

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

UN ENFOQUE PRÁCTICO



colección GUÍAS Y MANUALES

MARÍA VICTORIA VÉLEZ OTÁLVARO

CAROLINA ORTIZ PIMIENTA

MARÍA CONSUELO VARGAS QUINTERO



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



Libertad y Orden

INGEOMINAS
INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

República de Colombia

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
UN ENFOQUE PRÁCTICO

colección GUÍAS Y MANUALES

MARÍA VICTORIA VÉLEZ OTÁLVARO

CAROLINA ORTIZ PIMIENTA

MARÍA CONSUELO VARGAS QUINTERO

INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
INGEOMINAS

Ministro de Minas y Energía
CARLOS RODADO NORIEGA

Director General
ANDRÉS RUIZ RODRÍGUEZ

Director Técnico Servicio Geológico
CÉSAR DAVID LÓPEZ ARENAS

Subdirector Recursos del Subsuelo
FRANCISCO ALBERTO VELANDIA PATIÑO

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: UN ENFOQUE PRÁCTICO
ISBN: 978-958-99528-1-8

© Instituto Colombiano de Geología y Minería
Ingeominas

© MARÍA VICTORIA VÉLEZ OTÁLVARO
CAROLINA ORTIZ PIMENTA
MARÍA CONSUELO VARGAS QUINTERO

Revisión técnica
JAIRO VELOZA FRANCO

Coordinación editorial
LUIS EDUARDO VÁSQUEZ SALAMANCA

Diagramación
ANDRÉS LEONARDO CUÉLLAR V.

Impresión
IMPRENTA NACIONAL DE COLOMBIA

CONTENIDO

PRÓLOGO 11

CAPÍTULO UNO
CONCEPTOS BÁSICOS 13

Ciclo hidrológico 13

Movimiento del agua subterránea 17

Ley de Darcy 19

Nivel piezométrico 23

Composición del agua subterránea 27

Propiedades físicas y químicas del agua 28

Calidad del agua para diferentes usos 30

CAPÍTULO DOS
EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 35

Ocurrencia del agua subterránea
en diferentes formaciones geológicas 35

Acuíferos en rocas ígneas y metamórficas
(rocas cristalinas) 36

Aguas subterráneas en rocas sedimentarias 38

El agua subterránea y las estructuras geológicas 46

Definición de acuíferos, acuicludos,
acuitardos y acuífugos 47

Acuíferos 48

Acuicludos 48

Acuitardos 49

Acuífugos 49

Tipos de acuíferos 49

Modelo hidrogeológico conceptual 51

Metodología general para la exploración
y evaluación de aguas subterráneas 53

Etapas 1. Estudios hidrogeológicos de reconocimiento a escalas
locales y regionales 53

Etapa 2. Estudios de exploración y evaluación hidrogeológica regional de escalas entre 1:250.000 y 1:50.000	53
Etapa 3. Estudios de exploración hidrogeológica de detalle a escala igual o mayor de 1:25.000	58
Mapas hidrogeológicos	58
CAPÍTULO TRES	
EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	63
Tipos de captaciones	63
Pozos	64
Aljibes	64
Manantiales	65
Diseño, construcción y mantenimiento de pozos	66
Localización de un pozo	66
Diseño del pozo	68
Desarrollo del pozo	71
Prueba de bombeo	72
Mantenimiento del pozo	73
Equipo de bombeo	75
CAPÍTULO CUATRO	
PROTECCIÓN Y GESTIÓN	
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	77
Agua subterránea recurso no renovable	78
Balances hídricos	79
Tipos de balance de aguas	80
Balance de humedad del suelo	80
Balances de río y canales de agua	80
Aumento del nivel freático	80
Protección de la calidad del agua subterránea	81
Fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea	81
Perímetros de protección de pozos públicos	87
Estrategia para la gestión de aguas subterráneas	88
Monitoreo de aguas subterráneas	88
Control de sobreexplotación	92

Descenso de los niveles piezométricos	93
Compactación inducida del terreno	93
Aumento de los costos de explotación	93
Deterioro de la calidad del agua	93
Abandono de pozos	93
Modificaciones inducidas en el régimen de los ríos	94
Problemas legales	94
Gestión de acuíferos costeros	94
Gestión integrada de recursos hídricos	96
Aplicación de instrumentos económicos a la gestión integral	99

CAPÍTULO CINCO	
LEGISLACIÓN COLOMBIANA	
SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS	101
Competencia de autoridades ambientales	101
Concesiones de agua subterránea	102
Permisos de exploración	104
Control de construcción de pozos	105
Protección de aguas subterráneas	106
Ordenamiento territorial para conservación y protección del agua subterránea	108
Sanciones	108
Tasas retributivas	109

CAPÍTULO SEIS	
BIBLIOGRAFÍA	111

Frente a realidades como el cambio climático y sus consecuencias, la mayoría de los servicios geológicos del mundo han identificado las aguas subterráneas como el principal recurso del subsuelo para brindar oportunidades de desarrollo a la sociedad, y en ese sentido han reorientado sus actividades para fortalecer este tema de investigación. El agua subterránea constituye una verdadera alternativa para consumo humano en las zonas con demanda de agua potable, además de que es una necesidad para llevar a cabo proyectos agroindustriales, mineros y de hidrocarburos, los cuales consumen grandes cantidades de agua.

Aunque la hidrogeología se ha considerado una ciencia con presente y futuro, no se ha podido aplicar en Colombia en la medida en que el país lo requiere, entre otras razones por la abundancia del recurso hídrico superficial. Se espera que ante el proyectado avance industrial y minero de Colombia, se incremente la demanda del recurso agua y la explotación de los acuíferos; más importante aún, el Estado deberá procurar soluciones a la escasez de agua que sufren muchas regiones del país en forma cada vez más grave, ante lo cual seguramente se seguirán los ejemplos de países desarrollados, donde el agua subterránea ha sido una solución, incluso para las grandes ciudades.

En Colombia, Ingeominas ha sido la entidad líder en la exploración hidrogeológica; desde la década de los cincuenta se han llevado a cabo estudios de aguas subterráneas en la costa caribe, valles del Magdalena y Cauca, así como en zonas de la cordillera Oriental, entre éstas la sabana de Bogotá. Los acuíferos identificados se localizan especialmente en rocas sedimentarias y depósitos recientes. A partir del 2005, la entidad planteó generar nuevo conocimiento en ambientes geológicos poco estudiados en el país, por lo que en su Programa de Exploración de Aguas Subterráneas (Pexas) se seleccionaron áreas con rocas ígneo-metamórficas, depósitos volcánicos y rocas calcáreas que coinciden con zonas con déficit de abastecimiento de agua potable.

Durante su historia en investigación hidrogeológica, el Instituto ha buscado el acompañamiento de las entidades regionales en la ejecución de los proyectos, con el fin de afianzar el papel que deben cumplir en sus respectivas áreas de influencia. La transferencia tecnológica ha

dado como resultado el fortalecimiento y autonomía de varias corporaciones regionales en el tema de agua subterránea. Con todo, la continua rotación de personal en algunas de ellas y la necesaria incursión de estas entidades en la gestión de los acuíferos del país hicieron que la entidad se planteara como objetivo la elaboración de un documento guía que facilitara la comprensión de los principales aspectos técnicos que se aplican en los estudios de aguas subterráneas.

Este libro, que responde a dicho objetivo, es el resultado del trabajo conjunto con la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Se tratan conceptos básicos del agua subterránea, su exploración, evaluación y explotación, así como su protección, gestión y aspectos legales. Esperamos que el documento se convierta en un soporte técnico de las autoridades ambientales y territoriales en sus planes de exploración detallada, gestión, manejo y uso de los acuíferos como opción de abastecimiento de agua a la comunidad, y de igual manera que sea utilizado por todos los interesados en este recurso estratégico del subsuelo.

Francisco Alberto Velandia Patiño
Subdirector Recursos del Subsuelo
Ingeominas

CONCEPTOS BÁSICOS

Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el conjunto de procesos físicos que regulan y determinan la distribución y circulación del agua en la Tierra. En la naturaleza, ésta pasa por tres estados: sólido, líquido y gaseoso, en un movimiento cíclico permanente, en tres subsistemas: la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo. El agua se encuentra en la atmósfera como vapor de agua; en estado sólido se observa en los glaciares y en los páramos; en estado líquido, en mares, lagos, ríos, así como en el suelo y subsuelo. La que se halla en el subsuelo es objeto de estudio de la hidrogeología. A continuación se muestra una representación del ciclo hidrológico (figura 1).

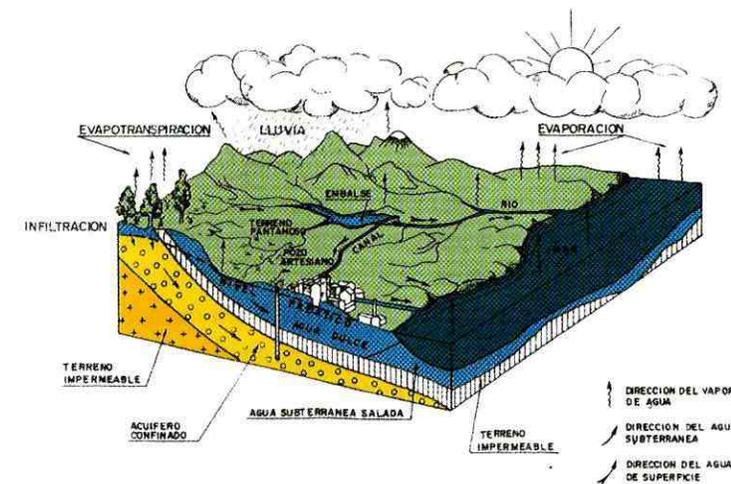


FIGURA 1. Ciclo hidrológico.

Fuente: Custodio & Llamas, 1996.

El agua llega a la superficie terrestre en forma de precipitación (lluvia, nieve o granizo, rocío o escarcha); una pequeña parte es retenida en las irregularidades del terreno, otra se infiltra y otra fluye hacia los

El volumen de agua que tenemos hoy en la Tierra se ha conservado casi sin cambio desde que ésta se formó. El agua se mantiene en tres estados: sólido, líquido y gaseoso, y ésta presente en la atmósfera, en la superficie terrestre y en el subsuelo. La interminable circulación del agua en la Tierra se llama el

La cantidad de agua que se infiltra en el suelo depende principalmente de su humedad y de factores tales como tipo de suelo, vegetación y relieve

ríos, y finalmente llega a los mares y lagos, para luego evaporarse. De la porción de lluvia que se infiltra en el terreno, un porcentaje se almacena en las rocas, aumentando así las reservas de aguas subterráneas. Éstas pueden brotar luego en manantiales y descargar directamente a los cauces, lagos o mares, o el hombre podrá extraerlas para su uso.

Por último, una parte del agua precipitada se retiene en el subsuelo para el uso de los seres vivos en actividades biológicas o se evapora, proceso que se conoce como evapotranspiración.

El movimiento permanente del agua se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol, que proporciona la energía necesaria para elevar el agua del suelo, al evaporarla; la segunda, la gravedad, que hace que el agua condensada precipite y que, una vez sobre la superficie, vaya hacia las zonas más bajas (Custodio & Llamas, 1976).

Las tasas de renovación del agua, o su tiempo medio de residencia, pueden ser muy lentas, como es el caso de los océanos, que se renuevan cada 3000 años, o muy rápidas, como el vapor atmosférico, que se renueva cada ocho o diez días.

Según datos que publicó Gleick (1996), el volumen total de agua que participa en el ciclo hidrológico es de aproximadamente 1338 millones de kilómetros cúbicos. Alrededor de un 97% es agua salada. Del agua dulce total, un 2,14% está confinada en los glaciares y la nieve, y un 0,61% se encuentra en el subsuelo. Las fuentes superficiales de agua dulce, como lagos y ríos, solamente corresponden a unos 93.100 kilómetros cúbicos. A pesar de esto, los ríos y lagos son la principal fuente de agua de la población (figura 2).

La cuenca es la unidad primaria de análisis para entender los procesos de circulación y almacenamiento de agua en la superficie terrestre. Para efectos de análisis, se puede dividir en cuenca superficial y cuenca subterránea; los principales flujos de agua que se producen en ésta son los siguientes:

- Precipitación, P: vapor de agua que se condensa y cae a la tierra en forma líquida o sólida.
- Escorrentía superficial, QS: parte del agua lluvia que circula por la superficie del terreno, y confluye a los ríos, lagos y otras masas de agua.

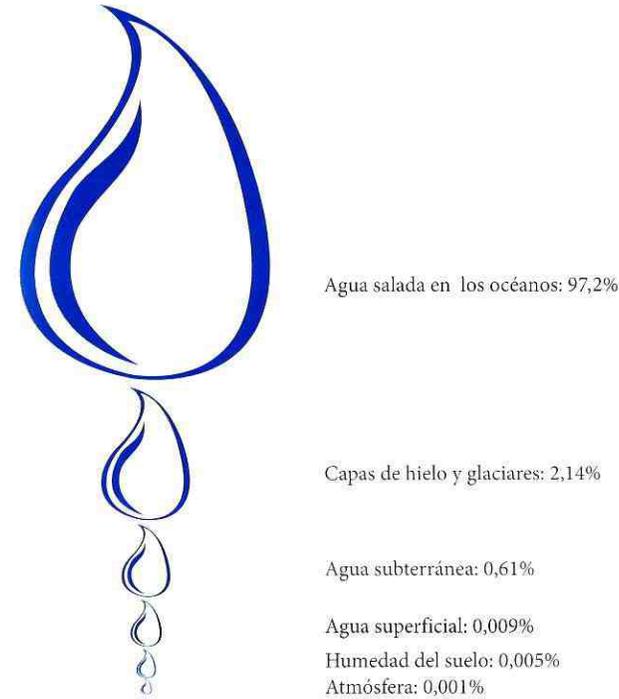


FIGURA 2. Distribución del agua en la Tierra.
Fuente: Fetter, 1988.

- Escorrentía subterránea, QW: agua que circula en el acuífero o embalse subterráneo, entendiéndose por acuífero una roca que tiene agua y la deja circular.
- Infiltración, I: cantidad de agua precipitada que atraviesa la superficie del terreno y pasa a ocupar, total o parcialmente, los poros y fisuras del subsuelo. No toda la infiltración alcanza la zona saturada, pues en mayor o menor medida se queda en la parte superficial y vuelve a la atmósfera por procesos de evapotranspiración.
- Evaporación, Ep: tasa neta de vapor de agua transferido desde los cuerpos de agua de la tierra hasta la atmósfera. La evaporación depende de factores como la radiación solar, temperatura del aire y del agua, presión, humedad relativa, viento, calidad de agua de la fuente de evaporación y geometría de la superficie del agua.

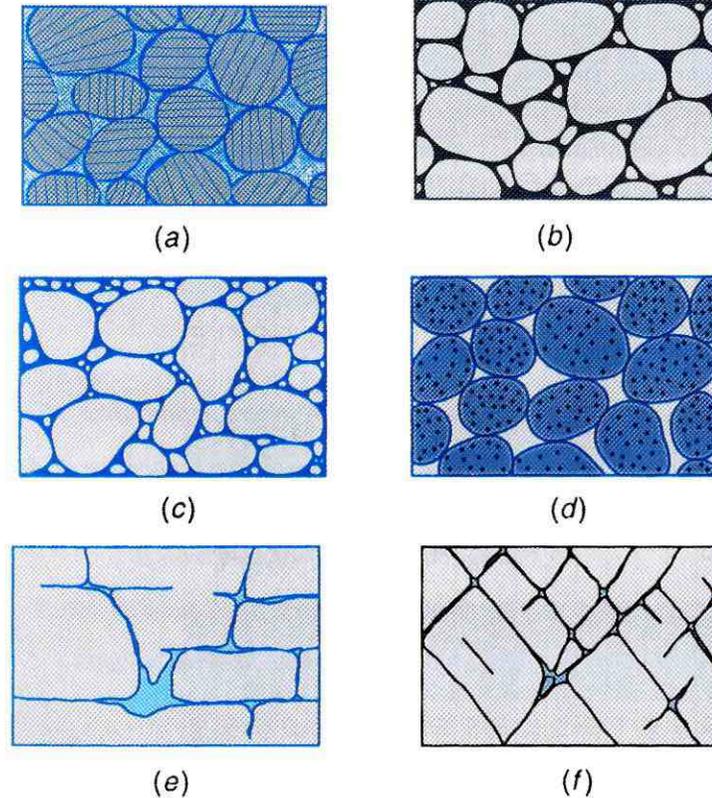
El agua que se precipita en una cuenca se convierte en escorrentía superficial, agua infiltrada, agua evaporada y agua subterránea.

- Evapotranspiración, Evtr: parte del agua que se evapora de cuerpos de agua y otra que es transpirada por animales y plantas. Los fenómenos de evaporación y transpiración son difíciles de separar, por lo que se utiliza el término “evapotranspiración” para englobarlos.

Movimiento del agua subterránea

El agua subterránea se almacena y mueve en las formaciones geológicas que tienen poros o vacíos. La relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de un material se define como porosidad total, y la porosidad eficaz no representa más que una porción a menudo pequeña de la porosidad total (m), además la porosidad eficaz (m_e) está muy afectada por la distribución del tamaño de los granos, y por la presencia de arcilla y su estado de hidratación (Custodio & Llamas, 1996). Dichos vacíos se pueden presentar por los espacios entre granos, en el caso de materiales no consolidados, porosidad que se conoce como primaria; por las fisuras, grietas y fracturas de las rocas consolidadas, o por fisuras o cavernas, o cuevas formadas por disolución de la roca, porosidad denominada secundaria (figura 3). La manera como estos vacíos están conectados determina la facilidad con que un fluido puede moverse entre ellos. Esta facilidad conocida con el nombre de permeabilidad, se denomina comúnmente conductividad hidráulica (K) en la literatura especializada.

Así mismo, se pueden observar las porosidades de algunos tipos de sedimentos y rocas en la naturaleza (tabla 1).



- Sedimento bien clasificado y con gran porosidad.
- Sedimento mal clasificado y con baja porosidad.
- Sedimentos sin matiz o cemento en sus intersticios con porosidad alta.
- Sedimentos con minerales en los intersticios, con disminución de la porosidad.
- Roca con porosidad por disolución.
- Roca con la porosidad por fracturación.

FIGURA 3. Representación esquemática de distintos tipos de rocas, indicando la relación entre su textura y porosidad.

Fuente: Custodio & Llamas, 1996.

Si la porosidad está asociada a los espacios entre granos, se dice que se tiene una porosidad primaria; si los vacíos son generados por disolución, fisuras y fracturas, se habla de porosidad secundaria.

TABLA 1. Valores de porosidades intergranulares para algunas rocas

Tipo	Material	Descripción	Porosidad total % m		Porosidad eficaz m _e		observaciones		
			Media	Normal Máx. Min.	Extraordinaria Máx. Min.	Media		Máx. Min.	
Rocas masivas		Granito	0,3	4 0,2	9	0,05	<0,2	0,5 0,0	A
		Caliza masiva	8	15 0,5	20		<0,5	1 0,0	B
		Dolomía	5	10 2			<0,5	1 0,0	B
Rocas metamórficas		Piroclastos y tobas	0,5	5 0,2	60	5	<0,5	2 0,0	A
		Escorias	30	50 10			<5	20 0,0	C,E
		Pumitas	25	80 10			20	50 1	C, E
Rocas volcánicas		Basaltos densos, fonolitas	85	90 50			<5	20 0,0	D
		Basaltos vacuolares	2	5 0,1			<1	2 0,1	A
		Basaltos vacuolares	12	30 5			5	10 1	C
Rocas sedimentarias Consolidadas (ver rocas masivas)		Pizarras sedimentarias	5	15 2	30	0,5	<2	5 0,0	E
		Areniscas	15	25 3	30	0,5	10	20 0,0	F
		Creta blanda	20	50 10			1	5 0,2	B
Rocas sedimentarias sueltas		Caliza detrítica	10	30 1,5			3	20 0,5	
		Aluviones	25	40 20	45	15	15	35 5	E
		Dunas	35	40 30			20	30 10	
		Gravas	30	40 25	40	20	25	35 15	
		Loess	45	55 40			<5	10 0,1	E
		Arenas	35	45 20			25	35 10	
		Depósitos glaciares	25	35 15			15	30 5	
		Limos	40	50 35			10	20 2	E
		Arcillas sin compactar	45	60 40	85	30	2	10 0,0	E
		Suelos superiores	50	60 30			10	20 1	E

= aumenta m y m_e por meteorización.
 = Aumenta m y m_e por fenómenos de disolución.
 = disminuye m y m_e con la edad.
 = disminuye m y puede aumentar m_e con la edad.
 = m_e muy variable según circunstancias y tiempo.
 = variable según el grado de cementación y su solubilidad.

ente: Johnson (1967), Davis (1969), Schoeller (1962), Muskat (1937), Meinzer (1923 b), Ward (1967). Algunos datos, en especial los referentes a m_e, deben tomarse en precauciones y según las circunstancias locales.

Ley de Darcy

El francés Henry Darcy en el siglo XIX estudió en forma experimental el flujo del agua a través de un medio poroso y estableció la ley que se conoce con el nombre de Ley de Darcy, la cual cuantifica el movimiento del agua subterránea (figura 4). Darcy, experimentalmente, estableció que:

$$Q = KA h_1 (\Delta h_2 / l)$$

Donde

Q: caudal constante en m³/día.

K: coeficiente denominado de permeabilidad o conductividad hidráulica con unidades m/día.

h₁ y h₂: Δ/h: nivel piezométrico en m de agua.

A: área de la sección transversal al flujo en m².

L: l: longitud del lecho de arena en m.

Si en lugar de considerar el tubo vertical, se le da una cierta inclinación, la ecuación anterior puede reescribirse como:

$$V = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta h}{L} = ik$$

Donde

i: es el llamado gradiente hidráulico, $i = (h_1 - h_2) / L = \Delta h / L$ y

V: es la llamada velocidad aparente o de Darcy.

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K) describe la facilidad con que un fluido se mueve a través de un medio poroso; depende de factores propios del acuífero y del fluido como viscosidad y peso específico. La permeabilidad es uno de los parámetros importante para evaluar la producción de agua de un acuífero, generalmente a mayor permeabilidad, mayor rendimiento del acuífero. La tabla 2 muestra va-

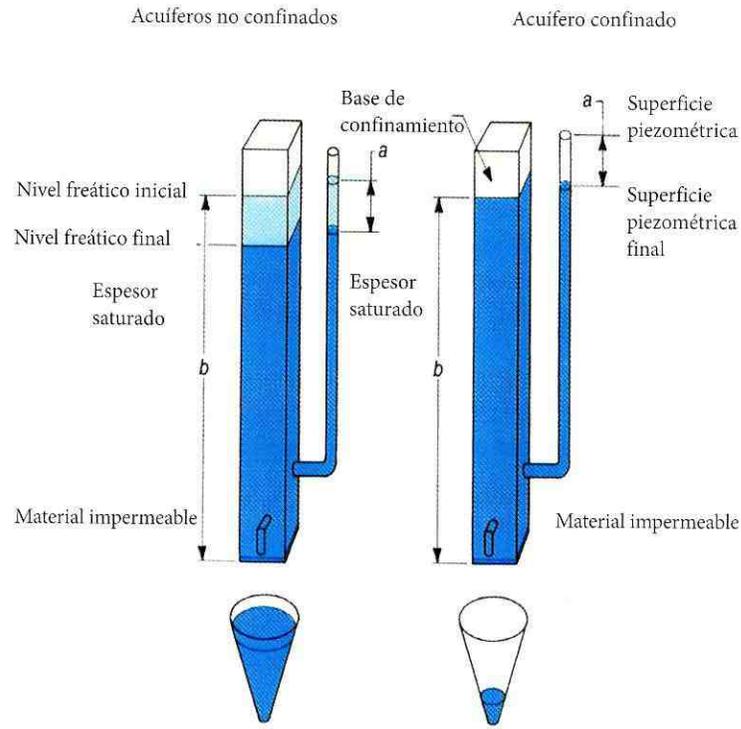


FIGURA 4. Esquema del experimento de Darcy.
Fuente: Tarbuck & Lutgens, 1999.

Gracias a trabajos posteriores se ha podido determinar que la ley de Darcy es válida para la mayoría de los tipos de flujo de fluidos en los suelos. Para velocidades de flujo muy elevadas o muy bajas, la ley de Darcy deja de ser válida.

Otros parámetros para caracterizar la producción de agua en los acuíferos son la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S). El concepto de transmisividad (T) lo introdujo Theis en 1935 y se define, para un acuífero de espesor b, como el volumen de agua por unidad de tiempo (o caudal) que pasa a través de una sección vertical de ancho unitario bajo el efecto de una unidad de gradiente hidráulico y a una temperatura de 20 °C. La transmisividad, se calcula como el producto de la permeabilidad (K) por el espesor del acuífero (b) y se expresa en m²/día. $T=Kb$ (tabla 3)

TABLA 2. Clasificación de terrenos por la permeabilidad

Permeabilidad (m/día)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴
Tipo de terreno	Grava limpia	Arena limpia; mezcla de grava y arena	Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas	Arcillas no meteorizadas							
Calificación	Buenos acuíferos	Acuíferos pobres	Impermeables								
Capacidad de drenaje	Drenan bien	Drenan mal	No drenan								

Fuente: Custodio & Llamas, 1996.

La permeabilidad (K) o conductividad hidráulica indica la facilidad con que un fluido se mueve a través de un medio poroso; depende de factores propios del acuífero tales como granulometría, compactación, tamaño de los poros, además del fluido y sus características físicas como viscosidad y peso específico.

TABLA 3. Calificación de la magnitud de la transmisividad

T (m ² /día)	Calificación estimada
T < 10	Muy baja
10 < T < 100	Baja
100 < T < 500	Media
500 < T < 1000	Alta
T > 1000	Muy alta

El coeficiente de almacenamiento (S) se define como el volumen de agua liberado por un prisma del acuífero de sección unitaria y de altura igual a la parte saturada de éste cuando se produce un cambio unitario del nivel piezométrico (figura 5). El coeficiente de almacenamiento es un número adimensional y es mucho mayor en los acuíferos libres que en los acuíferos confinados, ya que para los primeros está entre 0,05 y 0,3 y para los últimos entre 10⁻³ a 10⁻⁵.

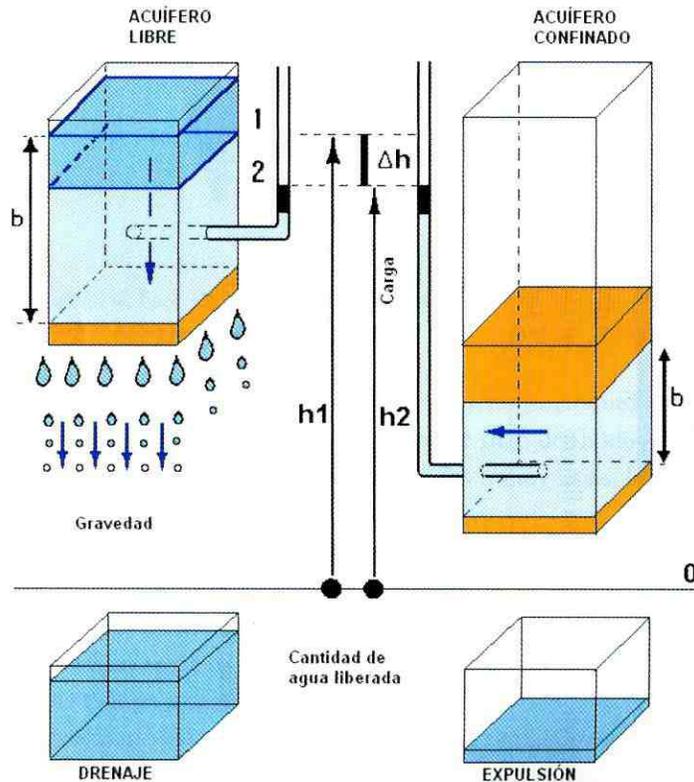


FIGURA 5. Explicación gráfica del coeficiente de almacenamiento.

Fuente: http://www.nicardio.fr/bencheam/cours_oge/du_7.htm

La conductividad hidráulica, K, la transmisividad, T y el coeficiente de almacenamiento, S son los parámetros que caracterizan un

Los valores de S y T se obtienen mediante la realización de pruebas de bombeo que se describen más adelante.

Nivel piezométrico

El nivel piezométrico, llamado también cabeza hidráulica, representa la energía mecánica del fluido por unidad de peso y es un parámetro medible en cualquier punto del sistema de flujo subterráneo. Controla el movimiento del agua subterránea, puesto que siempre la dirección de flujo será de zonas de mayores cabezas piezométricas (figura 6) a zonas con menores cabezas piezométricas. La cabeza hidráulica es la suma de la cabeza de presión y la cabeza de elevación, y siempre se expresa respecto a un datum o nivel de referencia como:

$$h = z + \frac{P}{\rho g}$$

Donde

h: nivel piezométrico o cabeza hidráulica.

z: cabeza de elevación.

P/ρg: cabeza de presión.

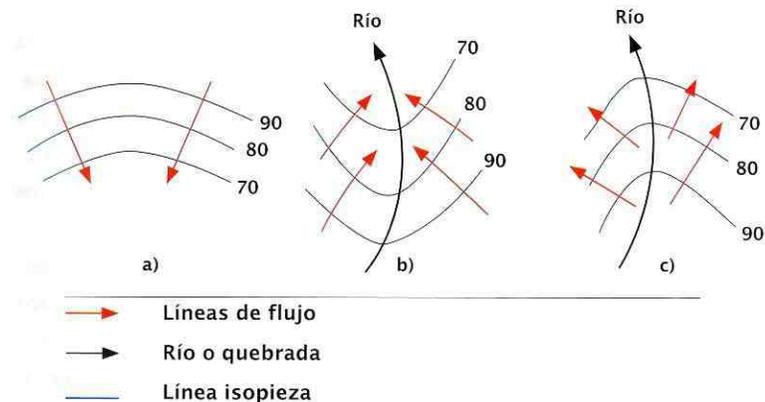


FIGURA 6. Esquema de superficie piezométrica-isopiezas. a. Líneas de flujo perpendiculares a las isopiezas de mayor a menor nivel de energía. b. Recarga del acuífero al río. c. Recarga del río al acuífero.

Es claro, entonces, que conociendo la cota del terreno y el nivel del agua, puede determinarse la altura piezométrica en el campo (figura 6). Las perforaciones para medir los niveles piezométricos son los pozos o captaciones de agua subterránea existentes en la zona y los construidos para tal fin. Debe conocerse bien el diseño de los piezómetros para garantizar que se está leyendo el nivel correspondiente a una capa acuífera específica. Cuando un piezómetro capta diferentes capas acuíferas, el nivel que se está tomando es un promedio de los niveles de los acuíferos, factor que debe tenerse en cuenta cuando se hagan los respectivos análisis, pues se pueden generar ideas erróneas de la dinámica de un acuífero.

Para definir la piezometría de una zona ha que tener un nivel de referencia o un datum cero; en general se usa el nivel medio del mar.

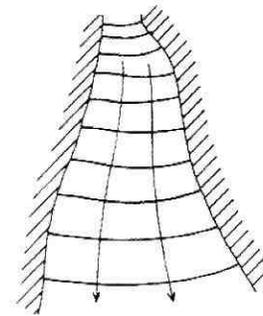
Los niveles piezométricos se miden con *sondas de nivel*, cintas métricas provistas de un electrodo que permite establecer un circuito eléctrico cuando la sonda toca el agua, mediante el encendido de un bombillo, respuesta eléctrica de una aguja (análogo), o el sonido de un timbre.

La medida de los niveles piezométricos de un acuífero debe efectuarse en un período de tiempo corto evitando las variaciones debidas a recargas o fuertes bombeos. En Colombia se hacen, generalmente, mediciones piezométricas dos veces al año: en la época de lluvias y en la época de sequía. A partir de mediciones específicas de niveles piezométricos se construyen los mapas de isopiezas o líneas con igual altura piezométrica, que son la representación bidimensional de una situación tridimensional. Para obtener las isopiezas se hace interpolación espacial de los niveles piezométricos registrados en un área, considerando las estructuras geológicas o barreras existentes en la zona, los cuerpos de agua y la topografía.

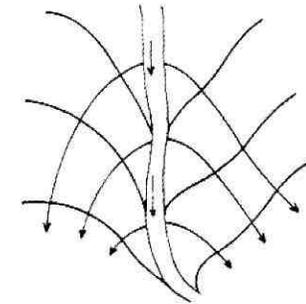
Una gran cantidad de información útil para estudios hidrogeológicos se puede extraer de los mapas de isopiezas. Por lo regular, estos mapas se referencian a planos topográficos, lo que permite determinar profundidad del agua subterránea, dirección del flujo, hacer inferencias sobre la conductividad hidráulica de las formaciones acuíferas, establecer zonas de recarga o descarga, etcétera.

El agua subterránea siempre se mueve de sitios con mayores alturas piezométricas a lugares con menores alturas piezométricas.

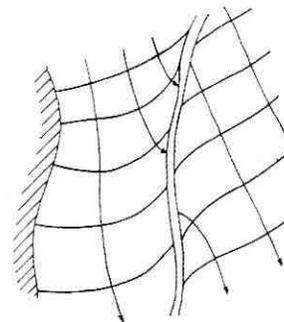
El sentido del flujo del agua es desde líneas de mayor altura piezométrica hacia líneas de menor altura piezométrica, perpendicularmente a éstas. Así, es posible dibujar flechas que indican la dirección del flujo subterráneo.



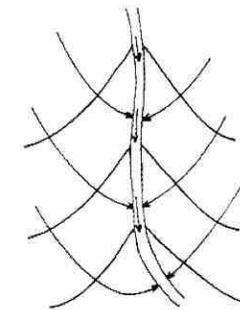
Flujo en un valle sin río



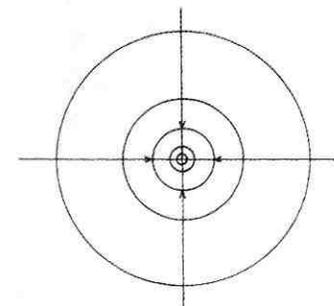
Río que recarga



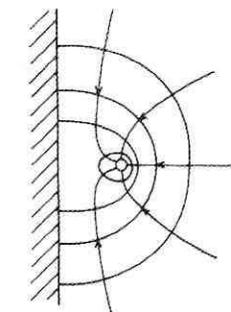
Límite impermeable y río que drena un lado y recarga el otro



Río que drena



Pozo en un acuífero extenso



Pozo próximo a un borde impermeable

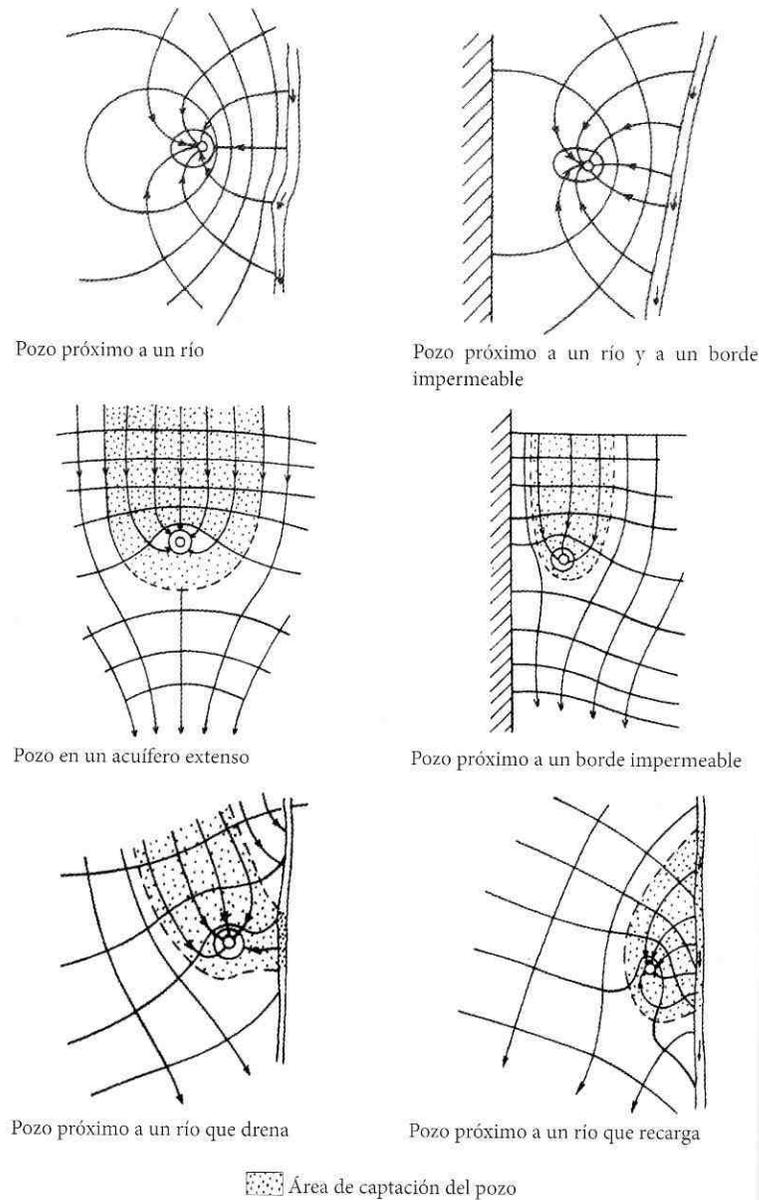


FIGURA 7. Tipos de superficies piezométricas.
Fuente: Custodio & Llamas, 1996.

Composición del agua subterránea

La composición química del agua subterránea depende del tipo y características de la roca, de la composición del agua infiltrada y de procesos microbiológicos del suelo. En el momento en que el agua precipitada se infiltra y pasa a través del suelo y la roca, hay disolución de los materiales con el agua subterránea, cambiando su composición. Los elementos químicos se presentan en todas las etapas del ciclo hidrológico, como gases atmosféricos, partículas de polvo o aerosoles alrededor de los cuales se condensan las gotas de lluvia, como elementos en suspensión o disueltos en el agua. La composición natural del agua lluvia dependerá de la localización geográfica del sitio que se esté analizando y de los factores climáticos que influyen en la precipitación local. Esta composición, así como la interrelación con el suelo y las rocas definirán entonces la composición del agua subterránea.

La composición media de las aguas naturales se presenta en la tabla 5.

TABLA 5. Composición de las aguas naturales (mg/l)

Parámetro	Agua del mar	Agua superficial (ríos)	Agua subterránea
pH	8,2	---	6,75
HCO ₃ ⁻	488	58,4	146
SO ₄ ²⁻	2712	11,2	12,4
Cl ⁻	19400	7,8	10,1
NO ₃ ⁻	--	1	1,56
F ⁻	1,3	0,1	0,23
NO ₂ ⁻	--	--	0,1
Na ⁺	10800	6,3	13,8
Ca ²⁺	411	15	27,4
Mg ²⁺	1290	4,1	11,2
K ⁺	392	2,3	1,84
NH ₄ ⁺	--	--	0,52
SiO ₂	6,2	13,1	14,5
Fe	0,0034	0,67	0,424
Al	0,001	0,4	0,19
Sr	8,1	0,05	0,0887
Br	67,3	0,02	0,0408

La composición del agua subterránea dependerá de la composición del agua lluvia, de los tipos de suelo y rocas que tenga que atravesar de su tiempo de contacto, y de procesos químicos y microbiológicos en la zona saturada y no saturada.

...continuación

B	4,45	0,01	0,0354
P	0,088	0,02	0,0569
Mn	0,0004	0,007	0,0343
Zn	0,005	0,02	0,0303
Ba	0,021	0,01	0,0144
Li	0,17	0,003	0,0062
Cu	0,0009	0,007	0,004
Ni	0,0066	0,0003	0,00311
Cr	0,0002	0,001	0,00278
Pb	0,00003	0,003	0,00218
Cs	0,0003	0,00002	0,00018
Ag	0,00028	0,0003	0,00022
Cd	0,00011	---	0,0002

Fuente: Shvartsev, 1998.

Propiedades físicas y químicas del agua

Entre las características físicas del agua subterránea se encuentran la temperatura, la conductividad eléctrica, el pH, color, turbiedad y sólidos disueltos totales, principalmente.

Temperatura

La temperatura (°C) del agua subterránea es muy poco variable, afecta de manera importante la solubilidad de diferentes sales en el agua, por lo que cumple un papel esencial en la composición del agua y en el cambio en la concentración de las sustancias. En los acuíferos hay una zona de temperatura constante, por encima de la cual la influencia térmica más significativa es la de las variaciones diarias o estacionales de la temperatura ambiente. Por debajo de esa zona, el factor preponderante es el gradiente geotérmico o variación de la temperatura con la profundidad que, en áreas continentales, suele ser de orden 3 °C/100 m.

La conductividad eléctrica

Es la habilidad de una solución para dejar pasar corriente eléctrica, se incrementa con la temperatura y con el contenido de iones disueltos. La unidad de medida es el mS/cm o μ S/cm. La tabla siguiente se muestra la conductividad de varios tipos de aguas (tabla 6).

TABLA 6. Valores de conductividad para diferentes tipos de agua

Muestra	(μ mho/cm)
Agua pura	0,055
Agua destilada	0,5-5
Agua lluvia	5-30
Agua subterránea potable	30-2000
Salmuera	>100.000

pH

Representa una medida de la concentración de iones de hidrógeno, la cual está directamente relacionada con el carácter del agua: ácido, pH<7; neutro, pH=7 o básico, pH>7.

Color

Se define como la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible.

Turbiedad

Define cuán clara o cuán oscura o saturada de sedimentos está el agua. Es la que causa que los rayos de luz se dispersen y absorban en lugar de transmitirlos en línea recta a través de la muestra.

Sólidos disueltos totales

TDS, por siglas en inglés, son una medida de la concentración total de iones disueltos totales.

La composición química del agua subterránea es el conjunto de sustancias incorporadas al agua por procesos naturales, los cuales se mencionaron anteriormente. Según Todd (1980), estas sustancias se clasifican, según su concentración, en constituyentes mayoritarios, constituyentes secundarios y constituyentes traza. Se llaman constituyentes mayoritarios los que tienen concentraciones de 1-1000 mg/l, constituyentes secundarios los que tienen concentraciones entre 0,01-10 mg/l y constituyentes traza los que tienen concentraciones entre 0,001-0,1 mg/l. Según Foster et ál. (2002), nueve iones importantes (Na, Ca, Mg, K, HCO₃, Cl, SO₄, NO₃ y Si) conforman el 99% del contenido soluto en las aguas subterráneas naturales (tabla 7). La proporción de cada uno de estos constituyentes, así como de los elementos traza asociados, refleja la trayectoria del flujo del agua subterránea en la roca

TABLA 7. Iones disueltos en el agua subterránea

Elementos traza (ug/l)				Elementos principales (mg/l)		
V*	Li*	P*	Sr*	Mg*	Na*	HCO ₃ *
Se*	Ba*	B	F*	K*	Ca*	
As	Cu*	Br		Si*	SO ₄ *	
Cd	Mn*	Fe*			Cl*	
Co*	U	Zn*			NO ₃ *	
Ni*	I*					
Cr*						
Pb						
Al						

* Probablemente esencial para la salud humana y animal.
Fuente: Foster, 2002.

Calidad del agua para diferentes usos

El agua subterránea se utiliza principalmente para abastecimiento doméstico, uso industrial y riego. En el mundo, el uso del agua subterránea en las actividades mencionadas es intensivo: el 50% para consumo humano, el 20% para riego y el 40% para la industria (Unesco, 2004). A partir del conocimiento de la composición del agua, es decir, de la identificación de las sustancias presentes en ella, se define la posibilidad de utilizar el agua en casos concretos.

Agua para riego

El agua que se usa para riego tiene restricciones en cuanto a la cantidad de sólidos disueltos totales, la conductividad eléctrica, el contenido de sodio y su relación con las cantidades de calcio y magnesio. Cuando un agua de alto contenido de sodio se aplica al suelo, parte se retiene por la arcilla del suelo. La arcilla cede calcio y magnesio en intercambio con el sodio, actividad que se denomina intercambio básico. El intercambio de iones altera las características físicas del suelo. Las altas concentraciones de sales de sodio desarrollan suelos alcalinos, en los cuales crece poca o ninguna vegetación. Entre los sistemas desarrollados para alertar del peligro de salinización o sodificación del suelo a partir de algunos parámetros medidos en el agua de riego, uno de los más utilizados es el propuesto por Richards (1954) para el Laboratorio de Salinidad de Estados Unidos (Riverside, California). Este sistema se basa en la medición de la conductividad eléctrica del agua de riego y la relación de adsorción de sodio (RAS o en inglés, SAR) para determinar el riesgo de sodificación o alcalinización.

El agua usada para riego tiene restricciones en conductividad eléctrica, contenido de sodio,

de salinización del suelo y en el cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS o en inglés, SAR) para determinar el riesgo de sodificación o alcalinización.

Las concentraciones de sodio están en meq/l. A partir de los resultados del RAS y la conductividad eléctrica, se clasifica el agua en tipos que presentan un alto o bajo riesgo para la salinización o alcalinización del suelo (figura 8).

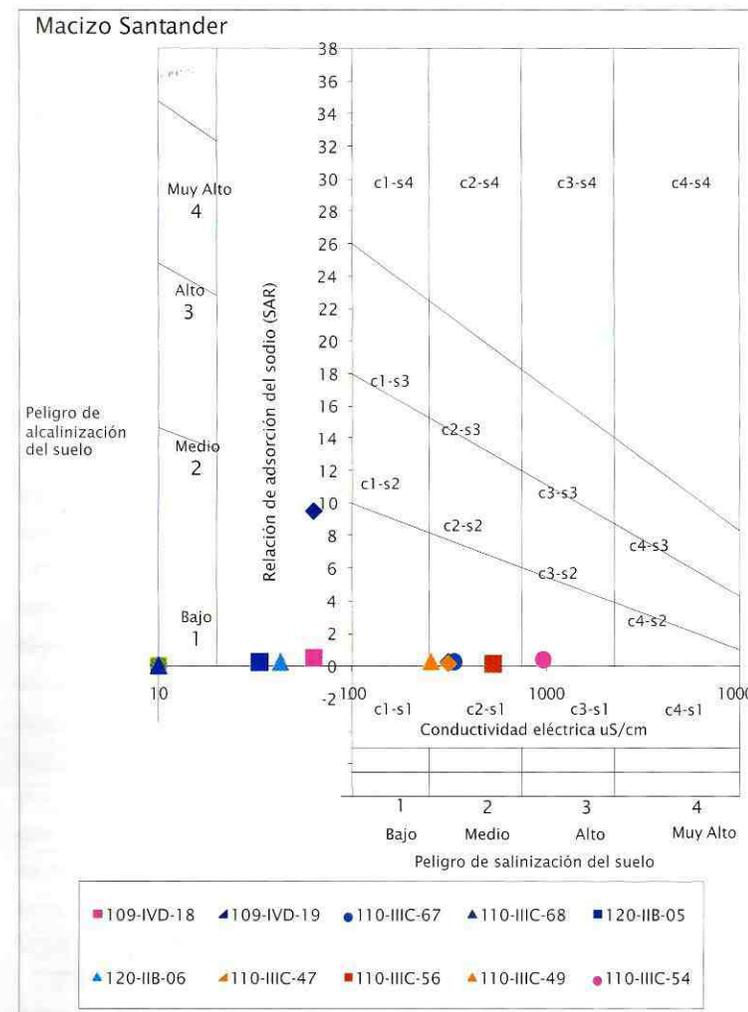


FIGURA 8. Clasificación de aguas para riego.
Fuente: Jairo Veloza Franco, Ingeominas, 2009.

Hay iones trazas en aguas subterráneas que pueden presentar problemas graves para la salud aun en concentraciones pequeñas, como el arsénico y el uranio. Otros, como el flúor y el yodo, son necesarios en concentraciones pequeñas para la salud, pero a mayores concentraciones pueden tener efectos nocivos.

Agua para consumo humano

En Colombia, las características del agua apta para consumo humano están descritas en el Decreto 2115 de 2007 del Ministerio de Salud (actual Ministerio de Protección Social) y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, que reglamentan la calidad del agua potable, y presentan las concentraciones y valores admisibles de los parámetros físicos, químicos y organolépticos para el agua de consumo humano (tabla 8).

TABLA 8. Valores admisibles el agua potable

Características	Expresadas como	Valor admisible mg/l
Aluminio	Al	0,2
Antimonio	Sb	0,005
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,5
Boro	B	0,3
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN	0,05
Cianuro total	CN	0,1
Cloroformo	CHCl ³	0,03
Cobre	Cu	1,0
Cromo hexavalente	Cr+6	0,01
Fenoles totales	Fenol	0,001
Mercurio	Hg	0,001
Molibdeno	Mo	0,07
Niquel	Ni	0,02
Nitritos	NO ₂	0,1
Nitratos	NO ₃	10
Plata	Ag	0,01
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Sustancias activas al azul de metileno	ABS	0,5
Grasas y aceites	-	Ausentes
Trihalometanos totales	THMs	0,1

...continuación

Calcio	Ca	60
Acidez	CaCO ₃	50
Hidroxidos	CaCO ₃	<LD
Alcalinidad total	CaCO ₃	100
Cloruros	Cl	250
Dureza total	CaCO ₃	160
Hierro total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	250
Zinc	Zn	5
Fluoruros	F	1,2
Fosfatos	PO ₄ ⁻³	0,2

Fuente: Decretos 1594 de 1984 y 475 de 1998 del Ministerio de Salud.

El agua y la salud

Según Foster (2002), los compuestos traza representan únicamente el 1% de los constituyentes disueltos presentes en el agua subterránea en forma natural, pero algunas veces pueden hacerla inadecuada o inaceptable para el consumo humano (tabla 7). No obstante, al mismo tiempo, muchos de estos elementos traza son esenciales en ciertas concentraciones para la salud humana o animal (por ejemplo el flúor, F, y el yodo, I) y deben ingerirse en el agua o con el alimento. Sin embargo, el rango dentro del cual son deseables puede ser pequeño y a mayores niveles pueden ser dañinos (por ejemplo, el F). Otros siempre perjudican la salud, incluso en concentraciones muy pequeñas (por ejemplo, el arsénico (As) y el uranio (U)). El arsénico (As) es el elemento traza que más preocupa en el agua subterránea ya que es carcinógeno aun en concentraciones bajas. La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala varios otros elementos traza (incluyendo notablemente el Ni, el U y el Al) como potencialmente peligrosos en el agua potable.

Por ejemplo, altos contenidos de sulfatos generan diarrea y deshidratación, los nitritos producen una enfermedad en los niños llamada cianosis o enfermedad azul, el potasio genera perturbaciones del ritmo cardiaco, el magnesio se considera como cancerígeno, el cadmio, mer-

EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**Ocurrencia del agua subterránea en diferentes formaciones geológicas**

Se considera agua subterránea aquella parte del agua del ciclo hidrológico que está bajo la superficie del terreno (Davis & De Wiest, 1966). Su ocurrencia se da en varios tipos de espacios abiertos en las rocas, tales como fisuras, intersticios entre granos, poros, grietas, fracturas, planos de foliación, planos de falla y diaclasas; debido a las diferencias de presión hidrostática, esta agua permanece en continuo movimiento. Se puede decir entonces que la existencia, el movimiento y el almacenamiento del agua subterránea están controlados por la secuencia estratigráfica, la litología, los espesores y la configuración estructural de los materiales que conforman la corteza terrestre.

Así mismo, las condiciones hidrodinámicas y las propiedades químicas y mineralógicas de las rocas, sedimentos, perfiles de meteorización y suelos determinan la composición química del agua que contienen.

La Tierra presenta ambientes geológicos muy variados y muy complejos. En el subsuelo se encuentran rocas y sedimentos de distinto origen, composición y disposición estructural, lo que determina las características y propiedades para la circulación del agua (medio poroso o fracturado), así como su capacidad para almacenarla y transmitirla. A causa de los procesos geológicos que han sufrido algunas formaciones litológicas, se han conformado estructuras y zonas con condiciones geométricas o texturales singulares que permiten la acumulación y distribución de las aguas subterráneas, como los plegamientos en secuencias de rocas sedimentarias, los perfiles de meteorización en rocas ígneas y metamórficas, zonas de fracturamiento y fallas regionales, permeabilidad secundaria por disolución en medios kársticos y acumulaciones de sedimentos superficiales, entre muchos otros (In-

La existencia, movimiento y almacenamiento del agua subterránea están controlados por la secuencia estratigráfica, la litología, los espesores y la configuración estructural de los materiales que conforman la corteza de la

Acuíferos en rocas ígneas y metamórficas (rocas cristalinas)

Las permeabilidades primarias en estas rocas son tan pequeñas que pueden considerarse nulas desde el punto de vista práctico. Sin embargo, a través de fracturas y zonas descompuestas y meteorizadas pueden circular grandes cantidades de agua (figura 1). Es probable que por la configuración geométrica de estas rocas no se produzcan acumulaciones de agua explotables económicamente, pero este tipo de acuíferos cumple un papel trascendental en el mantenimiento de los flujos base de las corrientes superficiales de un área determinada y en el abastecimiento de pequeñas comunidades, por lo que su conocimiento es de gran importancia ambiental a la hora de tomar decisiones sobre el uso del agua.

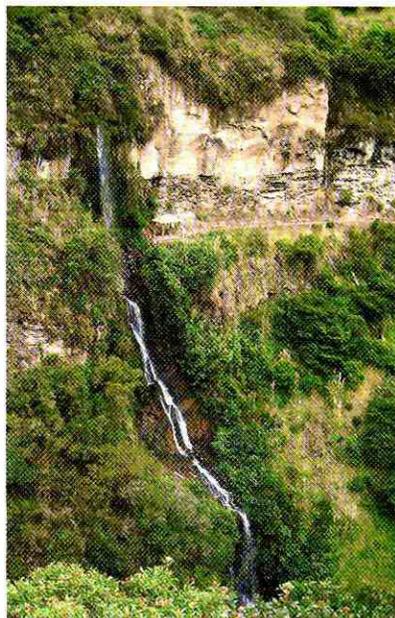


FIGURA 1. Lavas andesíticas con alta proporción de diaclasas laminares por enfriamiento, Santuario de Las Lajas, Ipiales (Nariño).
Foto: Jairo Veloza Franco, Ingeominas.

La meteorización química de las rocas cristalinas produce saprolitos y regolitos, con porosidades que pueden variar entre 40-50%. Este

filtrada, y alimentando el caudal que circula por fisuras y fracturas en esta clase de rocas.

En regiones sometidas a una meteorización fuerte, como por ejemplo en medios tropicales, los efectos de la descomposición meteórica de las rocas pueden extenderse hasta profundidades superiores a los 100 m; no obstante, las profundidades más frecuentes, en las que estos efectos son apreciables, están entre 1,5 y 15 m. La alteración superficial de la roca puede dar lugar a materiales muy sueltos, que alcanzan porosidades totales superiores al 40%, motivo por el cual la porosidad disminuye con la profundidad. En general, en las rocas parcialmente descompuestas, las mayores permeabilidades se encuentran por debajo de la zona en que abunda el material fino, por lo general en los horizontes superiores del perfil de meteorización.

Muchas rocas metamórficas y un número reducido de rocas plutónicas contienen minerales carbonatados, susceptibles de disolverse rápidamente debido al agua circulante, dando lugar a cavidades de diferente tamaño que aumentan la permeabilidad secundaria de los materiales.

La permeabilidad media de las rocas plutónicas y metamórficas disminuye a medida que la profundidad aumenta (Davis & De Wiest, 1966), fundamentalmente por dos razones:

- El peso de las capas superiores debido al incremento de las presiones litostáticas.
- Efectos menores de la meteorización, como incremento en el porcentaje de minerales arcillosos y óxidos que bloquean la porosidad de estos materiales, representada por diaclasas, planos de foliación, etcétera.

Entre los agentes de alteración, descomposición superficial y erosión que originan porosidad secundaria en rocas plutónicas y metamórficas se encuentran los deslizamientos, los asentamientos y la erosión superficial, los cuales producen efectos de sobrecarga en las rocas infrayacentes; la descomposición química, las raíces de las plantas y la acción del hombre incrementan este factor positivo para la existencia de aguas subterráneas. Los deslizamientos y asentamientos afectan

de material detrítico suelto y permeable, que actúan a modo de áreas de recarga y pueden llegar a constituir buenos acuíferos. La descomposición química actúa por lo regular a profundidades menores de 100 metros. Los agentes de meteorización física, como la acción del hielo y las raíces, son efectivos sólo a pocos metros de profundidad, pero de igual manera contribuyen a incrementar la porosidad secundaria de este tipo de materiales geológicos.

En general, los caudales de explotación son bajos en casi todos los pozos excavados en rocas plutónicas y metamórficas, ya que están comprendidos entre 0,5 y 1,5 l/s (Davis & De Wiest, 1966). Pero como se dijo antes, son claves para mantener los flujos subterráneos y superficiales de las áreas conformadas por estas rocas.

En una misma región puede haber diferencias de caudales de un sitio al otro, que suelen deberse más al grado de alteración y fracturamiento de la roca que a las diferencias de composición mineralógica y textura. Los mayores caudales corresponden a rocas metamórficas carbonatadas, como los mármoles, por ejemplo, donde la circulación del agua tiende a ensanchar las fracturas por disolución de los cristales de calcita y magnesita.

Aguas subterráneas en rocas sedimentarias

Las arcillas, los limos y sus equivalentes litificados, como limolitas, argilitas y otra serie de rocas detríticas de grano muy fino, representan aproximadamente el 50% de todas las rocas sedimentarias en la Tierra. Le siguen en importancia areniscas, conglomerados, estratos de yeso y de chert, y finalmente acumulaciones de materiales detríticos superficiales, como morrenas y tilitas, depósitos de vertiente en zonas montañosas y acumulaciones de materiales de origen lacustre, como diatomitas, por ejemplo (Davis & De Wiest, 1966).

El espesor medio de los estratos de las formaciones sedimentarias está comprendido, por lo general, entre unos pocos centímetros y algunos metros. Aunque la alternación de capas de arcilla, caliza y arenisca, dependiendo del ambiente de sedimentación, suelen ser las secuencias estratigráficas más frecuentes, puede ocurrir que algunos estratos individuales sean tan potentes, que los pozos que se perforan en busca de estratos acuíferos no lleguen a atravesar más que un solo tipo de roca.

La mayor parte de las rocas detríticas de grano fino poseen poro-

cas constituye barreras para el movimiento del agua; sin embargo, es un error común creer que a través de estos lechos confinantes no hay ningún almacenamiento de agua. El gran volumen que ocupan los espacios porosos de las rocas de grano fino permite almacenar grandes cantidades de agua. Aunque de los pozos situados en ellas no se puedan extraer grandes volúmenes de agua, a veces es posible producir un drenaje a través de ellas hacia los acuíferos confinados. Por tal razón, el agua almacenada en arcillas y rocas afines debe tomarse en cuenta, particularmente en los casos en que haya diferencias piezométricas importantes entre los acuíferos y las formaciones confinantes, permitiendo un drenaje vertical de estas últimas.

La porosidad total en las areniscas varía entre 5 y 33%. El factor que más influye en la porosidad efectiva que pueda tenerse en un caso particular es el tipo de cemento. Los cementos más comunes son de sílice, carbonatos u óxidos de hierro; es frecuente encontrar materiales arcillosos en la matriz que disminuyen igualmente la permeabilidad de las rocas sedimentarias detríticas.

La permeabilidad de las areniscas suele ser de una a tres veces menor que la permeabilidad de los correspondientes sedimentos no consolidados ni cementados. Mientras que la arena media tiene una permeabilidad entre 1 y 30 m/día, los valores para las areniscas correspondientes de grano medio varían entre 0,001 m/día y 0,5 m/día. La permeabilidad en las rocas carbonatadas puede variar desde menos de un mm/día en el caso de las calizas ricas en minerales de arcilla, hasta varios miles de metros por día en el caso de brechas gruesas y mal seleccionadas con escaso cemento. En términos generales, puede decirse que la mayor permeabilidad de casi todas las calizas se debe a la presencia de grietas y fracturas ensanchadas por efecto de disolución del agua.

Muchos de los pozos abiertos que captan en rocas sedimentarias moderadamente compactadas poseen caudales entre 0,05-30 l/s. Las rocas de grano fino proporcionan caudales del orden de 0,5 l/s. Las areniscas entre 0,5-15 l/s y las calizas entre 0,5-1,5 l/s. En rocas sedimentarias compactadas, las zonas más favorables para la explotación de aguas subterráneas se sitúan por lo general a lo largo de zonas de falla y en regiones profundamente fracturadas; la geometría de los plegamientos y su relación con el fallamiento regional desempeñan un papel decisivo a la hora de realizar la explotación para aguas subterráneas; la presencia

Por las fisuras, fracturas y disolución de las rocas cristalinas pueden circular considerables cantidades de agua subterránea.

de estructuras sinclinales representa condiciones ideales para la acumulación de agua subterránea.

Rocas sedimentarias no consolidadas o depósitos recientes

Los depósitos recientes se forman por los materiales transportados por los ríos, por lagos, por el viento o por el hielo de los glaciares. La gravedad y el agua lluvia generan diferentes tipos de erosión en laderas y flancos de las montañas, dando lugar a enormes acumulaciones de depósitos de vertiente. Los acuíferos ubicados en este tipo de depósitos son una fuente importante de agua potable. Según Ingeominas (2004), en Colombia los depósitos recientes se subdividen en cinco grandes grupos, de acuerdo con su génesis morfológica. Aunque no existe la cartografía detallada que permita distinguirlos por sus texturas y tamaño de grano, éstos se han clasificado regionalmente, según su importancia hidrogeológica.

El principal grupo por su mayor interés hidrogeológico lo integran los grandes depósitos de llanuras aluviales y sus sistemas de terrazas relacionadas (figura 2), asociadas con las grandes corrientes fluviales del país, en especial las de los ríos Magdalena, Cauca, Atrato, Sinú, Meta y Cesar, al igual que los ríos de las cuencas del Amazonas y Orinoco.

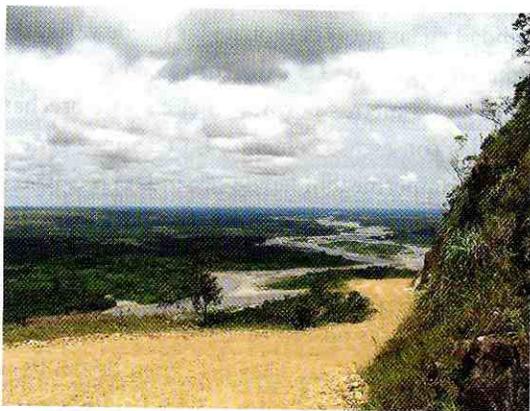


FIGURA 2. Cuaternario Aluvial del río Upía (Casanare – Meta).
Foto: Carlos Julio Morales, Ingeominas.

En un segundo grupo se consideran los abanicos aluviales y los grandes depósitos de piedemonte, localizados tanto en los valles in-

mente a lo largo de los bordes de las cuencas artesianas, que también poseen buenas posibilidades hidrogeológicas.

Las acumulaciones de depósitos de las llanuras costeras del Caribe y Pacífico se incluyen en el tercer grupo por considerarse buenos y extensos reservorios, aunque pueden presentar problemas de salinidad en proximidades del litoral y baja recarga en zonas áridas o semiáridas, como en el caso de La Guajira.

Con menor potencial hidrogeológico se considera al grupo conformado por los depósitos de vertiente generados por procesos gravitatorios a causa de su alto contenido de materiales finogranulares tipo arcillas y limos que restringen su permeabilidad; generalmente son depósitos tipo flujos de lodo o flujos de escombros, en oportunidades intercalados con los depósitos producto de la actividad torrencial de las corrientes, en diferentes estados de meteorización. Son acumulaciones de importancia local, pero que en algunos casos pueden condicionar el funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos considerados a estas escalas, como puede ser el caso del Valle del Aburrá o de otros valles intramontañosos, muy comunes en la topografía andina de Colombia.

Los depósitos de origen glaciar, ubicados en las zonas altas de las montañas (por encima de 3600 msnm para los de la última glaciación), son de extensión reducida; las mezclas heterogénea de tamaños de grano, producto de la meteorización física y el transporte por el hielo, disminuyen la posibilidad de almacenamiento de agua debido al rápido drenaje que tienen, pero pueden llegar a ser de gran valor como zonas de recarga local.

Un quinto grupo lo integran los depósitos lacustres y fluviolacustres, en los cuales predominan los tamaños de grano fino que disminuyen su permeabilidad. Su poca extensión y su confinamiento en pequeñas cuencas intramontañas los hacen poco atractivos para la exploración del recurso hídrico subterráneo.

Un caso aparte son las extensas capas de cenizas volcánicas que cubren grandes zonas de la región andina del país, especialmente en el sur y centro de las cordilleras Occidental y Central, sobre todo en esta última, donde se concentra la actividad volcánica reciente. Son materiales de textura arenosa, depositados en un ambiente subaéreo lo que les da buenas condiciones de permeabilidad primaria. Muchas veces estas acumulaciones tienden a agrietarse en forma poligonal, posiblemente por

dad el agua lluvia hacia los niveles inferiores, constituidos por saprolitos o rocas fracturadas. Pese a que no son numerosos los estudios sobre la conductividad hidráulica de las cenizas, en la región de los altiplanos de Nariño y Antioquia son determinantes en el ciclo del agua.

Rocas sedimentarias consolidadas clásticas

Las rocas sedimentarias de origen clástico, como areniscas y conglomerados de diverso tipo y origen (figura 3), en ocasiones intercaladas con materiales de origen volcánico, como tobas, lavas e ignimbritas. Estos materiales clásticos tienen las condiciones de permeabilidad y continuidad más adecuadas para convertirse en excelentes reservorios de agua. La disposición de los estratos y la geometría de los plegamientos de las formaciones de origen sedimentario detrítico constituyen el mejor ambiente geológico para la acumulación de volúmenes de agua económicamente importantes. Hay que anotar también que estas rocas son los medios adecuados para la transmisión o el flujo de agua subterránea desde las zonas de recarga hasta las de acumulación.



FIGURA 3. Areniscas de grano medio guijoso, Formación los Santos, Mesa de los Santos (Santander).
Foto: Nadia Rojas, Ingeominas.

Dentro de este grupo de rocas tienen menores posibilidades hidrogeológicas las rocas sedimentarias altamente litificadas por compactación y cementación por reducción de la permeabilidad primaria. En superficie, estas unidades pueden tener condiciones hidrogeológicas similares a las de las rocas cristalinas, pero pueden adquirir, al

permeabilidades secundarias por fracturamiento, diaclasamiento o cizallamiento. Las areniscas y conglomerados de las formaciones geológicas de origen marino, como las acumulaciones tipo flysch, de la cordillera Occidental, forman parte de este grupo hidrogeológico.

Rocas sedimentarias consolidadas no clásticas

Son rocas originadas por precipitación química en diversos ambientes geológicos y en diferentes condiciones fisicoquímicas; dentro de este grupo se incluyen rocas del tipo evaporitas (figura 4) (acumulaciones de sal, yeso y anhidrita, principalmente), calizas y dolomitas –que por su solubilidad se discutirán más adelante–, el chert y distintas acumulaciones de materiales silicios. Por su forma de precipitarse, generalmente son materiales fino granulares con muy poca permeabilidad, razón por la cual casi nunca se las considera entre las rocas con potencial hidrogeológico. Por lo menos hipotéticamente se pueden dar condiciones de permeabilidad secundaria que las hagan interesantes en determinadas condiciones.

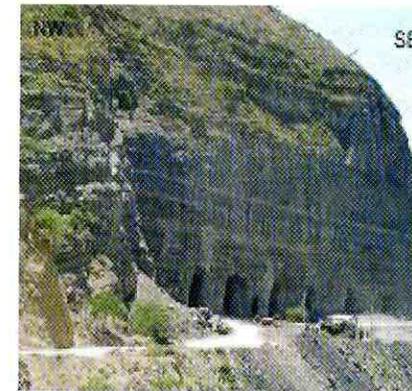


FIGURA 4. Niveles de evaporitas: caliza y yeso, en la Mesa de los Santos (Santander).

Foto: Nadia Rojas, Ingeominas.

Rocas sedimentarias consolidadas carbonatadas

Merece tratamiento aparte este conjunto heterogéneo de rocas, pues por presentar condiciones de alta solubilidad adquieren condiciones hidrogeológicas especiales. En este grupo se incluyen rocas sedimentarias clásticas, como algunas calizas (detríticas) y las margas; rocas

metamórficas, como el mármol. Las rocas de este tipo, como las calizas, mármoles, margas y dolomitas, están constituidas principalmente por minerales como la calcita, la magnesita y otros carbonatos complejos con cantidades variables de arcilla, según el caso. Estas rocas son solubles, en diferente grado, por la acción del agua superficial, rica en ácidos de origen orgánico que al infiltrarse por las fracturas, diaclasas o planos de debilidad, disuelven lentamente los planos de contacto de las discontinuidades, causando su ensanchamiento paulatino.

Cuando estas rocas son afectadas por estos fenómenos de disolución, pueden llegar a tener expresión en superficie, dando lugar a una topografía o relieve que se conoce en la literatura como kárstica (también escrita como cársica o cárstica en idioma castellano), que debe su nombre a la llanura de Kras en Eslovenia (antigua Yugoslavia), localizada a lo largo de la costa nororiental del mar Adriático, donde dicha topografía se ha desarrollado extraordinariamente; la mayor parte de la terminología geomorfológica a que se emplea para describir este tipo especial de relieve se deriva de los idiomas balcánicos por tal razón.

En zonas donde predomina este tipo de relieve se presentan fenómenos de colapso de cavidades subterráneas que tienen su expresión en superficies como sistemas de dolinas, los cuales establecen comunicaciones entre las aguas superficiales y subterráneas, haciendo mayores los volúmenes de agua que circulan por los materiales rocosos.

Como resultado de esta solubilidad, y de varios procesos geológicos a lo largo del tiempo, se forman paisajes propios de este tipo de terrenos, caracterizados por depresiones (llamadas dolinas), cárcavas, corrientes intermitentes y ríos subterráneos (figura 5). Las superficies freáticas en muchas zonas kársticas son casi planas debido a las altas conductividades hidráulicas.

Para la formación de un karst se requieren las siguientes condiciones:

- Existencia de un ambiente adecuado para el desarrollo de los procesos y fenómenos cársticos, como materiales calcáreos en superficie o cerca de ésta.
- Movimientos tectónicos y descomposición y meteorización de la superficie del terreno.
- Presencia del agua como agente meteorizante (Milanovic, 1981).

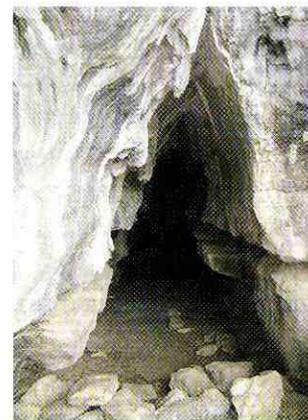


FIGURA 5. Calizas con disolución, gran acumulación de agua subterránea.
Foto: Nadia Rojas, Ingeominas.

Desde el punto de vista de la interconexión aguas subterráneas-aguas superficiales, los sistemas kársticos cumplen un papel muy importante (figura 6).

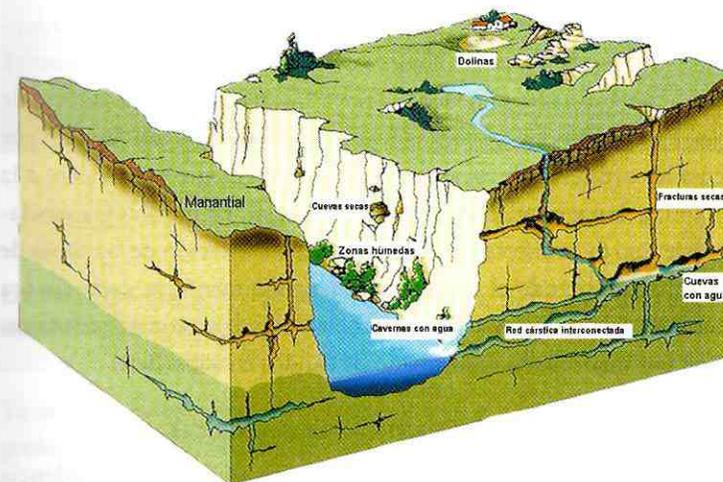


FIGURA 6. Esquema hidrogeológico de las rocas calcáreas.
Fuente: BRGM, 2005.

Esta conexión es fundamental cuando se vayan a evaluar procesos de contaminación, inundación y abastecimiento de agua.

Las principales concentraciones de rocas calcáreas en Colombia están relacionadas con formaciones sedimentarias de origen marino, como es el caso del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, La Guajira, la estribación occidental de la cordillera Oriental hacia el valle medio del Magdalena, el valle inferior del Magdalena y en la Serranía del Baudó (Ingeominas, 2004). Ambientes kársticos conocidos en Colombia se concentran en los departamentos de Santander, Norte de Santander, Huila y Tolima. En el oriente de Antioquia existen pequeñas zonas con relieves kársticos asociados a los afloramientos de mármoles intercalados entre las gruesas secuencias metamórficas de la cordillera Central.

Una característica esencial de los acuíferos en este tipo de rocas es que su cuenca superficial puede ser totalmente distinta de la cuenca subterránea. En muchos acuíferos kársticos un gran porcentaje del volumen de agua almacenado está “colgado” o suspendido sobre la parte principal, en el llamado epikarst, la zona entre la roca no alterada y la superficie del suelo. El agua en el epikarst se almacena en fisuras y planos de contacto, al igual que en la roca que se ha desprendido del basamento. Un manantial kárstico ocurre cuando una caverna o conducto descarga a la superficie del terreno y pueden producir grandes cantidades de agua. Además las cavernas que alimentan a un manantial kárstico pueden estar a kilómetros del afloramiento del manantial.

Los contaminantes pueden entrar a los acuíferos en este tipo de rocas por las dolinas, ya que viajan grandes distancias con rapidez, por lo cual los acuíferos en rocas kársticas son altamente vulnerables a la contaminación y requieren un manejo especial. La morfología asociada a este tipo de acuíferos permite la fácil identificación de las zonas de recarga, posibilitando el manejo adecuado del territorio de la cuenca superficial del acuífero y así evitar problemas graves, como la contaminación por inadecuado vertimiento de fluidos en superficie.

El agua subterránea y las estructuras geológicas

En la parte referente a las rocas cristalinas se aludió la trascendencia que tiene el fracturamiento en la generación de porosidades secundarias, facilitando flujos importantes en este tipo de materiales. Por sus condiciones litológicas no son rocas muy atractivas desde el punto de vista de producción, pero como se dijo antes el fracturamiento de las rocas es un elemento clave en la comprensión del funcionamiento de la parte subterránea del ciclo del agua, en especial para el diseño de

Para el caso de las secuencias sedimentarias que conforman medios porosos, resulta indispensable entender la continuidad y disposición de los estratos y las formas en que se han plegado como consecuencia de los procesos tectónicos de la corteza terrestre. El plegamiento y el fracturamiento de las formaciones sedimentarias pueden favorecer o dificultar la circulación del agua subterránea, por lo cual hay que conocer muy bien la geometría de esos plegamientos para identificar los mejores emplazamientos de agua subterránea.

Cada situación particular merece un análisis estructural especial para encontrar los mejores sitios con acumulación potencial de agua, pero en general se puede señalar que un eje sinclinal (figura 7) es siempre un buen candidato para la explotación de agua subterránea, toda vez que el agua, por tener densidad alta, tiende a viajar hacia abajo por efecto de la gravedad, siguiendo un curso distinto del de los hidrocarburos que, por su menor densidad, se acumulan preferentemente en los ejes anticlinales.



FIGURA 7. Sinclinal en Ciudad de México.

Fuente: J. Carrillo, 2005.

Definición de acuíferos, acuícludos, acuitardos y acuífugos

Ya se ha señalado que dos características claves de las formaciones geológicas desde un punto de vista hidrogeológico son la porosidad, la cual está ligada a la capacidad de almacenamiento de agua en las rocas, y la “habilidad” de éstas para dejar circular dicha agua, capacidad que se denomina conductividad hidráulica.

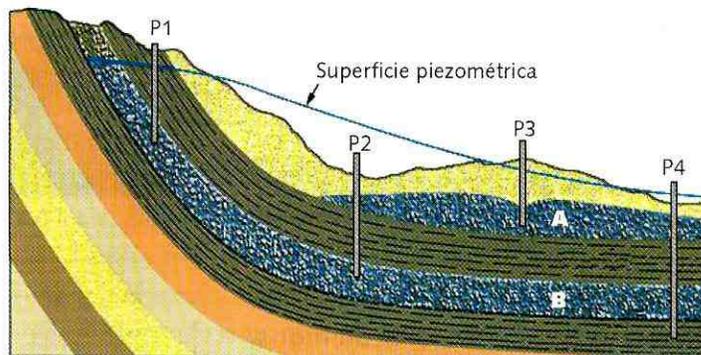
De esta manera, las diversas formaciones geológicas presentan distintas características en cuanto a su porosidad y a su permeabilidad, razón por la cual unas tendrán una porosidad relativamente alta y a su vez permitirán un fácil movimiento del agua; en el caso, por supuesto,

por lo que podrán almacenar considerables cantidades de agua, pero sin permitir su fácil desplazamiento; tal es el caso de la mayoría de las arcillas y limos. Finalmente, habrá otras formaciones que no pueden ni almacenar ni transmitir el agua, como ciertas rocas ígneas y metamórficas no fracturadas.

Vale la pena señalar que no se debe hablar de formaciones absolutamente impermeables. Se trata siempre de un concepto relativo, de la mayor o menor capacidad de la formación a permitir el movimiento del agua, pues en unas formaciones el agua puede desplazarse bajo la acción de la gravedad a velocidades mayores que en otras. De acuerdo con lo anterior, se pueden definir los siguientes conceptos:

Acuíferos

Son rocas que almacenan el agua y que a su vez permiten su movimiento, bajo la acción de las fuerzas de la gravedad, de tal manera que puede explotarse en cantidades relativamente apreciables (Figura 8).



- A. Acuífero libre, freático o no confinado.
- B. Acuífero confinado, cautivo o a presión.
- P1. Pozo en acuífero cautivo no surgente.
- P2. Pozo en acuífero cautivo surgente.
- P3. Pozo en acuífero libre.
- P4. Pozo en acuífero libre y cautivo surgente.

FIGURA 8. Tipos de acuíferos.
Fuente: Tarbuck & Lutgens, 1999.

Acuicludos

Son rocas que almacenan agua, a veces en proporciones altas, pero que

Acuitardos

Son rocas que almacenan agua, pero que sólo permiten el flujo de ésta en forma muy lenta en comparación con los acuíferos. Estas rocas pueden ser claves cuando se estudia el movimiento del agua a nivel regional, ya que sobre áreas relativamente grandes pueden transmitir ciertas cantidades de agua a pesar de la baja velocidad de flujo; así, pueden permitir el paso de agua de un acuífero a otro, cuando éstos se encuentran separados por un acuitardo.

Acuifugos

Son rocas impermeables que no almacenan el agua ni la transmiten.

Tipos de acuíferos

Los acuíferos pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua almacenada por ellos, condiciones que varían según la posición estructural de las rocas.

Acuíferos libres o no confinados

Son aquellos que presentan una superficie libre de agua que está en contacto directo con la atmósfera, sometida por consiguiente a la presión atmosférica. Dicha superficie se denomina superficie freática, nivel freático o tabla de agua (figura 9). En el caso de los acuíferos libres, el espesor saturado varía en forma muy directa con el comportamiento de temporal de la precipitación, por lo que el espesor no saturado se considera variable.

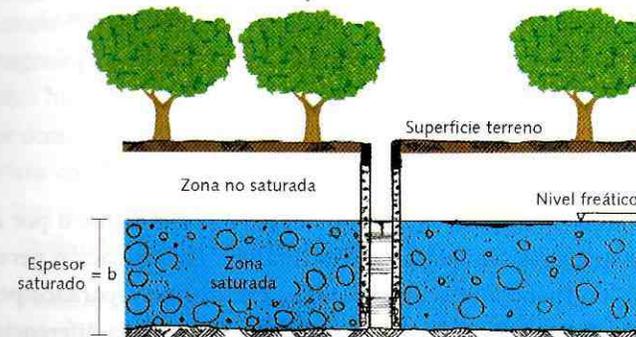


FIGURA 9. Acuífero libre.
Fuente: Jairo Veloza Franco, Ingeominas.

Un acuífero es una roca que tiene agua y la deja circular.

Acuíferos cautivos, a presión, confinados o artesianos

En estos acuíferos el agua se encuentra sometida a una presión mayor que la atmosférica y son rocas permeables, limitadas por capas de muy baja permeabilidad. En este caso la capa se encuentra completamente saturada. Aquí no existe una superficie libre del agua, pero sí puede hablarse de una superficie piezométrica, la cual es una superficie imaginaria que coincide con el nivel hidrostático del agua en el acuífero (figura 10). En este tipo de acuíferos se pueden presentar los llamados pozos de agua saltante, cuando se producen cabezas piezométricas mayores que la superficie del terreno.

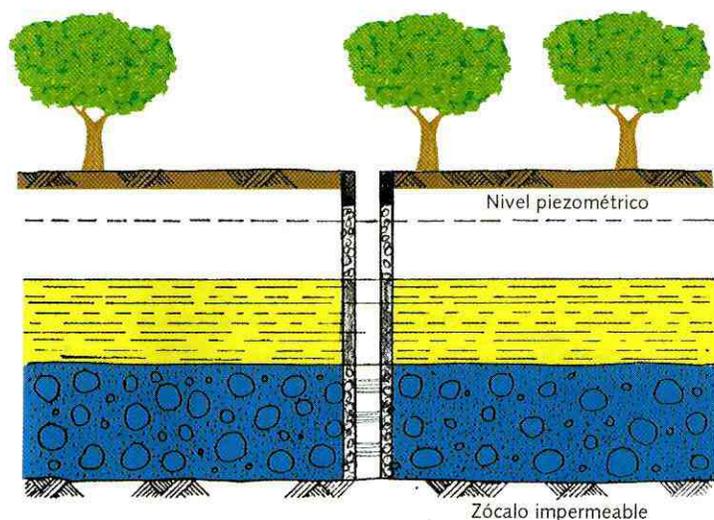


FIGURA 10. Acuífero confinado.
Fuente: Jairo Veloza Franco, Ingeominas.

Acuíferos semiconfinados

Son acuíferos limitados, ya sea por su base o por el techo, o por ambos, por una capa semipermeable (acuitardo). Esta situación permite que haya un flujo entre acuíferos que se encuentren separados por el acuitardo, flujo que puede efectuarse en dirección de la diferencia de niveles piezométricos existente entre éstos (figura 11).

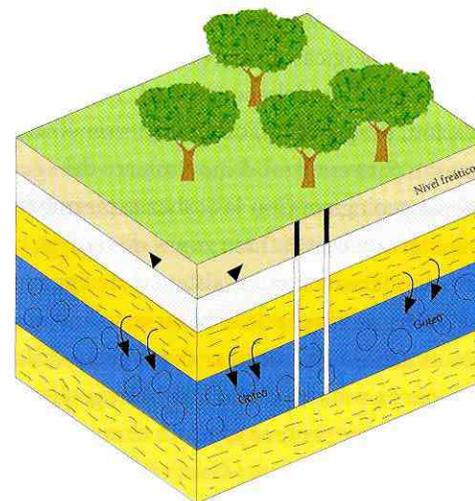


FIGURA 11. Acuífero semiconfinado.
Fuente: Jairo Veloza Franco, Ingeominas.

En una misma formación pueden presentarse varios tipos de acuíferos (figura 8).

Modelo hidrogeológico conceptual

Para entender la circulación de agua subterránea en el subsuelo se necesita definir lo que se conoce como modelo hidrogeológico conceptual, el cual permite identificar las condiciones de recarga y descarga de agua, las características litológicas y geométricas de la roca permeable, las secuencias estratigráficas y las respectivas condiciones hidrogeológicas locales: direcciones de flujo del agua subterránea, gradientes hidráulicos, transmisividad y capacidad de almacenamiento, entre otras.

Para construir el modelo hidrogeológico conceptual se deben seguir tres etapas básicas:

- Definir las unidades hidroestratigráficas.
- Realizar un balance hídrico.
- Definir el sistema de flujo (Anderson, 1992).

Los acuíferos se pueden clasificar en acuíferos libres, confinados o semi-confinados.

Las unidades hidroestratigráficas comprenden unidades geológicas de propiedades hidrogeológicas similares. Estas unidades forman la estructura o eje central del modelo conceptual. La información hidrogeológica (precipitación, evaporación, cabezas piezométricas) y los datos geoquímicos se usan para analizar el movimiento del agua subterránea a través del sistema geológico. Con las cabezas piezométricas y direcciones de flujo subterráneo se definen zonas de recarga y descarga, las conexiones entre acuíferos y con los sistemas de agua superficial. La definición del sistema de flujo puede basarse solamente en datos hidrogeológicos, pero es aconsejable utilizar datos geoquímicos donde sea posible para hacer más robusto el modelo hidrogeológico conceptual (Anderson, 1992). Seguidamente se muestra el modelo hidrogeológico conceptual de una zona del Valle del Cauca (figura 12).

El modelo conceptual permite entender el funcionamiento de los acuíferos –incluyendo aguas termales y minerales–, predecir su comportamiento y determinar sus recursos explotables; además, es útil para prever posibles impactos ambientales sobre el sistema o por su aprovechamiento, y para la gestión integral del recurso hídrico (Ingeominas, 2004).

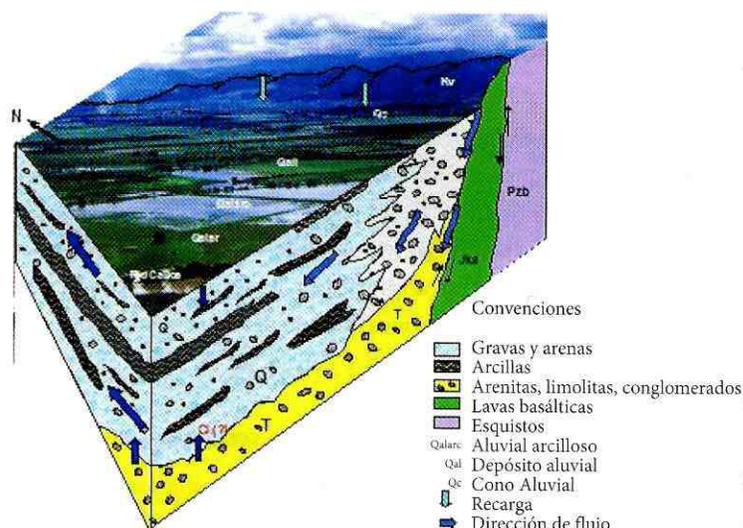


FIGURA 12. Modelo hidrogeológico conceptual del Valle del Cauca. Fuente: Corporación Autónoma del Valle del Cauca (CVC).

La construcción de un buen modelo conceptual garantiza luego el buen manejo del recurso

Metodología general para la exploración y evaluación de aguas subterráneas

Ingeominas definió en el 2004 pautas claras para la exploración y evaluación de aguas subterráneas, en el documento Programa de Exploración de Aguas Subterráneas, que se retoman en este texto.

La exploración regional de aguas subterráneas comprende todos los estudios encaminados a la localización, definición de las dimensiones y caracterización de las zonas favorables para la acumulación de aguas subterráneas. Al respecto existe una metodología con estándares internacionales y con suficiente difusión en documentos técnicos. El nivel de evaluación y el alcance de la exploración hidrogeológica dependen de la escala de trabajo, pero para esto se deben cumplir las siguientes etapas:

Etapas

Etapas 1 Estudios hidrogeológicos de reconocimiento a escalas iguales o menores que 1:500.000

Son estudios preliminares de una extensa región natural, una unidad hidrogeológica o un país entero. En esta etapa se identifican las estructuras geológicas, unidades geomorfológicas y unidades hidrogeológicas de mayor interés, lo que permite planificar adecuadamente la siguiente etapa de exploración. La finalidad de esta etapa es presentar las condiciones hidrogeológicas generales del territorio mediante la compilación y la síntesis de información secundaria; es de carácter orientativo, y por lo tanto se debe realizar rápidamente; tiene por objetivo contribuir al diseño de planes sistemáticos de exploración a escalas regionales y semirregionales.

Etapas 2

Estudios de exploración y evaluación hidrogeológica regional de escalas entre 1:250.000 y 1:50.000

Estos estudios, de evaluación y caracterización, permiten determinar las particularidades del origen, distribución y régimen de las aguas subterráneas en las estructuras hidrogeológicas definidas en la etapa anterior, incluyendo las aguas termales y minerales.

En esta etapa se identifican, delimitan y caracterizan las estructuras hidrogeológicas y se estiman, como pronóstico, los recursos y re-

servas de agua subterránea. Los resultados de estos estudios permiten definir las áreas con mayor potencial para el aprovechamiento del agua subterránea y establecer pautas para su conservación y protección.

Los estudios de exploración hidrogeológica regional son trabajos interdisciplinarios con metodologías bien definidas, que deben tener un orden secuencial en su realización, ya que cada una de las fases aporta información fundamental e indispensable para las posteriores (figura 13).

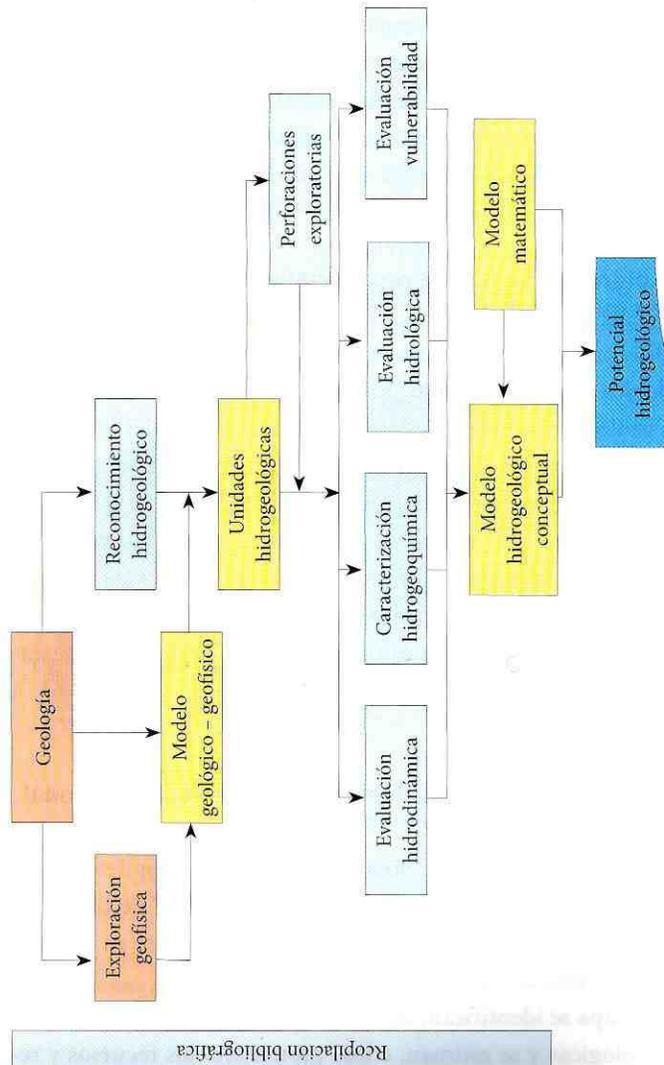


FIGURA 13. Flujodiagrama conceptual de exploración hidrogeológica. Fuente: Ingeominas, 2004.

Análisis del flujodiagrama conceptual de exploración hidrogeológica a nivel regional

Geología

La geología es la información base para los estudios hidrogeológicos, ya que define las propiedades de las rocas y las estructuras geológicas favorables para almacenar aguas subterráneas. La cartografía geológica debe hacerse enfatizando en la litología, textura, cambios de facies, tipo de porosidad, ambientes de depositación, estructuras tectónicas y geomorfológicas, así como composición mineralógica de los sedimentos y rocas. Se deben utilizar herramientas y disciplinas, tales como interpretación de fotografías aéreas, imágenes de radar y satélite, levantamiento de las secuencias estratigráficas, sedimentología, vulcanología y geología estructural, principalmente; para el caso de rocas ígneas y metamórficas es indispensable estudiar con detalle las formas e intensidades del fracturamiento, todos los sistemas de discontinuidades de los macizos rocosos utilizando técnicas de campo y estadísticas que permitan conocer los sistemas dominantes de fracturas y sus condiciones de conductividad hidráulica, como por ejemplo ancho, continuidad, rugosidad y relleno.

Puede haber circunstancias especiales en que la geomorfología del lugar cumple un papel dominante en la forma como se infiltra el agua, en la manera en que se transmite al sistema fracturado y de éste a las zonas de almacenamiento y alimentación de las fuentes superficiales. Un adecuado conocimiento de las formas superficiales facilita la identificación, en ocasiones, de las zonas más adecuadas para cartografiar la extensión de áreas de recarga de los acuíferos.

Exploración geofísica

La geofísica estudia las propiedades físicas del subsuelo y permite correlacionarlas con la geología de superficie que se efectuó en las etapas anteriores, lo cual, en el caso de la exploración de aguas subterráneas, contribuye a determinar la presencia y la geometría de los acuíferos o zonas acuíferas, al final que la obtención de un modelo conceptual que, a su vez, se valida con perforaciones exploratorias. Se debe hacer uso de las metodologías geofísicas convencionales, tales como resistividad, gravimetría, sísmica, magnetometría, electromagnetismo, registros

de protones o nuclear. La exploración geofísica se utiliza también para calcular el nivel de la profundidad del agua subterránea, estimar el espesor de la zona no saturada y de la porosidad de la roca, contribuir a la identificación de los ambientes de depositación, determinar el grado de mineralización de las aguas subterráneas, localizar fracturas, e identificar reservorios geotérmicos y aguas termales.

Reconocimiento hidrogeológico

Esta clase de reconocimiento, que se constituye en la fase esencial e inicial en exploración de aguas subterráneas, comprende las siguientes etapas: recolección de datos en el campo mediante el inventario de puntos de agua, discriminados en manantiales, aljibes, pozos, humedales y corrientes de agua, y diseño y desarrollo de la red de monitoreo para confirmar el modelo conceptual.

Los datos obtenidos en esta fase son la base para clasificar y caracterizar las unidades geológicas y así determinar las características hidrogeológicas preliminares del área.

Perforaciones exploratorias

Las perforaciones exploratorias son necesarias para validar los modelos geológico-geofísicos e hidrogeológicos conseguidos en las fases de trabajo anteriores y para la caracterización de los acuíferos desde los puntos de vista hidráulico y químico. La ubicación y el diseño de estas perforaciones dependerán de las particularidades hidrogeológicas de cada área. Además, si en los modelos se identifica que la densidad de puntos existentes no cumple con los requerimientos de exploración, se deben hacer perforaciones adicionales.

Evaluación hidrodinámica

La evaluación hidrodinámica de las aguas subterráneas se refiere al estudio de su movimiento en las rocas y sedimentos, desde las zonas de recarga hacia las de descarga (dirección del flujo subterráneo). Los principales elementos hidrodinámicos son la presión piezométrica, el gradiente y los parámetros hidráulicos del acuífero (conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento) que caracterizan el flujo y almacenamiento de agua en los diferentes acuíferos. La protección y el manejo racional de los acuíferos requieren igual-

cos se determinan a partir de ensayos de acuífero (pruebas de bombeo). Los sitios y duración de estas pruebas deben determinarse a partir de las fases previas de este estudio.

Caracterización hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica tienen que ver con el origen, los procesos y la evolución de la composición del agua almacenada en las unidades hidrogeológicas (acuíferos). Ésta es una herramienta básica que, además de determinar la calidad natural del agua para diferentes usos, mediante análisis fisicoquímicos e isotópicos, aporta la siguiente información al modelo hidrogeológico conceptual: identificación de zonas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diversos orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos), origen del agua subterránea, tiempo de residencia de las aguas subterráneas, identificación de ocurrencias de aguas termales y minerales.

Evaluación hidrológica

Las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas forman parte del ciclo hidrológico y se encuentran constantemente en interacción. Además, la principal fuente de alimentación de las aguas subterráneas son las aguas meteóricas. Por lo anterior, es de gran importancia evaluar las condiciones meteorológicas e hidrológicas, para contribuir al modelo hidrogeológico con información sobre posibles fuentes y zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas, a cerca de la disponibilidad del agua para la recarga (balance hídrico superficial).

Evaluación de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación depende de las características litológicas de la zona no saturada, del tipo de acuífero, de la profundidad del nivel del agua para el acuífero libre o de la profundidad del techo del acuífero confinado. La vulnerabilidad debe revisarse periódicamente, ya que algunas de las variables involucradas son temporales, dependiendo de situaciones particulares como por ejemplo la proximidad a cuerpos de agua salobre o el mar, vertederos de desechos, sistemas de riego en zonas agrícolas con uso intensivo de agroquímicos, descargas de sistemas de alcantarillado o plantas de

Los modelos matemáticos son útiles, entre otras cosas para la evaluación regional del recurso agua subterránea, predicción de efectos de posibles abatimientos, delimitación de zonas de protección, diseño de redes de monitoreo, evaluación de riesgo de contaminación y reglamentación del recurso.

Modelo hidrogeológico conceptual

Los conceptos principales relacionados con este modelo hidrogeológico conceptual se explicaron con anterioridad.

Modelo matemático

Un modelo es una representación simple de la realidad y por lo tanto no es perfecto. El término modelo se usa para describir la formulación matemática, más un algoritmo de computador junto con los datos de entrada. El modelo matemático es una representación numérica de las condiciones hidrogeológicas y permite mejorar el conocimiento que se tenga del funcionamiento del acuífero, así como evaluar la potencialidad de las aguas subterráneas.

Etapa 3

Estudios de exploración hidrogeológica de detalle a escala igual o mayor de 1:25.000

Estos estudios permiten tener un conocimiento detallado de zonas específicas para el aprovechamiento de aguas subterráneas, termales y minerales, con el fin de localizar y diseñar obras de captación o resolver problemas específicos, como contaminación, construcción de obras civiles, minería, ordenamiento del territorio, planeación de usos intensivos del suelo, etc. Este nivel de detalle requiere levantamientos precisos de campo, evaluaciones geofísicas y toma sistemática de muestras de roca, suelo y aguas para los análisis posteriores de laboratorio.

Mapas hidrogeológicos

La cartografía hidrogeológica se enfrenta a varios retos. En primer lugar, un problema importante es la gran cantidad de variables relacionadas a considerar, lo que obliga a una profunda estructuración de la información y al establecimiento de una jerarquía en el interés o importancia de los datos, al objeto de no sobrecargar el mapa convirtiéndolo en algo incomprensible. Así mismo, la elección de la simbología se convierte en algo prioritario, surgiendo la necesidad de una leyenda estándar al objeto de uniformizar la representación de los fenómenos hidrogeológicos.

En segundo lugar, la cartografía hidrogeológica no sólo se ocupa de fenómenos que tienen lugar sobre la superficie del terreno, sino

como la profundidad de niveles de agua, los espesores saturados o de materiales impermeables, la zonificación vertical de los acuíferos, etc. Además pueden existir dos o más acuíferos superpuestos con características muy distintas y grado de conocimiento diferente. Todo ello hace necesario recurrir a distintos recursos de representación cartográfica como: atlas de mapas hidrogeológicos, es decir, colecciones de mapas temáticos a la misma escala, superponibles, en cada uno de los cuales se presenta un tipo distinto de información referido al mismo sistema; utilización de un mapa principal con información del sistema mejor conocido o más importante y en la misma hoja, mapas auxiliares a menor escala con información de los sistemas o aspectos menos conocidos, y utilización de bloques diagramas tridimensionales y cortes hidrogeológicos representativos.

En tercer lugar, la cartografía hidrogeológica se interesa por elementos variables con el tiempo, con fluctuaciones naturales de carácter estacional, anual y plurianual, a las que hay que añadir los cambios producidos por la explotación de los recursos hídricos subterráneos a cargo del hombre. Como indica Galofré (1983), de cara a la cartografía distinguimos entre fenómenos permanentes, aquellos inmutables con el tiempo (datos geológicos, obras hidráulicas, puntos de agua, etc.) y sucesos, aquéllos que evolucionan en el tiempo (altura y profundidades del nivel de agua, caudales descargados o extraídos, datos de hidroquímica, etc.). La variable tiempo introduce complejidad adicional a la representación cartográfica y acarrea una falta de actualización del mapa si se produce un retraso en su publicación (García López, 2003).

Cuando existe una suficiente densidad de datos, se simplifica la preparación de un atlas de mapas hidrogeológicos (hidrología, isorresistividad, hidrogeoquímica, unidades acuíferas, vulnerabilidad, entre otros), pero cuando se posee un número de datos demasiado pequeño comparado con la escala del mapa base, puede ser útil representar estos datos en mapas a escala menor, con el fin de visualizar mejor la información. Los mapas hidrogeológicos tienen dos funciones principales (Kovalevsky et ál., 2004):

- Son una herramienta para visualizar y entender las condiciones hidrogeológicas regionales. Se requiere gran cantidad de información, proveniente de varias fuentes, lo que exige un fuerte trabajo

El mapa hidrogeológico debe ir acompañado de un perfil donde se represente el modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio.

- Son un medio de comunicación entre los hidrogeólogos y entre éstos y personas que requieren información sobre el agua subterránea y sus usos.

El mapa hidrogeológico tiene que ir acompañado de un perfil donde se represente el modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio. Este mapa, debe tener como base el mapa geológico, ha de ilustrar sobre las características de las unidades acuíferas y el estado del recurso. A continuación se muestran los temas que pueden ir en un mapa hidrogeológico, clasificados por su naturaleza y grado de contextualización (tabla 1).

La tendencia futura en la cartografía hidrogeológica apunta hacia la implantación total del soporte digital en la información y la utilización de entornos SIG, incidiéndose especialmente en el desarrollo de métodos de visualización de la tercera dimensión (bloques diagramas, representaciones realísticas, cortes hidrogeológicos) y de la consideración de la variable tiempo.

Por otra parte, se pueden establecer varias clasificaciones de mapas hidrogeológicos atendiendo a diversos criterios (tabla 2). Según la escala se suelen diferenciar entre mapas a pequeña escala (<1:500.000), que definen grandes provincias o cuencas hidrológicas y que son útiles para planificar futuros estudios de mayor detalle; mapas a escala media (1:500.000 a 1:100.000) que suelen ser documentos de síntesis hidrogeológica y sirven para la organización de los reconocimientos de detalle, y mapas a gran escala (>1:100.000) que son el resultado de investigaciones específicas (García López, 2003)

TABLA 1. Información en un mapa hidrogeológico

Temas	Formaciones hidrogeológicas y estructuras	Parámetros del agua subterránea	Estructuras de captación
datos básicos tuales observaciones campo).	Afloramientos Geometría de los acuíferos Lechos confinantes Espesores de las formaciones	Profundidad del nivel freático Georreferenciación de puntos de observación	Localización de pozos, drenes, profundidades
sultados cálculos e erpolaciones mples.	Cotas de los lechos confinantes de los acuíferos Isópacas Contornos de las áreas acuíferas	Cabezas hidráulicas y su variación Isopiezas Caudales	
sultados cálculos mplejos.	Parámetros de los acuíferos: permeabilidad, porosidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, espesor de la zona no saturada	Condiciones de frontera. Isóbatas. Localización de potenciales flujos artesianos. Líneas de corriente y divisorias de aguas subterráneas. Conexión entre aguas subterráneas y aguas superficiales. Localización de flujos locales de entrada y salida a los acuíferos	Caudales específicos
formación.	Accesibilidad. Probabilidad de perforaciones exitosas. Zonas de máxima productividad	Calidad del agua. Vulnerabilidad a la contaminación Comparaciones entre estado actual del acuífero y su estado natural (evolución abatimientos)	Rendimiento probable Abatimientos

Fuente: Kovalevsky et al., 2004.

Los mapas hidrogeológicos son una herramienta para visualizar y entender las condiciones hidrogeológicas regionales, así como un medio de comunicación entre los hidrogeólogos y entre éstos y personas que requieren información sobre el agua subterránea.

TABLA 2. Escala de los mapas según la evaluación

Nivel de evaluación	Escala de trabajo	Tipo de mapa
Reconocimiento preliminar	Mayor a 1: 500.000	Orientativo
Reconocimiento	Normalmente estado / provincial 1:100.000 a 1:500.000 (datos 10 km)	
Investigación Semidetallada	Local urbano / municipal 1:25.000 a 1:50.000 (datos 200-500 m)	Operativo
Investigación detallada	Local 1:10.000 a 1:5.000 (datos 50-100 m)	

Fuente: Ingeominas.



EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La utilización del agua subterránea como fuente de abastecimiento, tanto para uso doméstico como agrícola se remonta a tiempos inmemoriales. En efecto, desde que el hombre aprendió a domesticar y apacentar vacunos y ovejas en los valles de los ríos Tigres, Éufrates, Indo y Amarillo (10.000 a.C.) los pozos eran su posesión más importante (Kovalevsky et ál., 2004).

Sin embargo, en el último medio siglo la situación en los avances tecnológicos, en la perforación de pozos, en los sistemas de bombeo y en el conocimiento del origen y movimiento de las aguas subterráneas ha conducido a un aumento espectacular en el uso de las aguas subterráneas prácticamente en todos los países áridos o semiáridos. Quizás el caso más notable sea la India, donde se han puesto en regadío con aguas subterráneas más de 25 millones de hectáreas en los últimos treinta años. Y este país ha pasado de padecer hambrunas frecuentes y generalizadas a convertirse en un exportador de grano (Llamas & Custodio, 2002).

En este capítulo se darán los conceptos fundamentales para la captación de aguas subterráneas, además de los elementos para un buen diseño y construcción de pozos.

Tipos de captaciones

El agua subterránea puede captarse a partir de condiciones dadas espontáneamente por la naturaleza, como en los manantiales, donde los niveles freáticos interceptan la superficie del terreno y el agua sale por gravedad. Los manantiales son, en muchos lugares, la única fuente de abastecimiento de agua potable para pequeñas comunidades, por lo cual es necesario cuidarlos y protegerlos.

Para extraer el agua subterránea de los acuíferos por medios artificiales, se debe construir una captación. Una captación es cualquier instalación que permita poner a disposición del usuario el agua contenida en los acuíferos. Los diferentes tipos de captaciones pueden clasificarse así:

Pozos

Perforación mecánica vertical, por lo regular en forma cilíndrica y de diámetros de 2 a 16 pulgadas. Los pozos están revestidos de tubería metálica o PVC. La mayor parte del caudal procedente de los acuíferos se extrae por este tipo de captación (figura 1).

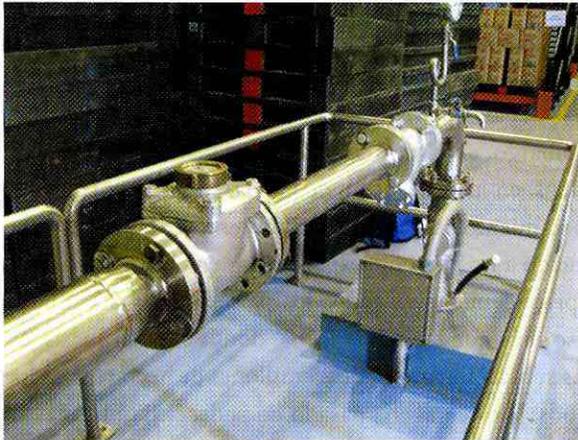


FIGURA 1. Pozo profundo Bogotá.
Foto. Jairo Veloza Franco, Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Bogotá.

Aljibes

Cuando los pozos se excavan de manera manual, con profundidades pequeñas, generalmente entre 5 y 10 metros y diámetros grandes, hasta un metro en promedio, se conocen con el nombre de aljibes. Para evitar su derrumbamiento, sus paredes se revisten con ladrillo, tubería de cemento o concreto. Normalmente, estos aljibes producen bajos caudales; se utilizan para abastecer de agua a pequeñas comunidades, mediante el uso de bombas manuales o sistemas de bombeo muy simples para extraer el preciado líquido (figura 2). Por la manera como están contruidos, pueden causar contaminación en las aguas subterráneas.



FIGURA 2. Aljibe zona del Patía.
Foto. Jairo Veloza Franco, Ingeominas.

Manantiales

Un manantial es una surgencia de agua que emerge de las rocas y están concentrados en la zona de descarga del agua subterránea y cuando brota a la superficie frecuentemente se convierte en un afluente temporal o permanente. Generalmente se realizan galerías y drenes en este tipo de captaciones, las cuales son perforaciones horizontales de baja pendiente, de sección generalmente circular, que interceptan el flujo de agua subterránea en el acuífero, permitiendo que el agua salga a la superficie del terreno por gravedad. A continuación se muestra una galería de drenajes, construida en el municipio de Mercaderes (Cauca) (figura 3).



FIGURA 3. Manantial con galería de drenaje, Mercaderes (Cauca).

Diseño, construcción y mantenimiento de pozos

El objetivo del diseño en ingeniería es lograr, en cualquier tipo de obra, la mejor combinación posible de rendimiento, vida útil y costo razonable. Diseñar el pozo es el proceso de especificar sus dimensiones y los materiales para su construcción, y definir la mejor política de operación. Los principales objetivos que un buen diseño debe asegurar son rendimientos altos con abatimientos mínimos, buena calidad del agua y una adecuada protección contra la contaminación, agua libre de arena, larga vida útil de un pozo (25 años o más), costos razonables a corto y largo plazos. La duración de un pozo y su eficiencia están relacionadas directamente con la calidad de los materiales empleados y la tecnología usada (López Geta et ál., 2004).

Se expondrán a continuación las principales etapas para lograr el objetivo de tener un pozo con un óptimo diseño, construcción y operación.

Localización de un pozo

Una de las claves del éxito en los rendimientos de un pozo es su correcta localización. Los pasos para una óptima localización de un pozo se pueden resumir en las siguientes etapas:

Reconocimiento geológico-hidrogeológico local

Incluye la revisión de la información existente (geológica, de puntos de agua, hidrológica, calidad de aguas, etc.) y el reconocimiento de campo (figura 4).



FIGURA 4. Reconocimiento geológico Formación Los Santos, La Navarre (Santander).

Estudios geofísicos

De estos estudios forman parte el diseño del programa de adquisición de datos, la toma y procesamiento de datos de resistividad en la modalidad de sondeos geoelectricos verticales (SEV), mencionados en el capítulo segundo, de los cuales se obtiene la interpretación del modelo de capas geoelectricas para recomendar el lugar y profundidad de la perforación del pozo (figura 5).



FIGURA 5. Exploración Geofísica, altiplano nariñense. Foto. José Vicente Franco, Ingeominas.

Perforación exploratoria

Con la información obtenida de la etapa anterior se realiza una perforación exploratoria o de prueba, que puede ser el pozo definitivo (figura 6). Mediante las perforaciones se puede obtener información sobre la geología y litología de las capas atravesadas. Sin embargo, esta información no es suficiente, ya que las muestras extraídas del lodo de perforación están muchas veces incompletas o mezcladas, y a menudo no se tienen muestras de algunos estratos. Estos problemas llevaron al desarrollo de métodos geofísicos para pozos. Con los registros geofísicos en pozos se halla información más precisa de la litología, geología, calidad del agua, porosidad y otros parámetros importantes, tales como la permeabilidad y contactos agua dulce/agua salada. Los registros más comunes en pozos son la resistividad en dispositivo normal, el potencial espontáneo y la radiación gamma. Como complemento de esta



FIGURA 6. Perforación pozo profundo, municipio de Barichara (Santander).
Foto. Jairo Veloza Franco, Ingeominas.

Con base en esta información se elabora el diseño del pozo, que incluye la selección del diámetro final de perforación, de los niveles permeables para la ubicación de filtros, el empaque de gravilla, y la elección del material, tubería y filtros.

Una perforación exitosa depende de la experiencia y de buenas prácticas de ingeniería. En Colombia el método más usado para la perforación de pozos es la perforación rotatoria. Existen dos sistemas de perforación a rotación: directa e inversa, que difieren en el sentido de circulación del lodo inyectado.

Diseño del pozo

Un procedimiento estándar de diseño de un pozo implica establecer su profundidad, el diámetro del entubado, seleccionar el diámetro, apertura y longitud del filtro o rejilla (figura 7), escoger el método de desarrollo y limpieza y, por último, determinar la política de bombeo y operación del pozo.

La profundidad en un pozo se define principalmente por las características de la formación que se va a explotar. La profundidad alcanzada dependerá de los caudales, equipo de perforación disponible y costos, así como también de la regulación de los organismos estatales que tengan jurisdicción en el lugar.

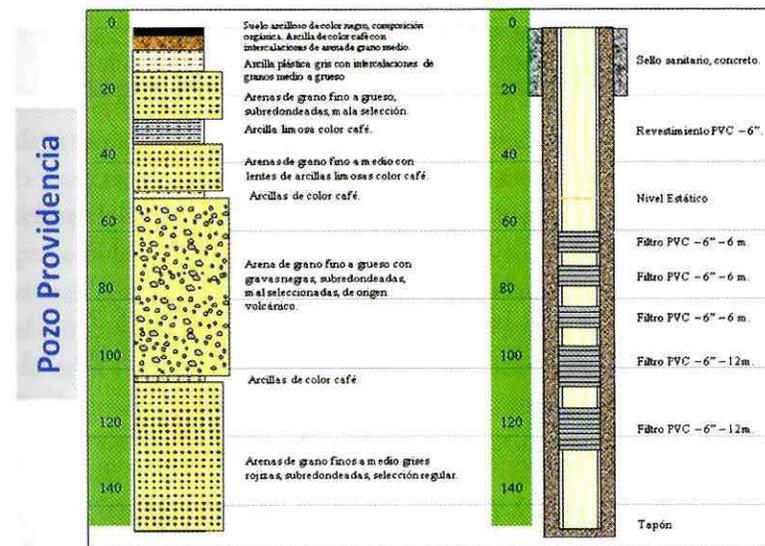


FIGURA 7. Columna y diseño de pozo profundo, municipio de Carlosama (Nariño).
Fuente. Ingeominas.

El entubado definitivo de un pozo desempeña, en general, dos misiones fundamentales: sostener las paredes de la perforación y constituir la conexión hidráulica que pone el acuífero en comunicación con la superficie de terreno o con los elementos de extracción correspondientes. El entubado puede ser todo del mismo diámetro o con diámetros distintos (pozo telescópico), escalonados en orden decreciente a profundidad.

El diámetro escogido debe ser lo suficientemente ancho para permitir el alojamiento de la bomba. El tamaño de ésta es el factor que controla el diámetro del entubado, por lo que es recomendable que sea dos unidades mayores que el diámetro nominal de la bomba. En todos los casos, sin embargo, ha de ser al menos un tamaño mayor que el de los tazones de la bomba. El diámetro debe ser aquel que cause las menores pérdidas por fricción. A continuación se puede observar los diámetros de entubados recomendados para diferentes caudales (tabla 1, Helweg, 1983).

TABLA 1. Diámetros de entubados recomendados

Caudal l/s	Diámetro nominal tazones (pul)	Diámetro óptimo (pul)	Diámetro Mínimo (pul)
<6	4	6 DI	5 DI
5-11	5	8 DI	6 DI
10-25	6	10 DI	8 DI
22-41	8	12 DE	10 DI
38-57	10	14 DE	12 DI
54-82	12	16 DE	14 DE
76-114	14	20 DE	16 DE
101-189	16	24 DE	20 DE

Fuente: Helweg, 1983.

El entubado debe soportar los esfuerzos de tracción y compresión producidos en el pozo y resistir la corrosión producida por aguas ácidas, o los ácidos empleados para desincrustar el pozo, en el caso de aguas con contenidos altos de carbonatos o hierro. En general, la mayoría de los fabricantes de tuberías especifican la relación diámetro-espesor de la tubería (RDE), que muestra los esfuerzos máximos que éstas pueden soportar.

La zona de admisión de agua al pozo se llama filtro y en algunas regiones se conoce también con el nombre de rejilla. Ésta permite que el agua entre al pozo e impide el paso del material fino, que dañaría la bomba y afectaría la calidad de agua. Existen diferentes tipos de filtros, cuya selección dependerá de la granulometría de las zonas acuíferas. Tres factores principales influyen en la selección del material de la rejillas: tipo de agua (corrosiva o incrustante), esfuerzos que soportará y costo.

Una acertada elección garantizará el buen funcionamiento de la captación. En la figura 8 se muestran varios tipos de filtros que existen en el mercado.



FIGURA 8. Tipos de filtros.

Desarrollo del pozo

Al finalizar la perforación, el desarrollo del pozo es la operación tendiente a eliminar las fracciones más finas del material acuífero y lodos de perforación en las inmediaciones de la rejilla. Con esto se estabiliza la roca o sedimento y se alcanza una granulometría más gruesa y uniforme en los filtros, lo cual aumenta la productividad del pozo. Este proceso constituye el verdadero acabado del pozo, con el que alcanza su máxima capacidad. Frecuentemente esta etapa no se completa con el debido rigor, lo cual acarrea consecuencias para la bomba, la calidad del agua y la vida útil del pozo. Existen muchas técnicas para desarrollo de pozos que dependen de las características de los acuíferos y el tipo de equipos usados en la perforación. Se utilizan métodos mecánicos (pistón y aire comprimido) y químicos (nieve carbónica, polifosfatos, ácidos o hielo), o ambos (López Geta et ál., 2004). Seguidamente se puede ver una instalación típica para el desarrollo con pistón.

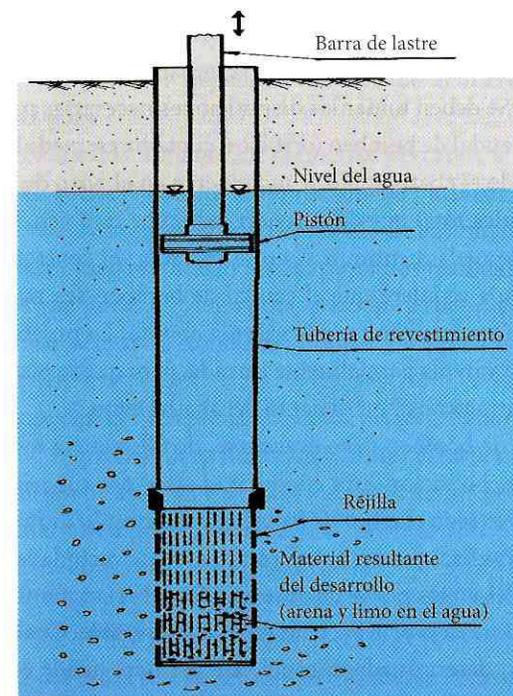


FIGURA 9. Instalación típica para el desarrollo con pistón.

Cualquier procedimiento debe facilitar la limpieza del pozo, de modo que la concentración de finos sea la mínima permitida para un uso particular. El desarrollo del pozo debe continuar hasta que se tenga un agua sin finos o material particulado. El tiempo requerido para esto depende de la naturaleza de la formación, tipo de rejilla y equipo empleado.

Prueba de bombeo

Una vez finalizada la construcción del pozo, es necesario realizar la prueba de bombeo, la cual tienen cuatro objetivos en orden creciente de complejidad: Determinación de las características del complejo acuífero-pozo, principalmente el caudal óptimo de explotación o eficiencia del pozo; los parámetros hidráulicos Coeficiente de Almacenamiento (S) y Transmisividad (T); estudio cuantitativo de las características particulares del acuífero –condiciones de frontera, estructura, heterogeneidad, drenaje, recarga, etc.–, y observación directa del efecto de la explotación sobre el acuífero.

Los ensayos de bombeo requieren una considerable inversión de tiempo y dinero, por lo que deben plantearse en forma cuidadosa de tal manera que pueda obtenerse de ellos la máxima cantidad de información posible. Se deben tomar las disposiciones necesarias para medir y controlar el caudal de bombeo (orificios, contadores, medidas volumétricas). Cuando el abatimiento se incrementa en el pozo de bombeo, la cabeza dinámica total que debe vencer la bomba también, lo que hace que el caudal pueda disminuir si no se controla. El control del caudal por una válvula requiere que el caudal de bombeo sea menor que el caudal que se tendría con toda la válvula abierta. La prueba debe empezarse con la válvula parcialmente cerrada, para que se pueda abrir de manera paulatina con el incremento del abatimiento.

El caudal de bombeo debe evacuarse, de tal manera que no afecte los resultados. Lo mejor sería conducir el agua por tubería hasta una distancia que exceda el radio de influencia esperando durante la prueba, lo que garantiza que no habrá recarga en las vecindades del bombeo. Los niveles en los pozos de observación deberían monitorearse en los días anteriores a la prueba, cuando esto sea posible. Cualquier traza de los niveles, determinada durante este período, puede extrapolarse al período de prueba, así como también corregir los abatimientos observados, si esto fuere necesario. Así mismo, se requiere tener las cotas topográficas de los pozos

Las primeras medidas deben tomarse con intervalos de minutos, y a medida que la prueba transcurre, pueden espaciarse a intervalos de horas.

La duración de la prueba depende del uso y confiabilidad de los datos que se obtendrán. Generalmente, las pruebas para estimar T y S duran más de 24 horas, sobre todo para acuíferos libres, por la influencia del drenaje vertical y del rendimiento específico; sin embargo, algunas duran 72 horas o más. También es buena práctica medir niveles después que el bombeo se ha interrumpido (recuperación), ya que esto puede aportar información sobre las características del acuífero.

Por lo regular, se hacen dos tipos de ensayos. El primero con un caudal constante, donde se mide la variación de los abatimientos con el tiempo; adicionalmente, se suspende el bombeo y se mide cómo se recuperan los niveles con el tiempo. El otro tipo de ensayo se hace con caudales variables, la llamada prueba de bombeo escalonada, que permite conocer la curva característica del pozo indispensable para hallar el caudal óptimo de explotación, la política de operación del pozo, necesaria para la selección de la bomba y los análisis económicos.

En la literatura existen varios métodos de interpretación de las pruebas de bombeo, que dependen del tipo de acuífero donde está construido el pozo.

Los pozos hechos a mano, de diámetros cercanos a un metro, la literatura más reciente (Mace, 1999) recomienda utilizar las *Slug-Test*. En estas pruebas se bombea el pozo hasta que el abatimiento alcanza su valor máximo y luego se miden los abatimientos residuales durante la recuperación del pozo. Existen varios métodos para interpretar los resultados de estos ensayos, como el de Cooper-Bredehoeft-Papadopoulos y el de Hvorslev.

Una vez hecha la interpretación de la prueba, hallando los parámetros S y T es posible determinar, aplicando ecuaciones analíticas, posibles interferencias de pozos, hallar el radio de influencia del pozo para un caudal y tiempo determinados, estudiar el funcionamiento del pozo y analizar cómo afecta los pozos vecinos.

Mantenimiento del pozo

Los pozos, como todas las estructuras en ingeniería, necesitan conservación o mantenimiento regular para garantizar un alto nivel de eficiencia y una vida útil mayor. Un programa de mantenimiento sistemático da

que excederán los costos de cualquier programa de mantenimiento. La experiencia ha mostrado que cuando la capacidad específica desciende en un 25%, es tiempo de iniciar un programa de rehabilitación, pues de lo contrario los costos de mantenimiento se incrementarán significativamente. La curva característica es el punto de referencia para saber si el pozo está perdiendo eficiencia, pero también servirá para diseñar los procedimientos más adecuados de rehabilitación.

Un programa de inspección y mantenimiento exige que el pozo esté equipado con sistemas de medición tanto del caudal como de niveles piezométricos. A continuación se muestra el diseño de un pozo equipado con tubería tomaniveles (figura 10).

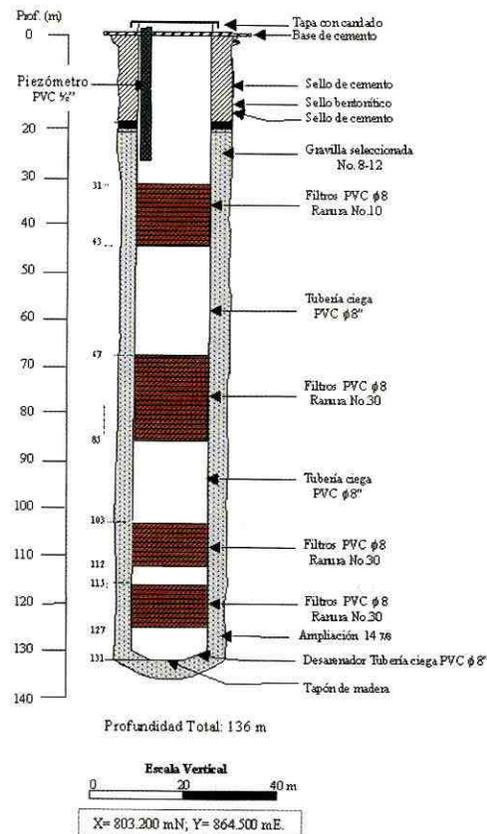


FIGURA 10. Diseño definitivo de un pozo, municipio de Rivera (Huila). Fuente: Ingeominas, 2003.

Varios factores pueden alterar y desmejorar las condiciones de un pozo. El primero es la reducción de su rendimiento, que puede deberse a la incrustación química de la rejilla en los alrededores del pozo. El taponamiento de la formación alrededor del pozo por partículas finas es la segunda causa del deterioro del funcionamiento del pozo. El tercer factor causante de la ineficiencia de los pozos es el bombeo de finos. La cuarta causa de falla del pozo puede ser el colapso estructural del entubado o rejilla. Este tipo de falla se produce a menudo por agua con bajos pH, que contienen altas concentraciones de sólidos disueltos y dióxido de carbono, los cuales se combinan para producir corrosión electrolítica a lo largo del entubado bajo el nivel freático. El último factor es la condición de la bomba. Errores en el diseño y construcción del pozo pueden causar graves daños a la bomba. Los álabes y la columna de la bomba son particularmente vulnerables al bombeo de arena.

Equipo de bombeo

La perforación y la terminación de un pozo sólo constituyen una parte de la solución del problema de obtención de agua en cantidad suficiente donde se desee usarla. Se requiere también elevar el agua a alturas mayores que el pozo, por lo cual hay que hacer la selección y montaje de una bomba apropiada. Una bomba es una máquina hidráulica que transforma la energía mecánica que recibe de algún tipo de motor en energía hidráulica, la cual se descompone en energía de posición, energía de presión y energía cinética. Los motores que suministran la energía mecánica pueden moverse a su vez por energía eléctrica, energía solar o energía eólica; para el bombeo de aguas subterráneas, las bombas más a menudo utilizadas son las centrífugas. Existen muchas variantes en su diseño. Originalmente se instalaban en el terreno o en un lugar próximo a éste, para operar por succión; pronto las adaptaron para colocarlas bajo el agua en los pozos, en un principio mediante largas extensiones del eje dentro de cajones sumergidos y luego en la forma compacta que hoy se conoce con el nombre de bomba turbina vertical. Con frecuencia, en sitios donde no se dispone de energía eléctrica, se usan bombas de mano para abastecer de agua a comunidades pequeñas, obviamente con caudales muy pequeños. Así mismo, en algunos sitios se utilizan compresores, que son también un tipo de

Los principales parámetros para selección de una bomba son diámetro del pozo, caudal deseado, cabeza dinámica total, requerimiento de potencia, fuente de energía, calidad del agua, costos a corto y largo plazos.

Se conoce como eficiencia la relación entre la potencia hidráulica y la potencia suministrada por el motor a la bomba. Todos los fabricantes de bombas suministran lo que se conoce como curvas características, que permiten conocer el caudal para una altura dinámica determinada. Además, proporcionan información sobre la eficiencia y potencia para un caudal particular. A continuación se muestran las curvas características para una bomba (figura 11).

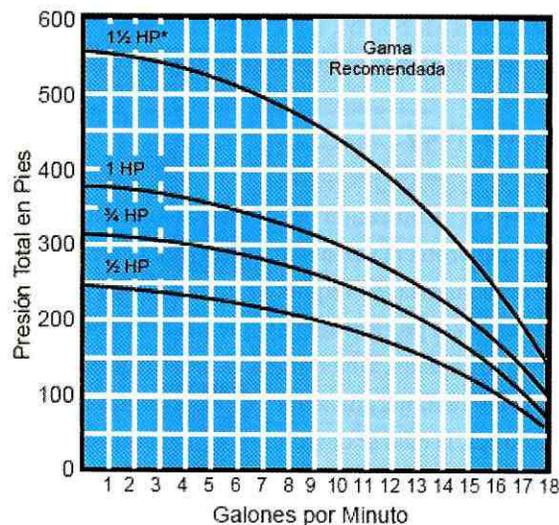


FIGURA 11. Curva característica de una bomba sumergible, 12 GPM.

Una buena política de operación del pozo necesita de análisis económicos y de demanda para determinar la capacidad de almacenamiento del agua frente a las horas de operación del pozo, lo que dará al propietario que haga un buen análisis económico, el tiempo óptimo de bombeo.

PROTECCIÓN Y GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Como se vio anteriormente, el agua subterránea constituye más de un 95% de las reservas de agua dulce en la Tierra, lo que la hace un recurso estratégico que es necesario proteger. Las tasas de aprovechamiento del recurso subterráneo son mayores cada día, mientras que la velocidad con que se mueve el agua subterránea depende de la estructura geológica y va desde tasas lentas un m/año a cientos de metros por día, factor que hay que tomar en cuenta en la planificación del recurso. La gestión de los recursos de agua subterránea tiene que equilibrar la explotación de un recurso complejo (en cuanto a cantidad, calidad e interacciones con el agua superficial) con las crecientes exigencias de los usuarios del agua y la tierra, quienes pueden representar una amenaza para la disponibilidad y calidad del recurso hídrico (Thuinof et ál., 2002).

La pregunta que debe responder todo responsable del manejo de los recursos hídricos subterráneos es a qué tasa y con cuáles costos (económicos y ambientales) es posible bombear y disminuir los almacenamientos y niveles subterráneos, sin que se presenten diversos problemas. A continuación se muestra un panorama de los principales problemas que se deben enfrentar.

Una baja de niveles piezométricos puede generar mayores costos de bombeo. Cuando esto sucede, se abandonan pozos y se utilizan otras fuentes de agua, lo que ocasiona una recuperación de los niveles piezométricos, que puede afectar las cimentaciones de edificaciones y causar dificultades para la utilización de sótanos y construcciones por debajo del nivel del terreno.

En zonas costeras, los bombeos excesivos pueden producir intrusión de la cuña salina, haciendo inutilizable el agua subterránea. Igualmente, en zonas costeras, de gran desarrollo urbano, la construcción de canales y marinas puede destruir lentes de arcilla y limo que aislaban los acuíferos favoreciendo la intrusión salina.

Los pozos mal contruidos o abandonados, sin adecuado sellamiento, pueden permitir conexiones entre acuíferos que favorecen la contaminación de las aguas subterráneas. Ésta también puede causarse por infiltraciones de lixiviados desde rellenos sanitarios o de disposición de desechos peligrosos.

Hay que tener en cuenta que es posible que la calidad del agua subterránea se degrade lentamente, y se pueden necesitar años y cuantiosos recursos económicos para recuperar sus condiciones iniciales (Asce, 1987). Según Adams & MacDonald (1995), un acuífero sobreexplotado tiene los siguientes indicadores principales: a) descenso de los niveles piezométricos; b) deterioro de la calidad del agua; c) subsidencia. Llamas (2004) considera además otros dos indicadores: d) interferencia con ríos y lagos, e) impacto ecológico en ecosistemas acuáticos que dependen del agua subterránea.

Se puede ver, entonces, que la mayoría de los problemas para el recurso hídrico subterráneo son causados por la acción del hombre, por lo que un buen manejo y desarrollo de éste podría disminuirlos o evitarlos, ya que la meta principal de gestión y manejo del agua subterránea, como de otros recursos naturales, son el desarrollo y conservación del recurso (Walton, 1970).

Agua subterránea recurso no renovable

Las aguas subterráneas como recurso “renovable”, es un concepto que se ha manejado a veces en forma errada. Estrictamente, las aguas subterráneas no son renovables. Pero en ciertos casos, los períodos que se necesitan para su recarga o renovación (cientos o miles de años) son demasiado grandes respecto a los calendarios de las actividades humanas en general y de la planificación de recursos hídricos en particular.

En estos casos es una buena práctica hablar de “Recursos de agua subterránea no renovables”. Recurso no renovable no implica necesariamente que el acuífero esté sin recarga o desconectado de los procesos hidrológicos que ocurren en la superficie, dado que recargas nulas son extremadamente raras (Unesco, 2006).

Como el agua subterránea forma parte de los recursos minerales, el rendimiento seguro (Unesco, 1978) es el caudal medio que se puede extraer de un acuífero durante un período de tiempo determinado, teniendo en cuenta condiciones físicas, económicas y legales, y las condiciones geológico-hidrológicas del territorio. Se debe tener claro que el agua subterránea está conectada directamente con la atmósfera y las aguas superficiales. Debido a esto los rendimientos seguros en aguas subterráneas no dependen sólo de las condiciones hidrogeológicas y

relacionados con cambios en los consumos de agua, que afectan a su vez las condiciones de recarga, la calidad del agua y los volúmenes de extracción (Unesco, 2004).

En este sentido, un manejo adecuado de un acuífero implica entender los procesos que en él se producen: cómo entrada y sale el agua, cómo circula, cuál es su calidad, de qué volúmenes se puede disponer, de tal manera que siempre haya una reserva del recurso. Una de las herramientas indispensables para este proceso son los balances hídricos utilizados para determinar la recarga, parámetro importante para una buena gestión del recurso subterráneo.

Balances hídricos

Un balance hídrico se establece siempre sobre la base de la ecuación de continuidad, en una unidad de análisis llamada volumen de control, que puede ser la cuenca, así:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Variación de almacenamiento}$$

Para hacer el balance hídrico se aplica el principio de la conservación de masa a este volumen de control, definido por unas condiciones de frontera durante un período de tiempo. Las entradas de agua a la cuenca pueden presentarse por precipitación (lluvia, nieve, granizo), aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas adyacentes y trasvase de agua de otras cuencas, agua proveniente de riegos o fugas de redes de acueducto o alcantarillado.

Las salidas de agua pueden producirse por evapotranspiración, infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos y los bombeos de los pozos, principalmente.

Un diagrama para el cálculo del balance se puede ver más adelante (figura 1).

La diferencia en las entradas y las salidas debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua. En la práctica, sólo se pueden medir algunos componentes (como la precipitación) y la mayoría deben determinarse por fórmulas empíricas. La mayor parte de los métodos de balance de agua determinan la recarga a partir de los demás componentes; este tipo de balances se puede hacer en la zona superficial, en la



FIGURA 1. Diagrama de balance hídrico.

Fuente: Samper, 1997a.

Tipos de balance de aguas

El grupo de técnicas que se fundamentan en el balance hídrico estima la recarga como el residuo de todos los otros flujos. El principio es que todos los otros flujos pueden medirse más fácilmente que la recarga. Lerner et ál. (1990) presentan algunos tipos de balance hídrico así:

Balace de humedad del suelo

La lluvia y la evapotranspiración potencial constituyen los datos de entrada al balance, y la evapotranspiración real y la recarga son los datos de salida.

Balances de río y canales de agua

La diferencia entre el flujo aguas arriba y aguas abajo, en un punto sobre un cauce, es igual a la recarga en caso de inexistencia de captaciones en el tramo.

Aumento del nivel freático

El volumen almacenado, producto de un aumento del nivel freático en un acuífero, es igual a la recarga, luego de tener en cuenta otros flujos de entrada y salida como pozos de bombeo y flujo de acuíferos.

Un aspecto crítico en el uso de un modelo de balance es el intervalo de tiempo (Lerner et ál., 1990). Si se utilizan largos intervalos de tiempo

po manteniendo los mismos parámetros, se pueden presentar valores de recarga muy bajos e incluso nulos. En la mayoría de los trabajos realizados en las últimas décadas se recomiendan intervalos de tiempos diarios para zonas húmedas, mientras que para zonas áridas se aconseja utilizar intervalos más cortos, menores de un día, como una noche o intervalos de tormentas (Lerner et ál., 1990)

Protección de la calidad del agua subterránea

El agua subterránea es, en muchos sitios, la única fuente de agua tanto para consumo humano como para uso agrícola, ganadero e industrial. Proteger su calidad no sólo es asegurar un recurso actualmente disponible, sino también garantizar su sostenibilidad para los años futuros.

Actividades humanas como la minería y la agricultura han aumentado en forma considerable la descarga de partículas, elementos y compuestos químicos sobre los recursos hídricos, entre éstos las aguas subterráneas. Desde la revolución industrial, los efluentes descargados sobre cursos hídricos constituyen otro importante factor de contaminación. Los insumos agrícolas se han incrementado enormemente en el siglo XX, contaminando tanto las aguas superficiales como las subterráneas. La irrigación, que aumenta la concentración de sales en las aguas, y la sobreexplotación de acuíferos costeros han producido intrusión de aguas salinas en éstos.

El término "peligro de contaminación del recurso hídrico subterráneo" se refiere a la probabilidad de que el agua subterránea de un acuífero se contamine, en concentraciones que superen los valores guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Foster et ál., 2002).

Fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea

En el ámbito mundial, los acuíferos están expuestos a una creciente contaminación, causada por el avance continuo de los procesos de urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y las explotaciones mineras, por lo que se requieren la formulación y la ejecución de acciones prácticas, destinadas a proteger la calidad natural del agua subterránea.

La contaminación del agua subterránea ocurre cuando el manejo de los contaminantes, líquidos o sólidos, generados en procesos industriales, domésticos, agrícolas, mineros, etc., se realiza de manera

nería, no se controla adecuadamente y excede la capacidad que tiene el suelo orgánico de atenuar sus efectos (Foster et ál., 2002).

Seguidamente, se presenta un resumen de las actividades y los compuestos más comunes que pueden generar alto grado de contaminación al agua subterránea (tabla 1).

TABLA 1. Contaminantes y fuentes de contaminación más comunes

Actividad/fuente de contaminación	Tipo de contaminante
Actividad agrícola.	Nitratos, amonio, pesticidas, organismos fecales.
Gasolineras.	Hidrocarburos, bencenos, fenoles.
Rellenos sanitarios y botaderos de residuos sólidos.	Amonio, hidrocarburos, metales pesados, salinidad.
Industrias metalúrgicas.	Hidrocarburos, cianuros, metales pesados, fenoles.
Pintura y esmaltes.	Hidrocarburos, metales.
Industria maderera.	Hidrocarburos.
Tintorerías.	Cloroetileno.
Manufactura de pesticidas.	Hidrocarburos, arsénico, fenoles.
Curtiembres.	Cromo, hidrocarburos, fenoles.
Exploración/extracción de gas y petróleo.	Hidrocarburos y cloruro de sodio.
Minería.	Hierro, metales pesados, sulfatos, aumento de acidez.

Fuente: Foster et ál., 2002.

Vale la pena anotar que las actividades económicas menores (microempresas, famiempresas e industrias poco desarrolladas) son las mayores fuentes de contaminación potencial de los acuíferos, dado que las grandes industrias tienen controles ambientales más estrictos por parte de las autoridades ambientales competentes y están sujetas a más revisiones de rutina.

Las fuentes de contaminación pueden ser puntuales: aquellas que penetran al acuífero en zonas localizadas, como por ejemplo los efluentes industriales, pequeños tanques de los cuales se derrama el contaminante, etc., o difusas, donde la zona de ingreso es un área extensa, como en el

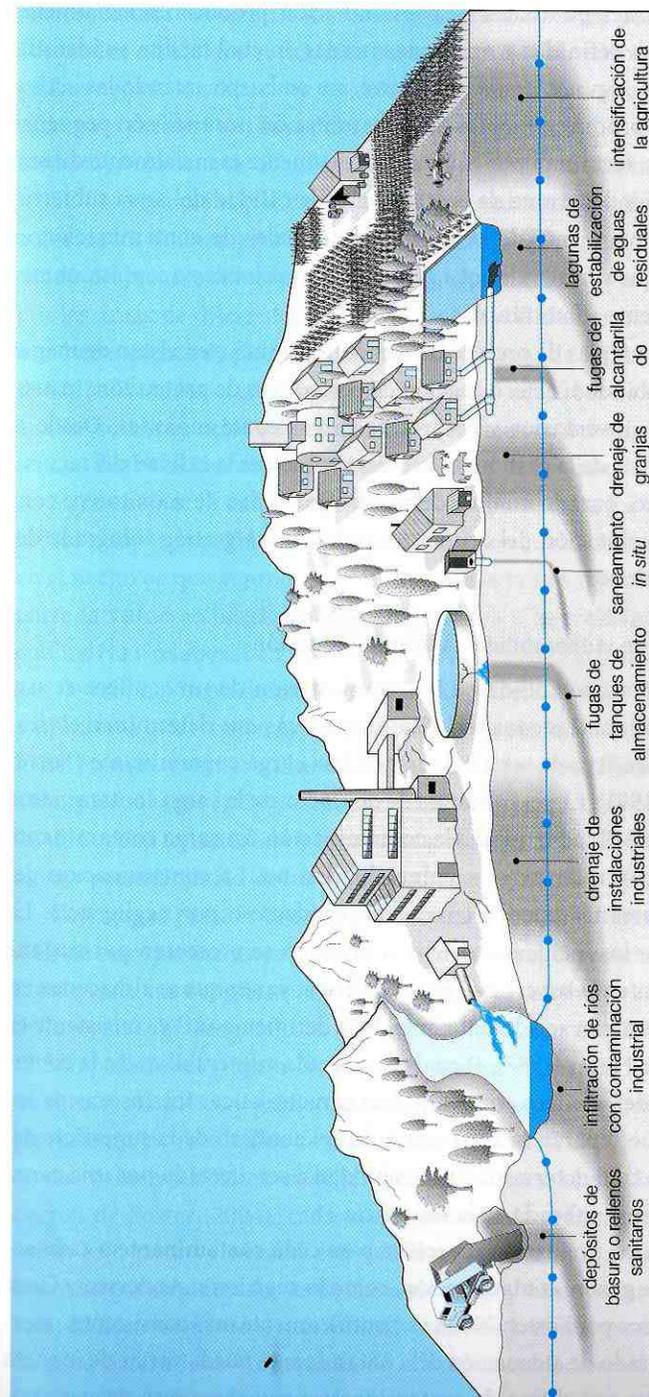


FIGURA 2. Usos del suelo que normalmente generan amenaza de contaminación del agua subterránea. Fuente: Foster et ál., 2003a.

Las fuentes puntuales de contaminación producen normalmente plumas bien definidas y más concentradas, lo cual facilita su identificación y, en algunos casos, su control; sin embargo, cuando las actividades, que producen fuentes de contaminación puntual, son pequeñas y múltiples, terminan por equivaler a una fuente esencialmente difusa. En cualquier programa de protección de la calidad del agua subterránea, el conocimiento de las fuentes potenciales de contaminación es crítico ya que son ellas las que generan las emisiones de contaminantes en el ambiente subterráneo.

Las estrategias de protección de acuíferos incluyen el uso de mapas de vulnerabilidad, determinación de perímetros de protección, instrumentación, inventarios y control de cargas contaminantes. Desde el punto de vista de la gestión, es necesario proteger la calidad del recurso subterráneo, para lo cual se deben diseñar redes de monitoreo, controlar la explotación del acuífero y realizar una gestión integrada del recurso hídrico.

Mapas de vulnerabilidad a la contaminación

El término vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se usa para representar las características intrínsecas que determinan el riesgo de un acuífero de ser afectado por una carga contaminante (Foster & Hirata, 1991). El riesgo resulta de dos factores: la carga contaminante y la vulnerabilidad natural a la contaminación. La carga contaminante se puede controlar pero la vulnerabilidad no. La contaminación del agua subterránea puede ocurrir por accidente o por negligencia. La mayoría de los incidentes de contaminación se presentan por sustancias dejadas en la superficie de los acuíferos, ya sea que se almacenen en ésta o que caigan accidentalmente. Una definición útil y consistente es la dada por Foster (1987), el cual considera la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a ser afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie.

Hacer una evaluación específica para cada contaminante o cada actividad que genere contaminación, como lo sugirieron Andersen y Gosk (1987, citados por Foster, 2002), es científicamente más consistente, puesto que el grado de atenuación del contaminante puede variar de manera significativa con el tipo de contaminante y con el proceso de contami-

nación en una situación dada. Sin embargo, no existen datos técnicos adecuados o recursos suficientes para lograr este objetivo ideal, por lo cual es necesario contar con un sistema menos refinado y más generalizado para definir la vulnerabilidad a la contaminación. Este sistema lo constituyen los mapas de vulnerabilidad a la contaminación.

El objetivo principal de un análisis de vulnerabilidad es dar a las autoridades ambientales bases técnico-científicas para el manejo adecuado del recurso subterráneo, por lo que los mapas donde se representan las áreas de diferentes grados de vulnerabilidad se convierten en una herramienta de planificación y control, tanto de explotación como de las actividades que se desarrollan sobre el acuífero. La escala en la cual se construyen los mapas depende del objetivo del estudio, la existencia, distribución, calidad y disponibilidad de los datos (Ríos, 2007).

Para estimar la vulnerabilidad a la contaminación, los métodos de índice y superposición son los más usados, los cuales se fundamentan en el hecho de que algunos parámetros importantes controlan en gran parte la vulnerabilidad del agua subterránea y la evalúan de manera cualitativa y relativa. La vulnerabilidad se interpreta por medio de rangos de valoración predefinidos para cada índice. Los métodos incluyen parámetros que reflejan las condiciones naturales del medio, las cuales lo hacen más o menos vulnerable a la contaminación. De acuerdo con Vrba y Zaporozec (1994), estos parámetros son características del suelo, de la zona no saturada y la saturada, recarga neta, profundidad del agua y permeabilidad de los acuíferos principalmente.

Los mapas pueden construirse manualmente, mediante la utilización de transparencias, utilizando la técnica de superposición de capas, donde cada capa contiene la información de un atributo. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) mejoran la técnica con la herramienta computacional (figura 3), que permite hacer más ágil el procesamiento, matemático y gráfico, de grandes volúmenes de información y representar los resultados de manera estética (Ríos, 2007).

La vulnerabilidad se clasifica en cinco clases, según la recomendación de Foster (2004), cada una representada gráficamente por un color: rojo para vulnerabilidad extremadamente alta, rosa para alta, amarillo para moderada, verde claro para baja y verde oscuro para muy baja. Existen numerosos métodos descritos en la literatura especializada para determinar vulnerabilidad a la contaminación: el Drastic, el GOD, RCB, entre otros.

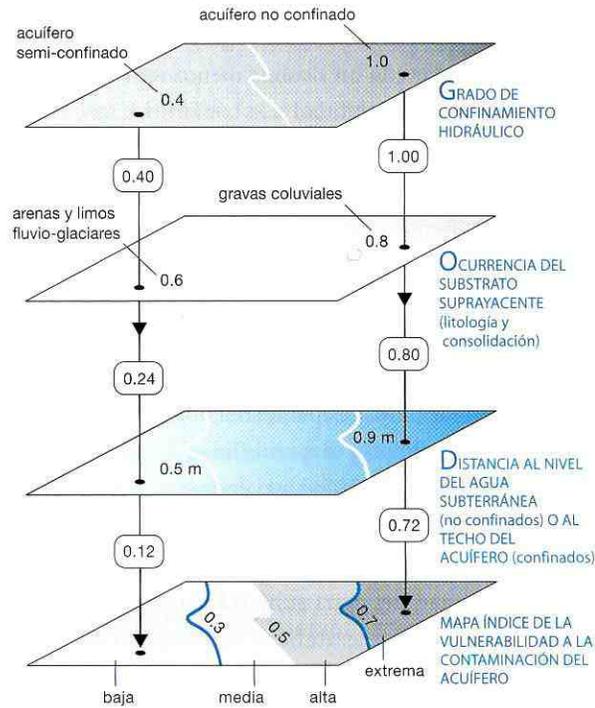


FIGURA 3. Generación de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, utilizando la metodología GOD, con base en las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las capas confinantes suprayacentes.

Fuente: Foster et ál., 2003a.

Los mapas de vulnerabilidad se combinan comúnmente con mapas de usos del territorio, calidad del agua y fuentes contaminantes, para identificar áreas vulnerables y planificar explotaciones agrícolas, emprendimientos urbanos o industriales y, en general, para clasificar zonas de riesgo al contaminación.

Para la selección de cuál método usar se deben considerar aspectos como la escala de trabajo, la disponibilidad de datos y la difusión y conocimiento de los métodos en las regiones. En trabajos semirregionales (escalas 1:100.000 a 1:500.000) regionales (1:500.000 y menores), cuya finalidad es planificar la preservación y el uso adecuado de los recursos naturales en regiones relativamente extensas, resultan prácticos los métodos que requieren menos variables.

Perímetros de protección de pozos públicos

Una revisión de las estrategias de protección de la calidad de las aguas subterráneas en varios países revela la existencia de dos líneas básicas de acción, casi siempre independientes. La primera se centra en el pozo o manantiales de abastecimiento público, estableciendo alrededor de la captación perímetros de protección, los cuales se determinan a partir del tiempo de tránsito, de la distancia de la fuente o del comportamiento hidráulico del acuífero. La otra línea es más amplia, dirigida al acuífero, y establece una cartografía de vulnerabilidad a la contaminación en relación con la importancia social y económica del recurso (Hirata, 2001), la cual se explicó anteriormente.

Restringir el uso del terreno que circunda a una fuente de captación de aguas subterráneas es una de las formas más antiguas de protegerla contra una contaminación indeseada (Hirata, 2001). Existen actualmente varias metodologías, tanto analíticas como numéricas, validadas y reportadas en diferentes estudios, que pueden aplicarse, dependiendo de la cantidad de información disponible, de la experiencia y conocimiento del usuario y de las restricciones que el mismo modelo presente. Los perímetros de protección de las captaciones de agua subterránea contra la contaminación consisten en la definición de zonas alrededor de los pozos en las que se prohíban o limiten determinadas actividades. Tales áreas deben extenderse en principio hasta las zonas de recarga y han de tener en cuenta estos aspectos (Custodio & Llamas, 1974): intensidad, régimen y localización de la recarga (zonas de recarga), características, disposición y propiedades hidráulicas del acuífero, y muy en especial propiedades de autoprotección contra la contaminación, controles naturales y artificiales existentes, posición y variaciones de la superficie freática y niveles piezométricos, límites en profundidad y laterales de la captación, así como posibles causas de contaminación. La Environmental Protection Agency (EPA) señala una amplia gama de metodologías para la determinación de perímetros de protección de pozos en el documento EPA-440/5-93. Dichas metodologías van desde métodos analíticos muy simples, hasta complejos modelos numéricos de transporte de contaminantes.

En la figura 4, se observa el área de influencia o área de protección de un acuífero confinado.



FIGURA 4. Esquema idealizado de zonas sanitarias y perímetros de flujo de agua subterránea para proteger a un pozo en un acuífero confinado. Fuente: Foster et ál., 2003a.

Estrategia para la gestión de aguas subterráneas

La gestión de un sistema acuífero implica la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales relacionadas con restricciones a los volúmenes de extracción, localización y operación de pozos y otras estructuras de captación de agua, considerando aspectos sociales, económicos y ambientales. La gestión no toca solamente aspectos como la cantidad del recurso, sino también su calidad, lo cual implica regulaciones sobre el uso de agroquímicos, zonas de protección de pozos, entre otras. Situaciones particulares se presentan en las zonas costeras, donde la intrusión salina es un factor fundamental para considerar (Zektser, 2004). Disponer de buena información sobre niveles, caudales y calidad del agua, junto con las posibilidades de uso conjunto de aguas superficiales subterráneas hace que las decisiones que se tomen acerca de los sistemas acuíferos sean más acertadas.

Monitoreo de aguas subterráneas

El monitoreo de las aguas subterráneas es uno de los más importantes métodos para soportar la estrategia y políticas de protección y conservación del recurso hídrico subterráneo. La implementación de programas de monitoreo (calidad y cantidad) ayuda a mejorar la planeación, desarrollo, protección y manejo de las aguas subterráneas, anticipando o controlando la contaminación y los problemas de sobreexplotación

En contraste con el agua superficial, los cambios en la cantidad y calidad del agua subterránea son, con frecuencia procesos muy lentos. Puesto que no es posible determinar estos cambios simplemente con un recorrido breve de campo, se requiere utilizar redes de monitoreo e interpretar los datos obtenidos. El monitoreo de la respuesta de un acuífero y de sus tendencias de calidad es básico para lograr una gestión eficaz del agua subterránea y cumplir con la principal meta de gestión, o sea, controlar los impactos de la extracción del agua subterránea y de las cargas de contaminantes (Tuinhof et ál., 2002). En la tabla 2, tomada de la misma referencia, se hace un listado de las variables que hay que medir para la gestión del recurso.

TABLA 2. Tipos de datos que se requieren en la gestión del agua subterránea

Tipo de datos	Información básica inicial (información secundaria)	Datos en el campo (información primaria)
Ocurrencia del agua subterránea y propiedades del acuífero	Registros de pozos de producción (perfiles hidrogeológicos, niveles y calidad instantáneos del agua subterránea). Pruebas de bombeo.	Monitoreo del nivel de agua subterránea. Monitoreo de la calidad del agua.
Uso del agua subterránea	Instalaciones de bombeo de pozos de producción. Inventario de los usos del agua. Registros y pronósticos de población. Consumo de energía para riego.	Monitoreo de la extracción de pozos de producción (directo o indirecto). Variación del nivel de agua subterránea en los pozos.
Información de apoyo	Datos climáticos. Inventario de uso del suelo. Mapas y secciones geológicos.	Medición de flujo en ríos. Observaciones meteorológicas. Imágenes de satélites con los usos del suelo.

Una red de monitoreo está formada normalmente por un conjunto de pozos de observación acoplado con una selección de pozos de extracción. Una vez establecido el modelo conceptual del sistema, se deben tener claros los objetivos y metas que se quieren lograr con la red de monitoreo, considerando el marco legal. El modelo conceptual podrá dar lineamientos sobre la frecuencia de las mediciones y los posibles sitios de localización de pozos de monitoreo para la conformación de la red.

El monitoreo de aguas subterráneas comprende el proceso de recolección, análisis y almacenamiento de datos en el tiempo, formando registros históricos de las variables de interés que se desean conocer y que tienen un objetivo específico. Seguidamente se presentan unas recomendaciones generales para un monitoreo exitoso de aguas subterráneas (tabla 3).

Las orientaciones para el muestreo y manejo de muestras de aguas subterráneas se abordan en la *Guía para el muestreo de aguas subterráneas*, que forma parte de la Norma Técnica Colombiana (Icontec) NTC-ISO 5667-11. En ella se especifican equipos, materiales, procedimientos de muestreo, frecuencia y tiempo de muestreo, selección de métodos de muestreo, transporte, preservación y almacenamiento de las muestras, precauciones de seguridad e identificación y registro de las muestras.

El método más directo, y generalmente confiable, para el monitoreo controlado de las aguas subterráneas es la instalación de pozos de monitoreo, perforados a propósito a una profundidad dada con un filtro situado a un intervalo de profundidad conocido, correspondiente a una zona acuífera específica. Una vez que se instala el pozo de manera correcta, ofrece la posibilidad de obtener muestras representativas de aguas subterráneas a un costo operacional bajo.

En contraste con la mayoría de los pozos de producción de agua, aquéllos específicamente diseñados para monitoreo a menudo se finalizan con materiales inertes (tales como PVC, teflón, acero inoxidable), son de diámetros más pequeños (normalmente menos de 100 mm y en algunos casos menos de 50 mm) y tienen un área de entrada más limitada (normalmente menos de 5 m y, en algunos casos, apenas 1 m).

TABLA 3. Reglas básicas para programas de monitoreo de aguas subterráneas

Diseño de la red	<ul style="list-style-type: none"> • El programa debe adaptarse a objetivos previamente definidos. • Debe conocerse claramente el sistema de flujo de agua subterránea. • Los sitios de muestreo y los parámetros por monitorear se deben seleccionar de acuerdo con los objetivos.
Implementación del sistema	<ul style="list-style-type: none"> • Deben utilizarse pozos de extracción y observación construidos apropiadamente. • El equipo de campo y las instalaciones de laboratorio deben ser acordes con los objetivos. • Debe establecerse un protocolo completo de operación, así como un sistema de manejo de datos. • Debe integrarse el monitoreo del agua subterránea y el de agua superficial.
Interpretación de los datos	<ul style="list-style-type: none"> • Debe verificarse regularmente la calidad de los datos mediante controles internos y externos. • A los tomadores de decisiones deben proporcionárseles conjuntos de datos ya interpretados y que sean relevantes para la gestión. • El programa debe evaluarse y revisarse periódicamente.

Fuente: Tuinhof et al., 2002.

El procedimiento de construcción de pozos de monitoreo sigue la misma secuencia que los de producción; esto es, perforación, instalación del filtro del pozo junto con el revestimiento sólido y colocación de un sello sanitario.

Las especificaciones técnicas para la construcción de pozos de monitoreo de aguas subterráneas se encuentran en la Norma Técnica Colombiana Icontec NTC 3948. En esta norma se detallan metodologías para la construcción de piezómetros, métodos de perforación, materiales y procesos de limpieza y desarrollo. En todos los casos, los pozos de monitoreo deben estar georreferenciados y nivelados, cumplir con disposiciones sanitarias (cerramiento, tapa de seguridad y sello sanitario), tener zonas de protección definidas, tener una ficha en la base de datos del sistema de monitoreo que incluya codificación, fotografía del pozo, características de diseño, fecha de instalación, propiedades hidráulicas del acuífero y del pozo obtenidas a partir de pruebas de bombeo, y descripción de sistema de recepción y transmisión de datos, fechas de limpieza, desarrollo y mantenimiento, estas últimas de carácter opcional.

Hay que tener especial cuidado con la construcción y características de los pozos de monitoreo, dado que se pueden cometer errores en el monitoreo por la interceptación de varios estratos o niveles acuíferos.

Control de sobreexplotación

Dadas las ventajas ya mencionadas del uso del agua subterránea, y a la necesidad de ésta ante la escasez de recursos superficiales, se presentan en algunas ocasiones problemas relacionados con la alta explotación del recurso, lo que genera cambios en las condiciones naturales del terreno y problemas futuros en el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo. Algunos autores llaman "sobreexplotación" a este uso intensivo del agua subterránea, mientras que otros, por razones técnicas y de interpretación, lo denominan explotación intensiva del recurso (Custodio & Llamas, 1996).

Hay un desarrollo intensivo de aguas subterráneas cuando se extrae una fracción significativa del recurso renovable interanual de los acuíferos, que modifica apreciablemente su régimen hidrogeológico, o causa impactos ecológicos o socioeconómicos significativos, o se producen cambios importantes en las interacciones agua superficial-agua subterránea. A continuación se enuncian las principales consecuencias que generan la extracción intensiva del agua subterránea desde los puntos de vista social, ambiental, técnico y económico.

Descenso de los niveles piezométricos

La extracción de aguas subterráneas genera inevitablemente descensos en los niveles piezométricos del acuífero, sea en forma local o distribuida en el área; estos descensos pueden llegar hasta un nivel en que no se recuperan, lo que sucede cuando el bombeo es continuo y los caudales medios de explotación exceden la magnitud de la recarga. En situaciones extremas, puede causar el agotamiento de las reservas.

Compactación inducida del terreno

Dado el vacío que se genera en el suelo por la extracción del agua se puede llegar a una redistribución irreversible de los granos y de los poros, lo que genera asentamientos en el suelo, fenómeno que se conoce como subsidencia. Estos asentamientos pueden generar afecciones o edificaciones, sistemas de acueductos, tuberías de gas y estructuras civiles en general.

Aumento de los costos de explotación

Como la profundidad del agua aumenta cuando hay explotación intensiva del agua subterránea, se genera costos económicos extras para su extracción; la disminución de los niveles incrementa la profundidad de elevación del agua y por lo tanto el consumo de energía, y posiblemente la longitud de tubería y las especificaciones de la bomba deban cambiarse.

Deterioro de la calidad del agua

La explotación puede generar flujos hacia el acuífero de agua de baja o mala calidad, originando procesos de mezcla; esta agua puede tener un origen natural o corresponder a procesos de contaminación. Uno de los casos más frecuentes de este efecto se debe a la explotación desmesurada en acuíferos costeros, donde el descenso de los niveles piezométricos por efecto de la extracción del agua genera el avance de la cuña salina de forma local o en grandes áreas.

Abandono de pozos

En algunos casos, el descenso de los niveles piezométricos es tan crítico que se produce el abandono de pozos por problemas de cantidad o también por calidad agua. El caso del acuífero costero ya mencionado puede conllevar el abandono de pozos y la construcción de otros en

Modificaciones inducidas en el régimen de los ríos

En el caso de que un acuífero esté conectado hidráulicamente con un río, la alta explotación del agua subterránea puede cambiar el régimen de la corriente superficial hasta llegar al punto de secarla en períodos de verano, con un impacto ambiental y ecológico incalculable. El mismo efecto puede producirse cerca de zonas húmedas, nacimientos y lagos.

Problemas legales

La sobreexplotación afecta la cantidad del agua subterránea, aparte de que pueden generarse problemas legales entre vecinos o usuarios del recurso por la disminución de la oferta. Los manantiales reducen su caudal en período seco, coincidiendo con el aumento de la demanda.

Es necesario, entonces, tomar medidas preventivas y de control del régimen de aprovechamiento de agua subterránea para evitar este tipo de problemas. Una de ellas es el seguimiento continuo de los pozos actuales, verificando sus caudales de explotación y comparándolos con los otorgados por las concesiones. Así mismo, autoridades ambientales deben estar atentas a los sitios de perforación de nuevos pozos, para evitar interferencias, disminuciones de caudal y un aumento exagerado de la densidad de pozos en un área.

Gestión de acuíferos costeros

Cerca del 70% de la población mundial habita en zonas costeras. A causa del crecimiento económico y poblacional, la demanda de agua potable se hace mayor. Con el agua superficial cada vez más contaminada y disminuida, las comunidades costeras centran su atención en la utilización del agua subterránea para satisfacer sus diversas necesidades de agua potable. Los manejos inapropiados de los acuíferos costeros pueden tener efectos irreversibles, hasta el punto de causar el deterioro total del recurso agua. En los diferentes estamentos y agencias ambientales alrededor del mundo se ha comenzado un monitoreo exhaustivo y la implementación de proyectos de prevención de intrusión salina, además de que se han redoblado los esfuerzos para optimizar la planificación y el manejo de acuíferos costeros (Cheng & Ouazar, 2004).

La planificación de acuíferos costeros requiere un enfoque similar al tradicional, realizado en áreas continentales. Ambos tienen

elementos de planificación en común: problemas de rendimiento de acuíferos, interferencia entre pozos de bombeo, interacción acuífero-río y contaminación de aguas superficiales están entre los más comunes y difíciles de resolver. Los acuíferos situados a lo largo de la costa, sin embargo, tienen una complicación adicional para el proceso de manejo: el potencial de intrusión salina que puede presentarse en porciones de acuíferos costeros cuya consecuencia es la inutilidad del recurso para consumo. Los acuíferos costeros, tienen un comportamiento condicionado por la cabeza hidráulica impuesta por el nivel del mar y la mayor densidad del agua salina respecto a la dulce. En la mayoría de estos sistemas el flujo de agua subterránea fluye naturalmente hacia el mar, debido al potencial producido por la recarga del agua dulce. En general, estos acuíferos están ubicados en zonas al extremo final de grandes cuencas de carácter sedimentario, las cuales presentan granulometrías medias y finas y grandes cambios laterales de facies litológicas; por ello forman acuíferos con permeabilidades moderadas a bajas y con una elevada heterogeneidad vertical y lateral; además, son zona de descarga de líneas de flujo de largo y medio recorrido (Manzano, 2002). Las actividades antrópicas pueden afectar tanto la cantidad como la calidad del agua subterránea en zonas costeras. En lo relativo a cantidad, el principal problema tiene que ver con la sobreexplotación del acuífero en la propia zona o en zonas adyacentes y a la falta de planificación de las captaciones subterráneas. Con frecuencia las actividades responsables del impacto se producen en zonas alejadas (a veces a centenares de kilómetros) o incluso ocurrieron hace décadas o centenares de años.

El flujo de agua dulce que descarga al mar cumple un papel esencial en el mantenimiento de las condiciones de equilibrio de la interfaz agua salada-agua dulce en un acuífero costero, la cual se presenta como una zona de mezcla que puede abarcar desde unos pocos decímetros hasta decámetros. Si dicho flujo se modifica por la extracción de agua dulce subterránea, y si dicha extracción no está compensada por un aumento de la recarga (natural o artificial), se producirá un descenso igual a la cantidad de la descarga de agua dulce al mar (Bocanegra, 2002).

Se define como cuña de agua salada o cuña salina la masa de agua salada de gran longitud con sección en forma de cuña, apoyada en la base del acuífero y con el vértice tierra adentro. La intrusión salina es

el movimiento de la cuña salina dentro del acuífero y frecuentemente la causa el bombeo desde pozos costeros. El agua marina que se introduce en el acuífero tiene altas concentraciones de sólidos disueltos totales y ciertos compuestos inorgánicos, por lo que no es apta para el consumo humano y otros usos antropogénicos (figura 5). La intrusión salina reduce el almacenamiento de agua subterránea potable y, en casos extremos, obliga al abandono de pozos de abastecimiento cuando concentraciones de iones disueltos exceden los estándares de agua para consumo humano (Marlow, 2005).



FIGURA 5. Esquema de acuífero costero y cuña de agua salina. Fuente: Foster et ál., 2003b.

Gestión integrada de recursos hídricos

Se denomina uso conjunto de los recursos hídricos a la estrategia de gestión del recurso en la que el agua subterránea y el agua superficial se emplean paralelamente, y se aprovechan las ventajas comparativas

Cuando se explota el agua subterránea en un acuífero superficial, se induce una recarga adicional a la natural a costa de la escorrentía superficial y subsuperficial, y adicionalmente se reduce el flujo base que aporta el almacenamiento del subsuelo a los cauces de las corrientes superficiales (Vélez, 2001). En otros casos, cuando la recarga natural de los acuíferos se realiza con agua procedente de las corrientes superficiales y se hace un incremento en la captación y uso de aguas superficiales, disminuye el agua disponible para la recarga y se presentan limitaciones para la cantidad de agua que se puede obtener del almacenamiento en el acuífero.

Tradicionalmente, en Colombia las autoridades ambientales han considerado en forma separada las aguas superficiales y las subterráneas, lo que ha llevado a la reglamentación desarticulada del aprovechamiento de este recurso, hasta el punto de que en la mayoría de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios en Colombia no se hacen consideraciones especiales con respecto al agua subterránea, sino que tan sólo se ordena el territorio tomando en cuenta las quebradas y cuerpos de agua superficial.

Se hace necesario, entonces, que se generen mecanismos y herramientas de apoyo que permitan a las autoridades ambientales, municipales y tomadores de decisiones realizar un manejo integral de los recursos hídricos, considerando en conjunto las aguas superficiales y subterráneas, tanto en cantidad como en calidad.

La gestión conjunta afronta un problema de optimización de la gestión del recurso hídrico, que normalmente sólo contempla aspectos de cantidad ligados a consideraciones de carácter económico y a la faceta legal que lo hace viable. Este supuesto no implica que, en determinados casos, se tengan en cuenta hipótesis de gestión fundamentadas en la mejora de la calidad del recurso hídrico o en la conservación del medio ambiente. No obstante, es preciso indicar que los aspectos cualitativos del uso conjunto no se han desarrollado lo suficiente (Custodio, 2000, en Murillo, 2002).

Los embalses superficiales y los subterráneos se consideran semejantes desde el punto de vista de que almacenan agua y tienen mecanismos de recarga y descarga, con particularidades y diferencias hidráulicas y dinámicas. A continuación es posible observar algunas diferencias.

TABLA 4. Aspectos comparados del recurso agua subterránea y agua superficial

Aspecto	Agua subterránea	Agua superficial
Características hidrológicas		
Volumen de almacenamiento	Muy grandes	Pequeños o moderados
Zonas de recursos	Relativamente no restringidos	Restringidas a cuerpos de agua
Velocidades de flujo	Muy bajas	Moderadas a altas
Tiempos de residencia	Generalmente de décadas o siglos	En su mayoría de semanas a meses
Propensión a sequía	Generalmente baja	Generalmente alta
Pérdidas por evaporación	Bajas y localizadas	Altas en los embalses
Evaluación de recursos	Costo alto e incertidumbre considerable	Costo bajo y a menudo menor incertidumbre
Impactos por extracción	Retardos y dispersos	Inmediatos
Calidad natural	Generalmente alta	Variable
Vulnerabilidad a la contaminación	Protección natural variable	Sin protección, en gran medida
Persistencia de la contaminación	A menudo extrema	Principalmente transitoria
Factores socioeconómicos		
Percepción del público	Recurso mítico, impredecible	Recurso estético, predecible
Costo de desarrollo	Generalmente modesto	A menudo alto
Riesgo por desarrollo	Menos del que se percibe a menudo	Más del que se supone a menudo
Estilo del desarrollo	Combinación de público y privado	Público, en gran medida

Fuente: Tuinhof et ál., 2002.

El agua superficial y el agua subterránea están incluidas en el mismo ciclo hidrológico, es decir, son recursos aprovechables del agua en la Tierra con diferentes características, lo que hace que su manejo sea diferente, y estas diferencias también se convierten en los fundamentos

técnicos para lograr el uso conjunto de los recursos. Para plantear programas de aprovechamiento paralelo y óptimo de aguas subterráneas se requieren la investigación y el conocimiento detallado de la relación entre los almacenamientos.

Aplicación de instrumentos económicos a la gestión integral

Una de las herramientas que ayudan al uso óptimo del recurso son los instrumentos económicos, los cuales están justificados en la disponibilidad de agua (uso) y en la sostenibilidad (contaminación y agotamiento).

El objetivo de la introducción de instrumentos económicos en la gestión del agua es mantener una estructura de administración eficaz del recurso e influir en el comportamiento de los usuarios para aumentar la eficiencia y el uso racional del agua y, al mismo tiempo reducir la contaminación.

Los instrumentos económicos pueden proporcionar incentivos para asignar o usar el agua subterránea de manera más eficiente, con lo que se contribuye a estabilizar los niveles al reducir la explotación, y disminuir los riesgos de que se presenten impactos negativos y conflictos sociales. Hay dos categorías relevantes de instrumentos económicos relacionados con el agua subterránea que se basan en lo siguiente (Kemper et ál., 2002):

- Cambiar los costos de extracción del agua subterránea por medio de la determinación directa de precios a través de cuotas de extracción (caso colombiano, Decreto 155 de 2004), determinación directa de precios mediante el aumento de las tarifas de energía y la introducción de mercados de agua.
- Dar incentivos económicos para ciertas actividades por medio de modificaciones a las políticas agrícolas y de comercio de alimentos y subsidios para fomentar el uso de tecnologías para lograr ahorros reales del agua (uso eficiente y ahorro del agua, Ley 373 de 1997).

Entre los instrumentos económicos existentes en Colombia se destaca la tasa por uso del agua, instrumento económico que tiene como fin de mejorar la utilización que se hace del agua, evitando su escasez y

garantizando la eficiencia económica y ambiental (artículo 43 de Ley 99 de 1993), el cual está reglamentado en el Decreto 155 de 2004. Según Ortiz (2006), aunque este instrumento económico está diseñado y es de obligatoria implementación en Colombia, no genera la señal deseada y tiene múltiples dificultades técnicas para su aplicación.

Para el control de la contaminación del agua subterránea se recomienda tener como base el principio contaminador-pagador, por el cual a un usuario se le cobra por la cantidad de contaminación que genera. En el caso colombiano, el Decreto 3100 de 2003 (tasa retributiva) está orientado a controlar vertimientos a cuerpos de agua, pero su aplicación está orientada principalmente a los cuerpos de agua superficial.

LEGISLACIÓN COLOMBIANA SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos está amenazada en el país por múltiples factores: contaminación, alta urbanización que afecta las zonas de recarga, deficiente construcción de pozos sépticos en zonas de creciente expansión urbana y bajo porcentaje de cobertura de sistemas de alcantarillado, disposición inadecuada de residuos industriales y mineros, contaminación producida por la actividad petrolera, intrusión salina en los acuíferos costeros, inadecuado uso del suelo, desprotección de zonas de recarga, ausencia de planes de ordenamiento de cuencas.

Con el objeto de establecer un uso más racional y proteger el recurso hídrico en el país, se han promulgado leyes y decretos para regular su explotación y gestión. La normatividad sobre el recurso hídrico subterráneo en Colombia está reglamentado por la Constitución Política de Colombia (artículos 78-80), Decreto Ley 2811 de 1974, Decretos 1541 de 1978, Ley 9 de 1979, Decreto 1594 de 1984, la Ley 99 de 1993, Decreto 1524 de 1995, Ley 373 de 1997, Decreto 901 de 1997, Ley 430 de 1998, Ley 599 de 2000, Decreto 302 de 2000, Decreto 1713 de 2002, Decreto 1729 de 2002, Decreto 3100 de 2003, Decreto 155 de 2004, Decreto 838 de 2005.

Los principales aspectos que aborda la legislación colombiana en el tema de aguas subterráneas se enuncian a continuación.

Competencia de autoridades ambientales

El artículo 265 del Decreto 1541 de 1978 le da a Ingeominas la responsabilidad de levantar el mapa hidrogeológico del país: "El Instituto de Investigaciones Geológico Mineras, Ingeominas, levantará el mapa general hidrogeológico del país con los datos que le suministren las entidades mencionadas en el artículo anterior. Podrá igualmente utilizar los informes de que trata el artículo 152 de este decreto y aquellos que deban aportar otras entidades relacionadas con la ejecución de trabajos para alumbrar aguas subterráneas".

La Ley 99 de 1993 fijó la competencia de Ingeominas, el Ideam y las corporaciones ambientales para el manejo del recurso hídrico subterráneo.

Ingeominas tiene como función realizar el inventario y la caracterización de las zonas más favorables para la acumulación de minerales, fuentes de aguas subterráneas, recursos geotérmicos e hidrocarburos en el subsuelo del territorio. Así mismo, restringe su margen de acción a la exploración básica y caracterización de la oferta hídrica subterránea del país a una escala regional de 1:100.000 a 1:50.000. Proyectos específicos y de abastecimiento de agua a pequeñas comunidades, y proyectos orientados al manejo integrado de recursos hídricos subterráneos, son competencia del Ideam y de las corporaciones autónomas regionales.

El artículo 17 de la citada ley dice textualmente: “El Ideam deberá obtener, analizar, estudiar, procesar y divulgar la información básica sobre hidrología, hidrogeología...”, y en el parágrafo 4 de este artículo se enuncia lo siguiente: “Trasládense al Ideam las funciones que en materia de aguas subterráneas tiene asignadas el Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química, Ingeominas, sin perjuicio de las actividades que el Ingeominas continuará adelantando dentro de los programas de exploración y evaluación de los recursos del subsuelo”.

Las funciones de las corporaciones autónomas regionales respecto a la administración de las aguas subterráneas las fija el artículo 31 de la misma ley, numeral 9: “Otorgar concesiones, permisos, autorizaciones y licencias ambientales requeridas por la ley para el uso, aprovechamiento o movilización de los recursos naturales renovables o para el desarrollo de actividades que afecten o puedan afectar el medio ambiente. Otorgar permisos y concesiones para aprovechamientos forestales, concesiones para el uso de aguas superficiales y subterráneas y establecer vedas para la caza y pesca deportiva”.

Concesiones de agua subterránea

El tema de concesiones se trata inicialmente en el Decreto Ley 2811 de 1974, en sus artículos 151, 152 y 153, así:

Artículo 151. El dueño, poseedor o tenedor tendrá derecho preferente en el aprovechamiento de las aguas subterráneas existentes en su predio, de acuerdo con sus necesidades. Se podrá otorgar concesión de aprovechamiento de aguas subterráneas en terreno distinto al del peticionario, para los usos domésticos y de abrevadero, previa la

en el suyo en profundidad razonable y cuando su alumbramiento no contraviniera alguna de las condiciones establecidas en este título. La concesión se otorgará sin perjuicio del derecho preferente del dueño, tenedor o poseedor del terreno en donde se encuentran las aguas, que podrá oponerse a la solicitud en cuanto lesione ese derecho, siempre que esté haciendo uso actual de las aguas o se obligue a hacerlo en un término que se le fijará según el tipo y la naturaleza de las obras necesarias y en cuanto el caudal subterráneo no exceda las necesidades de agua del predio.

Artículo 152. Cuando se compruebe que las aguas del subsuelo de una cuenca o de una zona se encuentran en peligro de agotamiento o de contaminación, o en merma progresiva y sustancial en cantidad o calidad, se suspenderá definitiva o temporalmente el otorgamiento de nuevas concesiones en la cuenca o zona; se podrá decretar la caducidad de las ya otorgadas o limitarse el uso, o ejecutarse, por cuenta de los usuarios, obras y trabajos necesarios, siempre que medie el consentimiento de dichos usuarios, y si esto no fuere posible, mediante la ejecución de la obra por el sistema de valorización.

Artículo 153. Las concesiones de aprovechamiento de aguas subterráneas podrán ser revisadas o modificadas o declararse su caducidad, cuando haya agotamiento de tales aguas o las circunstancias hidrogeológicas que se tuvieron en cuenta para otorgarlas hayan cambiado sustancialmente.

Artículo 154: El titular de concesión de aguas subterráneas está obligado a extraerlas de modo que no se produzcan sobrantes.

El Decreto 1541 de 1978 trata sobre otros aspectos adicionales de las concesiones de agua subterránea, en tanto que el artículo 155 hace la excepción de la obligatoriedad de la concesión para usos domésticos, así: “Los aprovechamientos de aguas subterráneas, tanto en predios propios como ajeno, requieren concesión del Inderena, con excepción de los que utilicen para usos domésticos en propiedad del beneficiario o en predios que éste tenga posesión o tenencia”. Los artículos 156 a 163 tratan aspectos adicionales sobre las concesiones. El artículo 178 del mismo decreto define los aspectos principales que se deben considerar en la prospección de aguas subterráneas.

Según la Ley 99 de 1993, en su artículo 31, numeral 9, el otorgamiento de las concesiones de aguas subterráneas es competencia de las

En el numeral 12 del mismo artículo les otorga también funciones de seguimiento y control: “Ejercer las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo, el aire y los demás recursos naturales renovables, lo cual comprenderá el vertimiento, emisión o incorporación de sustancias o residuos líquidos, sólidos y gaseosos, a las aguas en cualquiera de sus formas, al aire o a los suelos, así como los vertimientos o emisiones que puedan causar daño o poner en peligro el normal desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables, o impedir u obstaculizar su empleo para otros usos. Estas funciones comprenden la expedición de las respectivas licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y salvoconductos”.

Permisos de exploración

El Decreto 1541 de 1978 habla en su Título VII, Sección, capítulo II, artículos 146 a 154, de los requisitos exigidos para obtener concesión de aguas subterráneas. Fija los aspectos mínimos que hay que tratar en el proceso de exploración, así: cartografía geológica superficial, hidrología superficial, prospección geofísica, perforación de pozos exploratorios, ensayo de bombeo, análisis fisicoquímico de las aguas, y compilación de datos sobre necesidad de agua existente y requerida.

En el artículo 152 se especifican los ítems que debe contener el informe de exploración, así: “Al término de todo permiso de exploración de aguas subterráneas, el permisionario tiene un plazo de sesenta (60) días hábiles para entregar al Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, por cada perforado un informe que debe contener, cuando menos, los siguientes puntos:

- a. Ubicación del pozo perforado y de otros que existan dentro del área de exploración o próximos a ésta. La ubicación se hará por coordenadas geográficas y siempre que sea posible con base en cartas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- b. Descripción de la perforación y copias de los estudios geofísicos, si se hubieren hecho.
- c. Profundidad y método de perforación.
- d. Perfil estratigráfico de todos los pozos perforados, tengan o no agua; descripción y análisis de las formaciones geológicas, espe-

- e. Nivelación de cota del pozo con relación a las bases altimétricas establecidas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, niveles estáticos de agua contemporáneos a la prueba en la red de pozos de observación, y sobre los demás parámetros hidráulicos debidamente calculados.
- f. Calidad de las aguas; análisis fisicoquímico y bacteriológico, y
- g. Otros datos que el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, considere convenientes”.

El artículo 172 obliga a las personas que hacen exploración a reportar sus resultados ante el Inderena y hoy ante el Ideam.

El mismo decreto, en su artículo 257, numeral c, obliga al Inderena y hoy al Ideam a llevar un registro de los permisos para exploración de aguas subterráneas. Según el artículo 263, las personas jurídicas y naturales que se dediquen a la exploración de aguas subterráneas están obligadas a inscribirse ante el Inderena y hoy ante el Ideam para realizar los trabajos inherentes a esta actividad.

Control de construcción de pozos

El Decreto 1541 de 1978 aborda este tema en el artículo 164, dando potestad a la autoridad ambiental para pronunciarse sobre distancias mínimas entre pozos, características del pozo tales como profundidad, diámetro, revestimiento, filtros, características técnicas de la bomba o compresor y plan de operación del pozo, napas que se deben aislar, napas de las cuales esté permitido alumbrar aguas indicando sus cotas máximas y mínimas, tipo de válvula de control o cierre, caudal máximo que se va a explotar. La interferencia de pozos y el máximo caudal por explotar vuelven a enunciarse en el artículo 169 del mismo decreto. El artículo 171 fija que ningún aprovechamiento podrá iniciarse sin haberse practicado previamente la prueba de bombeo a que se refiere el artículo 153 de este decreto. El titular de la concesión deberá dotar al pozo de contador adecuado, conexión a manómetro y de toma para la

El artículo 174 obliga a que la labor de supervisión de pozos y perforaciones esté a cargo del Inderena, hoy Ideam.

Protección de aguas subterráneas

Este tema se aborda inicialmente en el Decreto 2811 de 1974, artículo 138, donde se prohíbe descargar aguas con concentraciones de sustancias por encima de límites admisibles en las aguas superficiales o subterráneas, interiores o marinas.

El Decreto 1541 de 1978, en sus artículos 176 y 177, fija pautas para que actividades potencialmente peligrosas para la calidad del agua subterránea, tales como explotación de minas y canteras, trabajos de avenamiento, alumbramiento de gases o hidrocarburos, establecimiento de cementerios, depósitos de basuras o de materiales contaminantes sean coordinadas de tal manera que su impacto sobre el recurso hídrico sea menor con medidas tales como la realización de los estudios necesarios para identificar las fuentes de contaminación y el grado de deterioro o la restricción, condicionamiento o prohibición de actividades.

La Ley 9 de 1979, en sus artículos 58, 59, 60, 61 y 62, fija normas y disposiciones para evitar la contaminación de las aguas subterráneas. En el artículo 59 llama la atención particularmente sobre las áreas de recarga.

El Decreto 1594 de 1984, en su numeral 61, prohíbe la inyección de sustancias a un acuífero, "... salvo que se trate de la reinyección de las aguas provenientes de la exploración y explotación petrolífera y de gas natural, siempre y cuando no se impida el uso actual o potencial del acuífero...". El artículo 63 del mismo, sin embargo, "...permite la infiltración de residuos líquidos siempre y cuando no se afecte la calidad del agua del acuífero en condiciones tales que impida los usos actuales o potenciales".

El artículo 70 del decreto anterior prohíbe expresamente la disposición de "... Los sedimentos, lodos, y sustancias sólidos provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de contaminación ambiental, y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo, no podrán disponerse en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas"

No obstante, el artículo 142 permite lo prohibido en el anterior artículo, pero sujeto al pago de tasas retributivas, así: "De acuerdo con el artículo 18 del Decreto Ley 2811 de 1974, la utilización directa o indi-

arrojar en ellos desechos o desperdicios agrícolas, mineros o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen y sustancias nocivas que sean resultado de actividades lucrativas, se sujetará al pago de tasas retributivas del servicio de eliminación o control de las consecuencias de las actividades nocivas expresadas. Dichas tasas serán pagadas semestralmente en los términos del presente decreto"

En cuanto a las zonas de recarga, la Ley 99 de 1993 en su artículo 1, numeral 4, enuncia: "Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial"

La Ley 373 de 1997, en su artículo 10, encarga a las corporaciones ambientales de la protección de la áreas de recarga: "... las corporaciones autónomas regionales y demás autoridades ambientales realizarán los estudios hidrogeológicos, y adelantarán las acciones de protección de las correspondientes zonas de recarga. Los anteriores estudios serán realizados con el apoyo técnico y científico del Ideam e Ingeominas".

El artículo 16 de la misma ley reitera la necesidad de protección de estas zonas de recarga o zonas de manejo especial, como las llama: "... En la elaboración y presentación del programa se debe precisar que las zonas de páramo, bosques de niebla y áreas de influencia de nacimientos de acuíferos y de estrellas fluviales, deberán ser adquiridos con carácter prioritario por las entidades ambientales de la jurisdicción correspondientes, las cuales realizarán los estudios necesarios para establecer su verdadera capacidad de oferta de bienes y servicios ambientales, para iniciar un proceso de recuperación, protección y conservación"

El Decreto 1713 de 2002, en los artículos 95 y 96, obliga a las empresas operadoras de rellenos sanitarios a establecer sistemas de monitoreo para proteger la calidad de las aguas subterráneas en sus áreas de influencia y a realizar los estudios hidrogeológicos necesarios para tal fin. El artículo 97, numeral 9, fija condiciones para la operación de rellenos sanitarios referentes a las aguas subterráneas: "Prohibición del vertimiento o descarga de lixiviados y contaminantes en los cuerpos de agua, tanto subterráneos como superficiales, incluyendo las zonas de humedales".

El artículo 6 del Decreto 838 de 2005 prohíbe la instalación de rellenos sanitarios en zonas de recarga de acuíferos, zonas kársticas y fija la profundidad mínima del nivel freático en la zona donde éstos vayan

Ordenamiento territorial para conservación y protección del agua subterránea

La Ley 99 de 1993 fija en su artículo 3, numeral 18, la competencia de las corporaciones ambientales para decretar las cuencas en ordenamiento: “Ordenar y establecer las normas y directrices para el manejo de las cuencas hidrográficas ubicadas dentro del área de su jurisdicción, conforme a las disposiciones superiores y a las políticas nacionales”.

El Decreto 1729 de 2002, en su artículo 4, enuncia los principios para ordenación de cuencas: “La ordenación de una cuenca tiene por objeto principal el planeamiento del uso y manejo sostenible de sus recursos naturales renovables, de manera que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente de sus recursos hídricos.

La ordenación así concebida constituye el marco para planificar el uso sostenible de la cuenca y la ejecución de programas y proyectos específicos dirigidos a conservar, preservar, proteger o prevenir el deterioro o restaurar la cuenca hidrográfica.

La ordenación de cuencas se hará teniendo en cuenta, entre otros, los siguientes principios y directrices:

1. El carácter de especial protección de las zonas de páramos, subpáramos, nacimientos de aguas y zonas de recarga de acuíferos, por ser considerados áreas de especial importancia ecológica para la conservación, preservación y recuperación de los recursos naturales renovables.
2. Las áreas a que se refiere el literal anterior son de utilidad pública e interés social y por lo tanto deben ser objeto de programas y proyectos de conservación, preservación o restauración de las mismas...”.

Sanciones

La Ley 99 de 1993, artículo 31, numeral 17, da competencia a las corporaciones ambientales para el establecimiento de sanciones: “Las corporaciones autónomas regionales ejercerán las siguientes funciones: ... Impo-

por la ley a otras autoridades, las medidas de policía y las sanciones previstas en la ley, en caso de violación a las normas de protección ambiental y de manejo de recursos naturales renovables y exigir, con sujeción a las regulaciones pertinentes, la reparación de los daños causados”.

Ley 599 del 2000, artículo 262, se fijan las sanciones para el que haga mal uso de los recursos hídricos: “El que con el fin de conseguir para sí o para otro un provecho ilícito y en perjuicio de tercero, desvíe el curso de las aguas públicas o privadas, o impida que corran por su cauce, o las utilice en mayor cantidad de la debida, o se apropie de terrenos de lagunas, ojos de agua, aguas subterráneas y demás fuentes hídricas, incurrirá en prisión de dieciséis (16) a cincuenta y cuatro (54) meses y multa de trece punto treinta y tres (13.33) a setenta y cinco (75) salarios mínimos legales mensuales vigentes”.

Tasas retributivas

La legislación colombiana fija tasas retributivas por contaminación del recurso hídrico y tasas por uso de éste inicialmente en el Decreto 2811 de 1974, artículo 18: “La utilización directa o indirecta de la atmósfera, de los ríos, arroyos, lagos y aguas subterráneas, y de la tierra y el suelo, para introducir o arrojar desechos o desperdicios agrícolas, mineros o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen, humos, vapores y sustancias nocivas que sean resultado de actividades lucrativas, podrá sujetarse al pago de tasas retributivas del servicio de eliminación o control de las consecuencias de las actividades nocivas expresadas. También podrán fijarse tasas para compensar los gastos de mantenimiento de la renovabilidad de los recursos naturales renovables”.

El artículo 159 del mismo decreto fija el uso de las tasas: “La utilización de aguas con fines lucrativos por personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, dará lugar al cobro de tasas fijadas por el gobierno nacional que se destinarán al pago de los gastos de protección y renovación de los recursos acuíferos, entre ellos:

- a. Investigar e inventariar los recursos hídricos nacionales;
- b. Planear su utilización;
- c. Proyectar aprovechamientos de beneficio común; d) Proteger y desarrollar las cuencas hidrográficas, y

El Decreto 1594 de 1984, en su artículo 142, fija la periodicidad de pago de las tasas retributivas: “De acuerdo con el artículo 18 del Decreto Ley 2811 de 1974, la utilización directa o indirecta de los ríos, arroyos, lagos y aguas subterráneas para introducir o arrojar en ellos desechos o desperdicios agrícolas, mineros o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen y sustancias nocivas que sean resultado de actividades lucrativas, se sujetará al pago de tasas retributivas del servicio de eliminación o control de las consecuencias de las actividades nocivas expresadas. Dichas tasas serán pagadas semestralmente en los términos del presente decreto”.

La Ley 99 de 1993, en su artículo 31, numeral 13, delega la responsabilidad del manejo de las tasas en las corporaciones ambientales, así: “Las corporaciones autónomas regionales ejercerán las siguientes funciones: ... Recaudar, conforme a la ley, las contribuciones, tasas, derechos, tarifas y multas por concepto del uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, fijar su monto en el territorio de su jurisdicción con base en las tarifas mínimas establecidas por el Ministerio del Medio Ambiente”.

El Decreto 155 de 2004 reglamenta detalladamente las tasas por uso. Su artículo 1 dice así: “Objeto. El presente Decreto tiene por objeto reglamentar el artículo 43 de la Ley 99 de 1993 en lo relativo a las tasas por utilización de aguas superficiales, las cuales incluyen las aguas estuarinas, y las aguas subterráneas, incluyendo dentro de éstas los acuíferos litorales. No son objeto de cobro del presente decreto las aguas marítimas”.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, M. P. & Woessner, W. W. (1992). *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. San Diego: Academic Press.
- Custodio, E. (2002, abril). Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10(2), 254-277.
- Custodio, E. & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología subterránea*. Tomos I y II. Barcelona: Ediciones Omega.
- Davis, S. N. & De Wiest, R. (1966). *Hydrogeology*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Driscoll, G. F. (1986). *Groundwater and wells*. St. Paul: Johnson Division.
- Ellis, E. E. (1909). Occurrence of water in crystalline rocks. In *US Geological Survey Water- Supply Paper*, 160, 19-28.
- Fetter, C. (1988). *Applied hydrogeology*. Nueva York: McMillan Publishing Company.
- Foster, S. (2003). *Yemen: Rationalizing Groundwater Resource Utilization in the Sana'a Basin. Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools*. GW Mate Briefing Note Series. Sustainable Groundwater Management Lessons from Practice. Banco Mundial.
- Foster, S. & Garduño, H. (2004). *India-Tamil Nadu: Resolving the Conflict Over Rural. Groundwater Use Between Drinking Water & Irrigation Supply*. Sustainable Groundwater Management Lessons from Practice. Banco Mundial.
- Foster, S. & Garduño, H. (2002). *Paraguay: El uso de agua subterránea en Gran Asunción. Problemas actuales y regulación propuesta*. Banco Mundial. Programa asociado de la GWP.
- Foster, S., Garduño, H., Kemper, K., Tuinhof, A. & Dumars, CH. (2003a). *Protección de la calidad del agua subterránea. Definición de estrategias y establecimiento de prioridades 2002-2006*. Gestión sustentable del agua subterránea. Conceptos y herramientas. Banco Mundial. Programa asociado de la GWP.
- Foster, S., Garduño, H., Kemper, K., Tuinhof, A., Nanni, M. & Dumars, CH. (2003b). *Amenazas naturales a la calidad del agua subterránea. Evitar problemas y formular estrategias de mitigación 2002-2006*. Gestión sustentable del agua subterránea. Conceptos y herramientas. Banco Mundial. Programa asociado de la GWP.
- Foster, S. & Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*. Lima: OPS-CEPIS.

- Foster, S. & Hirata, R. (1988). *Groundwater pollution risk assessment: a methodology based on available data*. Lima: CEPIS/PAHO Technical Report.
- Foster, S., Kemper, K., Tuinhof, A., Koundouri, P., Nanni, M., Garduño, H. (2002). *Amenazas naturales a la calidad del agua subterránea*. Banco Mundial. Serie de notas informativas, 14.
- Foster, S., Nanni, M., Kemper, K., Garduño, H. & Tuinhof, A. (2002). *Utilización de agua subterránea no renovable. Un enfoque socialmente sustentable para la gestión del recurso*. Banco Mundial. Serie de notas informativas, 11.
- Freeze, A. & Cherry, T. A. (1979). *Groundwater*. Nueva Jersey: Prentice Hall.
- Gleick, P. H. (1996). Water resources. In *Encyclopedia of climate and weather*, 2, 817-823, ed. by S. H. Schneider. Nueva York: Oxford University Press.
- Galofré, A. (1983). Mapas hidrogeológicos. En *hidrología subterránea*. E. Custodio & R. Llamas (ed.). Tomo 2, pp. 1545-1557. Barcelona: Omega.
- García López, S. (2003) *Cartografía hidrogeológica: un tipo complejo de cartografía temática*. Cádiz: Universidad de Cádiz. Departamento de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales.
- Groundwater Studies an International Guide for Hydrogeological Investigations. (2004). V. S. Kovalevsky, G. P. Kruseman & K. R. Rushton (ed.). IHP-VI, Series on Groundwater, 3. www.udep.edu.pe/recursos/hidricos/cartografia%20hidrogeologica.pdf.
- Helweg, O. J., Scott, V. H. & Scalmanini, J. C. (1983). *Improving well and pump efficiency*. USA: American Water Works Association.
- Ingeominas. (1995). *Evaluación del agua subterránea en la región de Urabá*. Departamento de Antioquia. Bogotá: Ingeominas.
- Ingeominas. (2004). *Programa de exploración de aguas subterráneas (Pexas)*. Bogotá: Ingeominas.
- Ingeominas - Universidad Industrial de Santander. (2007). *Acuerdo específico 017-2007*. Proyecto Investigación Geológica e Hidrogeológica en el área de la mesa de Los Santos. Bogotá: Ingeominas - UIS.
- Johnson Division. (1975). *El agua subterránea y los pozos*. Saint Paul, Minnesota: Johnson Division.
- Kovalevsky, V. S., Kruseman, G. P. & Rushton K. R. (2004). Groundwater studies. An international guide for hydrogeological investigations. IHP-VI, Series on Groundwater n.º 3. Unesco.
- Lecciones en <http://www.agua.uji.es/rh%20lecciones07.html>.
- Llamas, M. R. (2004). *Water and Ethics. Use of groundwater*. Unesco.
- Llamas, M. R. & Custodio, E. (1976). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Llamas, M. R. & Custodio, E. (2002). *Intensively exploited aquifers*. Unesco. IHP-VI, Series on groundwater, 4.
- López Geta, J. A., Fornés, J. M., Ramos, G. & Villarroya, F. (2004). *Las aguas subterráneas un recurso natural del subsuelo*. Madrid: Instituto Geológico Minero de España.
- Manzano Arellano, M. (2002). *El papel de los acuíferos costeros en la gestión del medio natural*. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica.
- Manzano Arellano, M., Custodio, E. & Nieto, P. (2003). El fondo natural de la calidad del agua subterránea: implicaciones para la aplicación de la Directiva Marco del Agua en Europa. *Tecnología del Agua*, 241, 38-47.
- McWhorter, D. B. & Sunada, D. K. (1977). *Groundwater hydrology and hydraulics*. Colorado: Water Resource Publications, Fort Collins.
- Milanovic, P. T. (1981). *Karst hydrology and Water Resources Publications*. Littleton, Colorado: Water Resources Publications.
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Agricultural Handbook*, 60. Washington.
- Sámano, S. (2005, 9 de abril). *Estudio de opciones eficientes de tratamientos de agua para remoción de algunos contaminantes a bajos costos considerando los impactos ambientales resultantes de los mismos*. Cholula, Puebla, México.
- Samper, J. (1997a). Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balances de agua: utilización, calibración y errores. En E. Custodio, M. R. Llamas & J. Samper (eds.). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Seminario de la AIH-GE. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, pp. 41-79.
- Samper, J. (1997b). Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. En E. Custodio, M. R. Llamas & J. Samper (eds.). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Seminario de la AIH-GE. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, pp. 153-180.
- Shvartsev, S. L. (1998). *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. Moscú.
- Stewart, J. W. (1962). Water-yielding potential of weathered crystalline rocks at the Georgia Nuclear Laboratory. *Geological Survey Research*. Short Papers in the Geologic and Hydrologic Sciences, pp. B 106-B 107.
- Tarback & Lutgens. Geode III. Geologic explorations on disk.
- Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Todd, D. K. (1980). *Groundwater hydrology*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Todd, D. K. & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology*. 3ª edición. Londres: John Wiley and Sons.
- Towards a more effective operational response. (2005). *Arsenic Contamination of Groundwater in South and East Asian Countries*. World Bank South Asia

- Tuinhof, A., Dumars, C., Foster, S., Kemper, K., Arduño, H. & Nanni, M. (2002). *Gestión de recursos de agua subterránea. Una introducción a su alcance y práctica*. Banco Mundial. Serie de notas informativas, 1.
- Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K; Garduño, H; Nanni, M. (2002). *Requerimientos de monitoreo del agua subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua*. Banco Mundial. Serie de notas informativas, 9.
- Unesco. (1974). *Glosario internacional de hidrogeología*. París: Unesco.
- Vargas, O. (2004). *Monitoreo de aguas subterráneas*. Bogotá: IDEAM, Subdirección de Hidrología.
- Veloza Franco, J. (2009). *Informe hidrogeoquímico del macizo de Santander*. Bogotá: Ingeominas.
- Zaporozec, A. (ed.) (2002). *Groundwater Contamination Inventory : a methodological guide; IHP-VI. Series on Groundwater, 2*. Unesco.
- Zora, J. *Hidrogeología, una introducción a las ciencias de las aguas subterráneas*. En <http://www.eccentrix.com/members/hydrogeologie/archhtmlsp/06330es.htm>
- <http://www.lenntech.com>
- <http://www.lenntech.com/espanol/Enfermedades-transmitidas-por-el-agua/arsenicosis.htm>



LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

UN ENFOQUE PRÁCTICO



colección GUÍAS Y MANUALES

MARÍA VICTORIA VÉLEZ OTÁLVARO

CAROLINA ORTIZ PIMENTA

MARÍA CONSUELO VARGAS QUINTERO

