidad de volumen de una formación saturada que es almacenada o exhalada por compresión del esqueleto rocoso y del agua por unidad de variación de la carga hidráulica.

El Almacenamiento Específico ( $S_y$ ) se expresa por la ecuación:

$$S_y = rg(a + hb),$$

Donde:

$r$  = densidad del agua ( $M/L^3$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $L/T^2$ )

$a$  = compresibilidad del esqueleto del acuífero ( $1/(M/LT^2)$ )

$h$  = porosidad

$b$  = compresibilidad del agua ( $1/(M/LT^2)$ )

El Almacenamiento Específico posee dimensiones  $1/L$  y valores muy pequeños.

En acuíferos confinados, cuando la carga hidráulica se reduce, la superficie potenciométrica todavía permanece encima de ese acuífero, manteniendo el acuífero saturado, a pesar del agua liberada (Fetter, 1994).

En este caso, el Coeficiente de Almacenamiento de un acuífero confinado se expresa:

$$S = S_y \cdot b, \text{ adimensional}$$

Donde:

$S_y$  = almacenamiento específico ( $1/L$ )

$b$  = espesor del acuífero ( $L$ )

El valor del coeficiente de almacenamiento encontrado en acuíferos confinados es del orden de 0,005 o menor (Fetter, 1994).

Para los acuíferos no confinados, el espesor saturado varía con las variaciones del volumen de agua almacenada, o, el agua es drenada de los espacios de los poros, función del Caudal Específico del acuífero.

$$S = S_y + bS_s \text{ (adimensional)}$$

Donde:

$b$  = espesor saturado

$S_y$  = caudal específico

$S_s$  = almacenamiento específico

El valor de caudal específico, en general, es mucho mayor en varios grados de magnitud del producto  $bS_s$ . El almacenamiento, por tanto, en esos casos es igual al caudal específico.

8. **Conceptos de Homogeneidad e Isotropía:** son propiedades del material rocoso, que indica que el acuífero posee las mismas propiedades en toda su extensión, o no.

El acuífero es homogéneo si presenta las mismas características en toda su extensión. Es heterogéneo, cuando las propiedades hidráulicas varían espacialmente.

En términos de conductividad hidráulica, el acuífero es homogéneo si  $K$  posee el mismo valor en cualquier dirección en que es medido. Es isotrópico si  $K$  en la dirección  $x$  es igual que en la dirección  $y$ . La figura 4 presenta las combinaciones posibles entre homogeneidad y anisotropía.

9. **Representación del Flujo de las Aguas Subterráneas:** el flujo de las aguas subterráneas es representado gráficamente por las líneas de flujo.

La Línea de Flujo es una línea imaginaria que representa el flujo del agua subterránea y su movimiento.

La Línea Equipotencial es la línea que define puntos de igual carga hidráulica. La línea

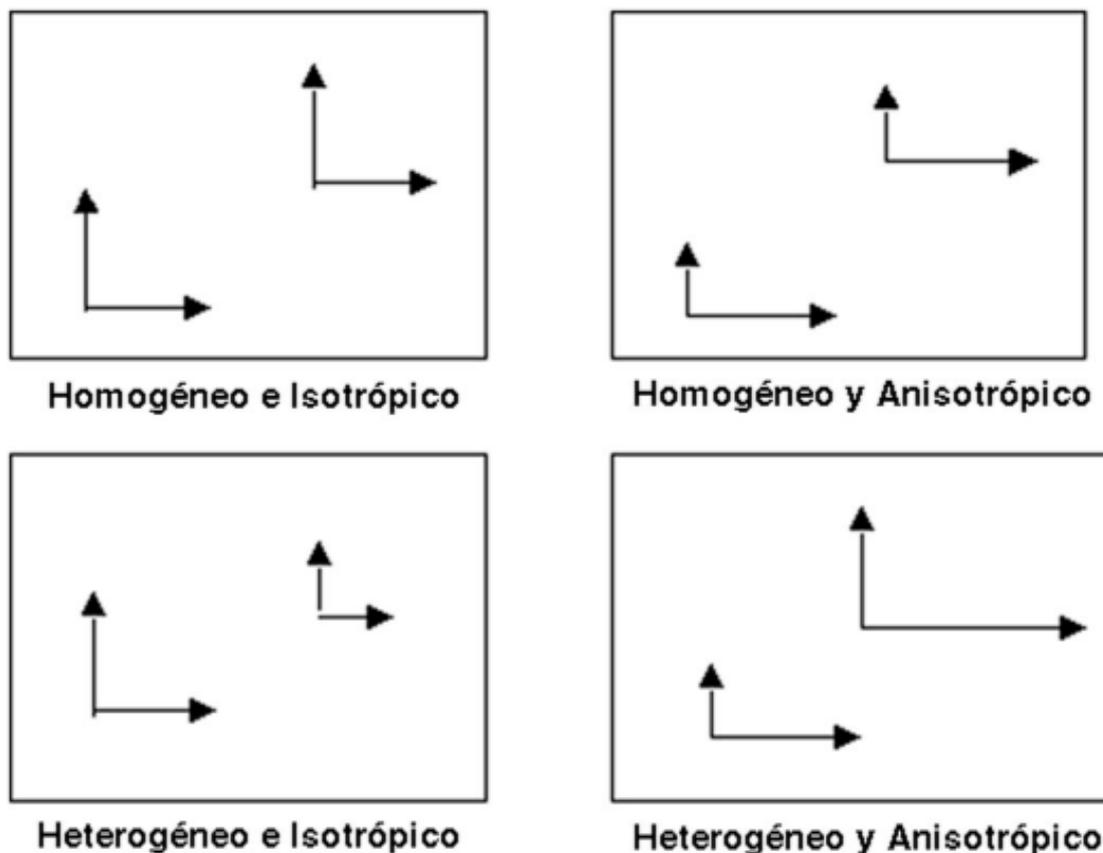


Figura 4. Combinaciones posibles entre homogeneidad y anisotropía (Freeze y Cherry, 1979)

de flujo indica la dirección del agua subterránea. En acuíferos isotrópicos las líneas de flujo cruzan las líneas equipotenciales en ángulos rectos; en los anisotrópicos, las líneas de flujo cruzan las equipotenciales en un ángulo indicado por el grado de anisotropía y la orientación del tensor elipsoidal del gradiente de carga hidráulica (Fetter, 1994).

Las líneas de flujo y las líneas equipotenciales forman mapas potenciométricos.

Los mapas potenciométricos pueden ser usados para estimar las direcciones del flujo, las velocidades y áreas de recarga, descarga y bombeo de un acuífero, y si el río es influente o efluente. Pueden demostrar los cambios en las condiciones geológicas y calcular las transmisividades utilizando los espacios entre las líneas equipotenciales (Cleary en Ramos *et al.*, 1989).

El flujo de agua subterránea, en contacto con medios de conductividad hidráulica

diferentes cambian la dirección, obedeciendo a la Ley de Refracción, expresada como:

$$K_1/K_2 = \tan O_1/\tan O_2$$

Los cambios de K pueden ser observados a través de los espacios entre las líneas equipotenciales. Otro factor que influye en estos espacios es la reducción de la espesor del acuífero (Bear, 1979).

La figura 5 presenta las diversas formas de líneas de flujo y equipotenciales que pueden ser encontradas.

El ejemplo de las aguas superficiales, se define también como el divisor de las aguas subterráneas, que es una línea que separa flujos que se dirigen a las zonas de descargas diferentes.

Los ríos influentes son definidos como los ríos que aportan agua al acuífero. Los ríos efluentes son abastecidos por el acuífero. Hay

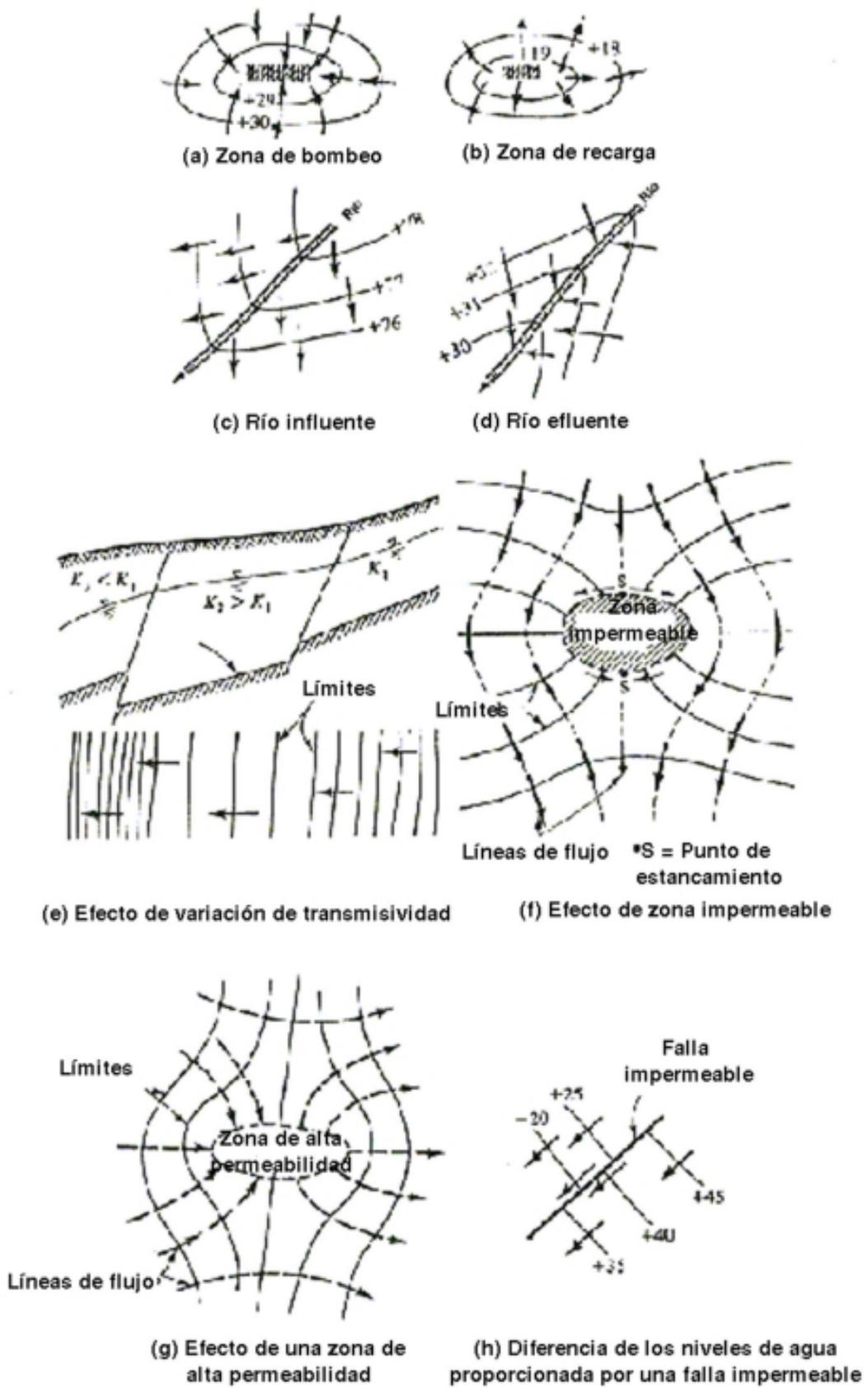


Figura 5. Situaciones típicas de las líneas de flujo y equipotenciales (Bear,1979).

casos en los cuales el río aporta agua al acuífero, pero no está en contacto con él, así como tampoco existe relación entre el río y el acuífero (confinado por camada impermeable).

Una estimativa para la determinación de la recarga de agua subterránea en una cuenca hidrográfica está basada en el uso de hidrogramas de 2 o más años consecutivos, por medio de la recesión de la escurrentía básica, explicado en Fetter (1994).

Los valores de descarga de un puesto fluviométrico son colocados en gráficos bilogarítmicos de caudal por tiempo. Las escurrentías básicas están definidas en el gráfico, considerando su partida cuando se inicia la caída del nivel en el verano (que se encuentra por encima del nivel freático) y termina cuando ocurre la primera descarga de la primavera. La descarga potencial total de agua subterránea es el volumen de agua subterránea que sería descargado en una recesión completa (Fetter, 1994).

Ese volumen puede ser expresado por:

$$V_{tp} = Q_0 \cdot t_1 / 2,3$$

Donde:

$V_{tp}$  = volumen de descarga potencial total de agua subterránea ( $L^3$ )

$Q_0$  = escurrentía básica al inicio de la recesión ( $L^3/T$ )

$T_1$  = tiempo que se necesita para que la escurrentía vaya de  $Q_0$  a  $0,1 Q_0$  (T)

La recarga de agua subterránea es la diferencia entre la descarga potencial de agua subterránea que permanece en el fin de la recesión de un período con la descarga potencial total del agua subterránea al inicio de la próxima recesión.

La escurrentía básica potencial,  $V_1$  ( $L^3$ ), que permanece en un tiempo  $t$  (T) después del inicio de un período de recesión está dado por:

$$V_t = V_{tp} / 10(t/t_1)$$

El cálculo asume que: no existe un uso irrecuperable de agua subterránea en la cuenca, de modo tal que, todo el caudal de agua subterránea está dado por la escurrentía de los ríos (Fetter, 1994).

10. **Ecuación Fundamental del Flujo de agua subterránea:** en teoría, ella es propuesta para acuíferos confinados y libres; asume las tres componentes diagonales de un tensor de nueve componentes (Cleary en Ramos *et al.*, 1989).

$$\partial[K_{xx} \partial H \partial X] \partial X + \partial[K_{yy} \partial H \partial Y] + \partial[K_{zz} \partial H \partial Z] + W(X, Y, Z, t) = S_s \partial H \partial t$$

Donde:

H = carga total

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  = componentes principales del tensor de conductividad hidráulica

$S_s$  = coeficiente de almacenamiento específico

W = fuentes o sumideros de agua del acuífero

t = tiempo

$\partial$  = representación de la derivada parcial

#### d) **Potencialidad y disponibilidad del recurso hídrico subterráneo**

La evaluación de la potencialidad y de la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos es un capítulo importante dentro de la hidrogeología, pues aporta bases para el establecimiento de la gestión de los recursos hídricos.

La evaluación de la potencialidad engloba los estudios básicos de hidrogeología, caracterizando la dinámica de los sistemas acuíferos, y su productividad en vista de buscar principalmente abastecimientos humanos, industriales y agropecuarios.

La caracterización del potencial y el perfil socio-económico de la región son parámetros de análisis, pues establecen un escenario del consumidor, así como establecen números para los cálculos de la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos.

La potencialidad puede ser definida en base a los cálculos de reservas. Según Costa (en Feitosa y Manoel Filho, 1997), la escuela francesa clasifica las reservas en cuatro tipos:

- Reservas reguladoras – es el volumen de agua libre almacenada por el acuífero por la

recarga importante, siendo sometidas al efecto de la variabilidad del ciclo hidrológico.

Esta reserva puede ser calculada por la expresión:

$$\text{Reserva Reguladora} = T \cdot i \cdot L,$$

Donde:

T = transmisividad hidráulica del acuífero (L/T)  
i = gradiente hidráulico del flujo de agua subterránea  
L = largo de la frente de escorrentía

Un segundo cálculo es dado por Costa (op.cit.)

$$\text{Reserva Reguladora} = A \cdot \Delta h \cdot h_e$$

Donde:

A = área de ocurrencia del acuífero (L<sup>2</sup>)  
 $\Delta h$  = variación del nivel de agua (L)  
 $h_e$  = porosidad efectiva

Por fin, la reserva puede ser calculada con la ecuación:

$$\text{Reserva Reguladora} = \Delta h \cdot A \cdot S,$$

Donde,

$\Delta h$  = variación de nivel  
A = área de ocurrencia del acuífero  
S = coeficiente de almacenamiento

- Reservas permanentes – denominadas seculares y profundas, son **la cantidad** de agua almacenada en el acuífero que no varían con las estaciones del año, y sí por períodos de varios años.

Las reservas permanentes son estimadas por las ecuaciones:

En el caso de acuíferos no confinados, el estimado es dado por la ecuación:

$$\text{Reserva Permanente} = A \cdot b \cdot h_e$$

Donde:

A = área de ocurrencia del acuífero (L<sup>2</sup>)  
b = espesor media del acuífero (L)  
 $h_e$  = porosidad efectiva

En acuíferos confinados:

$$\text{Reserva Permanente del acuífero confinado} = A_c \cdot h \cdot S (L^3) + A \cdot b \cdot h_e$$

Donde,

S = coeficiente de almacenamiento

$A_c$  = área de ocurrencia del acuífero confinado (L<sup>2</sup>)

h = carga hidráulica media encima de la base de la camada confinante (L)

- Reservas totales o naturales – es la sumatoria de las dos reservas descritas arriba y es el volumen total de agua almacenada en un acuífero.
- Reserva de explotación o recursos – son definidos como la cantidad máxima de agua que podría ser explotada de un acuífero, sin riesgos o perjuicios al manantial. Estas reservas son las reservas reguladoras y parte de las reservas permanentes y corresponden al concepto americano de *safe yield*.

La disponibilidad del recurso hídrico puede ser estimada realizando estudios de consumo de agua subterránea por los cálculos de números de pozos activos por actividades humanas, estimando el volumen explotado (por un tiempo definido – m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/año, etc.) substrayendo los valores de reservas estimadas.

Esos cálculos son estimados en locales donde no existen bases de datos suficientes para precisar esos valores. Sin embargo, aportan buenos indicadores para la planificación y gestión de los recursos hídricos de una región.

La figura 6 muestra la importancia de las aguas subterráneas en América Latina.

La calidad de las aguas subterráneas es hoy el mayor motivo de preocupación para los organismos de gestión, ya que la contaminación se hace presente ante innumerables elementos contaminantes ya detectados, provenientes de fuentes diversas.

En la planificación y gestión de los recursos hídricos se utilizan como estrategias de protección de acuíferos las cartas de vulnerabilidad de acuíferos y riesgo potencial de contaminación.

La metodología GOD (Foster y Hirata, 1991) es presentada para los estudios de vulnerabilidad de acuíferos y riesgos a la contaminación.

La vulnerabilidad de un acuífero se define como la mayor o menor capacidad del mismo de sufrir contaminación. Ella representa las características intrínsecas del acuífero que determinan una mayor o menor susceptibilidad a la contaminación.



Figura 6 – Importancia del agua subterránea para el abastecimiento de agua potable en la Región Latinoamericana y Caribeña (Foster, Ventura y Hirata, 1987)

De este modo, la vulnerabilidad es función de:

- Inaccessibilidad de la zona saturada - que por su vez es función del grado de confinamiento del acuífero, la profundidad del nivel freático o del acuífero, contenido de humedad de la zona no saturada y conductividad vertical hidráulica del acuífero o acuitardo.
- La capacidad de atenuación de los contaminantes en la zona no saturada – se relaciona con la distribución del tamaño del grano y las fisuras del acuífero o acuitardo y con la mineralogía del acuífero o de la matriz del acuitardo.

(saneamiento *in situ*, cultivos agrícolas, disposición de efluentes industriales, etc.).

La tabla 8 presenta una síntesis de las principales actividades potencialmente generadoras de carga contaminante en el suelo.

Las limitaciones de la metodología son: la ausencia de informaciones suficientes y de datos confiables. La interpretación de los mapas de vulnerabilidad debe ser hecha con mucha precaución, ya que, el concepto no posee validez científica.

La clasificación de vulnerabilidad de los acuíferos se muestra en la Figura 7.

Foster y Hirata (1991) recomiendan la evaluación de la vulnerabilidad para cada contaminante o clase contaminante (nutrientes, patógenos, microorganismos, metales pesados, etc.), para cada grupo de actividades contaminantes

Foster (1987 en Foster y Hirata, 1991) definió el riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas como la interacción entre la carga contaminante, que es o será aplicada al suelo por las actividades humanas, y la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, de acuerdo con sus características intrínsecas.

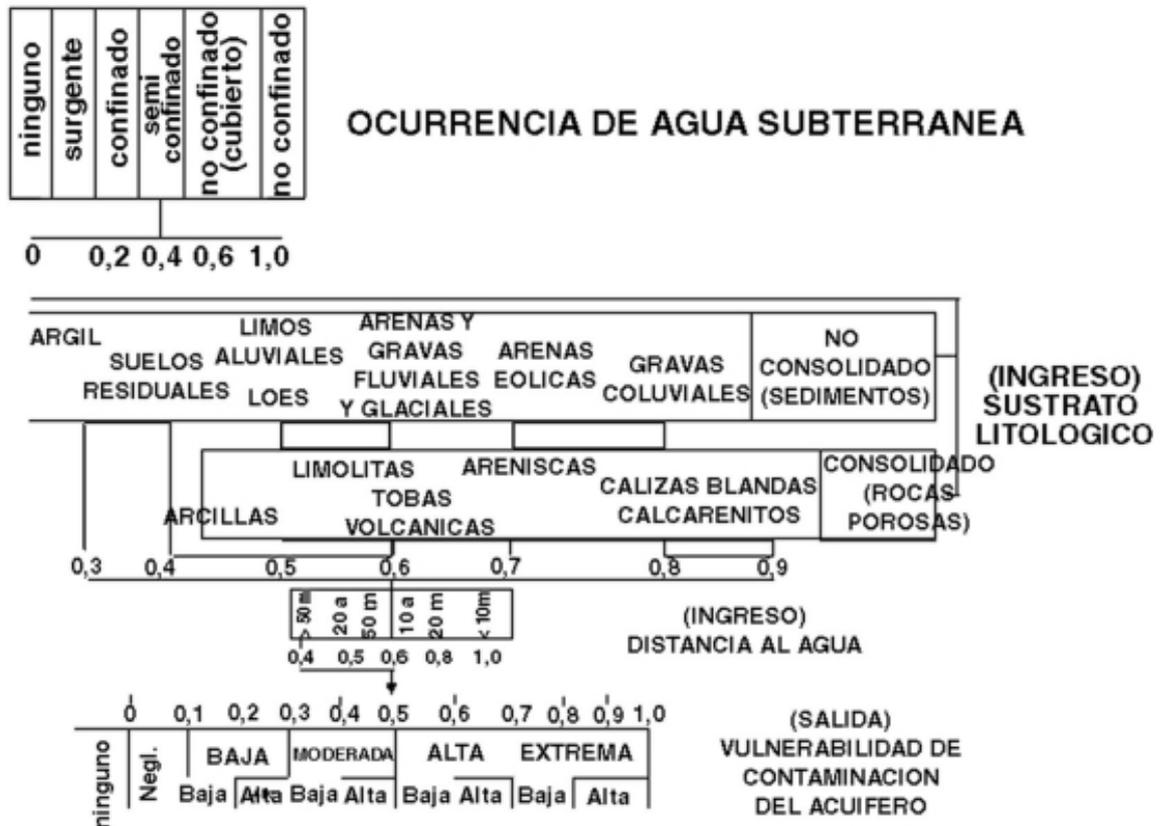


Figura 7. Sistema GOD para la evaluación del índice de vulnerabilidad del acuífero (compilado por Foster, 1987)

**Tabela 8. Resumen de actividades potencialmente generadoras de carga contaminante al subsuelo (Foster y Hirata, 1991). Las actividades en letra mayúscula son de ocurrencia más frecuente en América Latina.**

Actividad	Características de la carga contaminante			
	Categoría de Distribución	Principales tipos de contaminantes	Relativa carga hidráulica	Desvío de suelo
<u>Urbanización</u>				
SANEAMIENTO SIN ALCANTARILLADO	u/f P - D	n f o	+	*
- Fugas o desagües (a)	u P - L	n f o	+	*
LAGUNAS DE OXIDACIÓN				
DE DESAGUES (a)	u/r P	o f n	++	*
- Aplicación desagües al suelo	u/r P - D	n s o f	+	
DESCARGA DESAGUES AL RIO	u/r P - L	n o f	++	*
- Lixiviación de rellenos/ botaderos (a)	u/r P	o s h		*
- Almacenamiento de combustibles	u/r P - D	o		*
- Drenaje por sumideros	u/r P - D	s o	+	*
<u>Industrial</u>				
Fugas de tanques/ tuberías (b)	u P - D	o h		*
Derrames accidentales	u P - D	o h	+	
LAGUNAS DE EFLUENTES				
AL SUELO	u P	o h s	++	*
APLICACIÓN DE EFLUENTES AL RIO	u P - D	o h s	+	
DESCARGA EFLUENTES AL RIO	u P - L	o h s	++	*
Lixiviación de botaderos	u/r P	o h s		*
Drenaje por sumideros	u/r P	o h	++	*
Precipitaciones aéreas	u/r D	s o		
<u>Agrícola</u>				
a. CULTIVO DEL SUELO				
- CON QUIMICOS AGRICOLAS	r D	n o		
- E IRRIGACION	r D	n o s	+	
- con todos	r D	n o s		
- IRRIGACION DE AGUAS RESIDUALES	r D	n o s f	+	
b. Cría de ganado/procesos de cosechas	r P	f o n	++	*
- lagunas de efluentes	r P - D	n s o f		
- descarga efluentes al suelo	r P - L	o n f	++	*
- descarga efluentes al río				
<u>Extracción de Minerales</u>				
Modificación régimen hidráulico	r/u P - D	s h		*
Descarga de agua del drenaje	r/u P - D	h s	++	*
LAGUNAS DE RELAVES	r/u P	h s	+	*
LIXIVIACION DE BOTADEROS	r/u P	s h		*

(a) puede incluir componentes industriales

(b) puede ocurrir también en áreas no industriales

(c) intensificación presenta el principal riesgo de contaminación carga

P/L/D puntual/ lineal/ difusa

u/r urbano/ rural

n compuestos de nutrientes

f patógenos fecales

o compuestos microorgánicos y/o

orgánica

s salinidad

h metales pesados

Los autores presentan la localización de los estudios de vulnerabilidad y riesgo a la contaminación dentro de un esquema general de evaluación y administración del recurso hídrico. La determinación de riesgo tendría el objetivo de identificar los acuíferos más vulnerables y las actividades potenciales al riesgo máximo de contaminación, con el fin de establecer estrategias para la protección de los acuíferos para las próximas etapas (investigación y monitoreo de campo).

**e) Modelos de simulación de flujo de agua subterránea**

Los modelos de simulación matemática son instrumentos de análisis para la mejor

comprensión de las condiciones hidrogeológicas de una cierta área de estudio, y prever situaciones futuras o pasadas, partiendo de una situación real presente.

Actualmente los modelos matemáticos son empleados comúnmente para estudios hidrogeológicos, principalmente en estudios de definición de perímetros de protección de pozos y contaminación de aguas subterráneas.

En gestión de acuíferos, los modelos matemáticos son útiles para componer diversos escenarios futura de explotación, de acuerdo con el crecimiento de la demanda, definida por el crecimiento socioeconómico de la región.

La aplicación de modelos de simulación se basa en la ejecución de varias básicas, que se inicia con la elaboración del Modelo Conceptual del área de estudios.

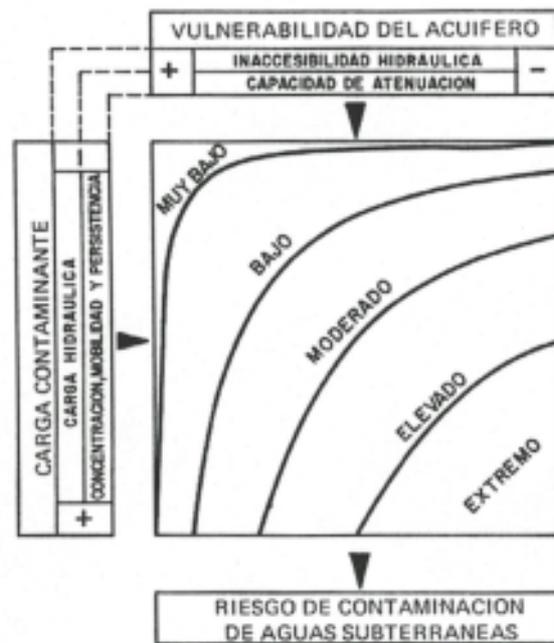


Figura 8. Esquema conceptual del riesgo de contaminación de aguas subterráneas (modificada de Foster 1987, en Foster y Hirata 1991).

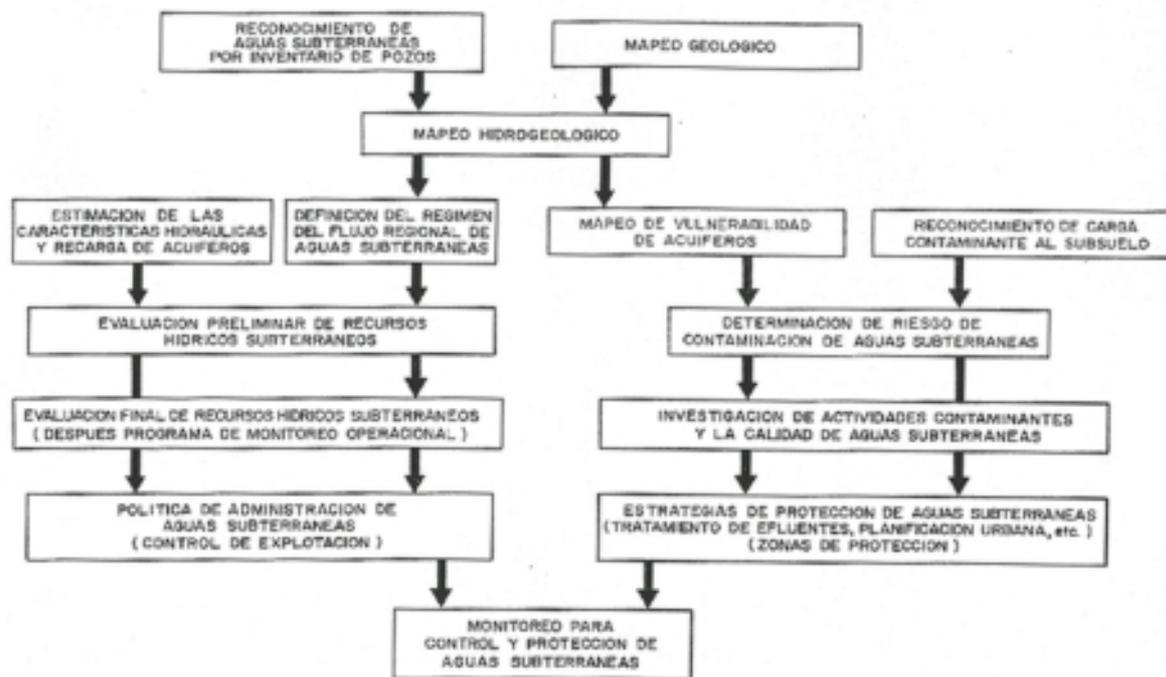


Figura 9. Posición de la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas en el esquema global de evaluación y administración del recurso hídrico sanitario.

**Modelo Conceptual** – es el producto de la evaluación de los datos hidrogeológicos con vistas a caracterizar una situación hidrogeológica en alguna región de interés.

Los elementos del modelo conceptual son (Domenico y Schwartz, 1997):

1. Esbozo hidrogeológico – contiene los principales rasgos hidrogeológicos definidos por investigaciones geológicas y ensayos hidráulicos. Es la síntesis acerca de las informaciones de forma, espesor, propiedades hidráulicas de las unidades geológicas regionales, la distribución de carga hidráulica y tasas de recarga de las aguas subterráneas;
2. Condiciones de contorno – son definidas a lo largo de los límites del dominio de la

simulación (tope y base), con la finalidad de delimitar la región que será modelada. Esas condiciones son requeridas para la solución de cualquier ecuación de flujo de agua subterránea. Las condiciones de contorno más utilizadas son: contornos específicos de carga hidráulica y contornos específicos del flujo. La condición de no flujo es un caso especial de contorno de flujo, y de un contorno de flujo a carga constante, un caso especial de contorno de carga específica. Cada condición de contorno puede proporcionar una zona de recarga o descarga. Las condiciones de contorno pueden ser caracterizadas por los rasgos hidrogeológicos como divisor de aguas subterráneas, una unidad acuífera de espesor fino y conductividad hidráulica

baja. En modelos transientes, donde la carga hidráulica varía en función del tiempo, es necesaria la definición de condición inicial para la simulación en tiempo cero.

La simulación del flujo de agua subterránea se calcula por la solución numérica de una ecuación de flujo de agua subterránea.

Los métodos numéricos son utilizados para resolver ecuaciones diferenciales parciales de la ecuación de flujo, en las cuales la carga hidráulica es desconocida.

Los principales enfoques numéricos utilizados para la ecuación de flujo de agua subterránea son:

1. **Método de las diferencias finitas** – se utiliza la discretización (el área de estudio es subdividida en mallas o redes) regulares, en bloques rectangulares, en los que para cada célula es definida un espesor  $m$  y un volumen  $mx$  y en el modelo bidimensional. En el modelo tridimensional, con acuíferos y acuitardos, las unidades individuales son caracterizadas verticalmente en células de espesores específicos. Los espacios de las líneas y columnas pueden variar, pero es común un espaciamiento constante. Los nódulos representan puntos de la malla donde la carga hidráulica es desconocida.

2. **Método de elementos finitos** – la discretización es hecha con elementos triangulares, permitiendo así una mejor distribución de los puntos de los nódulos. Es indicado para definir los contornos de acuíferos de formas irregulares, de manera que los nódulos puedan coincidir con los pozos de monitoreo o con los rasgos geográficos.

La figura 10 presenta dos enfoques numéricos.

El modelo conceptual es la fuente de información para el modelaje matemático, pues los datos son originados de este primer modelo.

La aplicación del modelo matemático implica la creación de un banco de datos que crearía los rasgos considerados más importantes del modelo natural.

Básicamente el modelo debe contener, en los nódulos o en las células, informaciones sobre la conductividad hidráulica, transmisividad, almacenamiento y flujos por fuentes o sumideros (recarga, bombeo y evaporación), así como las condiciones iniciales y de contorno (Domenico y Schwartz 1997).

El modelo pasa entonces por una CALIBRACIÓN, o sea, por un proceso de ajuste

entre parámetros seleccionados, entre cargas hidráulicas medidas y previstas, o de datos hidrogeológicos relevantes, como cambios de flujo de drenajes entre puntos de monitoreo. Esta etapa tiene como objetivo evaluar los resultados del modelo.

El ajuste por tentativa y error es el procedimiento más comúnmente usado, haciendo ensayos hasta que el error sea eliminado. Este ajuste se realiza por la variación sistemática de parámetros del modelo (conductividad hidráulica, almacenamiento, flujos o condiciones de contorno), pudiendo o no existir procedimientos automatizados en software.

Este proceso de calibración es una etapa importante para el uso de modelos matemáticos, ya que los sistemas hidrogeológicos son poco conocidos, y por eso, esos modelos necesitan de varios ajustes para eliminar los errores ocasionados por las diferencias entre los parámetros medidos y los previstos.

Los procedimientos para una mejor calibración dependen de cada caso, y deben ser dirigidos para que los errores sean pequeños en relación a la carga hidráulica total.

Estos procedimientos pueden estar basados en:

1. Error Medio =  $1/n \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i$
2. Error Medio Absoluto =  $1/n \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)_i|$
3. Error de la Raíz Cuadrada de la Media =  $[1/n \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2]^{0.5}$

$n$  es el número de puntos donde las comparaciones son hechas,  $h_m$  es la carga hidráulica medida en un punto  $i$  y  $h_s$  la carga hidráulica simulada en el mismo punto.

El último error es indicado como la mejor medida cuantitativa, si los errores fueran distribuidos normalmente; sin embargo otros procedimientos son necesarios para la calibración del modelo, en adición a las estimativas del error, como chequear las direcciones y gradientes de flujo (Domenico y Schwartz 1997).

Después de la fase de calibración del modelo, se ejecuta un ensayo de verificación del mismo, con vistas a evaluar si el modelo muestra una representatividad válida del sistema hidrogeológico estudiado. Usualmente ese ensayo es hecho simulando una condición particular donde se tenga una respuesta medida conocida.

Después de esa etapa de verificación el modelo puede ser utilizado para la simulación de escenarios diversos de acuerdo con los objetivos del proyecto.

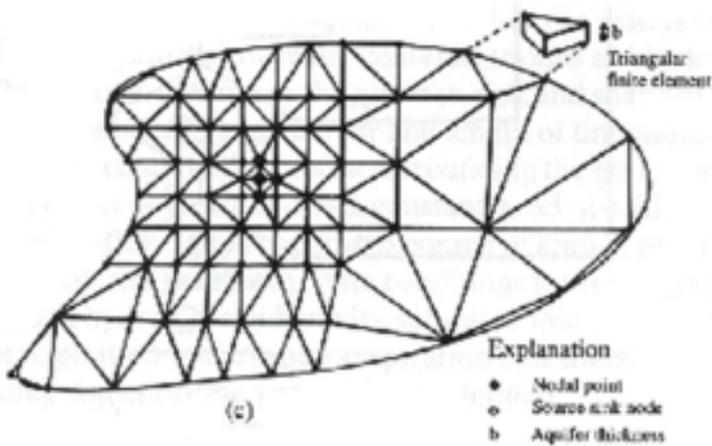
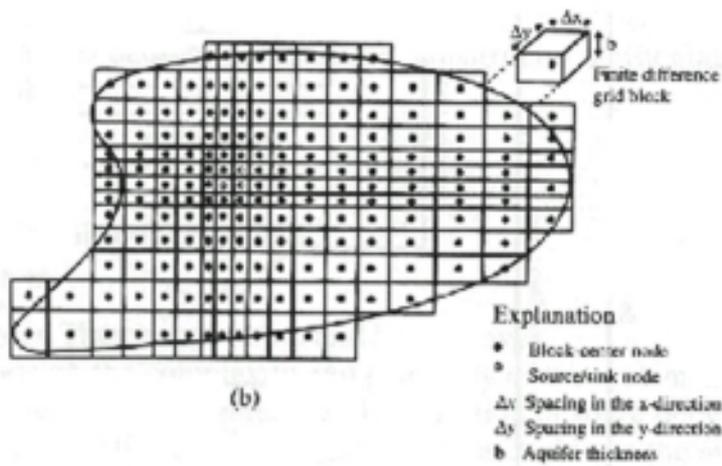
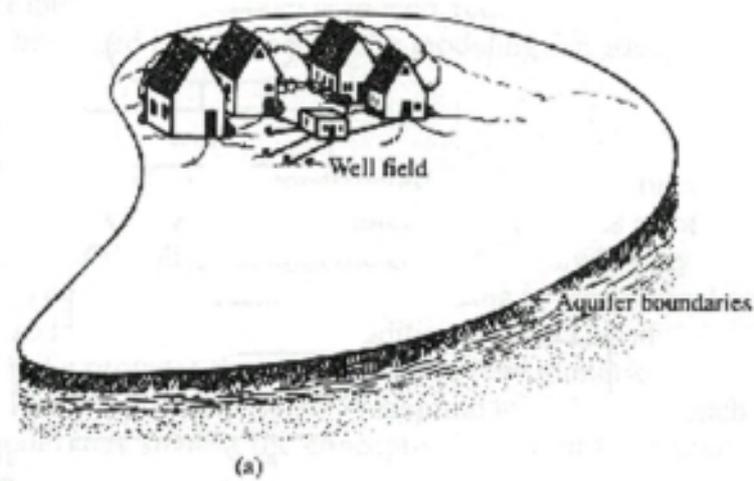


Figura 10. Comparación de los métodos de diferencias finitas y elementos finitos. (a) Acuífero Hipotético; (b) enfoque posible de diferencias finitas; (c) enfoque posible de elementos finitos (Mercer y Faust, en Stone 1999).

Los modelos tienen como objetivo presentar una visión más amplia de determinada situación hidrogeológica, pero no producen números incuestionables, sus resultados representan una simplificación de una realidad más compleja, por lo tanto, con posibles correcciones (Cleary en Ramos *et al.*, 1979). Los modelos son instrumentos de análisis del profesional para tomar decisiones técnicas de la mejor manera posible (Cleary en Ramos *et al.*, 1979).

Los modelos aplicados son determinísticos en su estructura, o sea, engloban características físicas de los acuíferos sin el elemento de falta de certeza en sus previsiones. Los modelos estocásticos vienen siendo desarrollados para estudio de transporte de contaminantes, en los casos en los cuales las heterogeneidades geológicas naturales, (que son responsables por los efectos de la dispersión) son preponderantes (Cleary en Ramos *et al.*, 1979).

#### f) La calidad de las aguas

Este ítem tiene como objetivo abordar los aspectos físico-químicos del agua subterránea y su calidad para el consumo humano. En la contaminación de las aguas subterráneas, será presentada los principales fundamentos teóricos.

#### ASPECTOS DE HIDROQUÍMICA Y CALIDAD

- La composición físico-química de las aguas subterráneas es el producto de las diversas reacciones químicas que tienen lugar durante la infiltración de las aguas para la zona saturada y durante el tiempo que permanecen y se mueven en el acuífero.

Los procesos de concentración del agua se inician con el enriquecimiento de gases e iones en la atmósfera en el ciclo hidrológico. La mayor parte del agua de precipitación que se infiltra en el suelo, volverá rápidamente al ciclo. Sin embargo, un pequeño porcentaje alcanza grandes profundidades por un largo tiempo de residencia, formando el agua subterránea.

Durante el proceso de infiltración, la velocidad del flujo es muy lenta, pudiendo así reaccionar con el medio y dar inicio a las reacciones que modifican su composición química original.

En el acuífero, estos procesos actúan con mayor intensidad en el agua y pueden presentar grandes variaciones debido a la heterogeneidad del medio rocoso.

Existen casos excepcionales en los cuales el agua subterránea no proviene directamente del agua meteórica; son las aguas juveniles (o geotérmicas) y las conatas.

Las aguas juveniles son provenientes de las aguas de precipitación que se infiltran en regiones activas, por ejemplo volcanes o fallas de grandes profundidades. En estos lugares, ellas adquieren mayor temperatura, presión y se enriquecen de gases y sales minerales.

Las aguas conatas tienen origen singenético con la roca almacenadora. Generalmente son aguas marinas que fueron aprisionadas durante la formación del acuífero.

La composición química de las aguas subterráneas es producto de una serie de procesos de mineralización, siendo aquí discriminados los más importantes.

La concentración en iones o en elementos se hace por la disolución y por los ataques de sustancias contenidas en las rocas por donde el agua atraviesa (Schoeller, 1962).

Así, los fenómenos de enriquecimiento de la composición química del agua son:

#### 1) Disolución:

**1.1) De los gases:** los principales gases encontrados en el agua son  $N_2$ , Ar,  $O_2$ ,  $H_2$ , He,  $CO_3$ ,  $NH_3$  y  $CH_4$ . En la infiltración, el equilibrio entre el agua y los gases se realiza rápidamente sobre presión atmosférica. Ya en la región arriba de un acuífero existe una cierta inestabilidad pudiendo, sin embargo, entrar en equilibrio dinámico en caso de existir un régimen de movimiento permanente entre el gas y el agua.

**1.2) De las sales:** la disolución de sustancias contenidas en las rocas es función de dos fenómenos: la disociación y la ionización de un elemento.

**2) Ataque Químico:** de compleja comprensión, engloba muchas reacciones, que resultan en el enriquecimiento de elementos químicos en el agua. Los principales agentes del ataque químico son:

**2.3) Hidratación:** es el proceso de alteración más común de muchos minerales, representando el proceso inicial de ataque químico. Es definido como la penetración de la molécula de agua en el sistema reticular de los cristales de un mineral.

**2.4) Hidrólisis:** es uno de los agentes de ataque de ciertas sustancias, tales como silicatos. Sin embargo, no posee la propiedad de reaccionar y descomponer

totalmente los minerales, pues ella tiende a entrar en equilibrio rápidamente con la reacción inversa. Para que la hidrólisis se procese, es necesaria la eliminación de ciertos elementos del medio, o el aporte de ciertos iones, de modo que se "rompa" el equilibrio establecido. La eliminación de iones se dará por disociación de algún elemento (ácido carbónico, por ejemplo). Los elementos hidrolisables generalmente son sales de bases fuertes.

**2.5) Oxidación y reducción:** el proceso de oxidación frecuentemente ocurre en acuíferos que almacenan aguas de origen superficial (Schoeller, 1962). Estos fenómenos se procesan con mayor intensidad en la zona de infiltración, más específicamente entre el nivel del suelo y la superficie del nivel freático (donde el aire, o el oxígeno y el agua coexisten). En el acuífero, la oxidación se procesa con menor intensidad, siendo que, a grandes profundidades, la reacción casi no ocurre. Cuando el oxígeno es insuficiente, se da la retirada de estos dos óxidos, sulfatos, nitratos y nitritos. Los productos de la reacción son generalmente  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  y en menor frecuencia,  $S^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $Fe^{++}$  y Mn. El Potencial de Oxi-Reducción (potencial redox) es la variación de la energía debido a la adición o substracción de electrones, con vistas a posibilitar la estabilidad de un elemento en un estado dado de oxidación.

El potencial redox se representa con el símbolo eH y por la ecuación:

$$eH = eH_0 + (RT/nF) \cdot \ln (<Ox>/<Red>)$$

<Ox> = concentración molar (actividad) del cuerpo oxidado

<Red> = concentración molar del cuerpo reducido

eH = potencial medido en Volts

$eH_0$  = potencial del electrodo, cuando Ox = Red

R = constante del gas

T = temperatura absoluta

N = número de electrones, o diferencia de electrones entre los cuerpos oxidados y los reducidos

F = Faraday = 96.540 Coulombs

El eH tiene la propiedad de caracterizar el medio en función de la oxidación y la reducción. Él mide la capacidad del ambiente de aportar electrones a un agente oxidante, o de retirar electrones de un agente reductor. En el agua del suelo, la solución es compleja, pues existen innumerables reacciones que ocurren en el medio, siendo difícil su identificación y por tanto, la determinación de eH de cada reacción. Para la interpretación de ambientes hidrogeológicos se utilizan los diagramas de eH-pH. Estos gráficos indican los campos de oxi-reducción x pH que pueden ocurrir en la naturaleza para cada elemento.

**2.6) Ataque de los Ácidos:** el ataque de los ácidos en las rocas proviene del gas carbónico, del ácido nítrico, del ácido nitroso, del ácido sulfúrico y de los ácidos orgánicos. El Gas Carbónico es originario de la respiración de los organismos, microorganismos y de la descomposición de la materia orgánica existente en el suelo (principal fuente), del ataque químico del carbonato existente por los ácidos orgánicos y de su disolución en la atmósfera. El ácido sulfúrico es el producto de la oxidación de los sulfuros, atacando sobre todo a los carbonatos. El ácido nítrico y nitroso provienen de los fenómenos de nitrificación y de los ácidos orgánicos del suelo, son resultantes de la descomposición de vegetales por las bacterias; a pesar de ser inestables, poseen suficiente tiempo de vida para atacar a los carbonatos. Los ácidos orgánicos son: butírico, fórmico, acético, propiónico, oxálico, fumárico, cítrico, tánico, láctico, valeriano y proxiónico.

**3) Fenómenos Modificadores:** Los fenómenos modificadores son procesos secundarios que cambian la composición química del agua. Los más importantes son identificados a continuación:

**3.1) Reducción de los Sulfatos:** ocurre en el agua subterránea y está relacionada con la presencia de materia orgánica. En aguas con contenido anómalo muy reducido de sulfato, están presentes elementos como  $H_2S$ , sulfuros e hiposulfitos. Generalmente esta reducción de sulfatos está relacionada con regiones de turfa, lignitos, carbón y petróleo. La reducción se atribuye a los microorganismos (bacterias) existentes en la materia orgánica.

**3.2) Intercambio de Bases:** es la propiedad de intercambiar iones de la roca con el

agua que está en contacto a través de la absorción. Este intercambio de bases se realiza a través de tres tipos de absorción, siendo una de ellas intermediaria entre las otras dos. La absorción física o de Van Der Waals posee una unión débil entre el absorbente y el absorbido; la absorción química, se caracteriza por las uniones fuertes de valencias y la intermediaria, es donde ocurren los dos fenómenos simultáneamente.

En general, el intercambio de bases ataca principalmente los cationes fijándose en la superficie o aun en el interior de las sustancias, siendo que, los iones bivalentes se fijan mejor que los monovalentes.

Estas sustancias poseen la capacidad de absorber e intercambiar bases y están representadas por los minerales arcillosos, minerales del Grupo de las Zeolitas, hidróxido de hierro y sustancias orgánicas.

De una manera general, la fijación se dará en la siguiente secuencia: H – Rb – Ba – Sr – Ca – Mg – K – Na – Li, en orden decreciente, en función del tipo de material arcilloso.

**3.3) Concentración:** el aumento del contenido de sales disueltas en el agua se realiza de dos maneras: por disolución de nuevas cantidades de sales, que es función directa de la litología, y por evaporación, de influencia esencialmente climática. Los factores principales que influyen en la concentración por disolución son la temperatura, la presión, el área de la superficie de contacto, volumen de agua de contacto y solubilidad de los elementos constituyentes del contacto. La concentración de los elementos alcanzará un cierto límite, pues el agua tenderá a entrar en equilibrio con la roca de contacto. Este equilibrio es función del tiempo, de la naturaleza del terreno y de la diferencia de concentración de las sales del agua y del terreno.

La solubilidad de las sales es el resultado de la combinación de diversos iones que se forman en el agua. Las sales más comunes y que se disuelven en gran cantidad son carbonato de calcio, carbonato de magnesio, cloruro de sodio y sulfato de calcio. La concentración será mayor cuanto mayor sea el período de tiempo de trayecto y menor la velocidad de circulación.

La concentración por evaporación posee la misma regla que la disolución; sin embargo, la evaporación ocurre en regiones de clima pre-

desértico. La primera precipitación que ocurre es la del carbonato de calcio, después la del yeso, el carbonato o el sulfato de sodio. En estas regiones las aguas serán salobres, con elevado contenido de residuo seco debido a la intensa evaporación.

La composición química resultante de las aguas podrá o no ser utilizada para diversas actividades humanas (como p. ej: actividades industriales, agropecuarias y de abastecimiento humano), siendo que cada actividad tendrá exigencias de mayor o menor restricción. Los patrones de potencialidad de las aguas para el consumo humano es el más exigente y restrictivo.

La Organización Mundial de la Salud presenta patrones de potencialidad para agua de consumo humano, cuya síntesis se encuentra en la tabla 9.

**CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS** – la hidrogeología de los contaminantes es una ciencia relativamente nueva, que se inició ante los varios casos de contaminación de acuíferos, por la existencia de muchos tipos de fuentes de contaminantes y por consistir en un problema a largo plazo, en vistas de que la remediación para el problema es muy complicada y costosa, y no siempre produce resultados satisfactorios.

Fetter (1999) presenta una vasta gama de tipos de contaminantes encontrados en el agua subterránea, y consisten en general en compuestos orgánicos sintéticos, hidrocarbonatos, cationes y aniones inorgánicos, patógenos y radionucléidos.

Los estudios de contaminación del agua subterránea son muy complejos, pues el comportamiento de los contaminantes es complejo. Algunos pueden sufrir procesos de biodegradación transformándose en otros compuestos no contaminantes, o mucho más nocivos para la salud, otros pueden estar presentes en el agua subterránea en forma disuelta y en la fase insoluble, o aún, presentar fases más y menos densas que el agua.

Los contaminantes sufren varios procesos de atenuación en el suelo hasta llegar al acuífero. Los procesos que ocurren en la zona no saturada son la dilución hidrodinámica, sorción iónica, intercambio iónico, hidrólisis, complejación, transformación bioquímica volatilización. Los acuíferos más vulnerables a la contaminación son los no confinados, especialmente si el nivel freático es poco profundo (Foster y Hirata 1991).

Los patrones de potabilidad definen la concentración permitida en el agua para consumo humano y los principales contaminantes del agua subterránea.

Los patrones de potabilidad, como los expuestos en la tabla 9, definen la concentración permitida en el agua para el consumo humano.

Las fuentes de contaminación son también innumerables y de diversas formas. Fetter (1999) presenta la clasificación de la *Office of Technology and Assessment* (OTA) del Congreso de los Estados Unidos, que lista más de 30 fuentes potenciales de contaminación de agua subterránea, dividiéndolas en 6 categorías:

- 1) **Fuentes proyectadas para el lanzamiento de sustancias:** 1.1) fosas sépticas y sumideros para uso doméstico – que poseen como contaminantes potenciales una variedad de componentes orgánicos e inorgánicos (indicadores: DBO, DCO, Coliformes Fecales, Streptococos, nitrógeno total, amoníaco, nitrato, fósforo total e ortofosfato); 1.2) pozos de inyección – usados para lanzar efluentes y otros líquidos en zonas de subsuperficie por debajo del nivel del agua, teniendo como contaminantes efluentes peligrosos, agua salobre de pozos de petróleo, escurrientía urbana y rural, alcantarillado municipal, agua de retorno de refrigeración y de calefacción, líquidos para aumentar la recuperación del aceite en campos de petróleo, agua tratada para recarga artificial y fluidos usados en la minería. 1.3) Contaminantes aplicados en terrenos por sistemas de irrigación – efluentes municipales e industriales tratados o no tratados, como la borra de tratamiento de efluentes como fertilizantes del suelo, conteniendo nitrógeno, fósforo, metales pesados y componentes orgánicos, son contaminantes potenciales.
- 2) **Fuentes proyectadas para almacenar, tratar y/o disponer sustancias de relleno sanitarios:** 2.1) a pesar de que estas construcciones sean hechas para evitar la contaminación, los rellenos sanitarios generan el lixiviado, que contamina las aguas subterráneas. Los basureros, o sea, áreas que reciben desechos domésticos (a veces de otras actividades humanas) sin ningún criterio de disposición, a pesar de ser prohibidos en muchos países, visto su impacto ambiental, todavía existen y son fuentes

potenciales de contaminación. También es común la disposición doméstica de residuos, los cuales pueden contener contaminantes como aceites y grasas, productos de jardín (pesticidas, sobras de pintura, *thinner*, etc.). 2.2) Lagunas, tanques usados por las industrias, haciendas y ciudades para almacenamiento y/o tratamiento de efluentes peligrosos y no –peligrosos, 2.3) Desperdicios de la minería, como suelos, sedimentos y rocas provenientes de las actividades de minería, residuos del beneficiamiento de las minas pueden generar contaminantes, como ácido sulfúrico, provenientes de la lixiviación de minerales sulfatados. 2.4) Cementerios – la descomposición libera material orgánico y puede contaminar el agua subterránea con nivel de agua raso y geología muy susceptible a la contaminación. 2.5) Tanques de almacenamiento superficial – roturas o vaciamientos pueden liberar productos del petróleo, agroquímicos y productos químicos, contaminando el suelo y las aguas subterráneas. 2.6) Tanques enterrados – para almacenar combustible en puestos de gasolina, haciendas e industrias, de productos químicos en industrias, pueden poseer vaciamientos por corrosión de tanques de acero o fisuras en tanques de fibra de vidrio. 2.7) Locales de incineración y detonación – los químicos liberados de estos locales pueden alcanzar el suelo por la precipitación.

- 3) **Fuentes proyectadas para retener sustancias durante el transporte:** 3.1) en conductos de transporte de gas natural, de productos del petróleo (aceite crudo, gasolina diesel, combustible de aviación, kerosene, y amoníaco anhidro) y red de alcantarillado (bacterias, nitrógeno y cloretos) y otros líquidos, pueden ocurrir pérdidas por fisuras y roturas. 3.2) Transporte y transferencia de material – por camión y tren que pueden causar filtraciones por accidentes en carreteras.
- 4) **Fuentes que lanzan sustancias como consecuencia de otras actividades:** 4.1) el exceso de irrigación percola a través de la zona no saturada hacia el agua subterránea, cargando productos químicos como fertilizantes y pesticidas. La mayor salinidad del suelo también puede ocurrir por la evapotranspiración del agua que es irrigada. Los pesticidas

Tabla 9. Síntesis de los Patrones de Potabilidad de la Organización Mundial de la Salud

	Parámetro	Unidad	Patrón		Parámetro	Unidad	Patrón
I	Color	Pt/l	15	III	Aldrin y Dieldrin	µg/l	0.03
	Olor	-	Inofensivo		Benzeno	µg/l	10
	Sabor	-	Inofensivo		Benzo a pireno	µg/l	0.01
	Turbidez	UNT	5		Clordano	µg/l	0.3
	Temperatura	°C	-		Clorobenzenos	µg/l	0.1-10
	pH	-	6.5-8.5		Clorofenoles	µg/l	0.1-10
II	Arsenio	mg/l As	0.05		DDT	µg/l	1.0
	Bario	mg/l Ba	-		Eldrin	µg/l	-
	Cádmio	mg/l Cd	0.005		Fenol	µg/l	-
	Plomo	mg/l Pb	0.05		Heptacoloro	µg/l	0.1
	Cianetos	mg/l CN	0.1		Hexaclorobenzeno	µg/l	0.01
	Cromo	mg/l Cr	0.05		Lindano	µg/l	3.0
	Fluoretos	mg/l F	1.5		Metoxicloro	µg/l	30
	Mercurio	mg/l Hg	0.001		Pentacolorofenol	µg/l	10
	Nitratos	mg/l NO <sub>3</sub>	10		Tetracloroto de C	µg/l	3.0*
	Nitritos	mg/l NO <sub>2</sub>	-		Tetracloretano	µg/l	10*
IV	Plata	mg/l Ag	-		Toxafenos	µg/l	-
	Selenio	mg/l Se	0.01		Tricloroetenos	µg/l	30*
	Aluminio	mg/l Al	0.2		Trihalometanos	µg/l	-
	Surfactantes	mg/l LAS	-		1,1 Dicloroetano	µg/l	0.3
	Cloretos	mg/l Cl	250		1,2 Dicloroetano	µg/l	10
	Cobre	mg/l Cu	1.0		2,4 D	µg/l	100
	Dureza Total	mg/l	500		2,4,6 Triclorofenol	µg/l	10
	Hierro Total	mg/l Fe	0.3		V	Alfa Total	Bq/l
	Manganeso	mg/l Mn	0.1	Beta Total		Bq/l	11.0
	Sodio	mg/l Na	200	Césio 137		Bq/l	-
	STD	mg/l	1000	Radio 226		Bq/l	-
	ST	mg/l	-	Estroncio 90		Bq/l	-
	Sulfatos	mg/l SO <sub>4</sub>	400	Tritio 3	Bq/l	-	
	Sulfeto de H	mg/l S	N.D.	VI	Coliformes Fecales	Nº/100ml	0
Zinc	mg/l Zn	5.0	Coliformes Totales		Nº/100ml	0	

- I – Parámetros físico-organolépticos,  
 II – Parámetros químicos inorgánicos,  
 III – Parámetros químicos orgánicos,  
 IV – Parámetros químicos que afectan la calidad organoléptica,  
 V – Parámetros radioactivos,  
 VI – Parámetros biológicos;  
 UNT – Unidad nefelométrica de turbidez,  
 N.O. – No Objetable,  
 N.D. – No Detectable,  
 Bq/l – Becquerel/litro,  
 \* – Valor experimental.

Fuente: CETESB 1990.

pueden contaminar el agua subterránea cuando su uso es muy intenso. Generalmente los pesticidas son biodegradados, sin embargo los productos resultantes de esa biodegradación (metabolitos) pueden ser encontrados en el agua subterránea. La Atrazina es uno de los pesticidas más usados en la agricultura. La aplicación de fertilizantes puede liberar nitrógeno, fósforo y potasio. 4.2) Residuos de animales pueden contaminar el agua con bacterias, virus, nitrógeno y cloretos. 4.3) La aplicación de sal para deshielo de nieve en avenidas libera ferrocianato férrico y ferrocianato de sodio. Cromato y fósforo pueden ser adicionados para reducir el potencial corrosivo de las sales. 4.4) La escorrentía urbana contiene altas concentraciones de sólidos disueltos y en suspensión de emisiones de automóviles, aceites y grasas de vehículos, aguas servidas, y filtraciones de la red de alcantarillado. 4.5) Los contaminantes atmosféricos son depositados en el suelo por la precipitación o como polvo; los contaminantes pueden ser provenientes de la emisión de vehículos, industrias, incinerados, y otros procesos industriales, generando hidrocarbonatos, productos químicos sintéticos y naturales, metales pesados, azufre, compuestos de nitrógeno. 4.6) El drenaje ácido- ocurre con la lixiviación de las rocas que contienen pirita, produciendo aguas ácidas que son drenadas de las minas, resultando en la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

- 5) **Fuentes que son conductos de pasaje del agua contaminada para los acuíferos:** 5.1) los pozos de producción de aceite, gas, energía geotérmica y agua, pueden servir de conductos de contaminantes durante la perforación de los pozos, ya sea pozos mal construidos, con revestimientos corroídos y abandonados, o pozos rasos pueden servir como receptores de basura. 5.2) los pozos de monitoreo y sondeo de exploración. 5.3) Excavaciones para la construcción, pueden remover la protección natural de los acuíferos.
- 6) **Fuentes naturales con interferencias de actividades humanas:** 6.1) interacción agua superficial – agua

subterránea, o sea, contaminación del agua subterránea por la infiltración de cuerpos de agua superficial contaminada; 6.2) Lixiviación natural de las rocas y suelos aumentada con la lluvia ácida provocada por las actividades humanas que incrementan la concentración de sales disueltas, que se infiltran y contaminan el agua subterránea. 6.3) avance de la intrusión salina, con la superexplotación de pozos.

Según la *National Water Quality Inventory* (en Fetter, 1999), las principales fuentes de contaminación son los tanques enterrados, seguidos por las fosas sépticas, actividades de la agricultura, rellenos sanitarios, lagunas o tanques superficiales, locales de deposición de residuos peligrosos abandonados.

**Conceptos Básicos de Transporte de Masa en Medio Saturado** – existen tres procesos básicos de transporte de solutos.

La Difusión es el proceso a través del cual las especies iónicas y moleculares disueltas en el agua se mueven de áreas de mayor concentración para áreas de menores concentraciones (Fetter, 1994). La Advección es el proceso por el cual el agua subterránea se mueve cargando solutos disueltos. En este proceso ocurre la dispersión, que diluye el soluto y disminuye su concentración. La Retardación de un soluto en movimiento es ocasionado por procesos físicos y químicos que hacen que se “retarde” el movimiento del soluto.

La Difusión se rige por la ley de Fick, que describe la siguiente ecuación en condiciones de steady state.

$$F = - D \, dc/dx,$$

Donde:

F = flujo de masa del soluto por unidad de área por unidad de tiempo

D = coeficiente de difusión (área/tiempo)

C = concentración del soluto (masa/ volumen)

dC/dx = gradiente de concentración (masa/ volumen/ distancia)

En sistemas en los cuales la concentración varía con el tiempo, la segunda Ley de Fick, en una dimensión se expresa por la ecuación:

$$cC/ct = D \, c^2C/cx^2$$

Donde:

$c^2C/cx^2$  = cambio de la concentración con el tiempo.

El Coeficiente de Difusión Efectiva  $D^*$  es utilizado y se expresa por la ecuación empírica:

$$D^* = wD,$$

Donde,

$w$  es un valor empírico determinado por ensayos de laboratorio.

Ese coeficiente representaría la posibilidad de que la solución se moviera y se difunda por las aberturas existentes entre los granos minerales y por eso poseen varios caminos en un bloque poroso (Fetter, 1994).

**Advección** – es una tasa de agua subterránea que se mueve y que puede ser determinada por la Ley de Darcy, y por la velocidad real del flujo ( $V_{real} = q/ne$ ). Los contaminantes que sufren advenimiento viajan en la misma razón que la velocidad media lineal del agua subterránea.

**Dispersión** - la solución que se mueve en el medio poroso, se mezcla con el agua no contaminada, trayendo como resultado la dilución de la solución.

La mezcla que ocurre a lo largo de la línea de flujo se denomina Dispersión Longitudinal; aquella que ocurre normal a la trayectoria del flujo se llama dispersión lateral (Fetter, 1994).

La Dispersión Mecánica puede ser expresada por: Dispersión Mecánica =  $a_L v_x$ , donde  $a_L$  se denomina dispersividad dinámica.

La Dispersión Hidrodinámica y los procesos citados anteriormente ocurren en función del movimiento de las aguas subterráneas; el parámetro Coeficiente de Dispersión Hidrodinámica es definido y es función de la mezcla mecánica y la difusión.

La ecuación unidimensional está dada por la ecuación:

$$D_L = a_L v_x + D^*$$

Donde:

$D_L$  = coeficiente de dispersión hidrodinámica longitudinal

$a_L$  = dispersividad dinámica

$v_x$  = velocidad media lineal del agua subterránea

$D^*$  = difusión molecular

Fetter (1994) presenta la ecuación unidimensional de la dispersión hidrodinámica dada por la ecuación:

$$D_L \frac{c^2 C}{cx^2} - v_x \frac{cC}{cx} = \frac{cC}{ct}$$

Donde:

$D_L$  = coeficiente de dispersión hidrodinámica longitudinal

$C$  = es la concentración del soluto

$v_x$  = velocidad media del agua subterránea en la dirección  $x$

$t$  = tiempo entre el inicio de la contaminación hasta el momento requerido de la invasión del soluto

La concentración  $C$ , a una cierta distancia,  $L$ , de la fuente de concentración  $C_0$  a un tiempo  $t$  se expresa por la siguiente ecuación:

$$C = C_0/2 [\operatorname{erfc}\{(L - v_x t)/(2\sqrt{D_L t})\} + \exp(v_x L/D_L) \cdot \operatorname{erfc}\{(L + v_x t)/(2\sqrt{D_L t})\}]$$

Donde:

$C$  = concentración del soluto ( $M/L^3$ )

$C_0$  = concentración inicial del soluto ( $M/L^3$ )

$L$  = largo de la trayectoria del flujo ( $L$ )

$v_x$  = velocidad media lineal del agua subterránea ( $L/T$ )

$t$  = tiempo desde la liberación del soluto ( $T$ )

$D_L$  = coeficiente de dispersión longitudinal ( $L$ )

La dispersión mecánica es influenciada por las heterogeneidades de la roca almacenadora.

La concentración de un soluto decaerá debido a la dispersión hidrodinámica, pues el soluto se esparcirá en dirección del movimiento del agua subterránea, así como, con menor efecto, en la dirección perpendicular del flujo (Fetter, 1994).

**Retardación** – el principal proceso de retardo es la adsorción, proceso físico causado por las fuerzas de Van der Waals. Las superficies de materiales, principalmente arcilla, poseen cargas eléctricas por su isomorfismo, uniones quebradas y defectos estructurales. La carga eléctrica está desbalanceada y por eso atrae iones.

El factor de retardo puede expresarse por:

$$\text{Factor de retardo} = 1 + (r_b/q) \cdot (K_d)$$

Donde:

$r_b$  = densidad de la masa seca del suelo ( $M/L^3$ )

$q$  = contenido volumétrico de humedad del suelo (adimensional)

$K_d$  = coeficiente de distribución para el soluto con el suelo ( $L^3/M$ )

En casos de solutos reactivos, el movimiento del soluto puede determinarse por la ecuación de retardo dada por la expresión:

$$v_c = v_x / [1 + (\tau_b/q) \cdot (K_d)]$$

Donde:

$v_x$  = velocidad media lineal (L/T)

$v_c$  = velocidad de la frente del soluto, donde la concentración es la mitad del valor original ( $C/C_0 = 0,5$ ) (L/T)

En la degradación de componentes orgánicos (principalmente halogenados) se observan los siguientes procesos: disolución, biodegradación, sustitución (interacción del agua y el componente halogenado sustituyendo  $\text{OH}^-$  por  $\text{X}^-$ , creando un tipo de alcohol), deshidrohalogenación, oxidación y reducción e hidrogenólisis (Fetter, 1994).

### g) Evaluación Hidrogeológica y Cartografía Hidrogeológica

Los estudios de evaluación hidrogeológica y la cartografía son temas íntimamente relacionados, ya que esta última es la representación espacial de la síntesis de los conocimientos. Los aspectos relacionados con estudios hidrogeológicos y cartografía son analizados en la literatura científica, por los siguientes prismas: a través del proceso evolutivo del conocimiento, y de la función de los diversos tipos de estudios de hidrogeología.

Los estudios hidrogeológicos se vienen modificando conjuntamente con la propia visión de la función del hidrogeólogo y del avance de los métodos y técnicas de estudios.

En términos de cartografía hidrogeológica, una idea de su evolución y de su papel es evaluada por Collin (1991), quién identificó tres momentos (o estados) del desarrollo de la cartografía hidrogeológica, que a su vez retratan el estado evolutivo de los estudios de hidrogeología.

En el primer estado, la cartografía representa un documento elaborado como un informe, las informaciones hidrogeológicas eran sobretudo puntuales y las especializaciones se restringían a la carta geológica, frecuentemente traducidos en términos de litología.

En el segundo momento, la cartografía es elaborada por hidrogeólogos especializados y existe una cierta padronización en los mapas; sin embargo, esa cartografía es analítica y poco "dinámica". La caracterización de las condicio-

nes de recarga y las transmisividades introduce un inicio en la idea de modelaje en los estudios hidrogeológicos.

El tercer momento identificado es la transmisión del conocimiento al público, hecha por medio de cartas temáticas, que son ejecutadas de dos formas; por superposición gráfica (adición o sustracción de una imagen a otra, produciendo una tercera familia de contornos), o por asociación preliminar de parámetros numéricos diversos y constitución de *index*, que son objeto de procedimientos de interpolación. El contorno geológico permite definir las "regiones presumiblemente homogéneas".

Otro enfoque del análisis de estos datos se basa en la existencia de varios tipos de estudios hidrogeológicos, influenciado por diversos factores técnicos y operacionales, tales como: estado del arte del conocimiento, objetivos del proyecto, volumen y calidad de información de los datos disponibles, escala de estudio, mano de obra, experiencia del profesional hidrogeólogo, costo y tiempo. De acuerdo con esto los mapas hidrogeológicos son bastante diversos.

De esta forma, se pueden identificar dos ramas en los estudios hidrogeológicos. La primera consiste en estudios de evaluaciones hidrogeológicas y de relevamientos de carácter regional y sistemático ejecutados por los órganos de gobiernos estatales o federales (como departamentos o servicios geológicos), con el interés de ofrecer en particular informaciones sobre el comportamiento hidrodinámico y estructural de los sistemas acuíferos, y la potencialidad y calidad del recurso hídrico subterráneo.

En términos de cartografía, Struckmeier y Krampe (1992) clasifican los mapas resultantes de este tipo de estudio como los mapas generales y sistemáticos, que son la representación gráfica de un inventario sistematizado y centralizado de datos geológicos e hidrogeológicos, que tiene como objetivo cubrir áreas extensas usando formas homogéneas de interpretación, representación y escala.

La otra tendencia de desarrollo de los estudios hidrogeológicos está dirigida a temas específicos, sobre demandas especiales y se caracterizan por su gran variabilidad en cuanto a tipos, pudiendo o no pertenecer a los levantamientos regionales.

Los mapas derivados (Struckmeier y Krampe 1992) resultantes de estos estudios específicos, pueden ser ramificaciones y salidas gráficas de los mapas y bases de levantamientos hidrogeológicos sistemáticos, cuyos temas representados están direccionados a problemas específicos, sirviendo a un grupo bien definido de usuarios.

Estos tipos de mapas ("*problem-oriented hydrogeological maps*") son elaborados para mejorar el uso del conocimiento hidrogeológico en planificación, desarrollo y protección de recursos naturales, por medio de técnicas modernas de almacenamiento y gestión de datos en sistemas de información.

Los autores consideran también que algunas de estas cartas derivadas pueden ser simplistas para el profesional hidrogeólogo, sin embargo pueden justamente atender las necesidades de legos como, políticos, algunos planificadores y hombres de decisión.

La tabla 10 de autoría de Struckmeier y Krampe (1992), esquematiza la clasificación de varios tipos de mapas que pueden ser producidos en función del nivel de información disponible, del uso de los mapas y de los parámetros de representación.

Dentro de esta clasificación de Struckmeier y Krampe (1992) y del abordaje histórico de los trabajos de hidrogeología, algunos ejemplos internacionales y nacionales son presentados y analizados.

Los estudios de evaluaciones regionales se realizan normalmente con el objetivo de alcanzar metas como el conocimiento del potencial de ese recurso hídrico en una región y/o la atención para la planificación regional, abastecimiento rural, uso del suelo y asentamientos humanos.

Los trabajos de la *Geological Survey of Canada* –GSC (1967), de la Carta Hidrogeológica de Mozambique (Ferro y Bouman 1992) y los estudios de la Cuenca del Río de La Plata (Organización de Estados Americanos – OEA 1971) son evaluaciones hidrogeológicas regionales basadas en la síntesis de informaciones existentes acerca del conocimiento hidrogeológico del momento. En general, los estudios abarcan extensas regiones, como por ej. todo Canadá, Mozambique y la Cuenca del Río de La Plata, y son considerados aquí como estudios de reconocimiento de evaluación del recurso. Los ni-

veles de información son heterogéneos, con problemas de falta y baja confiabilidad de datos para algunas regiones de la cuenca del río La Plata y Mozambique. En base a los objetivos de estos levantamientos, la base de información es el área de investigación, las escalas de trabajo son bien pequeñas, 1:7.603.200 (GSC, 1967) y 1:3.000.000 (Ferro y Bouman, 1992 y OEA, 1971).

Los levantamientos ejecutados en Canadá (GSC, 1967) y la cuenca del Río de La Plata (OEA, 1971) representan las primeras etapas del proceso histórico de los estudios hidrogeológicos, donde la representación hidroquímica se restringía a las formaciones geológicas y, efectivamente, sin una especialización de los parámetros hidrogeológicos evaluados; sin embargo, con el análisis de las condiciones de alimentación (pluviometría e hidrología) se tiene una idea acerca de la dinámica del medio estudiado. Ya los estudios de Mozambique (Ferro y Bouman, 1992), a pesar de ser recientes, presentan las mismas características de estos dos estudios más antiguos, donde se han visto las limitaciones de nivel de información con respecto al agua subterránea en la región.

Un segundo momento, con la evolución del propio conocimiento hidrogeológico, las evaluaciones y la cartografía, propone transmitir una visión más dinámica de la circulación de las aguas subterráneas y de sus condiciones de ocurrencia, sin restringirse apenas a las condiciones estáticas (por ej: litología), y sí intentando profundizar en la comprensión de otras áreas como climatología e hidrología (condiciones de recarga de acuíferos), histórico de la exploración y modelaje matemático, que influyen temporalmente en el comportamiento de las aguas subterráneas.

Margat (1981) propone para la Carta Hidrogeológica de Francia (escala 1: 500 000) una evolución del modo de representación, por medio de modelización de cierto número de sistemas acuíferos regionales, clasificados por el modo de alimentación, régimen de escorrentía de acuíferos libres o confinados y conexión con los cursos de agua. Esto se sobrepone a la naturaleza litológica de sus embalses, así como también a las condiciones límites combinadas con los factores estructurales e hidrodinámicos. Para la confección de la cartografía, el autor elaboró una síntesis de los conocimientos hidrogeológicos actualizados.

Tabla 10. Representación gráfica en hidrogeología con relación al nivel de información y uso posible (Struckmeier y Krampe, 1992).

	<i><u>bajo</u></i>	<i><u>avanzado</u></i>	<i><u>alto</u></i>
<i><b>nivel de información</b></i>	<i><b>(datos escasos y heterogéneos de varias fuentes)</b></i>	<i><b>(más programas de investigación sistemática, datos más confiables)</b></i>	<i><b>(más análisis hidrológicos de sistemas y modelos de agua subterránea)</b></i>
<i><b>uso posible reconocimiento y explotación</b></i>	MAPA HIDROGEOLÓGICO GENERAL (mapa del acuífero)	MAPAS DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS (serie de mapas, atlas)	MAPAS REGIONALES DE SISTEMAS DE AGUA SUBTERRÁNEA (modelos conceptuales de representación)
<i><b>planificación y desarrollo</b></i>	MAPA POTENCIAL DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS	MAPAS HIDROGEOLÓGICOS ESPECÍFICOS (mapas de planificación)	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DERIVADA DE SISTEMAS DE INFORMACIONES GEOGRÁFICAS
<i><b>gestión y protección</b></i>	MAPA DE VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA		(mapas, secciones, bloques-diagramas y escenarios)
<i><b>uso posible</b></i>	estático	dependencia del tiempo	dinámico
<i><b>parámetros de representación</b></i>	bajo	confiabilidad	alto
	bajo	costo por unidad de área	alto
	extensa	área representada	pequeña
	pequeña	escala	grande

Otro ejemplo de evaluación hidrogeológica regional está representado en el trabajo de la United States Geological Survey (U.S.G.S., 1992), cuya área evaluada fue el Sistema Acuífero Cambro-Ordovícico situado en la región oeste de los Estados Unidos. Se trata de un estudio completo, con caracterización hidrodinámica y condiciones de ocurrencia, hidroquímica e isótopos, caracterización de la geometría de los embalses de agua subterránea, la exploración y sus efectos. La dinámica se representa por medio de modelos matemáticos.

Algunos trabajos inician una cartografía de representación de clases por aptitudes, como el trabajo de Meister y Becher (1971) donde se destaca la evaluación del potencial y la adecuación a los diversos tipos de uso del agua subterránea. En lo que se refiere a las aptitudes, esas formaciones se clasificaron en función de la potencialidad al uso (abastecimiento público e industrial), en excelente, muy bueno, bueno, regular y pobre.

Los levantamientos hidrogeológicos sistemáticos son, en muchos países, atribuciones de responsabilidad de órganos gubernamentales, y tienen por objeto aportar informaciones básicas acerca del conocimiento de las aguas subterráneas en los estados o países, por medio de trabajos sistemáticos en escalas que varían de regionales (generalmente 1:100.000 o 1:50.000) a locales (de 1:25.000 a 1:10.000), dependiendo del país, de su historia de desarrollo cultural y económico.

En escalas mayores, los estudios sistemáticos elaborados poseen un abordaje más específico, cuyos temas desarrollados fueron determinados en función de características particulares de los acuíferos y/o de las actividades socio-económicas locales. Los trabajos de la U.S.G.S., en los Condados de Pike y Fayette (respectivamente Davis (1989) y McElroy (1988), Pennsylvania (Estados Unidos de América), consisten en levantamientos de los recursos hídricos subterráneos a escala 1:50.000, sin embargo, destacando los estudios relativos a la precipitación, factor de gran influencia en la recarga de agua subterránea de la región, en el Condado Pike, y los estudios sobre la cantidad y calidad del agua subterránea y los impactos causados en la minería de carbón, en el Condado de Fayette.

El tercer momento del proceso histórico de los estudios hidrogeológicos, destaca la utilización de cartas temáticas (escala 1:100.000), que

presentan la susceptibilidad del agua subterránea para uso doméstico en las principales unidades hidrogeológicas (unidades litológicas), siendo clasificadas en: de uso generalmente no restringido, usualmente restringido y restringido, así como la susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea proveniente de desechos domésticos, industriales y de la agricultura, donde están representadas las unidades hidrogeológicas y la susceptibilidad a la irrigación. Existen cuatro grupos de esta susceptibilidad: generalmente no restringidos, restringidos para ciertos usos por el alto contenido de sulfato de calcio o al riesgo de salinización del suelo, y restringido. Las extensiones y la productividad de los principales acuíferos están descritas conjuntamente con las clasificaciones de las susceptibilidades.

Actualmente, el conocimiento hidrogeológico no se restringe apenas a los profesionales del área, sino también pretende atender la demanda de personas legales. Esta necesidad, que ya existía hace algún tiempo, creció sustancialmente en consecuencia del aumento de trabajos integrados de planificación y análisis ambiental, donde los hidrogeólogos trabajan con profesionales de otras áreas y deben dar respuestas simples y directas a un público más exigente. Por otro lado, el agua subterránea en muchos países es el recurso hídrico más importante para el abastecimiento público, y los casos de contaminación en acuíferos ocasionados por las actividades industriales, urbanas y agropecuarias, impulsaron el desarrollo de investigaciones sobre contaminación, así como también concientizaron a las poblaciones y a las personas tomadoras de decisiones de la importancia del agua subterránea.

La cartografía es el recurso más utilizado para esa transmisión de conocimientos, pues "traduce" y sintetiza el conocimiento hidrogeológico, así como también especializa los resultados, facilitando la comprensión del usuario.

Esta preocupación con el público lego es presentada por Struckmeier y Margat (1989), donde discuten los temas presentados en el Coloquio Internacional sobre "Cartografías Hidrogeológicas al Servicio del Desarrollo Económico y Social", donde, dos temas desarrollados estaban relacionados con los usuarios ("Demanda de los usuarios de cartas hidrogeológicas: críticas a las cartas existentes y demandas futuras", y "Significado de las cartas hidrogeológicas para la planificación, desarrollo y gestión de los recursos en aguas subterráneas: estudios de caso donde las car-

tas hidrogeológicas o la ausencia de éstas puede influir en los proyectos, en la planificación, o en el desarrollo y gestión del agua subterránea y la utilización de los suelos”).

Entre los varios resultados de este coloquio, se destaca el diálogo entre los productores y usuarios de la cartografía hidrogeológica, donde ideas y sugerencias fueron hechas a los hidrogeólogos por parte de planificadores, ingenieros, ecologistas y el público. También fue mostrada a usuarios inexperientes la necesidad de instrucción para hacer mejor uso de una carta.

La existencia de cartas hidrogeológicas para la planificación, desarrollo, gestión y protección del medio ambiente son presentados, así como también las pérdidas económicas causadas por la ausencia de documentos de planificación y de gestión adecuados. Estos ejemplos deben ser llevados por los hidrogeólogos a los tomadores de decisiones (políticos, economistas y ejecutivos).

En mesa redonda también fue evidenciada la importancia de las cartas hidrogeológicas en la planificación y explotación de los recursos hídricos y en la gestión y protección del medio ambiente en países en desarrollo. Los fundamentos, sin embargo, deben ser adaptados a las condiciones de estos países.

La técnica más avanzadas de cartografía hidrogeológica y estudios hidrogeológicos es el uso cada vez más constante del Sistema de Información Geográfica (GIS o SIG), facilitando principalmente el desarrollo de cartas temáticas.

El SIG tiene la función de ser un sistema central de gestión de bancos de datos geográficos y alfanuméricos que están en interfase con programas aplicados. En los estudios hidrogeológicos puede ser utilizado el modelo matemático de los acuíferos, modelos de simulación hidrogeológica, modelos digitales, representación gráfica de los resultados, gestión de bases de datos y gestión del agua subterránea en modos vectoriales y *raster*. El banco de datos puede contener aun informaciones pluviométricas y climatológicas, recursos hídricos y demanda, datos de censo poblacional, etc.

En cartografía en SIG, los mapas para la gestión de recursos hídricos pueden ser editados como cartas temáticas de potencialidad de recursos hídricos subterráneos, vulnerabilidad de

acuíferos, obtenidos por superposición numérica y superposición visual de diversas cartas temáticas.

En Brasil, los estudios de evaluación hidrogeológica sistemática se restringen a algunas regiones del país y no poseen carácter continuo. Infelizmente se trata de “momentos políticos” de períodos favorables al desarrollo de este trabajo básico y de iniciativas de algunos profesionales.

La inexistencia de relevamientos hidrogeológicos sistemáticos interfiere en el desarrollo y ejecución de la cartografía hidrogeológica nacional. Algunos trabajos cartográficos son expuestos, sin embargo, se trata de resultados de estudios de iniciativa de algunos órganos de investigación o de proyectos académicos, que abarcan regiones o áreas y/o temas específicos.

Como ejemplos de estudios hidrogeológicos y cartográficos en Brasil pueden citarse:

En São Paulo, entre 1970 y 1981, se elaboró una estrategia de gestión de los recursos hídricos subterráneos en São Paulo, iniciado con estudios de relevamiento hidrogeológico que abarcó todo el estado (DAEE 1974, 1975, 1976, 1977, 1979a, 1979b, 1981a y 1981b). Estos trabajos consistieron, por Región Administrativa, en la evaluación hidrogeológica, el balance hídrico y la caracterización de los recursos hídricos subterráneos por Sistemas Acuíferos, con el análisis de la hidrodinámica, la hidrogeoquímica y la calidad de las aguas, aspectos constructivos de los pozos tabulares profundos, perfil del usuario y del consumidor de las aguas subterráneas. Estos productos resultantes estaban basados en las informaciones de un amplio registro de pozos tabulares profundos realizado en el período. Como consecuencia de este trabajo de evaluación sistemática, Campos (1993) presenta una caracterización hidrogeoquímica de las provincias hidrogeológicas, con la propuesta de una cartografía a nivel de Estado de São Paulo, en escala 1:1.000.000, y la elaboración de la carta hidrogeológica del estado en fase final de ejecución, de escala 1:500.000 (DAEE, en prensa). La falta de recursos humanos, estructurales y financieros, y de apoyo político, atrasaron algunos proyectos que serían resultantes de estos levantamientos, como esa carta hidrogeológica.

La Ley Estadual nº. 6.134 (02/06/88) y su reglamentación, el Decreto-Ley nº. 32.955 (07/02/91), constituyen los aspectos legales y la continuidad del proceso desencadenado por el relevamiento sistemático. Sin embargo, la falta de una estructura de los órganos responsables por la gestión, fiscalización y control de las aguas subterráneas trajo como resultado la quiebra de estas acciones programadas y la consecuente desactualización de los registros y el no cumplimiento de la ley.

La Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) y el Servicio Geológico Nacional desarrollan en Piauí el Programa de Apoyo a la Gestión de Aguas Subterráneas (PA-GAS), donde ya inventariaron cerca de cuarenta municipios de ese Estado. El trabajo de Branco, Vinha y Soares Filho (1995) muestra resultados de estudios utilizando este inventario en los municipios Oeiras y Picos (sur de Teresina) y el Sistema de Informaciones Geográficas (SIG). Los mapas producidos fueron tratados geoestadísticamente y son los siguientes: mapas de isocaudales de prueba y de isocaudales específicos (productividad), superficie de tendencia de la salinidad, superficie de tendencia de la cota del nivel estático, para todos los acuíferos existentes en Oeiras y Picos y específicamente para los acuíferos Cabeças y Serra Grande. Los mapas de zonas favorables de exploración de aguas subterráneas son resultados y síntesis de las áreas de mayor potencial de disponibilidad y productividad.

En Rio Grande do Sul, la CPRM desarrolló en el Programa Relevamientos Geológicos Básicos, el proyecto Mapas de Previsión de Recursos Hídricos Subterráneos. El mapa hidrogeológico de Santa María, escala 1:100.000 es un resultado de este proyecto y contiene informaciones hidrogeológicas de la región, donde están dispuestos estratigráficamente los acuíferos locales y descritas sus importancias hidrogeológicas relativas, así como también la zonificación hidroquímica y el balance hídrico, como informaciones auxiliares, y las condiciones probables de aprovechamiento de las aguas subterráneas (CPRM, 1994).

El mapeo de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en el Estado de São Paulo (IG/CETESB/DAEE, 1993), es uno de los primeros estudios que elaboraron cartas temáticas, que son: Carga Contaminante Potencial – fuentes puntuales, Carga Contaminante Potencial – fuente saneamiento *in situ*

y cantidad de residuos sólidos generados, y el Mapa de Vulnerabilidad de la Contaminación de Acuíferos).

La caracterización de la vulnerabilidad natural de un acuífero se determina a través de combinaciones de factores o parámetros disponibles como: tipo de ocurrencia del agua subterránea (o condición del acuífero), las características de los estratos que están encima de la zona no saturada, de acuerdo con el método propuesto por Foster y Hirata (1991). La caracterización de la carga contaminante en el subsuelo fue dividida en contaminación por fuentes difusas y puntuales. Las cargas contaminantes potenciales de fuentes puntuales fueron separadas en actividad industrial, disposición de residuos sólidos, laguna de efluentes y actividad minera. Las fuentes dispersas evaluadas fueron las áreas urbanas sin red de alcantarillado.

El cruzamiento de la vulnerabilidad natural y la carga potencial de contaminantes genera los grados de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BRANCO, P. C.; VINHA, C. A. G.; SOARES FILHO, A. R. 1995. Sistema de informações geográficas para avaliação e gestão de informações hidrogeológicas. *A Água em Revista*. CPRM. Ano III, 1995. nº 4, pp.: 48-55.
- CAMPOS, H. C. N. 1993. *Caracterização e cartografia das Províncias Hidrogeológicas do Estado de São Paulo*. São Paulo, SP. (Tese de Doutorado - IGc/USP, inédita). 177p.
- COLLIN, J. J. 1991. Renouveau de la cartographie hydrogéologique. La rencontre des concepts et des outils. *Hydrogeologie*. nº 1. 1991. pp. 3-6.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). 1994. *Mapa hidrogeológico de Santa Maria - 1:100.000*, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto Mapas de Previsão de Recursos Hídricos Subterráneos. 1 mapa.
- DAVIS, D. K. 1989. Groundwater resources of Pike County, Pennsylvania. *Water Resources Report* 65. 1989. Pennsylvania Geological Survey, Fourth Series. Harrisburg. 1989. 63p.

- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1974. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 6, Ribeirão Preto, SP*. São Paulo, SP. Geopesquisadora/ Tahal, 2v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1975. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 1, São Paulo, SP*. São Paulo, SP. ENCIBRA/ Tahal, 3v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1976. *Estudo de águas subterrâneas, Regiões Administrativas 7, 8 e 9 (Bauru, São José do Rio Preto, Araçatuba), SP*. São Paulo, SP. ENCO, 4v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1977. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 3 (São José dos Campos e Faixa Litorânea), SP*. São Paulo, SP. ENCO, 5v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1979a. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 2 (Santos), SP*. São Paulo, SP. ENCO, 3v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1979b. *Estudo de águas subterrâneas, Regiões Administrativas 10 e 11 (Presidente Prudente e Marília), SP*. São Paulo, SP. DAEE, 3v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1981a. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 5 (Campinas), SP*. São Paulo, SP. DAEE, 2v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1981b. *Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 4 (Sorocaba), SP*. São Paulo, SP. DAEE, 2v.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). no prelo. *Carta hidrogeológica do Estado de São Paulo (1:500.000)*. São Paulo.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2º Ed. John Wiley & Sons Inc. 506 p.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.). 1997. *Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações*. CPRM, LABHID-UFPE. 389 p.
- FERRO, B. P. A.; BOUMAN, D. 1992. The hydrogeological map of Mozambique (scale 1:1,000,000). *Hydrogeologie*. nº 1 - 2. 1992. pp.17 -27.
- FETTER, C. W. 1994. *Applied Hydrogeology*. Third ed. Prentice Hall. 691 p.
- FETTER, C. W. 1999. *Contaminant Hydrogeology*. 2º. Ed. Prentice-Hall Inc. 500pp.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. C. A. 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas – una metodología basada en datos existentes*. CEPIS, OPS, OMS. 81p.
- FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. 1987. *Contaminación de las aguas subterráneas. Un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el suministro de agua potable*. OMS/ OPS/CEPIS. 42pp.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. 1991. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*. CEPIS, OPS/OMS, 2ª edición. Lima, Perú.
- GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA. 1967. Groundwater in Canada. *Economic Geology Report* nº. 24. 228 p. Canada. 1967.
- GLEICK, P. H. (Ed.). 1993. *Water in Crisis – A guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford University Press. 473 pp.
- HEATHCOTE, I. W. 1998. *Integrated Watershed Management – principles and practice*. John Wiley & Sons Inc. 414pp.
- INSTITUTO GEOLÓGICO (IG-SMA) / COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB)/ DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1993. *Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterráneas no estado de São Paulo*. Relatório Técnico IG. 2v.
- MARGAT, J. 1981. La carte hydrogéologique de la France à 1:500.000. *Bull. BRGM*. (2), III, pp. 98-99.
- MCELROY, T. A. 1988. Groundwater resources of Fayette County, Pennsylvania. *Water Resources Report* 60. Pennsylvania Geological Survey, Fourth Series. Harrisburg. 1988. 57p.

- MEISTER, H.; BECHER, A. 1971. Hydrogeology of the carbonate rocks of the Lancaster 15-minute quadrangle, Southeastern Pennsylvania. *Groundwater Report*. Harrisburg. W26. 149 p.
- ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS (OEA). 1971. *Bacia do Rio do Prata: Estudo para sua Planificação e Desenvolvimento*. Secr. Geral Org. Est. Amer. Washington. 1971. 4v.
- RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P.C.; CLEARY, R.W. 1989. *Engenharia hidrológica*. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. ABRH. 404 pp.
- REBOUÇAS, A.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. 1999. *Águas Doces no Brasil*. Escrituras. IEA/Acad. Bras. Letras. 717 pp.
- STONE, W. J. 1999. *Hydrogeology in Practice. A guide to characterizing ground water systems*. Prentice-Hall Inc. 248 pp.
- STRUCKMEIER, W. F.; KRAMPE, K. 1992. Developments in hydrogeological mapping. A state-of-the-art report in view of medium scale hydrogeological mapping in Africa. *Hydrogeologie*. no 1-2. pp. 105-111. 1992.
- STRUCKMEIER, W.F.; MARGAT, J. 1989. Les cartes hydrogéologiques au service du développement économique et social. *Hydrogeologie*, nº 4. 1989. pp. 293-296
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 1992. Simulation of regional groundwater flow in the Cambrian-Ordovician Aquifer System in the Northern Midwest, United States.