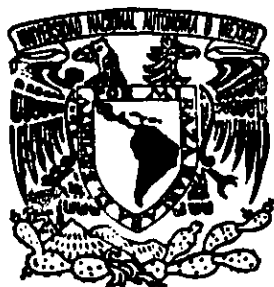


80



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS DE LOS EFECTOS AMBIENTA-
LES DE LA SOBRE EXPLOTACION DE LOS
ACUIFEROS**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A**

SALVADOR PEÑA HARO



"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO 2000

280368



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/035/00

Señor
SALVADOR PEÑA HARO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. HECTOR L. MACIAS GONZALEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"EFECTOS AMBIENTALES DE LA SOBRE EXPLOTACION DE LOS ACUIFEROS"

- I. ASPECTOS GENERALES
- II. EL AGUA EN MEXICO
- III. EFECTOS DE LA SOBRE EXPLOTACION DE LOS ACUIFEROS
- IV. ESTIMACION DE COSTOS Y BENEFICIOS DEBIDOS A LA SOBRE EXPLOTACION DE LOS ACUIFEROS
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria el 04 de abril de 2000
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg

Dedico este trabajo a mis queridísimos padres por su apoyo incondicional a través de toda mi vida y a mi irremplazable hermana. Además agradezco profundamente a mi padre por su guía y ayuda prestada, al Ing. Hector Macías por su apoyo y comentarios, al Ing. José Arreguín Mañón por el tiempo y espacio cedidos para la realización de este trabajo, a la Universidad Nacional Autónoma de México, y a todas aquellas personas con las que he convivido y que han contribuido de una u otra manera a ser quien soy, a mi familia y amigos.

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS AMBIENTALES DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

Indice

Introducción	I
1. Aspectos generales	1
1.1. Ciclo hidrológico	1
1.1.1 Precipitación	4
1.1.2 Evaporación	5
1.1.3 Escurrimiento	7
1.1.4 Infiltración	9
1.1.5 El agua en el subsuelo	11
1.1.6 El ciclo hidrológico en la República Mexicana	12
1.2 Acuíferos	14
1.2.1. Piezometría	15
1.2.2. Propiedades de los acuíferos	17
1.2.3. Las formaciones acuíferas en la República Mexicana	20
1.3. Captaciones	22
1.4. Balances	24
2 El agua en México	29
2.1 La importancia del agua subterránea en México	30
2.2 Uso del agua subterránea en México	32
2.2.1 Uso público - urbano	35
2.2.2 Uso agrícola	36
2.2.3 Uso industrial	39
2.3 Situación actual de los acuíferos	39
3. Efectos de la sobre explotación de los acuíferos	43
3.1 Rendimiento seguro	44
3.2 Problemas ambientales de la sobre explotación de los acuíferos	47
3.2.1. Diminución del flujo base y agotamiento de manantiales	49
3.2.2. Reducción de la cámara de bombeo en los pozos	51
3.2.2.1. Abandono de pozos	51

3.2.2.2. Abandono de tierras de agricultura	52
3.2.3. Modificación del esquema de flujo subterráneo	53
3.2.3.1. Modificación de la calidad del agua	53
3.2.3.2. Intrusión de agua de mar	54
3.2.4. Consolidación de estratos arcillosos	58
4 Estimación de costos y beneficios debidos a la sobre explotación de los acuíferos	66
4.1. Costos debidos al incremento en la profundidad de bombeo	66
4.1.1 Costos de perforación de pozos	67
4.1.2. Costos del equipo de bombeo	70
4.1.3. Costos de bombeo	72
4.1.4. Incremento en los costos de bombeo debido a la sobre explotación	77
4.2. Costos por el abandono de pozos	78
4.3. Costos por el abandono de tierras agrícolas	81
4.4. Costos totales	81
4.5. Beneficios	85
5. Conclusiones	87

INTRODUCCION

El agua es un elemento vital para el ser humano sin ella la vida no sería posible, su valor es incalculable además, es un elemento indispensable para el bienestar social y el desarrollo económico de las diferentes regiones y un factor clave en la preservación del medio ambiente.

Debido al aumento demográfico de la población, las ciudades crecen y requieren un mayor abasto de agua; así mismo los requerimientos de alimentos se incrementan, los cuales conllevan a un mayor consumo de agua, y paralelo a esto se incrementa la demanda del agua, específicamente en las aguas subterráneas se presenta la sobre explotación de los acuíferos, que son la base de gran parte del abastecimiento de este vital líquido en muchas regiones del país, particularmente en México se tiene que la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos están en proporción inversa a las actividades económicas del país.

En este trabajo se hace un análisis de los efectos negativos que trae consigo la sobre explotación de los acuíferos, calculando algunos costos que esto trae consigo. Para ello, en el primer capítulo, se hace mención a algunas de las características que rigen el comportamiento de los acuíferos, algunas definiciones y se presenta una panorámica del agua en el mundo.

En el capítulo dos se presenta la panorámica del agua en México, se hace énfasis en la importancia que esta tiene en nuestro país y su distribución espacial, se tiene que menos de un tercio del total de la disponibilidad de los recursos hídricos del país se encuentran en los dos tercios del territorio donde se ubican las principales ciudades, gran parte de la infraestructura industrial y de las tierras de riego, esta zona corresponde principalmente a la parte norte del país caracterizada por ser árida y semiárida; en consecuencia, el agua subterránea en estas zonas es esencial para la economía mexicana, ya que representa la principal y a veces la única fuente de agua. Actualmente en estas zonas el balance bombeo-recarga es negativo, con la consiguiente sobre explotación de numerosos acuíferos.

La sobre explotación de los acuíferos trae consigo varios efectos indeseables que repercuten en una gran diversidad de problemas sociales, económicos y ambientales, por lo que no solamente se trata de un problema puramente técnico sino que existe una interacción entre el marco físico regional y la sociedad, ideas que se exponen en el tercer capítulo

Los efectos de la sobre explotación son de diversa índole, desde consolidación de estratos arcillosos, intrusión salina, abandono de tierras hasta problemas sociales y ambientales. Todos estos efectos tienen un costo económico, además de un costo social, algunos de estos efectos se evaluaron de forma económica en el capítulo cuatro.

Hay una gran cantidad de costos, no solamente económicos, sino sociales, ambientales, políticos, etc. que son prácticamente imposibles de cuantificar, pero que tiene repercusiones de gran importancia para el país.

Finalmente en el último capítulo se presentan algunas conclusiones y comentarios acerca de la problemática tratada en este durante el desarrollo de este trabajo.

Por lo tanto este trabajo tiene como objetivo hacer un primer análisis de los efectos colaterales que trae consigo la explotación irracional de los acuíferos, y expresar algunos de ellos en forma económica.

CAPÍTULO 1

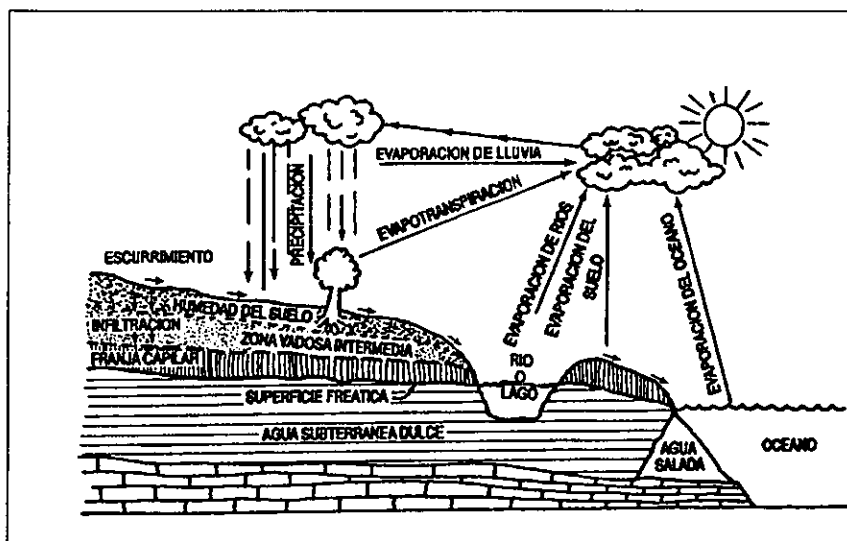
Aspectos generales

1.1 Ciclo hidrológico

El movimiento del agua dentro de la Tierra se lleva a cabo por medio de diferentes eventos, los cuales en su conjunto reciben el nombre de ciclo hidrológico, el agua subterránea solamente forma una parte de dicho ciclo. En estos eventos interviene la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera.

El ciclo hidrológico es un proceso continuo mediante el cual el agua es transportada desde los océanos a la atmósfera, de ésta a la tierra y posteriormente regresada al mar. La fuerza motora del sistema global para el transporte del agua la proporciona el sol (¹).

Figura 1.1
Ciclo hidrológico



Mediante la radiación solar, el agua se evapora de los océanos y de diferentes cuerpos de agua, así como también la que se encuentra en el suelo, plantas, etc. pasando a formar parte de la atmósfera; debido a cambios de presión y temperatu-

¹ Rodarte L., Hidrología subterránea, Colegio de Posgraduados, 1999

ra que ocurren en ésta última, el vapor de agua se condensa y se precipita en forma de granizo, nieve o agua, cayendo tanto en tierra como en los mismos cuerpos de agua de donde se evaporó, incluyendo los océanos. Una parte del agua que se precipitó sobre las partes continentales recarga en forma natural a los acuíferos mediante su infiltración, en tanto que el agua excedente escurre superficialmente formando arroyos y ríos que también pueden ser alimentados en parte por los acuíferos, para que finalmente, tanto los escurrimientos superficiales como los subterráneos descarguen al mar y continúe el ciclo hidrológico.

Los cuatro procesos principales que intervienen en el ciclo hidrológico son la precipitación, la evaporación y transpiración, escurrimiento e infiltración. Se estima que del total de la precipitación, un 80% se evapotranspira, 9.2% escurre superficialmente y el 10.8% restante se infiltra.

En la siguiente tabla se muestra una estimación de las cantidades de agua almacenadas en la tierra y el porcentaje respecto al total.

Tabla 1.1.
Distribución del Agua en la Tierra (²)

	Volumen x 10 ³ km ³	Porcentaje
Lagos	230	0.0160
Ríos	1	0.0001
Humedad del suelo	75	0.0050
Agua subterránea	64,000	4.3900
Lagos de agua salada	105	0.0080
Atmósfera	14	0.0010
Casquetes polares y glaciares	24,000	1.6500
Océanos	1,370,323	93.9300
TOTAL	1,458,851	100.0

Como se puede observar, la mayor parte del agua se encuentra en los océanos, pero la utilización del agua salada para el consumo humano requiere de un tratamiento especial, el cual es muy costoso, así como también el tratar de utilizar el agua de los casquetes polares, ya que su traslado a los centros de consumo es costoso, por lo que solamente se ha utilizado el agua de los ríos y lagos o el agua subterránea.

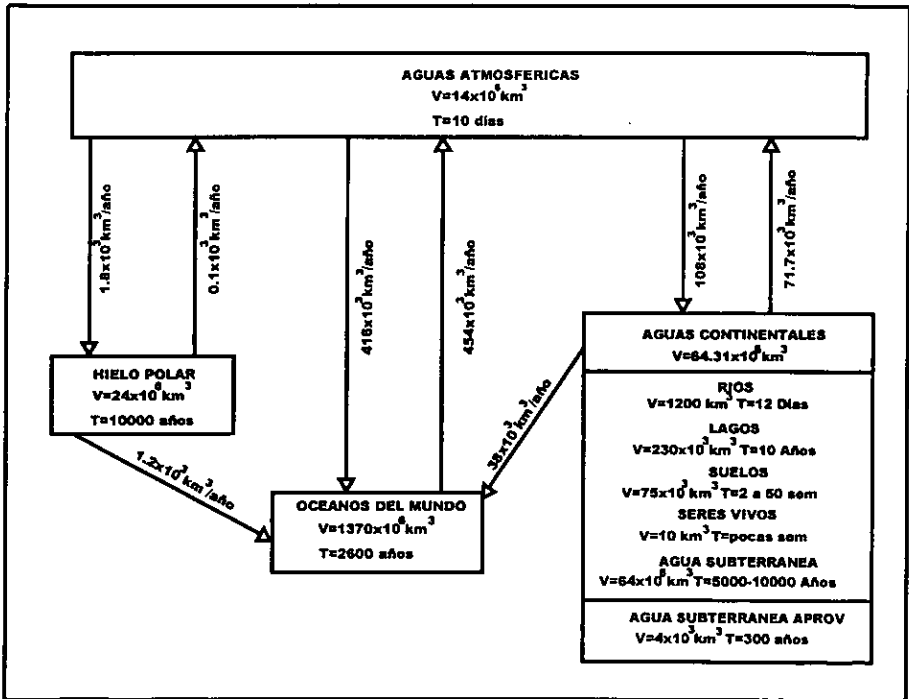
El 4.39% del total de agua almacenada en la Tierra es agua subterránea, cuantificada hasta una profundidad de 800 m., por lo que solamente una parte es económicamente extraíble. Esto significa que la reserva de agua subterránea a niveles económicos se reduce a solo 4 millones de km³ aproximadamente, lo que representa un 0.27% del agua total, que sumados al 0.0161% de ríos y lagos da un total aproxi-

² Raudkivi K., Hydrology, Ed. Pergamon Press, 1979

mado de 0.3% del total del agua almacenada en la Tierra, que pueden ser utilizados para el consumo humano.

Por otro lado en el siguiente esquema (figura 1.2) se representa el flujo del agua, del total de agua que llueve, la mayor parte cae sobre los océanos, sobre los continentes se precipitan $108 \times 10^3 \text{ km}^3 / \text{año}$, de los cuales casi $72 \times 10^3 \text{ km}^3 / \text{año}$ se evapora inmediatamente y $38 \times 10^3 \text{ km}^3 / \text{año}$ escurren superficialmente hacia los océanos, esto es, salen de los continentes aproximadamente $2 \times 10^3 \text{ km}^3 / \text{año}$ de más, los cuales se supone provienen de la sobre explotación de los acuíferos. Al mismo tiempo si se hace un balance en las zonas polares se puede observar que hay una disminución constante del hielo almacenado, que va a dar a los océanos, producto del calentamiento terrestre.

Figura 1.2
Ciclo hidrológico



En la misma figura 1.2. se observa que del almacenamiento total de la zona continental la mayor parte se encuentra en el subsuelo, y su acumulación tomó muchos años, se estima un período de retorno o de incidencia de unos 5,000 a 10,000 años, lo que significa que una sobre explotación de los acuíferos es muy peligrosa debido a que se requiere de mucho tiempo para su recuperación.

Entre las dos posibilidades de aprovechamiento, de agua subterránea o superficial, para el consumo humano, la primera es preferida de la segunda por las siguientes razones ⁽³⁾:

- El agua subterránea no posee generalmente organismos patógenos ni necesita ser tratada previamente.
- Generalmente no posee ni turbidez ni color.
- Los volúmenes de agua subterránea almacenada son generalmente mayores que los volúmenes superficiales, además que los almacenamientos subterráneos no suelen verse afectados por las sequías de manera tan severa como los superficiales.
- El agua subterránea puede constituir el único recurso en muchas regiones.
- Su composición química es generalmente constante.
- La contaminación radio química y biológica del agua subterránea es difícil.

Además en algunas regiones el agua subterránea es el único recurso disponible, además su captación es más barata, ya que no es necesario la construcción de grandes obras.

En México se cuenta con aproximadamente 6.7 km³ de agua almacenada en los 7 lagos más representativos y 150 km³ en presas. Por otro lado considerando que los acuíferos cubren un área de casi 1 millón de km², con un espesor aproximado de 170 m, al suponer una profundidad que va de los 30 a los 200 metros ⁽⁴⁾ y un coeficiente de almacenamiento del 0.10, el almacenamiento resulta de 17 000 km³, valor muy superior a los almacenamientos en lagos y presas

1.1.1 Precipitación

La precipitación ocurre como resultado de la condensación del vapor de agua en la atmósfera, provocado por los cambios de presión y temperatura en el aire, y se presenta en diferentes formas como lo son la lluvia, la nieve y el granizo. La precipitación tiene importancia para la hidrología subterránea por contribuir ésta, directa o indirectamente, a la recarga de los acuíferos.

El agua que se evapora de la superficie terrestre se eleva hasta que la presión y la temperatura son las necesarias para que exista condensación, es decir, hasta que se pueda alcanzar el punto de rocío. Cuando una masa de aire, se ve sujeta

³ Davis y de Weist, Hidrogeología, Ed. Ariel, 1971

⁴ CNA, Compendio Básico del Agua en México, 1999

a una presión gradualmente decreciente; entonces se expande y, al expandirse, disminuye su temperatura; si la temperatura disminuye lo suficiente como para quedar abajo del punto de rocío, se inicia la condensación. El vapor se condensa en torno a diminutos núcleos de material sólido presentes en la atmósfera en forma de suspensión.

La mayor parte de estos núcleos de condensación están constituidos por pequeñas partículas de materia orgánica (esporas y polen), cenizas volcánicas, diminutos granos de sal, partículas de humo y polvo. De esta manera se tienen gotas más grandes que ya tienen suficiente peso para caer por la acción de la gravedad, dando lugar a la precipitación.

El vapor de agua contenido en la atmósfera procedente de la evaporación se condensa y precipita por causa, fundamentalmente, de tres fenómenos meteorológicos⁽⁵⁾:

1. *Lluvia ciclónica.* La mayor cantidad de agua se precipita a lo largo de los frentes de masas de aire cálido y húmedo que se desplazan sobre las regiones de masas de aire frío. Este desplazamiento suele aparecer generalmente asociado a los grandes movimientos ciclónicos.
2. *Lluvia convectiva.* Durante la estación cálida del año, el aire que se calienta en contacto con la superficie de la tierra tiende a ascender en grandes masas hacia las zonas altas donde existen masas de aire más frío. Este movimiento ascendente de convección puede ser provocado simplemente por la inestabilidad de una masa de aire ligera y cálida situada por debajo de otra masa de aire más densa y fría, aunque también puede ser producido por las corrientes de aire que ascienden sobre las barreras montañosas.
3. *Lluvia orográfica.* La precipitación se origina, en este caso, por el enfriamiento adiabático de las masas de aire a medida que estas se desplazan sobre las elevadas barreras montañosas, por lo que es de carácter puramente orográfico.

1.1.2 Evaporación

Gran parte de la precipitación vuelve a la atmósfera en forma de vapor, como resultado de la evaporación, la transpiración y la sublimación.

La *evaporación* es un proceso que se produce cuando algunas moléculas de agua adquieren suficiente energía cinética, por acción de la radiación solar, como para escaparse de la superficie del agua o del suelo húmedo, algunas moléculas que se escapan son atraídas por otras moléculas que tienden a mantenerlas en el interior del líquido, creándose una zona de intercambio. Sólo aquellas cuya energía cinética es mayor que el promedio en el interior del líquido logran escapar de la superficie, pasando del estado líquido al gaseoso.

⁵Linsley, Kohler, Paulus, Hidrología para Ingenieros, Ed. Mc Graw Hill, 1979

Las moléculas pueden escapar de una superficie sólida (nieve o hielo) de la misma manera, cuando este cambio ocurre, sin pasar por estado líquido intermedio, recibe el nombre de *sublimación*.

La *transpiración* es el proceso mediante el cual las plantas ceden agua a la atmósfera. En muchas regiones, el volumen total de la evaporación real no puede ser considerado independientemente de la transpiración, de ahí que ambos efectos suelen ser considerados en conjunto bajo el concepto más amplio de *evapotranspiración* (evaporación más transpiración).

El *uso consuntivo* de una planta es la cantidad anual de agua usada por un cultivo o la vegetación natural para la construcción de sus tejidos y la transpiración, sumada al agua que se evapora del suelo adyacente. En ocasiones se confunde evapotranspiración con el uso consuntivo (o se usan como sinónimos ya que el uso consuntivo representa sólo el 1% de la evapotranspiración) ⁽⁶⁾.

La evapotranspiración es un fenómeno importante, ya que del agua que se precipita en una región, la mayor parte regresa a la atmósfera como resultado de la evapotranspiración, aproximadamente un 80% ⁽⁷⁾ y las pérdidas por evaporación en lagos y vasos de almacenamiento pueden tener un efecto muy significativo en el agua disponible, sobre todo en las zonas áridas.

El agua subterránea no alcanza nunca la atmósfera mediante un proceso de evaporación directa, a no ser que el nivel freático de las formaciones acuíferas esté situado a muy pocos decímetros de la superficie del suelo. Una forma de descarga del agua subterránea es por medio del consumo de agua por parte de las plantas, el cual constituye un medio de descarga del agua subterránea mucho más importante que la evaporación directa de los acuíferos.

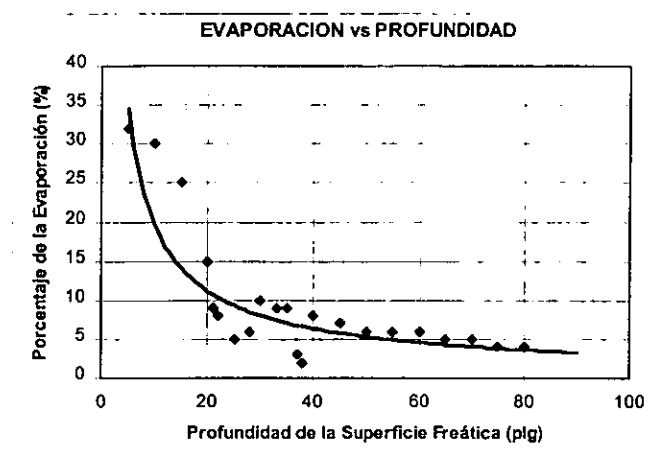
En la figura 1.3 se muestra la relación que existe entre la profundidad de la superficie freática y la magnitud de evaporación del agua. Cada punto representa, para una profundidad determinada, el valor de la evaporación del acuífero, como un porcentaje de la evaporación mensual en el evaporímetro ⁽⁸⁾. De esta gráfica se deduce que la evaporación del agua subterránea es de poca magnitud para profundidades del nivel freático mayores 1 m.

⁶ Aparicio F., Fundamentos de Hidrología de Superficie, ed. Limusa, 1989

⁷ Escolero O., Panorámica del agua Subterránea en México, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 1992

⁸ CNA, Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos, 1994

Figura 1.3
Evaporación contra profundidad de la superficie freática



1.1.3 Escurrimiento

Por *escurrimiento* se entiende la parte de la precipitación que fluye bajo la acción de la gravedad por la superficie del terreno (escurrimiento superficial). El escurrimiento superficial es igual a la precipitación menos la evapotranspiración, la retención superficial y la infiltración (paso o movimiento del agua a través de la superficie del suelo) ^(*).

El escurrimiento superficial es una función de la intensidad y duración de la precipitación, permeabilidad o conductividad hidráulica de la superficie del suelo, tipo y extensión de la vegetación, área de la cuenca de captación, geometría de los cauces, profundidad de la superficie freática y pendiente del terreno.

Al inicio de una fuerte precipitación, una gran cantidad de agua es interceptada por la vegetación; el agua así almacenada sobre la superficie de la capa vegetal se encuentra muy expuesta al viento y ofrece una enorme área de evaporación, a este fenómeno se le conoce como *intercepción*, de tal forma que las precipitaciones de corta duración pueden ser completamente consumidas en esta etapa y también con una pequeña cantidad de agua que se infiltra a través del suelo y por el agua que llena las pequeñas depresiones en el terreno, formando charcos.

A lo largo de una precipitación cuando el poder de intercepción y de almacenamiento en la superficie del suelo han sido agotados, y cuando la precipitación es tal que su intensidad excede la capacidad de infiltración del suelo, comienza ya el escurrimiento.

* Davis y de Weist, Hidrogeología, Ed. Ariel, 1971

rrimiento superficial. La superficie del suelo se cubre en ese momento con una fina película de agua llamada película de retención superficial. Una vez que el agua que corre sobre la superficie del suelo alcanza a la red hidrográfica, comienza a parecer el escurrimiento superficial en los cauces.

Parte del agua que se infiltra en el suelo continúa fluyendo lateralmente a pequeñas profundidades debido a la presencia de horizontes relativamente impermeables situados muy cerca de la superficie del suelo, alcanzando de este modo los cauces de los ríos sin haber sufrido una infiltración profunda. Otra parte de esta agua es infiltrada hacia la zona de saturación de las aguas subterráneas las cuales fluyen hasta que eventualmente alcanzan la red hidrográfica para suministrar el caudal base de los ríos. Existe otra porción del agua infiltrada que no llega a alcanzar el nivel de saturación de las aguas subterráneas y queda retenida en la zona situada por encima del nivel freático. También hay una porción de lluvia que desde el primer momento cae sobre los cauces de los ríos y circula por ellos sin haber recorrido previamente sobre la superficie del suelo.

Hidrograma

El agua que cae dentro de una cuenca producto de la precipitación, escurre hasta alcanzar la red hidrográfica que drena dicha cuenca. Para registrar la cantidad de agua que pasa por un cauce se utiliza el *hidrograma* que es una curva que representa las oscilaciones del caudal en función del tiempo de un río en una sección dada. En la figura 1.4 se presenta el hidrograma de una tormenta (10).

En el hidrograma que produce una tormenta aislada, se definen tres porciones características:

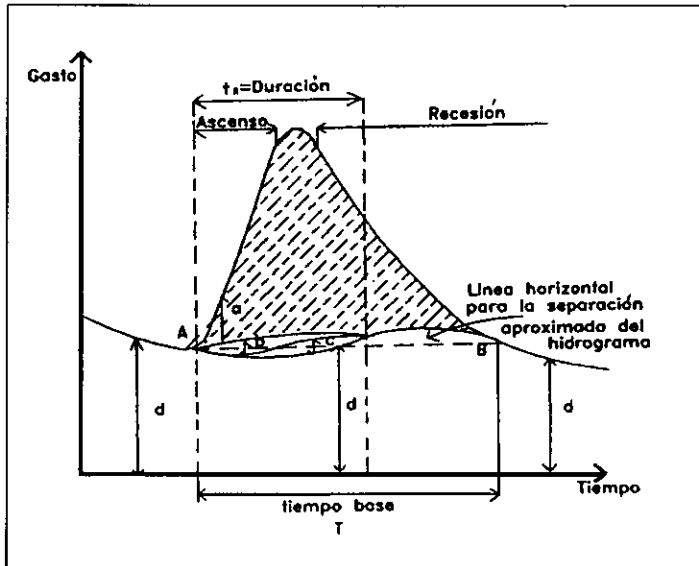
- La rama ascendente o curva de concentración.
- La cresta que es el tramo donde se ubica el gasto máximo
- La curva de vaciado del agua subterránea o curva de recesión.

Aunque la forma de los hidrogramas producidos por tormentas particulares varían de cuenca a cuenca y de tormenta a tormenta, es posible distinguir las siguientes partes en cada hidrograma:

- a. Escurrimiento superficial. En este punto, el agua proveniente de la tormenta comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta.
- b. Precipitación sobre el cauce del río.
- c. Flujo subsuperficial.
- d. Aportación de las aguas subterráneas.

¹⁰ CNA, Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos, 1994

Figura 1. 4
Hidrograma de una tormenta aislada



Para mayor simplicidad suelen incluirse en un solo grupo las aportaciones debidas al flujo del escurrimiento subsuperficial y el escurrimiento puramente superficial; todas ellas forman un único componente de los hidrogramas llamado *escurrimiento directo*, el cual es realmente el producto de la tormenta. La otra parte del hidrograma lo forman los caudales debidos a las aportaciones subterráneas, llamados éstos últimos *escurrimientos base*, y son representados por la parte inferior de la línea A-B del hidrograma (figura 1.4).

Del agua que se infiltra como resultado de una o varias tormentas, parte de ésta fluye hasta alcanzar la superficie freática del acuífero subyacente, agua que eventualmente puede aflorar a una corriente, constituyendo su gasto base. En el estiaje el caudal que escurre en los ríos es aportado por el acuífero. La determinación de su magnitud sirve de base para la definición del potencial del acuífero.

1.1.4 Infiltración

La *infiltración* es el movimiento del agua, a través, de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares ⁽¹¹⁾.

¹¹ Aparicio F., Fundamentos de hidrología de superficie, Ed. Limusa, 1989

La *capacidad de infiltración* es el índice de máxima absorción de agua, procedente de una precipitación dada, por parte de un suelo en unas condiciones también dadas.

La infiltración depende de diversos factores como los son: las condiciones de la superficie del terreno, la densidad de la vegetación, temperatura, propiedades físicas del suelo, intensidad de la lluvia, pendiente del terreno y contenido de humedad del suelo.

En los primeros momentos de la infiltración, el desplazamiento del agua bajo la acción de las fuerzas capilares del suelo juega un papel muy importante. El efecto de las fuerzas capilares, en un suelo constituido por elementos muy gruesos comienza a ser menos importante cuando el frente de infiltración ha penetrado ya unos 70 u 80 cm por debajo de la superficie del suelo. Las mayores fuerzas capilares corresponden a los suelos de grano fino en condiciones iniciales de muy poca humedad.

El aire atrapado en el interior del suelo por el avance del frente de infiltración produce un efecto contrario al de la estructura del suelo. Inicialmente, el frente de infiltración puede ser irregular y con ello el aire es expulsado a través de diversos puntos de escape. La energía que se necesita para desplazar el aire del suelo hace disminuir en cada instante el valor del índice de infiltración. A medida que avanza el frente saturado va dejando atrás bolsas de suelo seco que constituyen barreras para el avance del agua. El continuo movimiento del frente de infiltración puede ir desplazando un poco de ese aire aprisionado. Los efectos de este aire embolsado son, pues, opuestos a los de la estructura del suelo, y se manifiestan a través de una resistencia inicial al avance de infiltración, que se va reduciendo con el paso continuo del agua.

El estado de la superficie del suelo es también un factor muy importante. Una superficie del suelo desprovista de vegetación estará libremente expuesta al impacto directo de las gotas de agua; el agua de lluvia puede en este caso compactar considerablemente la superficie del suelo e introducir al mismo tiempo diminutas partículas en el interior de las grietas y de los conductos abiertos, lo que tiene como consecuencia inmediata la reducción de la infiltración a medida que la lluvia continua. Las raíces de las plantas contribuyen también a mantener el suelo abierto, aumentando con ello el valor de la infiltración de los suelos.

Otro factor que influye es la temperatura del agua ya que afecta su viscosidad, y ésta a su vez, afecta al valor del índice de infiltración. La viscosidad del agua es inversamente proporcional a la infiltración y directamente proporcional a la temperatura.

El volumen de agua que llega hasta la superficie de saturación de los acuíferos es igual al volumen total de la infiltración menos la cantidad de agua retenida en el suelo. El contenido de humedad en el suelo anterior al comienzo de la infiltración, es uno de los factores más importantes que influyen sobre la recarga de agua subterrá-

nea. Al aumentar la humedad del suelo la capacidad de infiltración disminuye con el tiempo.

1.1.5 El agua en el subsuelo

El agua en el subsuelo puede encontrarse bajo una amplia gama de condiciones que se extienden desde el agua que circula libremente hasta el agua que se encuentra firmemente fijada en el interior de las estructuras cristalinas. El agua en el subsuelo se divide en las siguientes categorías (figura 1.5):

El agua que existe en los poros o intersticios de las rocas sin saturarlos por completo, recibe el nombre de *agua subsuperficial*. El agua que satura por completo los poros del subsuelo recibe el nombre de *agua subterránea*.

La *zona de aireación* es la zona no saturada del subsuelo. En ella existe vapor de agua a presión atmosférica, aire u otros gases y agua líquida a presión menor que la atmosférica. Normalmente sobreyace a la zona de saturación. La zona de aireación puede no existir debajo de zonas pantanosas, presas o lagos. Para su análisis la zona no saturada se divide en tres partes: franja de humedad del suelo, franja intermedia y franja capilar.

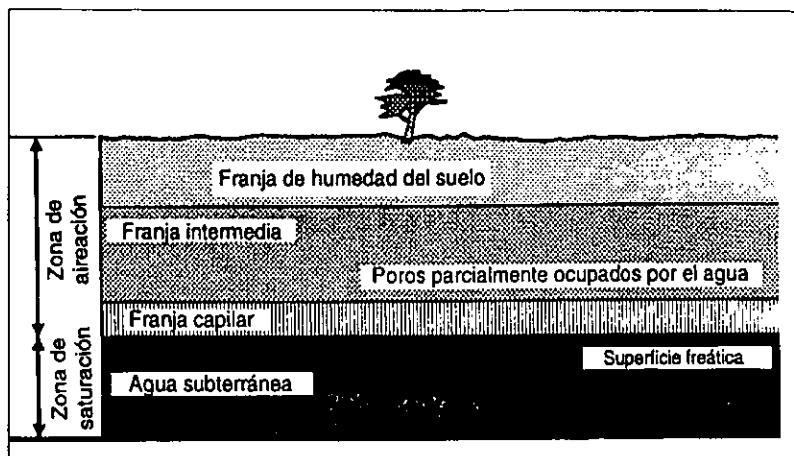
La *franja capilar* es la parte de la zona no saturada que se encuentra en contacto con la de saturación. El ascenso del agua u otro fluido en la zona de contacto de tres medios diferentes, agua, aire y material sólido, se produce cuando el fluido tiene una fuerza de adhesión al sólido mayor que la fuerza de cohesión que existe entre las moléculas del mismo fluido.

La *franja intermedia* se ubica entre la franja capilar y franja de humedad del suelo. Su espesor puede variar de cero, cuando el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie, como puede ser en zonas muy húmedas, hasta centenas de metros cuando el nivel freático se encuentra muy profundo. El agua en esta zona se mueve por medio de las fuerzas de gravedad.

La *franja de humedad* del suelo está constituida por suelo y otros materiales cercanos a la superficie, que pueden descargar agua a la atmósfera por evapotranspiración. Se extiende desde la superficie del suelo hasta la profundidad a la que penetran las raíces de las plantas, por lo que su espesor es variable en función del tipo de suelo y vegetación. El contenido de humedad varía en función de las fluctuaciones de la temperatura y de la tensión de vapor, causadas por las variaciones de temperatura del aire y del suelo. Durante días cálidos, el agua es transportada hasta la superficie del suelo por la acción de las fuerzas capilares, desde donde puede ser evaporada a la atmósfera. En las noches en las que el suelo pierde gran cantidad de calor por efecto de una baja radiación, tiene lugar, como consecuencia, una condensación de vapor de agua de la atmósfera sobre la superficie de suelo en forma de rocío, el cual puede hu-

medecer considerablemente los tres primeros centímetros del suelo. Esta zona tiene una gran importancia para la agricultura, por ser de donde se alimentan los cultivos.

Figura 1. 5 ⁽¹²⁾
El agua en el subsuelo



La *zona de saturación* es aquella en el que el agua satura por completo los poros de subsuelo, la cual es una característica fundamental de los acuíferos. La franja capilar está separada de la zona de agua subterránea por la superficie freática. La superficie freática es la superficie saturada de un terreno no confinado sobre el cual la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica ⁽¹³⁾.

A profundidades superiores a los 30 000 m el calor y la presión allí reinantes son ya tan elevados que no permiten la existencia de espacios porosos ni la existencia de agua libre; a estas profundidades, el agua sólo puede existir en forma de combinación química con otras sustancias.

1.1.6 El ciclo hidrológico en la República Mexicana

Para la República mexicana la precipitación media anual es de 1 570 mm, equivalente a una lámina de 780 mm. Su distribución en el espacio y en el tiempo es muy variable. El 42% del territorio ubicado en el norte del país, en la zona de los desiertos, tiene precipitaciones medias anuales inferiores a los 500 mm, llegando a 50 mm en algunas zo-

¹² Rodarte L., Hidrología subterránea, IMTA, 1999

¹³ Davis R. De Weist, Hidrogeología, Ed. Ariel, 1971

nas de la península de baja California; mientras que en una porción del sureste, que cubre un 7% del país, se localizan zonas con precipitaciones superiores a los 2 000 mm, como en las sierras de Zongolica, Ver. y del Soconusco, Chis (¹⁴), donde se presentan precipitaciones de hasta más de 5 000 mm (figura 1.6). Además la influencia de la orografía es determinante en la definición de la distribución de la lluvia, en general es mayor en las planicies costeras que en el altiplano para una misma latitud y es menor en la planicie que en las montañas circunvecinas.

Figura 1.6
Precipitaciones medias anuales mm (1931-1970)



La temporada de lluvias se presenta frecuentemente en los meses de junio a octubre, bajo la influencia de los ciclones del pacífico y del golfo. En algunos lugares, como en la porción noroccidental del país, se tiene una segunda temporada de lluvias durante diciembre y enero.

El escurrimiento medio anual en México es de 410 km³. Este volumen que constituye la disponibilidad media anual de agua renovable presenta también una distribución espacial y temporal poco uniforme; el 50% se genera en el sureste en tan

¹⁴ Acosta G., Situación General. El Recurso Hidráulico Superficial en México, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 1993

sólo el 20% del área del país, mientras que una porción del norte, que abarca un 30% del territorio nacional, produce solo el 3%. Además, el escurrimiento se concentra en la mayor parte del país, en tres o cuatro meses al año, alrededor de septiembre ⁽¹⁵⁾.

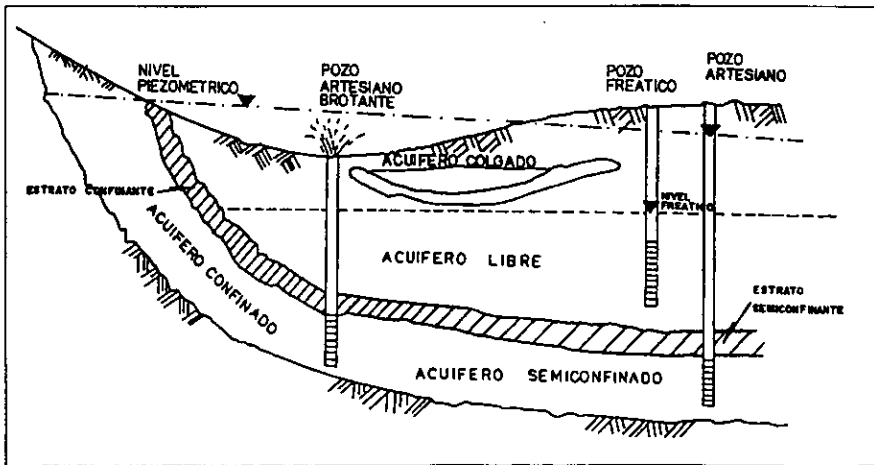
Se infiltran en el subsuelo en forma natural 40 km³ por año, pero la recarga total de los acuíferos es del orden de 55 km³, 40 km³ que se infiltran en forma natural y 15 km³ inducidos por las actividades humanas al aprovechar tanto el agua superficial como la subterránea, por sobre riegos en zonas agrícolas y pérdidas en conducción de agua potable y drenaje en zonas urbanas, principalmente.

1.2 Acuíferos

Se denomina *acuífero* a una roca o formación geológica, a una parte o un grupo de formaciones geológicas que contienen cantidades significativas de agua y además que se puedan extraer.

Los acuíferos pueden estar constituidos por depósitos sedimentarios no consolidados, por rocas plutónicas masivas fracturadas, por estratos de areniscas porosas, por bancos de calizas carstificadas y por otros muchos contextos geológicos. Los tipos más comunes de acuíferos son los siguientes (figura 1.7) ⁽¹⁶⁾:

Figura 1.7
Clasificación de los acuíferos



¹⁵ CNA, Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos, 1994

¹⁶ Hantush, Hydraulics of Wells, Academic Press, 1964

- *Acuíferos artesianos o confinados.* Son aquellos que están a presión, confinados entre dos rocas o estratos impermeables, los pozos perforados en estos acuíferos se denominan pozos artesianos y si la elevación del brocal del pozo está abajo de la superficie piezométrica del acuífero confinado, se denominan artesianos brotantes.
- *Acuíferos freáticos o libres.* Son aquellos cuya presión es la atmosférica, por lo que su nivel piezométrico coincide con la línea de saturación. Un caso especial de este tipo son los denominados acuíferos colgados, que sobreyacen a una roca o formación impermeable y son generalmente de poca extensión.
- *Acuíferos semiconfinados.* Estos acuíferos ganan o pierden presión a través de los estratos que los semiconfinan y se pueden alimentar por los acuíferos vecinos, cuando además de la alimentación de los acuíferos vecinos, existe aportación de los estratos semiconfinantes se denominan acuíferos semiconfinados modificados.
- *Acuífero colgado.* En muchas zonas, la primera agua no confinada que suele encontrar está frecuentemente por encima de la zona general de las aguas freáticas, constituyendo un volumen de agua más o menos aislado cuya posición está impuesta por la estructura y estratigrafía del terreno; el agua que se encuentra bajo estas condiciones se le denomina agua colgada.

1.2.1 Piezometría

La *piezometría* en los acuíferos se refiere a la medición de las fluctuaciones que se presentan en los niveles del agua subterránea, producidos por causas tanto naturales como artificiales.

Mediante pozos de observación, debidamente localizados y distribuidos en las áreas de estudio, es posible determinar las superficies piezométricas efectuando lecturas periódicas de los niveles estáticos del agua subterránea, que son en sí, los que interesan para el estudio del comportamiento de los acuíferos. Recibe el nombre de *nivel estático*, el nivel de agua que no se encuentra afectado por el bombeo en el pozo observado o en pozos cercanos a él, en consecuencia refleja el nivel regional del acuífero (¹⁷).

En el caso de acuíferos libres, la superficie piezométrica coincide con el manto freático, mientras que en los confinados la superficie queda por encima o por debajo del nivel anterior, dependiendo de la diferencia de presiones que haya los acuíferos y los puntos observados.

Dependiendo de la profundidad y diseño de los pozos de observación se registran los niveles piezométricos del agua en los acuíferos, si éste es somero o poco profundo, el nivel en el pozo será el nivel de aguas freáticas.

¹⁷ Tinajero G., Aspectos Fundamentales en el Estudio del Agua Subterránea, SARIH, 1982

Otro nivel de aguas es el *nivel dinámico* que es el nivel del agua cuando el pozo se encuentra en operación, por lo que dependerá del caudal de extracción, características del suelo y en cierta medida también de la capacidad de la bomba.

A continuación se presenta un ejemplo de los niveles estático y dinámico en el acuífero de Aguascalientes y su variación en el tiempo. El nivel estático se obtuvo de mediciones que realizaron en el campo mediante estudios geohidrológicos específicos⁽¹⁸⁾. El nivel dinámico se estimó aumentando simplemente una constante 29.53 m, abatimiento promedio que se presenta en la zona, se obtuvo a partir del nivel estático según la siguiente fórmula:

$$ND = \text{profundidad NE(m)} + 29.53$$

$$\text{Profundidad NE(m)} = \text{elevación media} - 1914.33$$

donde 1914.33 es la elevación media del terreno.

Tabla 1.2
Niveles estático y dinámico del Valle de Aguascalientes

AÑO	Elevación media N.E. msnm	Profundidad N.E. m	Profundidad N.D. m	Volumen de extracción Mm ³ /año
Ene-68	1,873.63	-40.70	-70.23	
Ene-69	1,874.18	-40.15	-69.68	
Feb-71	1,872.17	-42.16	-71.69	262.3
Dic-71	1,872.09	-42.24	-71.77	
Ene-72				262.2
Ene-80				339.8
Ene-81				341.0
Ene-86	1,852.14	-62.19	-91.72	
Ene-87				444.0
Jun-89				
Ene-90	1,840.14	-74.19	-103.72	
Ene-95				450.0
Ene-96	1,826.34	-87.99	-117.52	437.6
Jun-98				415.7

En la siguiente gráfica (figura 1.8) se muestra la variación de los niveles anteriores, y se ajustó una línea de tendencia, para cada nivel.

En este ejemplo se puede observar el abatimiento de los niveles; en 30 años se ha abatido el nivel estático aproximadamente 47 metros, y en los últimos 6 años 13 metros, lo que implica un aumento en el nivel de bombeo de unos 60 m en

¹⁸ Arreguín J., Banco mundial, 1999

1968 a más de 100 m en 1995, representando un costo adicional de bombeo muy alto y una reducción en el almacenamiento del acuífero.

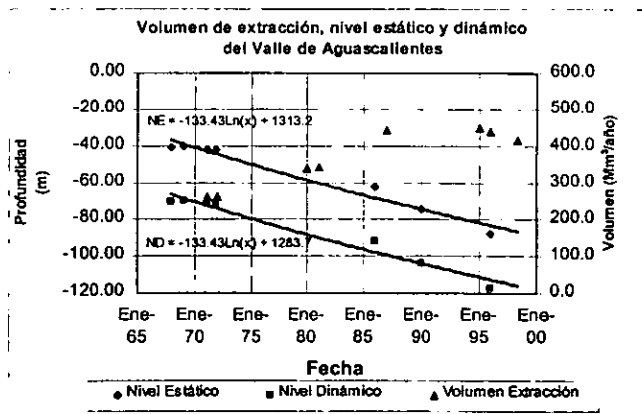
1.2.2 Propiedades de los acuíferos

Las propiedades de los acuíferos son la porosidad, permeabilidad, conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento (19).

La *porosidad* es una medida de la presencia de poros, fisuras, etc. en el suelo, y se define como la relación del volumen de vacíos (V_p) al volumen total de una muestra de suelo determinada (V_t).

$$n = \frac{V_p}{V_t} \quad (1.1)$$

Figura 1.8
Profundidad de los niveles estático, dinámico y volumen de extracción



La porosidad de un medio depende de varios factores. Para medios no consolidados son factores de importancia el acomodamiento de los granos, su forma, gradación y tamaño. Para medios consolidados, la porosidad depende principalmente del grado de cementación, así como del estado de disolución y fracturamiento de la roca, por lo que se le habla de *porosidad secundaria*.

19 Peña S., Hidrología Subterránea, Colegio de Posgraduados, 1996

En el caso de los acuíferos en donde las rocas están totalmente saturadas, el volumen de vacíos es igual al contenido de agua. En algunos tipos de rocas o formaciones geológicas, de esa agua que ocupa los intersticios sólo puede extraerse una parte mediante pozos o drenes, por lo que íntimamente ligado a este concepto se define el *coeficiente de almacenamiento*, como la cantidad de agua que puede ceder o almacenar una roca o formación bajo un abatimiento o recuperación unitario del nivel piezométrico.

La *conductividad hidráulica*, refleja la facilidad con que el agua puede fluir o transmitirse a través de una roca o formación, su valor representa la cantidad de agua que circula a través de una sección transversal unitaria, perpendicular a la dirección del flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario, sus dimensiones son de velocidad y en este sentido representa la velocidad del flujo con la cual el agua atraviesa el acuífero. Su valor depende de las propiedades del medio. Se habla de conductividad hidráulica solamente cuando se trata de agua, cuando se habla de otros fluidos se denomina *permeabilidad* e influyen las propiedades del fluido.

No es posible concluir que los mejores acuíferos son aquellos que tienen una mayor porosidad, puesto que es también un factor importante la conductividad hidráulica. Por ejemplo las arcillas tienen una gran porosidad pero una conductividad hidráulica muy baja, por lo que no ceden agua.

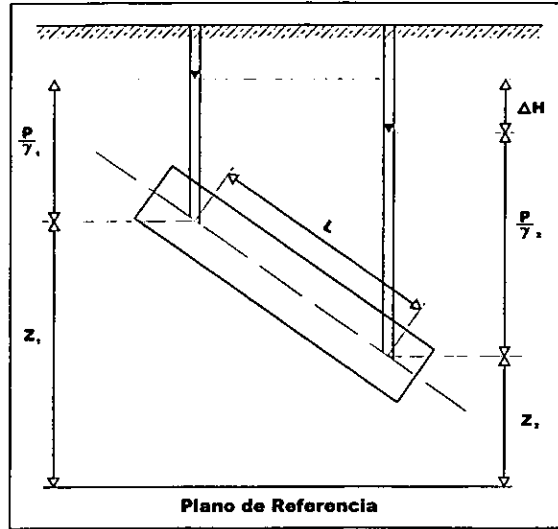
La velocidad de flujo y por lo tanto el caudal, en un acuífero, se puede determinar con la Ley de Darcy. En la figura 1.9 se muestra esquemáticamente el experimento con el que Darcy obtuvo su ley. El flujo va de la sección 1 hacia la sección 2, debido a una diferencia de carga hidráulica ΔH en ese sentido, esta diferencia se obtiene a partir de la carga de posición z y de la presión, que se tiene en las secciones 1 y 2. La presión en estos puntos se obtiene a partir de unos tubos llamados piezómetros o manómetros, de tal manera que la presión es medida a través de la carga de altura del fluido que contienen, en este caso, altura de agua. En algunos casos a la carga hidráulica h se le suma también una carga debida a la velocidad del fluido, que generalmente es muy pequeña en el medio poroso y se desprecia.

La ley de Darcy muestra que la velocidad del flujo v es directamente proporcional a la diferencia de carga hidráulica ΔH e inversamente proporcional a la distancia L en que ocurre este cambio:

$$v = k \frac{\Delta H}{L} \quad (1.2)$$

donde: k es la conductividad hidráulica,
 ΔH es la pérdida de carga hidráulica y
 L es la longitud en que ocurre este cambio.

Figura 1. 9
Experimento de Darcy



Para casos en que el fluido no es agua o ésta tiene cambios de temperatura o densidad, en lugar de la conductividad hidráulica se utiliza el término permeabilidad, este concepto es más amplio, ya que depende, además de las características del medio por el que circula, del tipo de fluido, que se puede caracterizar a través de su densidad, peso específico y viscosidad. Cuando se trata de agua, las características anteriores son prácticamente constantes y se utiliza el término conductividad hidráulica en lugar de permeabilidad.

La *transmisividad* es el valor de la conductividad hidráulica multiplicada por el espesor saturado del acuífero, también suele denominarse transmisibilidad.

Adicionalmente los acuíferos pueden ser homogéneos e isotrópicos cuando tienen las mismas características en toda su extensión y en todas las direcciones, y puede tomarse esta característica a través de su permeabilidad. En contraste, cuando los acuíferos tienen distinta permeabilidad en toda su extensión, serán heterogéneos, y cuando la permeabilidad sea distinta en algún sentido vertical u horizontal se dirá que son anisotrópicos.

1.2.3 Las formaciones acuíferas en la República Mexicana

El territorio mexicano cuenta con una gran variedad de características geohidrológicas en sus casi dos millones de kilómetros cuadrados, las principales unidades geohidrológicas se encuentran dentro de 8 unidades fisiográficas (figura 1.10) ⁽²⁰⁾:

Centro. Comprende cerca del 30% del área de la república. La parte norte es árida e incluye cuencas y valles a una elevación de entre los 396 m a los 1980 m.s.n.m. Los acuíferos se encuentran en aluviones, rocas volcánicas y calizas. Los acuíferos explotados en los aluviones y rocas volcánicas cubren aproximadamente 6,990 km². Mas del 50% del agua total extraída en la república son extraídos en cerca de 26,000 pozos usados para irrigar esas áreas. El agua municipal es obtenida solamente de fuentes subterráneas. La mayoría de las aguas se originan en aluviones cuaternarios y en algunos piroclastos.

Sierra Madre Oriental. El agua subterránea se encuentra en calizas del cretáceo en los angostos valles intermontaños. El agua es extraída en esta zona para el abastecimiento de ciudades importantes como Monterrey, Saltillo y Monclova; también es explotada una zona carbonífera en esta sierra donde los pozos han sido perforados a una profundidad que va de los 198 m a los 1980 m. Cerca de 40 pozos producen aproximadamente el 100 Mm³ por año, lo que es equivalente a 274,000 m³/día. Drenes y túneles que alcanzan los acuíferos en las calizas producen adicionalmente 69 Mm³ por año.

Las calizas cretácicas permeables son de mayor importancia hidrogeológica ya que son fácilmente rellenadas con la lluvia y el escurrimiento. Estos acuíferos contienen agua dulce y moderadamente salada bajo presión, pozos artesianos pueden producir hasta 26,200 m³/día (9.5 Mm³/año).

En valles topográficamente cerrados y cuencas tales como Tula y Jaumave cerca de Cd. Victoria, pozos perforados en calizas producen aproximadamente el 7% del total del agua subterránea. En las laderas del este de Sierra Madre Oriental cerca de la planicie costera del Golfo de México, los acuíferos de caliza dan origen a varios manantiales que tienen una descarga total de 120 Mm³/año.

Sierra Madre Occidental. Tiene cerca de 241 km. de ancho y esta sobre rocas volcánicas del mioceno (riolitas) y también rocas plutónicas. Estas no son consideradas que sean acuíferos importantes. La mayoría de los pozos en esta zona están en rocas piroclásticas y en sedimentos no consolidados.

Sierra Madre del Sur. Este sistema es la continuación de la Sierra Madre Occidental, rocas metamórficas actúan como una barrera inferior impermeable. El agua subterránea es forzada a fluir hacia arriba a través de las calizas del antiguo cretácico.

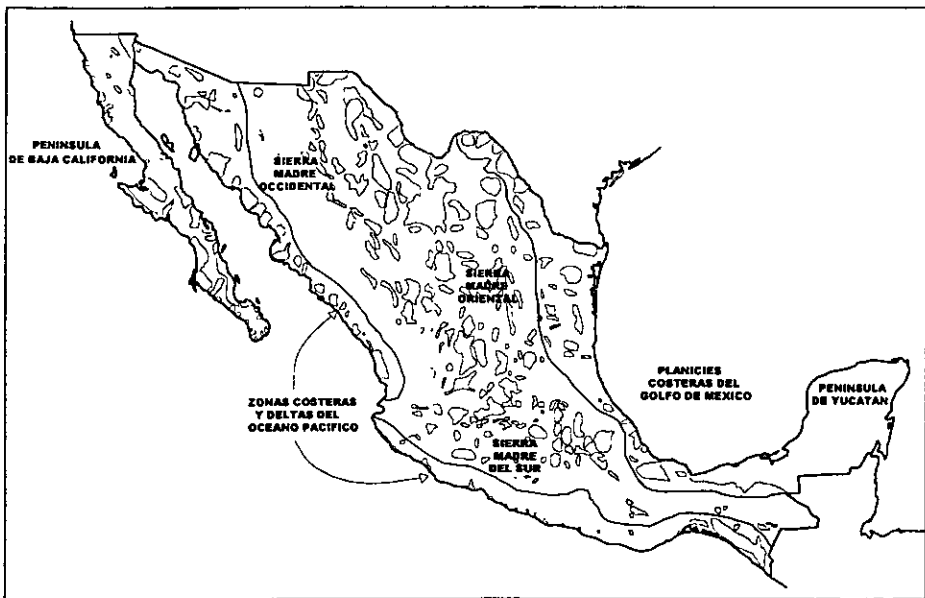
²⁰ Fletcher G., Groundwater and wells, Jhonson Division., 1986

El acuífero principal que alimenta a una serie de manantiales con una producción total de 1000 Mm³ al año, sin embargo no es explotado.

Planicies costeras del Golfo de México. El agua subterránea en esta zona es utilizada en la región fronteriza entre México y Estados Unidos. Cerca de un 5% son extraídos de acuíferos consistentes en formaciones de sedimentos marinos del cretáceo – Mioceno superior. En la vecindad con Veracruz cerca de 120 Mm³ son extraídos de formaciones marinas sedimentarias.

Zonas costeras y deltas del Océano Pacífico. En esta zona se extrae cerca del 30% del agua subterránea de acuíferos de arena y grava. En las planicies de Sinaloa, cerca de 350 Mm³ son extraídos anualmente, principalmente de cenizas volcánicas, conglomerados y arenas. Estas aguas son utilizadas para uso municipal e irrigación.

Figura 1.10
Acuíferos en la República Mexicana



Península de Baja California. Cerca de un 5% del agua subterránea son extraídos en la Península de Baja California. Rellenos aluviales y rocas volcánicas fracturadas constituyen a los acuíferos principales.

Península de Yucatán. La Península de Yucatán es una región plana sin ríos, sobre rocas calizas con mucha carsticidad por lo que son altamente permeables y de un gran potencial; cerca de 700 millones de m³ son bombeados anualmente. (para mayor detalle consultar la tabla 2.1 del capítulo 2)

1.3 Captaciones

La descarga del agua infiltrada que llega a los acuíferos puede tener lugar de varias maneras, de entre las cuales los manantiales, las descargas artificiales y la transpiración de las plantas son las más importantes. Localmente, el agua puede aparecer en la superficie en forma de descarga difusa que se evapora directamente desde la superficie del suelo, o bien en forma más ostensible alimentado ríos y lagos.

Las descargas artificiales, son las llamadas *captaciones* de agua subterránea, las cuales son dispositivos para la extracción del agua, aunque no siempre para su aprovechamiento, como en el caso de drenes agrícolas. Las captaciones se pueden clasificar en: norias, drenes, manantiales, galerías filtrantes y pozos (²¹).

Las *norias* son agujeros verticales excavados de manera manual, de sección circular, cuadrada o rectangular, con dimensiones suficientes para albergar a una persona o dos; debido a su proceso constructivo, la sección transversal debe ser de uno a dos metros y la profundidad puede variar de unos 30 a 50 metros, aunque en ocasiones puede llegar a ser mucho más profundos, las norias no penetran mucho más que el nivel freático, debido a la dificultad para desalojar el agua durante su construcción, por lo tanto su producción es pequeña.

Los *drenes* consisten en zanjas horizontales que captan las aguas freáticas, normalmente son a cielo abierto, o bien alojando en ellas tubos perforados y cubriéndolos posteriormente, en zonas agrícolas se utilizan generalmente para desalojar los excedentes de riego y para abatir los niveles superficiales, evitando así la evaporación directa y en consecuencia la acumulación de sales en el suelo, pero pueden catalogarse también como una captación para el posterior aprovechamiento del agua que recolectan estas obras.

Los *manantiales* son lugares naturales, donde normalmente aflora agua al cortar a la superficie piezométrica la superficie del terreno, también se encuentran en rocas fracturadas, donde elevadas temperaturas y presiones hacen surgir los manantiales termales, geissers, etc. En general y debido a que son descargas naturales de los acuíferos, su productividad persiste durante todo el año o puede variar hasta agotarse; el funcionamiento será indicativo de la capacidad del acuífero que los alimenta.

Las tres variables principales que determinan la descarga de un manantial son la permeabilidad del terreno, el área de alimentación y el volumen de recarga.

²¹ Peña S., Hidrología Subterránea, Colegio de Posgraduados, 1996

La mayoría de los manantiales presentan variaciones apreciables en su descarga como respuesta a las fluctuaciones estacionales de la precipitación. Así por ejemplo los manantiales que tienen muy poco caudal fluyen solamente durante el corto periodo que sigue a cada precipitación. Otros manantiales, que surgen de acuíferos de gran capacidad de almacenamiento, pueden presentar fluctuaciones en el caudal de descarga apenas apreciables.

Casi todos los manantiales de gran caudal proceden de acuíferos constituidos por corrientes de lavas, calizas cavernosas y gravas. La mayoría de estos manantiales emergen a través de grandes aberturas a modo de cavernas. Otros terrenos acuíferos, tales como las areniscas, los conglomerados y las arenas, carecen por general de permeabilidad suficiente para poder formar manantiales importantes. Los pequeños manantiales pueden encontrarse en todo tipo de terreno.

Las *galerías filtrantes* son construcciones que consisten básicamente en túneles, generalmente de forma circular o semejante y prácticamente horizontales; el objetivo es que atraviesen el contacto con el nivel freático y se alojen en la parte saturada del acuífero, captando filtraciones de las aguas subterráneas.

Los *pozos* son dispositivos que se utilizan para la extracción de agua, son agujeros verticales de diámetro pequeño, pero a gran profundidad.

El diseño de los pozos, y en general de cualquier obra de captación, debe perseguir los siguientes objetivos:

1. El mayor caudal con un mínimo de abatimiento, en concordancia con las características del acuífero.
2. El agua extraída debe carecer de partículas sólidas en suspensión o arenas.
3. La mayor vida útil del pozo.
4. Un costo razonable en su construcción y operación.

Las pérdidas hidráulicas que ocurren en un pozo de bombeo se pueden dividir en dos partes principales; las que ocurren en el acuífero y las que tienen lugar en el pozo. Las pérdidas en el acuífero dependen de la conductividad hidráulica del acuífero y de las condiciones de funcionamiento y son proporcionales al caudal elevado a la primera potencia, ya que se trata de un flujo laminar. Las pérdidas hidráulicas del pozo se originan en régimen turbulento, por lo que dependerán del caudal elevado a una potencia superior a uno. Las pérdidas que ocurren en el acuífero son inevitables, pero las que ocurren en el pozo se pueden minimizar al realizar un buen diseño del pozo.

Para evitar la producción de arenas, se requiere de un buen diseño de la zona de captación para lo que se requiere un filtro de gravas o arenas y la dimensión adecuada de la abertura del ademe. Los trabajos de operación y mantenimiento serán

los responsables de alargar la vida útil del pozo. Desde luego el equipo de bombeo es parte importante e integral del pozo.

1.4 Balances

Para cuantificar la potencialidad de los acuíferos, se utiliza un método que trabaja directamente con ellos, considerando el agua ya infiltrada y relativamente al margen de los fenómenos que ocurren en la superficie, dicho método recibe el nombre de balance de agua subterránea ⁽²²⁾.

El fin primordial de los balances de agua subterránea es determinar el volumen de recarga a los acuíferos, y poder así obtener los volúmenes de agua que se pueden utilizar sin inducir efectos de agotamiento, efectos ambientales perjudiciales y realizar un uso racional del recurso.

Este método se basa en el principio de la conservación de la materia, ya que en un intervalo de tiempo dado y en una área determinada, tienen lugar recargas y descargas que hacen variar el almacenamiento de agua ya existente, aumentándolo o disminuyéndolo, según estos factores puede ser uno mayor que otro.

En forma general se representa de la siguiente manera:

$$E - S = \Delta A \quad (1.3)$$

donde: E son las entradas,
S las salidas y
 ΔA es el cambio en el almacenamiento,

todo lo anterior referido a un intervalo de tiempo y en una sección determinada ⁽²³⁾.

Las entradas a un acuífero se pueden dividir en las siguientes componentes: entradas provenientes de acuíferos vecinos, que se denominan *flujo subterráneo horizontal*; las recargas provenientes de la infiltración de la lluvia, sobre riegos, fugas en las redes de distribución de agua en centros urbanos o en drenajes, estas últimas se denominan generalmente *recargas verticales*.

En las salidas, se consideran las *salidas verticales y las horizontales*; dentro de las primeras se pueden mencionar las extracciones por medio de pozos, norias y manantiales, la evapotranspiración en zonas donde los niveles del agua son poco

²² Tinajero J., Aspectos Fundamentales en el Estudio del Agua Subterránea, SARH, 1982

²³ Viessman W., Hamaugh T., Knapp Jhon, Introduction to hydrology, Intex Educational Publishers, 1972

profundos y como salidas horizontales las salidas hacia acuíferos vecinos, el drenaje por ríos, drenes o por manantiales.

El cambio de almacenamiento en un acuífero es el volumen neto de agua extraído y se obtiene al multiplicar el coeficiente de almacenamiento y el volumen drenado

Dentro del planteamiento descrito anteriormente la ecuación de balance se puede escribir de la siguiente manera:

$$(E_m + (I_1)(LI) + (I_2)(A) + (I_3)(PU)) - (B + S_m) = V_d(S) \quad (1.4)$$

donde:

- E_m flujo horizontal de entrada
- LI lluvia,
- A agua utilizada en la agricultura,
- PU agua utilizada en ciudades o uso público urbano
- B bombeo o extracción por captaciones
- S_m flujo horizontal de salida
- V_d volumen drenado
- S coeficiente de almacenamiento
- $I_{1,2,3}$ coeficientes de infiltración.

Las entradas horizontales (E_m) se calculan mediante la ecuación de Darcy, curvas equipotenciales en planta y la transmisividad. Las equipotenciales de la red de flujo se obtienen mediante la profundidad de los niveles en pozos o norias y referido a un plano de comparación, generalmente el nivel del mar, estas líneas equipotenciales se denominan también curvas de igual elevación del nivel estático y dan una idea del flujo de agua subterráneo.

El área considerada se divide en canales de flujo, asignando sus anchos, gradientes hidráulicos y transmisividad, para obtener el caudal de entrada al acuífero, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q = k(A)(v) = a(b) \left(k \frac{\Delta H}{L} \right) = a(T) \text{ grad} \quad (1.5)$$

- donde: Q Volumen de entrada, para cada canal de flujo
- k conductividad hidráulica
- v velocidad
- a ancho

b	espesor del acuífero
$\frac{\Delta H}{L}$	gradiente hidráulico
A	área

La suma de los caudales para cada canal de flujo dará como resultado la entrada horizontal al acuífero.

La recarga por lluvia se obtiene mediante la precipitación media anual en la zona, el área del acuífero y el coeficiente de infiltración, la recarga proveniente de los excesos de riego y la recarga proveniente de fugas en redes de distribución de agua en ciudades y redes de drenajes se obtienen mediante datos estadísticos multiplicados por sus respectivos coeficientes de infiltración. Normalmente se asigna un coeficiente de infiltración a cada componente o uno global para todos, el problema que se presenta es que el valor de los coeficientes de infiltración no se conocen con exactitud.

Una forma de estimar estos coeficientes de infiltración es considerando las condiciones del terreno, así como un porcentaje de "pérdidas" en el sistema de aprovechamiento, en muchas ocasiones este valor es empírico o se tiene que tomar de otras zonas donde es conocido.

Finalmente, el volumen a costa del almacenamiento $V_d(S)$, tiene dos componentes, el volumen drenado (V_d) y el coeficiente de almacenamiento (S). El primero representa la diferencia entre los niveles estáticos y se obtiene por la diferencia en observaciones en pozos y drenes en diferentes fechas. El coeficiente de almacenamiento S es un coeficiente que representa las características de los materiales que conforman el acuífero y da una idea de la cantidad de agua que el acuífero puede "ceder" y generalmente en la ecuación de balance queda como incógnita o puede obtenerse por medio de pruebas de bombeo. El volumen drenado al multiplicarse por el coeficiente de almacenamiento da como resultado el volumen neto de agua extraído del acuífero en el intervalo de tiempo correspondiente a las observaciones en niveles estáticos, esto es, un cambio de almacenamiento.

Lo ideal es tener varios periodos de observación para contar con varias ecuaciones para obtener los coeficientes de infiltración y el de almacenamiento, si no se cuenta se hacen variaciones paramétricas hasta lograr valores más o menos lógicos. Coeficientes de infiltración de la lluvia alrededor de 0.10 son comunes. En zonas de riego con sistemas tradicionales de surcos o inundación los coeficientes de infiltración pueden llegar a valor de 0.30 y cuando se tengan sistemas eficientes como goteo o aspersión los coeficientes pueden bajar al rededor de 15%. En zonas urbanas el coeficiente dependerá de las pérdidas en las redes de distribución y del estado de las redes de drenaje, pero puede fijarse entre 0.15 y 0.30, o puede tomarse un 50% del volumen servido menos la descarga de aguas residuales.

A continuación se presenta un balance, de acuerdo con la expresión 1.4, realizado en el acuífero de Aguascalientes para el año de 1998 ⁽²⁴⁾.

Del balance se puede observar que para ese año las entradas fueron de 300 Mm³, y las salidas de 397 Mm³, lo que representa una sobre explotación del acuífero de 97 Mm³ en ese año, lo que se refleja en una disminución del almacenamiento.

Tabla 1.3
Balance de aguas subterráneas

Fecha			Jun-98
Residual 0.45			Mm ³ /año 51.3
Lluvia	Area	km ²	600
	Coefficiente	l ₁	0.15
			mm 526.2
Público Urbano mas industrial			l ₂ 0.55
			Mm ³ /año 114.1
Agrícola mas otros			l ₃ 0.35
			Mm ³ /año 281.4
Entradas	Recarga vertical	Lluvia	Mm ³ /año 47.4
		P.U.	Mm ³ /año 34.5
		Agrícola	Mm ³ /año 98.5
	Lateral (b) subterránea		Mm ³ /año 120.0
	Total		Mm ³ /año 300.4
Salidas	Bombeo		Mm ³ /año 395.5
	Evaporación		Mm ³ /año 0.0
	Lateral		Mm ³ /año 2.0
	TOTAL		Mm ³ /año 397.5
Almacenamiento			Mm ³ /año -97.1
S			0.12
Volumen drenado			Mm ³ /año -822

Como residual se consideró la descarga de agua residuales de la ciudad y esta cantidad se obtuvo a partir de una estación hidrométrica que se encuentra sobre el río Aguascalientes, a la salida de la ciudad, y según los datos registrados en época de estiaje y el promedio de algunos años, se obtuvo que el agua que escurre por el río representa el 45% de las aguas del público urbano. Como los datos utilizados fueron de la época de estiaje y el acuífero no aporta agua al río por estar su nivel estático muy profundo, el agua que pasa por el río es el agua residual de la ciudad.

²⁴ Arreguin J., Banco mundial, 1999

Para la obtención de la lluvia se consideró un área de 600 km² con una lámina llovida de 526.2 mm, dato obtenido de estaciones climatológicas, y un coeficiente de infiltración del 0.15.

Dentro del volumen público urbano también se consideró el uso industrial y dentro del agrícola se consideró el doméstico, por tener coeficientes de infiltración parecidos. Los volúmenes multiplicados por sus coeficientes de infiltración dan las entradas verticales al acuífero.

Para las salidas se tomó en cuenta el bombeo que se tiene en la zona, este dato fue obtenido de los censos que se tienen en la región. Las salidas y entradas laterales fueron calculadas con las equipotenciales. No se consideró evaporación ya que el nivel estático del acuífero se encuentra a gran profundidad.

De esta manera sacando la diferencia entre las salidas y las entradas, se tienen que las salidas son mayores que las entradas al acuífero, hecho que se refleja en el almacenamiento negativo.

El almacenamiento es el volumen real de agua que se extrae, y este se calculó haciendo uso del coeficiente de almacenamiento, que se obtuvo de la división de las entradas menos las salidas entre el volumen drenado, expresión 1.4.

Para el volumen drenado se consideró 1.37 por el área del acuífero, donde el 1.37 se obtuvo de la diferencia en el nivel estático durante un año, y el área del acuífero se estimó en 600 km². Por lo tanto el volumen drenado es una relación del cambio del nivel estático entre el área que este cubre, o el volumen que se "saca" del acuífero considerando los espacios ocupados por el suelo.

Cuando se tiene un uso eficiente del agua se tiene que las extracciones disminuyen, pero por otro lado como hay menos pérdidas en los diferentes usos se refleja como una menor infiltración de agua del acuífero, por lo que baja la recarga inducida, entonces se tiene que reajustar el balance para determinar la condición del acuífero.

Con la ayuda de los balances se puede llegar a una condición óptima para el acuífero en la que no exista sobre explotación, se pueden modificar las extracciones y su distribución en los diferentes usos según diferentes criterios, hasta lograr una condición de equilibrio, en el que no exista la sobre explotación. Pero poder aplicar estas reducciones en los usos del agua es muy difícil de llevar a cabo, ya que influyen aspectos sociales, políticos, económicos y no solo técnicos.

CAPÍTULO 2

El agua en México

México cuenta con una superficie aproximada de dos millones de kilómetros cuadrados y una población actual de 98 millones de habitantes, pero la distribución geográfica y las actividades económicas están en proporción inversa con la disponibilidad de agua ⁽²⁵⁾ (Tabla 2.1).

Nuestra orografía y posición geográfica determinan que el agua se distribuya en forma muy desigual, tenemos años muy abundantes y otros muy escasos; por otra parte, se tienen zonas muy áridas en el norte y noroeste del país, donde las precipitaciones llegan a ser de sólo unos 50 milímetros por año, en contraste con zonas muy húmedas, como es el caso del trópico mexicano donde se llegan a tener precipitaciones de 5 metros por año ⁽²⁶⁾. Aún cuando la cifra total del volumen natural de los ríos es de 410 km³, no refleja la realidad hidrológica del país, debido a que los factores orográficos y climáticos del país crean una gran desigualdad entre las diferentes regiones del país.

Más de la mitad del territorio, localizado en el noreste y el altiplano, dispone del 19% del escurrimiento medio anual, pero comprende dos tercios de la población nacional, el 70% de la actividad industrial y el 40% de las tierras de temporal, mientras que en el sur este, que abarca menos de la cuarta parte de la superficie nacional, ocurre el 67% del total del agua, habita el 24% de la población y la industria es muy incipiente. Se observa también que en altitudes superiores a los 2 000 metros sobre el nivel del mar se asienta más de la cuarta parte de nuestra población y se dispone del 4% del escurrimiento. En contraste, por abajo de los 500 metros de altitud se concentra el 50% del escurrimiento para una población similar.

La mayoría de los principales centros urbanos se ubican en las regiones que cuentan con las menores posibilidades de agua del país; de este modo, el líquido se transporta a costos elevados, desde sitios cada vez más distantes. También la industria, que llega a utilizar grandes cantidades de agua, se encuentra donde ésta escasea. En el campo, el problema del agua presenta aspectos igualmente preocupantes. Las zonas áridas y semiáridas, donde se concentra más de la mitad de los suelos aptos para la agricultura, disponen de menos del 10% del total del agua del país. En este sector se presenta además un considerable desperdicio ocasionado por el empleo de sistemas de riego de bajo rendimiento o ineficientes.

Con respecto a las aguas subterráneas, se estima que el volumen almacenado en los acuíferos del país es alrededor de 17,000 km³ de agua; la mayor parte de esa agua subterránea no es aprovechable debido a su gran profundidad y en algu-

²⁵ Banco Mundial, Políticas Opcionales para el Manejo de la Sobre explotación de Acuíferos en México, 1999

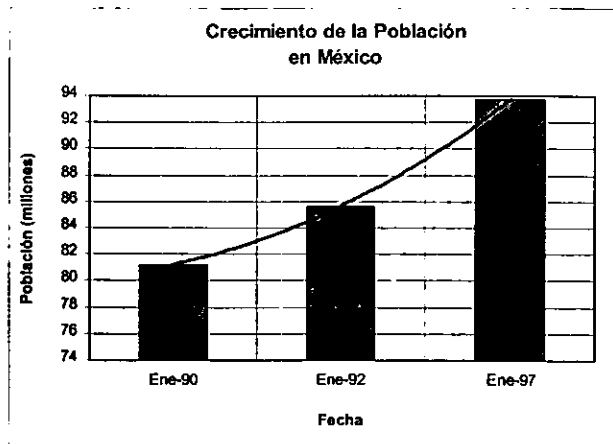
²⁶ Luna H., El Agua en México, Ing Humberto Luna Núñez, El agua

nos casos mala calidad, por lo que estas cifras disminuyen a mas del 50% de agua subterránea aprovechable.

Un balance de aguas subterráneas a nivel nacional resulta positivo en su conjunto; sin embargo, es engañoso ya que encubre situaciones críticas en muchos de los cien acuíferos sobre explotados que, por otro lado, son los más importantes del país. En estos acuíferos sobre explotados la recarga es de unos 9 km³ anuales, y la extracción es del orden de 14 km³ anuales.

El crecimiento acelerado de la población en México es la fuente principal de muchos problemas, ya que entre otros aspectos, implica un aumento similar en la demanda de agua. La tasa media anual de crecimiento de la población, según INEGI, en la década de 1980 a 1990, fue del 1.9%, la cual aumentó sensiblemente, de acuerdo al conteo INEGI del 1990 a 1997, a 2.15% anual en este lapso de siete años, aunque la CONAPO considera que en las próximas décadas las tasas de crecimiento a nivel nacional estarán por debajo del 2%. Considerando la población actual, cada año hay cerca de 1.8 millones más de mexicanos que requieren alimentación, materias primas y servicios adicionales, lo cual impacta a la demanda de agua en forma significativa (figura 2.1) ⁽²⁷⁾.

Figura 2.1
Crecimiento de la población en México



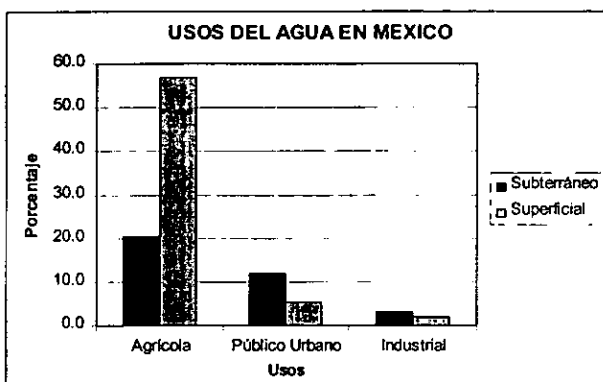
2.1 La importancia del agua subterránea en México

El agua subterránea dedicada a la agricultura permite regar unos dos millones de hectáreas que representan aproximadamente una tercera parte de la superficie de riego del

²⁷ INEGI, internet

país; el uso público urbano se abastece en dos terceras partes con agua del subsuelo (figura 2.2); aproximadamente 55 millones de personas dependen del agua subterránea, y los usuarios industriales que cuentan con abastecimiento propio declaran una extracción de 1.4 km³/año de aguas subterráneas, además de la dotación que está involucrada en el uso público – urbano (28).

Figura 2.2.
Usos del agua en México



Los recursos subterráneos son de importancia fundamental por ser la fuente principal de:

- Agua potable en áreas rurales.
- Abastecimiento urbano y otros usos industriales en las grandes ciudades y medianas.
- Agua de riego para dos millones de hectáreas.
- Agua de riego para cultivos de exportación.
- Seguridad alimentaria para unos 70 millones de habitantes.

En la tabla 2.2 se presenta el uso del agua en porcentaje dependiendo de su fuente de abastecimiento, según recientes publicaciones de la CNA (29).

Del total del agua usada (79.4 km³/año) el 35 % es de origen subterráneo y de los usos industrial y público urbano el agua subterránea cubre más del doble de la demanda.

²⁸ Banco Mundial, Políticas opcionales para el manejo de la sobre explotación de acuíferos en México, 1999

²⁹ CNA. 1999. Compendio básico del agua en México.

Tabla 2.1
Usos del agua en México

	USO SUPERFICIAL	SUBTERRÁNEO	VOLUMEN TOTAL
Agrícola	55.9%	20.3%	76.2%
Público urbano	5.2%	11.8%	17.0%
Industrial	2.0%	3.1%	5.2%
Acuícola	1.4%	0.0%	1.4%
Termoeléctricas	0.0%	0.3%	0.3%
TOTAL	64.5%	35.5%	100.0%

Durante los últimos 30 años la extracción de agua subterránea ha progresado a ritmo acelerado, hasta alcanzar la cifra de 27 km³ por año. El agua subterránea es esencial para la economía mexicana, ya que cerca de las dos terceras partes del volumen anterior se extraen en las regiones áridas del país, donde el subsuelo es la principal fuente de abastecimiento; en las regiones semiáridas y tropicales, por sus características naturales como permanencia, amplia distribución espacial y bajo costo, el agua subterránea es preferentemente utilizada para abastecimiento público y en la industria. La recarga natural a nivel nacional de los acuíferos se estima en 50 km³, como promedio anual a largo plazo, y tiene distribución geográfica similar a la de la precipitación; siendo la renovación muy pobre en la porción árida del país y muy abundante en las regiones lluviosas. A esta alimentación natural se agrega la recarga inducida por las actividades humanas, especialmente en las zonas irrigadas con agua superficial, cuyo valor a escala nacional se estima en 15 km³ por año, resultando de esta manera una recarga total de 65 km³ por año ⁽³⁾.

2.2 Uso del agua subterránea en México

De los aproximadamente 27 km³ de agua que se extraen anualmente de los acuíferos, 19 km³ por año, el 70% del total de agua extraída, se destinan al riego de dos millones de hectáreas que representan poco más de la tercera parte de la superficie total bajo riego; 6 km³ por año, equivalente al 22%, se utilizan para satisfacer las necesidades de agua de unos 55 millones de habitantes, es decir el 68% de la población; unos 1.4 km³ por año (6%) se utilizan para abastecer al 85% de la industria, y el 2% restante es aprovechado por la población rural para uso doméstico y abrevadero ⁽³⁰⁾.

En la tabla 2.2 ⁽³¹⁾ se muestran los usos del agua subterránea, su relación con el PIB y con la sobre explotación de los acuíferos por entidad federativa. La sobre explotación mostrada se calculó sumando el volumen únicamente de los acuíferos

³⁰ Banco Mundial, Políticas Opcionales para el Manejo de la Sobre explotación de Acuíferos en México, 1999

³¹ CNA, Gerencia de Aguas Subterráneas, 1998

sobre explotados de cada estado, sin considerar los que no se encuentran en esta condición, ya que si se sacara un balance considerando a todos los acuíferos a nivel nacional daría un resultado positivo, ocultando el problema de la sobre explotación. En los lugares donde se encuentran los acuíferos sobre explotados es donde los requerimientos de agua son mayores en los demás no se tiene una demanda que obligue a sobre explotar el acuífero, por lo que no se pueden sumar los acuíferos sobre explotados de los que no, ya que el agua no es transferible de un acuífero a otro. Por esa razón se calculo el volumen de los acuíferos sobre explotados por estado para así mostrar de manera más real este problema.

Los estados que se encuentran en las zonas más áridas del país y donde la precipitación es menor, hecho que se refleja en una recarga de los acuíferos baja, se ubican en la zona norte, aquí se observa que se concentra el 23.2 % del PIB ⁽³²⁾ y se tiene una sobre explotación de 2.5 km³ al año.

En el altiplano del país se encuentran mezcladas zonas semiáridas con otras donde mejora la precipitación pluvial y la disponibilidad de agua, pero donde se concentra la mayor parte de la población del país; el PIB es de 643,598 millones de pesos el mayor de todo el país (57.1 %) y las extracciones de agua llegan a los 12.3 km³ anuales, y se tiene una sobre explotación de 2.6 km³ por año.

La extracción de aguas subterráneas disminuye en forma significativa en las zonas costeras, donde el PIB es de 182,320 millones de pesos (16.2 %) y las extracciones de 2.2 km³ anuales; esta disminución en las extracciones se observa también en el noroeste donde el PIB es de 40,204 millones de pesos y la extracción es de 1.9 km³ anuales, debido sobre todo a la disminución en el uso agrícola y a una mayor disponibilidad tanto de aguas superficiales como una mayor precipitación pluvial.

De aquí se puede observar la distribución geográfica y las actividades económicas están en proporción inversa con la disponibilidad de agua; en las dos zonas donde el PIB es el mayor (zona norte y el altiplano, juntas representan el 80.3% del PIB nacional) los acuíferos están sobre explotados en casi todos los estados que la componen. Con esto surge la duda sobre la sustentabilidad a largo plazo de las actividades económicas y sociales, ya que si el agua se esta acabando en esas zonas como se va sustentar la actividad económica que depende de la cantidad de agua que se pueda aprovechar.

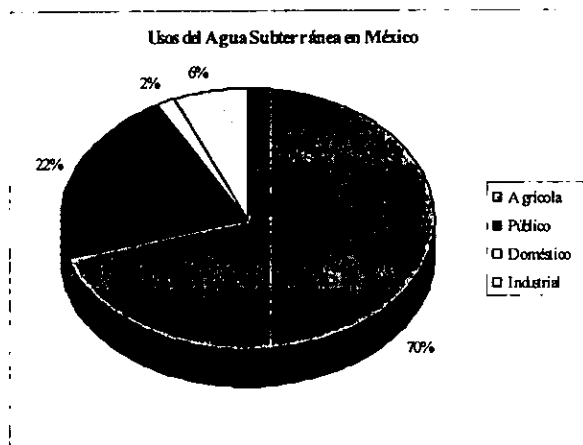
³² INEGI, Cuento, 1995

Tabla 2.2
Distribución y usos del agua subterránea en México y su relación con el PIB

ESTADO	EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA (Mm ³ /año)					RECARGA (Mm ³ /año)	SOBRE EXPLOTACION	PIB (Millones \$)	PIB (%)
	AGRÍCOLA	PÚBLICO	DOMÉSTICO	INDUSTRIAL	TOTAL				
Agascalientes	403.8	123.0	20.2	9.0	556.0	300.0	-256	9935	0.88
Baja California	1042.8	200.9	60.6	55.0	1359.3	968.4	-446.4	27661	2.45
Baja California Sur	410.0	33.0	6.0	2.0	451.0	393.0	-116	5250	0.47
Coahuila	984.4	223.8	27.9	86.9	1322.9	905.5	-477.25	31296	2.78
Chihuahua	2645.6	330.8	70.8	78.7	3125.9	4345.6	-445.143	33072	2.93
Durango	380.1	99.6	20.3	22.2	522.2	496.1	-72.56	13570	1.20
Nuevo Leon	305.8	135.1	41.4	32.9	515.2	678.7	-16	72915	6.47
Sonora	2324.7	194.9	35.9	20.9	2576.4	2558.0	-504.4	29744	2.64
Tamaulipas	244.4	32.2	0.0	5.8	282.4	592.8		28840	2.56
Zacatecas	709.3	71.9	11.3	19.5	812.0	785.4	-205.041	9114	0.81
Subtotal Norte	9450.9	1443.2	294.3	332.9	11523.3	12023.5	-2538.8	261397.0	23.2
Colima	166.1	76.9	1.0	13.5	257.5	442.0		7104	0.63
Nayarit	74.9	92.1	0.0	11.1	178.1	412.2		8186	0.73
Sinaloa	305.2	151.0	3.0	12.0	471.2	994.0		24914	2.21
Subtotal Noroeste	546.1	320.0	4.0	36.6	906.7	1848.2	0.0	40204.0	3.6
Distrito Federal	3.0	839.0	2.0	81.0	925.0	224.0	-701	271271	24.06
Guanajuato	2442.5	300.2	11.7	126.4	2880.8	2011.0	-865.83	39291	3.48
Hidalgo	240.0	145.2	111.2	57.1	553.4	584.0	-103.15	17891	1.59
Jalisco	955.6	180.6	0.0	103.8	1240.2	2167.4		74207	6.58
México	234.4	998.6	6.2	104.5	1343.6	1051.9	-291.66	118598	10.52
Michoacán	759.4	255.5	26.0	68.3	1109.2	1360.5	-106.21	25795	2.29
Morelos	900.0	242.0	4.0	27.0	1173.0	1170.3	-53.7	18143	1.61
Puebla	1085.0	238.0	2.4	50.5	1375.9	1379.0	-100	36305	3.22
Queretaro	578.2	124.4	0.0	62.1	764.7	580.3	-184.4	15867	1.41
San Luis Potosí	589.9	128.7	10.1	33.3	762.0	603.7	-160.8	19956	1.77
Tlaxcala	110.9	57.2	1.4	17.1	186.6	190.9	-29.63	6274	0.56
Subtotal Altiplano	7899.0	3509.3	175.0	731.1	12314.4	11323.0	-2596.4	643598.0	57.1
Campeche	228.0	76.0	0.3	9.8	314.1	11013.6		18409	1.63
Chiapas	53.4	15.1	0.0	46.6	115.0	2611.2		20563	1.82
Guerrero	57.2	105.9	0.0	2.2	165.3	2042.0		22326	1.98
Oaxaca	121.9	34.1	3.4	19.8	179.2	325.8	-38.2	19322	1.71
Quintana Roo	47.0	99.2	0.4	3.7	150.3	13986.4		15153	1.34
Tabasco	8.0	62.2	0.0	30.7	101.0	991.7		16637	1.48
Veracruz	321.6	157.5	16.0	119.9	614.9	1482.8		55654	4.94
Yucatán	271.0	244.0	3.0	29.0	547.0	8975.0		14256	1.26
Subtotal Costeros	1108.2	794.0	23.2	261.5	2186.9	41428.5	-38.2	182320.0	16.2
Total	19004.3	6068.5	496.4	1362.1	26931.3	66623.2		1127519.0	100.0

De la extracción de agua subterránea se tiene que el mayor usuario es el agrícola, después el público el industrial y el doméstico (figura 2.3). Dentro de esta clasificación el uso público-urbano es el agua utilizada en los núcleos urbanos, dentro de esto se considera los servicios, uso residencial y las industrias que se abastecen de la red de distribución. El doméstico se refiere básicamente a los aprovechamientos que se tienen en las zonas rurales y se dedican a abrevadero y otras actividades, pero estos son para uso propio de los habitantes. El industrial es cuando este sector tiene aprovechamientos propios.

Figura 2.3
Usos del agua subterránea en México



2.2.1 Uso público - urbano

Se estima que en las tres grandes zonas metropolitanas de México (DF, Guadalajara, Monterrey) y 120 ciudades medias, que concentran el 80% de la población servida con agua potable en las ciudades, extrajeron en 1997, 6.2 km³. De este volumen se calcula que el 66% provino de aprovechamientos subterráneos. La importancia del agua subterránea para abastecimiento de agua potable, es aún mayor en las poblaciones menores y comunidades rurales, no incluidas en las cifras anteriores. Se estima que cerca de 55 millones de habitantes se abastecen con agua potable de origen subterráneo en el país ⁽³³⁾.

³³ Documento D. Manejo de la demanda de agua subterránea en los sectores urbano e industrial. Octavio del Conde y Miguel Angel Gómez., 1999

El desarrollo socioeconómico está asociado con una fuerte dinámica de urbanización. Aún cuando el ritmo de general de crecimiento tiende a disminuir hasta tasas por debajo del 2% anual en las próximas décadas, según los pronósticos del Consejo Nacional de Población (CONAPO), las ciudades medias van a interceptar el flujo hacia las grandes metrópolis y absorber mayor proporción de la población rural, por lo que algunas de ellas tienen tasas de crecimiento de hasta 4 y 5% y muchas de éstas ciudades están asentadas o se abastecen de acuíferos sobre explotados.

No obstante los problemas que enfrentan las ciudades, sigue existiendo un uso ineficiente del agua y en muchos casos no existe evidencia de mejora en los patrones de consumo. Las dotaciones establecidas en los títulos de concesión otorgados en 1994 a 49 ciudades que albergaban una población de 21.5 millones de habitantes oscilaban entre 200 y 700 l/h/d, con un promedio de 352 l/h/d. Entre las ciudades con las dotaciones más altas se encuentran algunas con los problemas más críticos de abastecimiento y sobre explotación de sus fuentes. Además persisten altos porcentajes de pérdidas físicas en las redes, y un rezago importante en los servicios de drenaje.

Se cuenta en el país con 914 sistemas de depuración de aguas residuales con una capacidad instalada de 63.2 m³/seg, de los cuales 727 se encuentran en operación con un gasto tratado de 40.9 m³/s, se recolectan en el alcantarillado 187 m³/s, por lo que 22% del total de aguas residuales recolectadas de localidades urbanas reciben tratamiento ⁽³⁴⁾; y de los 40.9 m³/s de aguas residuales tratadas solo 29 m³/s cumplen con la norma ecológica NOM-001-ECOL-1996, lo que representa el 16% del total del agua recolectada y el 7% del agua utilizada, que se estima en 13.5 km³/año entre aguas superficiales y subterráneas.

De continuar con los patrones de uso público urbano, aún con las proyecciones conservadoras de CONAPO, la demanda de agua subterránea en zonas urbanas podría seguir creciendo hasta cerca de 150% del volumen actual en 25 años, debido a la dificultad de aprovechar fuentes superficiales que se encuentran distantes de las ciudades y requieren una mayor inversión.

2.2.2 Uso agrícola

El subsector agrícola tiene una especial importancia en México, debido a que un porcentaje muy importante de la población económicamente activa, el 22% según el INEGI en 1995, depende de las actividades primarias; no obstante la participación del subsector agrícola en el Producto Interno Bruto (PIB) del país es poco significativo, menos del 5% en 1997 ⁽³⁵⁾, a pesar de que emplea el 85% de la fuerza de trabajo del sector primario, lo cual muestra el poco ingreso que tiene este sector de la población ⁽³⁶⁾.

³⁴ CNA, Compendio Básico del Agua en México, 1999

³⁵ SAGAR, 1997

³⁶ Palacios E., Estado Actual y Perspectivas del Sector Agrícola en México, 1997

El subsector agrícola se puede subdividir en dos componentes, uno es la agricultura de temporal, muy dependiente de las condiciones climatológicas, principalmente de la lluvia aprovechable, y el otro componente es la agricultura de riego, la cual en promedio tiene una productividad del orden de tres veces la del temporal. En los últimos años, la agricultura de riego ha contribuido a reducir la importación de granos, participando con una mayor producción en el abastecimiento de maíz, sorgo y frijol.

En la agricultura de temporal, anualmente se siembran alrededor de 12 a 15 millones de hectáreas; sin embargo, un porcentaje de cierta consideración no da cosecha, principalmente por pérdidas; así las superficies siniestradas por las sequías, las plagas, las inundaciones, etc., que puede llegar a ser del orden del 12%, según la SAGAR, mientras que en la agricultura de riego, el siniestro no llega al 3% anual.

El subsector de la agricultura de riego, a su vez se divide en dos componentes, en función de la organización de los sistemas de riego; la denominada distritos de riego, de los cuales hay 109, dominan un poco más de 3 millones de hectáreas y hasta la década pasada eran operados por el gobierno, pero actualmente se están transfiriendo a sus organizaciones de usuarios, utilizan en promedio 25 km³ de agua superficiales y unos 5.5 km³ de aguas subterráneas.

Y las unidades de riego que son poco más de 35 000 dominan unos 2 millones de hectáreas y alrededor de dos terceras partes tiene como fuente principal de abastecimiento de agua, pozos profundos de los cuales se extraen anualmente unos 12 km³.

Aunque en las unidades de riego la eficiencia de conducción es mayor que en los distritos, la eficiencia total, en el uso del agua es aún baja, probablemente apenas llegue a un 50%, mientras que en los distritos de riego es menor, por las pérdidas en la conducción, así que en dichos distritos la eficiencia posiblemente sea menor que un 40%, no obstante, no toda el agua se desperdicia, ya que parte de ella recarga los acuíferos.

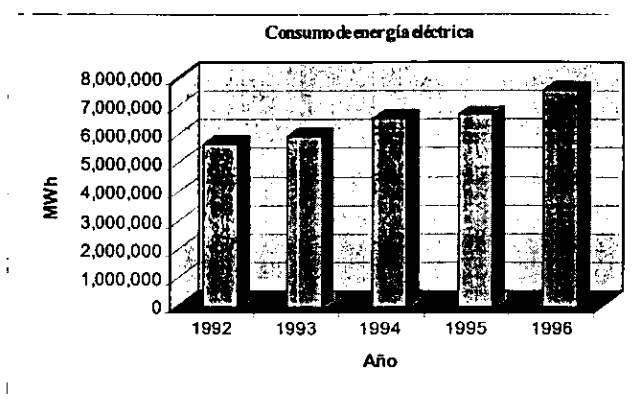
La mayor parte del agua que se extrae de los acuíferos no se mide, por esta razón se desconoce con precisión el volumen real de extracción de los acuíferos, y para cuantificarlo, es necesario recurrir a métodos indirectos, como lo es el consumo de energía eléctrica en la operación de pozos, ya que el uso agrícola está exento del pago de derechos por el uso de las aguas nacionales.

El uso agrícola es el mayor consumidor del recurso; se estima que la demanda actual de agua por año esta entre 50 y 60 km³, de los cuales aproximadamente un 33%, proceden de fuentes subterráneas.

El agua subterránea esta siendo más utilizada en la agricultura, ya que el agua superficial cada vez está más contaminada y plagada con malas hierbas, lo que impide su utilización.

El uso total de aguas subterráneas en la agricultura es de unos 19 km³, pero hay una tendencia creciente; así la CFE, señala que en el período de 1992 a 1996, el consumo de energía eléctrica en el sector aumentó en 1871 Gwh cuyo equivalente aproximado de agua bombeada de pozos es del orden de los 4.8 km³. Las tendencias del crecimiento de las áreas regadas muestran una contracción en los distritos de riego que usan aguas superficiales y un aumento en el consumo de agua en las unidades abastecidas con aguas subterráneas ⁽³⁷⁾ (figura 2.4).

Figura 2.4
Consumo de energía eléctrica en la agricultura según CFE



Ya que la agricultura es el mayor usuario del agua subterránea, es importante que se le de mayor atención a los problemas que se están presentando en la agricultura de riego en relación al uso de agua, debido a que se están agravando la sobre explotación de los acuíferos.

El problema de la agricultura es muy complejo ya que muchas personas dependen económicamente de ella (casi el 20 % de la población económica activa), y sus ingresos son muy bajos (solo aporta el 5% del PIB nacional).

Otro problema que no debe descuidarse es el incremento de la contaminación de las aguas superficiales que se utilizan para riego, lo cual está limitando su uso en la agricultura, lo cual también favorece la mayor utilización de las aguas subterráneas y por ende la sobre explotación de los acuíferos.

³⁷ CFE, internet, 1999

2.2.3 Uso industrial

El uso actual del agua en la industria asciende al orden de los 4 km³ anuales, representa una tercera parte del uso público urbano. De este volumen, la mayor parte se abastece con agua subterránea. Además, casi el 70% es industria que se auto abastece con fuentes propias y el 30% restante logra su suministro de los sistemas de distribución de agua de las ciudades; el principal usuario es la industria azucarera seguida por la química y la del petróleo y petroquímica; estos tres grupos representan dos tercios de la extracción total. Las industrias con mayor demanda son, al mismo tiempo, las mayores aportadoras de contaminación ⁽³⁸⁾.

La actividad industrial se ha concentrado en unas cuantas ciudades, lo que ha agudizado los problemas locales que enfrentan para el abastecimiento de agua y los posibles conflictos por el uso y explotación de recursos.

El reúso y recirculación del agua en la industria, son todavía prácticas incipientes y podrían incrementarse significativamente en los próximos años, principalmente en las regiones donde este recurso es ya escaso.

Las necesidades y hábitos de uso de agua se relacionan con aspectos tecnológicos como los requerimientos de agua en sistemas de enfriamiento, de agua de proceso y de servicios complementarios o auxiliares, que son resultado de la tecnología utilizada y de la educación en la cultura del agua de los directivos o auxiliares en cada industria. En México, se han logrado ahorros significativos mediante cambios tecnológicos.

En la medida en que el precio del agua llega a impactar el costo del bien que se produce o del servicio que se presta, el usuario tiende a optimizar su uso y, en la medida en que las sanciones por su contaminación son más elevadas, tiende a limitar su contaminación o a eliminarla de sus aguas residuales con la instalación de plantas de tratamiento.

El comportamiento futuro de la demanda está ligado al pronóstico de crecimiento de la economía en su conjunto y a las medidas que se adopten para proporcionar el uso eficiente. Es de esperarse que la componente de la demanda que tendrá un mayor crecimiento es la de auto abastecimiento, al acentuarse la tendencia a independizar las zonas industriales de las urbanas.

2.3 Situación actual de los acuíferos

Los recursos naturales anteriormente se consideraban como abundantes e inagotables, pero en la actualidad, como consecuencia de su mal uso, adquieren el carácter de escasos y agotables.

³⁸ del Conde O., Documento D. Manejo de la demanda de agua subterránea en los sectores urbano e industrial, Banco Mundial, 1999

Son muchas las causas que han llevado al mundo a esta situación, entre ellas el excesivo crecimiento de la población, los sistemas económicos actuales y sobre todo el manejo irracional de los recursos.

El abastecimiento de agua para los diferentes usos es un problema que en México se acentuó a partir de la década de los cuarentas del presente siglo. La creación de los distritos de riego y los inicios de la industrialización motivaron la construcción de miles de pozos someros y/o norias para proveer de agua a la agricultura y a la población. Hasta fines de los años cincuentas, el agua subterránea procedía de acuíferos granulares, pues tanto el acceso como el perforar estos materiales eran fáciles, los niveles explotados eran en general someros, en promedio 30 metros, en estos años se dan los primeros indicios de la sobre explotación de los acuíferos.

La naturaleza cambiante y creciente de las necesidades de la población y la continua evolución de los factores tecnológicos, económicos, sociales y políticos que intervienen en el aprovechamiento del agua, provocaron que se agudizaran los problemas de escasez y contaminación.

El crecimiento constante de la explotación causaba el descenso del nivel del agua y la producción de los acuíferos empezó a decaer, entonces fue necesario extraer agua a mayor profundidad y buscar acuíferos en roca compacta, lo cual requería mejor técnica de perforación.

Se impulsó fuertemente la industrialización manufacturera y la agricultura, los estudios geohidrológicos se enfocaban principalmente a la construcción de presas, cuya agua beneficiaba al riego y generaba energía eléctrica.

De 1960 en adelante la explotación demográfica, el desarrollo agrícola y el auge industrial requirieron grandes volúmenes de agua y de energía eléctrica, de esta manera el número de presas se incrementó y creció notablemente la capacidad de agua disponible para riego.

En la década de los setentas la irregularidad en el control de los aprovechamientos del agua y la falta de pagos de las cuotas motivaron la creación del Plan Nacional Hidráulico, el cual tenía como fin, formular e instituir un proceso sistemático de planeación y aprovechamiento del recurso agua mediante la selección racional de programas y proyectos. Tal acción fue necesaria, pues el descenso del nivel del agua debido a la constante extracción, propició el aumento en el costo del bombeo provocando problemas sobre todo para el sector rural, pues su capacidad económica es menor para soportar los altos costos de extracción ⁽³⁹⁾.

³⁹ Peña S., Hidrología Subterránea, Colegio de Posgraduados, 1996

La satisfacción de la creciente demanda de agua para la población, sobre todo para las zonas industriales que fueron implantadas sin darle importancia a la disponibilidad de agua, es cada vez más difícil y hace necesario la costosa importación de agua de fuentes lejanas, como por ejemplo el sistema Cutzamala para abastecer a la ciudad de México.

El deficiente control de las extracciones ha incrementado el número de acuíferos sobre explotados, el abatimiento del nivel de agua ha inutilizado cantidad de pozos en acuíferos confinados y semiconfinados; tal situación ha producido agrietamientos y asentamientos del terreno dañando tanto las redes de distribución como las obras civiles. De igual forma ha influido grandemente en la contaminación de los acuíferos, pues facilita el ingreso de diversos contaminantes al subsuelo, modificando su capacidad autodepurable. De igual modo se ha propiciado la desertificación en ciertos lugares, la salinización de los acuíferos de zonas costeras.

Durante las últimas tres décadas, la extracción de agua subterránea ha progresado a ritmo acelerado, hasta alcanzar la cifra de casi 27 km³/año ⁽⁴⁰⁾, actualmente.

El mayor uso del agua subterránea ocurre en las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noroeste, donde el balance bombeo - recarga es negativo y reflejo de las condiciones de sobre explotación en numerosos acuíferos. Este hecho amenaza la sustentabilidad de las actividades económicas apoyadas en estas fuentes de abastecimiento, ya que no sólo se agota el recurso sino que en algunas se ha afectado la calidad del agua y encarece su aprovechamiento (tabla 2.1)

En 1975 se identificaron 32 sitios donde los acuíferos estaban sobre explotados desde esa fecha han aumentado substancialmente a 36 en 1981, 80 en 1985 y actualmente de los 647 acuíferos identificados, 99 están sobre explotados, en donde la recarga es de unos 9.0 Km³/año y la extracción de 14 Km³/año, representando la recarga el 65% de la extracción total. En estos acuíferos sobre explotados se extrae el 51% del total a nivel nacional. En caso de persistir los actuales patrones de aprovechamiento del agua subterránea, habrá acuíferos sobre explotados a niveles críticos, en lo que posiblemente ya no será posible garantizar un desarrollo sustentable, basado en el aprovechamiento del agua subterránea.

Las consecuencias de la sobre explotación de los acuíferos son ya visibles:

- Acelerado descenso de los niveles estáticos (más de 1.2 metros por año)
- Fincas con pozos operando con niveles dinámicos entre 70 y 140 metros
- Penetración de agua salada en los acuíferos costeros
- Contaminación de acuíferos internos con agua de mala calidad.

⁴⁰ Escolero O., Panorámica del Agua Subterránea en México, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 1993

El resultado neto es:

- Incremento en la energía de bombeo y sus correspondientes costes de capital.
- Intrusión salina y salinización del suelo en áreas costeras.
- Hundimiento y surgimiento de grietas en el suelo en áreas urbanas.

Por ejemplo en Sonora el sobre bombeo de los mantos acuíferos hizo que a fines de 1984 se hubieran abandonado 50 000 hectáreas por falta de agua, y unas 15 000 hectáreas por intrusión de agua de mar en los mantos. En varias partes de la costa de Hermosillo y del valle de Guaymas los acuíferos se encuentran decenas de metros por debajo del nivel del mar, y están sujetos a la intrusión salina. En la Comarca Lagunera la profundidad media del acuífero incrementó de 27 metros en 1950 a 82 metros en 1978, y continúa disminuyendo a razón de 1.5 metros por año. Adicionalmente, al explorar los niveles inferiores del acuífero regional, está apareciendo agua con altos niveles de arsénico, que causa toxicidad sobre la vegetación y síntomas de envenenamiento en la población. Así, el agotamiento de los mantos freáticos, la salinización de los suelos y la contaminación de los ríos, las vías de drenaje, las lagunas y los estuarios, aparecen como los principales costos ambientales del desarrollo de las áreas de riego en México, y cuestionan la sustentabilidad del sistema en el futuro ⁽⁴¹⁾.

⁴¹ Ezcurra E., El Problema del Agua en las Zonas Áridas, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 1993

CAPÍTULO 3

Efectos de la sobre explotación de los acuíferos

Como se vio en el capítulo anterior, las reservas de agua subterránea en el país están disminuyendo, principalmente en los sitios en el que este recurso tiene fuertes demandas. Además de la importancia de preservar las aguas subterráneas, simplemente por su importancia intrínseca para el futuro, al sobre explotar un acuífero se tienen efectos ambientales negativos muy importantes con consecuencias igualmente preocupantes y muy costosas.

Se considera que los recursos hídricos subterráneos están constituidos por dos componentes principales, el volumen renovable y el volumen no renovable, el primero será igual a la recarga media, considerada a largo plazo, y el segundo está constituido por el almacenamiento; el sobre explotar un acuífero significa que el almacenamiento del acuífero está disminuyendo y en consecuencia el agotamiento de las reservas.

El almacenamiento subterráneo se origina de las recargas a los mantos acuíferos, dicha recarga está compuesta por el agua infiltrada que proviene del volumen de agua llovido y recarga inducida por el uso del agua superficial y subterránea, en las actividades humanas, además de flujos subterráneos provenientes de otras zonas. Dado que el régimen pluvial es variable año con año, así como las condiciones de infiltración y los usos, se utilizan en el cálculo de la recarga condiciones medias a largo plazo; así en la precipitación, el cálculo se realiza con valores medios anuales para fines prácticos. La parte renovable estará constituida por la recarga media.

La parte no renovable del recurso está representada por los volúmenes acumulados en el subsuelo como resultado de un proceso de muchos años o incluso siglos, dependiendo de la capacidad de almacenamiento en cada caso particular. De esta manera expuesto, si un acuífero se explota a un nivel que rebasa el volumen correspondiente a su parte renovable, se comienza a extraer parte del almacenamiento considerado como no renovable.

Los efectos de la sobre explotación se pueden dividir en dos: *efectos directos* y *efectos colaterales*. Los primeros síntomas se refieren principalmente a la disminución de agua superficial que aflora a través de manantiales o derrames naturales del acuífero, reflejándose además en una disminución de los volúmenes almacenados en lagos y lagunas, afectando al mismo tiempo la ecología de la zona. Otro efecto directo es el abatimiento de los niveles que ocasionan el agotamiento de las norias primariamente y luego de los pozos, incrementando el costo de extracción, por aumentar la profundidad de bombeo y además un mayor costo en profundización de pozos⁽⁴²⁾, en general en la construcción y operación de los mismos.

⁴² Banco Mundial, Políticas Opcionales para el Manejo de la Sobre Explotación de Acuíferos en México, 1999

Como efectos colaterales, se pueden mencionar los relacionados con la migración de aguas de mala calidad profundas hacia los acuíferos en explotación. El efecto de hundimiento y agrietamiento en materiales sujetos a consolidación en algunas zonas es evidente, con la consecuente inestabilidad en construcciones y en la infraestructura urbana, redes de agua potable, drenaje y líneas de transporte como el metro.

Es fácil apreciar que el simple abatimiento de los niveles del agua subterránea, puede no ser tan grave en algunos casos, como algunos de los afectos secundarios.

3.1 Rendimiento seguro

El nivel hasta el cual se puede explotar un acuífero sin riesgos, se le conoce como *rendimiento seguro*, y se define como la cantidad de agua que se puede extraer de un acuífero sin sobre explotarlo, más específicamente será aquel estado en que no se tengan mayores abatimientos del nivel del agua y se conserve al almacenamiento actual, sin importar que haya existido sobre explotación anterior.

Según este criterio clásico geohidrológico, el rendimiento seguro es la explotación o aprovechamiento del recurso agua subterránea llevado a su nivel máximo, equivalente a la recarga media anual. El concepto más antiguo se refiere a la explotación máxima permisible que teóricamente puede ser mantenida por siempre. Acorde con este criterio, el promedio anual de la recarga a los acuíferos representa el límite máximo de explotación bajo la condición de que necesariamente los abatimientos piezométricos son restringidos severamente. Por esta razón, en cualquier esfuerzo de planeación racional se debe considerar un lapso limitado de tiempo en que este concepto, de rendimiento seguro, debe servir como marca de referencia que puede y debería ser rebasada sólo en pequeños lapsos de tiempo.

En los grandes acuíferos las reservas que se han formado a través del tiempo son tan vastas que el acuífero puede explotarse en exceso varias veces la recarga natural, e incluso durante varias décadas. El valor más bajo de una sobre explotación o agotamiento permisible del almacenamiento subterráneo estará indicado por el nivel crítico de agua, es decir el nivel de bombeo económico, el cual estará en función de las actividades productivas o sea de los beneficios. Además, en ocasiones al abatir los niveles aumentan las recargas al disminuir las evaporaciones directas, incrementando su nivel de explotación renovable.

Las condiciones hidrogeológicas son cambiantes y el rendimiento seguro depende de las características hidráulicas de la producción y uso del agua. Por lo tanto, el rendimiento seguro no es un valor constante, y tiene que ser revisado con el tiempo.

Los conceptos anteriores llevan a clasificar dentro de dos criterios la explotación de los acuíferos:

- a. Bajo el criterio de rendimiento seguro, y
- b. Bajo el criterio de sobre explotación.

Desde el punto de vista económico y social, el primer concepto no permite que se obtengan altos beneficios como en la sobre explotación, especialmente durante las etapas iniciales de desarrollo en alguna zona.

El criterio de sobre explotación de un acuífero implica extraer un volumen mayor que su recarga, por lo que a corto y hasta mediano plazo se aceptan explotar volúmenes mayores a la recarga, correspondientes al almacenamiento de los acuíferos, pero más allá del mediano plazo, estos recursos hídricos deberán sustituirse con otros provenientes de proyectos alternativos, o reducir la explotación para regresar al rendimiento seguro. Luego entonces, este tipo de sobre explotación temporal puede considerarse como una fuente alternativa de recuperación o de rescate, el almacenamiento aprovechado es sólo una fuente provisional del recurso, en tanto se realicen los proyectos alternativos que sostengan el desarrollo, y eviten la sobre explotación o por lo menos disminuirla.

Otros tipos de sobre explotación se derivan de las definiciones de reserva dinámica y de minado, siempre y cuando sean susceptibles de distinguirse. Las reservas dinámicas son aquellas que se encuentran arriba de la salida natural de los acuíferos y por lo tanto incrementan la disponibilidad, y las de minado son aquellas que se encuentran por debajo del límite fijado como salida natural de los acuíferos (⁴³).

Cuando no hay una fuente alternativa que sustituya el déficit, y siendo el agua subterránea el único recurso, la sobre explotación puede sostenerse a largo plazo, pero a partir de cierto límite, marcado por la profundidad económica del bombeo, por ejemplo, la explotación se verá reducida siempre al rendimiento seguro. Lo anterior implica explotar reservas dinámicas sin afectar o afectando muy poco las reservas de minado, adoptando riesgos menores ocasionados por asentamientos del terreno, grietas, intrusión marina, entre otros. Por último, cabe la posibilidad de explotar incluso las reservas de minado hasta un nivel destructivo del acuífero, que pudiera marcar el final de un florecimiento efímero de la economía de una región.

En nuestro país, todas las sobre explotaciones de acuíferos, aunque a veces calificadas de temporales, se han convertido en situaciones perennes, pues aún en el mejor de los casos, como puede ser el de la ciudad de México, a partir de algunos proyectos en que se han importado volúmenes importantes de agua de otros lugares (Alto Lerma y Cutzamala), con el propósito de sustituir el bombeo del valle de México; sin embargo, el crecimiento de la demanda ha rebasado la capacidad de abastecimiento y los acuíferos locales siguen siendo sobre explotados, tanto o más que antes.

La determinación del nivel óptimo de explotación de los acuíferos, o mejor dicho un nivel apropiado, es distinto para cada región en particular y necesariamente

⁴³ Banco Mundial, Políticas Opcionales para el Manejo de la Sobre Explotación de Acuíferos en México, 1999

tendrán que considerarse otros elementos de juicio, además de los puramente técnicos, señalados anteriormente. Dichos elementos de juicio involucran aspectos socioeconómicos principalmente. En algunas zonas, los usuarios serán el obstáculo a salvar y el convencimiento para que acepten una reducción importante del volumen concesionado, llegando necesariamente a un sacrificio parcial; es decir, la reducción aceptada de la extracción y en consecuencia la también la recarga inducida.

A continuación se presenta el análisis del rendimiento seguro para el acuífero de Aguascalientes, tomando como base los valores mostrados en la tabla 1.3.

Tabla 3.1
Rendimiento seguro del acuífero de Aguascalientes

Fecha			Jun-98	Rendimiento Seguro
Residual 0.45			Mm ³ /año	51.3
Lluvia	Area		km ²	600.0
	Coeficiente		l ₁	0.15
			mm	526.2
Público Urbano mas industrial			l ₂	0.55
			Mm ³ /año	114.1
Agrícola mas otros			l ₃	0.35
			Mm ³ /año	281.4
Entradas	Recarga vertical	Lluvia	Mm ³ /año	47.4
		P.U.	Mm ³ /año	34.5
	Lateral (b) subterránea	Agrícola	Mm ³ /año	98.5
			Mm ³ /año	120.0
		Total	Mm ³ /año	300.4
				248.1
Salidas	Bombeo		Mm ³ /año	395.5
	Evaporación		Mm ³ /año	0.0
	Lateral		Mm ³ /año	2.0
	TOTAL		Mm ³ /año	397.5
				248.1
Almacenamiento			Mm ³ /año	-97.1
S				0.12
Volumen drenado			Mm ³ /año	-822.0

El cálculo del rendimiento seguro se realizó disminuyendo la extracción para el uso agrícola y conservando constantes las extracciones para el uso público urbano y el industrial, tomando en cuenta que se trata de una zona urbana, los volúmenes se castigaron más en lo agrícola, bajando éstos de 281 a 132 Mm³/año para no desa-

bastecer a la ciudad, la recarga por el uso agrícola disminuye también de 98 a 46 Mm³/año. Desde luego pueden disminuir las extracciones para los demás usos, dependiendo de los planes o programas que se establezcan.

Al disminuir las extracciones del agua para los diferentes usos, también disminuye la infiltración o recarga inducida, por lo que las entradas que tiene el acuífero bajan, reduciendo el volumen que se puede extraer, así hasta alcanzar un equilibrio, en este caso fue de 300 a 248 Mm³/año.

Además, como se mencionó el rendimiento seguro no es una cantidad constante, ya que dependerá de las recargas inducidas por cada uso, por ejemplo cuando se implantan condiciones de uso eficiente, la recarga necesariamente disminuye aún más. En el uso agrícola esto se refiere a utilizar sistemas de riego más eficientes para ahorrar agua, como riegos por aspersión o goteo, entre otros. En el uso público urbano se puede hacer eficiente su uso mediante la reducción de pérdidas de agua en las redes y menor dotación a los usuarios, en lo industrial mediante la modificación del sistema de producción y tratamiento del agua, pero no hay que olvidar que estas acciones significan que el retorno de agua en los drenajes disminuya y también la recarga al subsuelo.

3.2 Problemas ambientales de la sobre explotación de los acuíferos

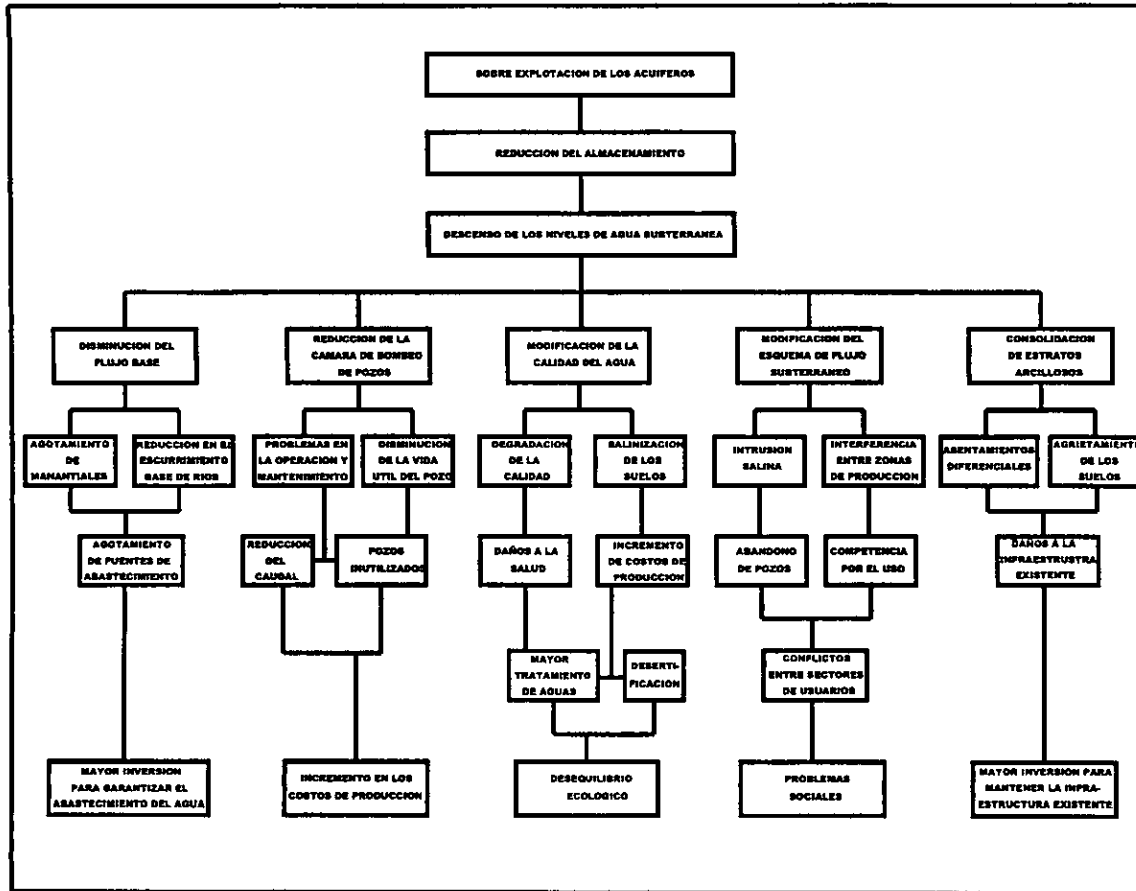
Los efectos de una sobre explotación son, a corto y hasta mediano plazo, lentos y poco espectaculares, pero una vez que se manifiestan, la situación del acuífero suele ser ya crítica, en extremo difícil y costosa de remediar.

Al sobre explotar un acuífero, en principio se reduce su almacenamiento y se provoca un descenso en los niveles del agua subterránea, trayendo consigo una secuencia de problemas de diversa índole, algunos de los cuales se muestran en la figura 3.1 (44), como lo pueden ser el agotamiento de manantiales, disminución del flujo base de los ríos, consolidación de estratos arcillosos, migración de aguas de mala calidad e intrusión salina. Y estos a su vez traen consigo problemas de tipo económico y sociales, ya que afectan de manera directa e importante a la población, incrementando los costos de producción, pérdida de empleos, migración, etc.

Aunque, por otro lado, no se debe olvidar los beneficios que trae la explotación de los acuíferos, ya que al sobre explotarlos se tiene un mayor auge en la economía, por ejemplo en la agricultura se puede sembrar una superficie mayor, lo que trae consigo generación de empleos; así también sucede en la industria. En caso contrario, si el acuífero no se sobre explotara se reduciría el uso del agua, lo que representaría una disminución en los beneficios.

⁴⁴ Escolero O., Manejo Optimo de un Acuífero, 1993

Figura 3.1
Efectos de la sobre explotación del agua subterránea



A continuación se describen con detalle algunos problemas debidos a la sobre explotación de los acuíferos, siguiendo la secuencia mostrada en la figura 3.1.

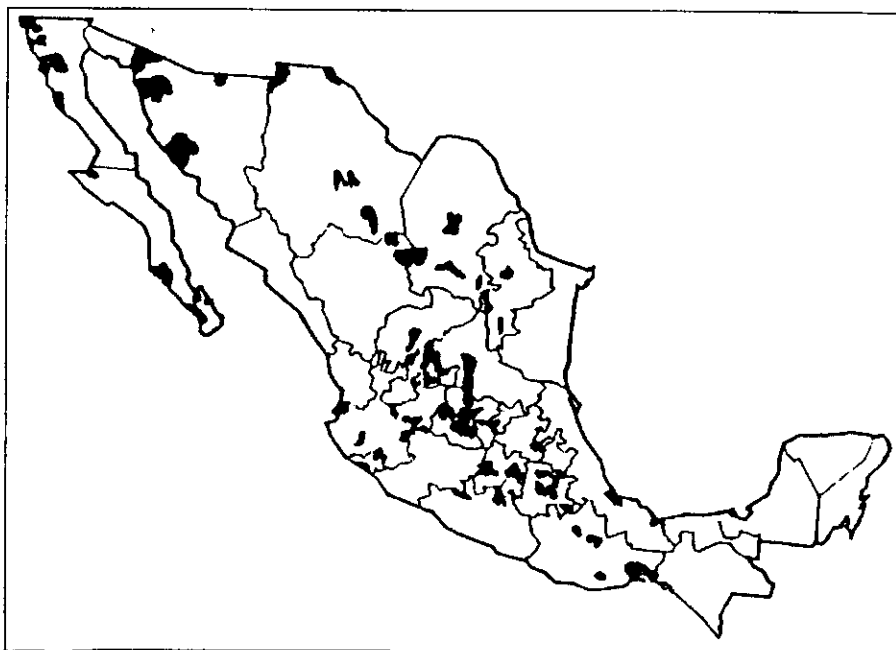
3.2.1 Disminución del flujo base y agotamiento de manantiales

Uno de los primeros efectos de la sobre explotación lo constituye la afectación del flujo base en los ríos y el agotamiento de los manantiales por su estrecha relación con los niveles piezométricos. Además también influyen directamente en la operación de los pozos de bombeo haciéndolos menos eficientes e incluso llegando a hacerlos obsoletos.

Un efecto negativo muy importante aunque difícil de evaluar, es el hecho de que todos estas consecuencias repercuten en la sociedad teniendo efectos sociales muy altos y consecuencias graves, las cuales son muy complicados de evaluar debido a que su manifestación puede llegar a ser de diversas formas.

En la figura 3.2 se muestran los acuíferos que tienen abatimiento de niveles, podemos afirmar que se anotan todos lo acuíferos con síntomas de sobre explotación.

Figura 3.2
Acuíferos con abatimiento de niveles (⁴⁵)



⁴⁵ Escolero O., Panorámica del agua subterránea en México, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 1993

Agotamiento de los manantiales

Como se mencionó en el capítulo anterior, los manantiales se originan en el contacto de la superficie del terreno con la superficie piezométrica, al abatirse esta última, el manantial desaparece. Desde luego este efecto dependerá de la ubicación de los manantiales, cuando más lejanos de las planicies menor será el efecto de abatimiento y la disminución en su caudal también será menor.

El mismo efecto puede mencionarse sobre las galerías filtrantes, que como se mencionó, son excavaciones construidas bajo del nivel de saturación y que captan filtraciones, si disminuye este nivel de saturación el volumen captado resultará menor.

El agotamiento de manantiales es uno de los efectos casi inmediatos causados por el abatimiento de niveles al sobre explotar un acuífero. Los costos, en muchas ocasiones, son fáciles de estimar, ya que este es el costo del bombeo para sustituir el producto de los manantiales o galerías filtrantes y garantizar el abastecimiento de agua.

Reducción del escurrimiento base en los ríos

El flujo base en los ríos es mantenido por la aportación de los mantos acuíferos hacia ellos. Al sobre explotar los acuíferos, bajan los niveles piezométricos lo que provoca que la aportación de las aguas subterráneas hacia los ríos se reduzca disminuyendo los escurrimientos, sobre todo en época de estiaje, y dando como resultado que solo lleven agua en época de lluvias.

La disminución del caudal de los ríos, el cual muchas veces es utilizado como fuente de abastecimiento de agua para las poblaciones y para la agricultura, trae consigo un agotamiento del agua que abastece a las comunidades, por lo que se tiene que sustituir por otras. Las obras para abastecer poblaciones son muy costosas ya que se tiene que llevar el agua de otros lugares teniendo que construir líneas de conducción muy grandes, canales, estaciones de bombeo, etc. Y todo esto tiene un costo muy elevado para el gobierno tanto económica como socialmente.

También al agotarse las fuentes de abastecimiento se agotan las fuentes de trabajo creando un flujo de las personas del campo a las ciudades teniendo otro costo adicional, ya que hay que generar más empleos en la ciudad. La migración de personas a las ciudades trae consigo grandes problemas a estas ya que se crean zonas marginales que cuestan al gobierno ya que hay proporcionarles los servicios necesarios.

Otro problema relacionado con la disminución de los niveles del agua en el subsuelo es que al perder ésta humedad, principalmente la vegetación existente, es afectada hasta llegar incluso a desaparecer. Al desaparecer la vegetación quedan los suelos expuestos a los agentes erosivos, mismos que no solo los degradan, sino que además se producen tolvaneras que afectan la calidad del aire, llegando inclusive a modificarse la fauna vinculada con dicha vegetación. Estos efectos aunados a la dismi-

nación del volumen almacenado en lagos y lagunas afectan severamente a la ecología de la zona.

3.2.2 Reducción de la cámara de bombeo en los pozos

El agua subterránea para su aprovechamiento es extraída mediante pozos y norias, los cuales se vuelven ineficientes con el abatimiento de los niveles piezométricos. Las norias, que generalmente no son muy profundas se vuelven obsoletas al quedar por arriba del nivel freático. En los pozos disminuye su eficiencia hidráulica debido a que se acorta la zona de captación extrayéndose menos agua según bajan los niveles, así como también la eficiencia electromecánica de los equipos de bombeo al no trabajar bajo las condiciones de diseño; lo que trae consigo un incremento en el consumo de energía eléctrica, que es el costo más importante en la operación del pozo, aumentando en forma directa conforme se incrementa la profundidad de bombeo. Al cambiar estas condiciones la vida útil de los pozos disminuye, lo que se refleja en una amortización de la perforación en un menor tiempo.

Todos estos factores impactan significativamente el costo de la extracción del agua afectando principalmente a la agricultura que el mas grande usuario. Los niveles piezométricos llegan a disminuir tanto que eventualmente también los pozos resultan obsoletos, ya que el nivel queda por debajo de la perforación del pozo, teniendo que abandonarlos.

Si la sobre explotación se continúa y se está todavía dentro de rangos económicos de bombeo, no se generarán ninguno de esos efectos sociales económicos antes mencionados, por lo que la sobre explotación tiene sus beneficios.

3.2.2.1 Abandono de pozos

Como se mencionó anteriormente, los niveles piezométricos pueden disminuir tanto, que los pozos pueden volverse obsoletos, ya que el nivel del agua puede quedar por debajo de la perforación del pozo provocando el abandono de éste, o requiriendo hacer más profunda la perforación y cambiando el equipo de bombeo. Al abandonar un pozo se pierde principalmente la inversión hecha en la perforación, ya que algunas partes del equipo de bombeo puede volver a utilizarse, además si se considera que se cambiaría de lugar también se tendría que añadir el costo de las líneas de energía eléctrica, tuberías, líneas de conducción, la caseta, etc.

No necesariamente se tiene que llegar a que un pozo es obsoleto hasta que el nivel estático esta por debajo de la perforación, sino que se considera que este ya no trabaja de manera eficiente cuando la profundidad es menor a 2/3 partes de la profundidad de diseño un pozo y no tendrá un funcionamiento adecuado, este es un valor empírico y debe tomarse con reservas. Se considera que la eficiencia de un pozo trabajando bajo esas condiciones es muy baja, y no resulta rentable.

Si se contara con un censo confiable de aprovechamientos en zonas sobre explotadas, se podría analizar las causas por las que fueron abandonados los po-

zos, estimar sus costos, y así tener una cifra más real de estos efectos. O también saber cuales pozos se hicieron más profundos y el costo que esto representó. Existen algunos censos en los que marcan pozos abandonados, pero no la causa del abandono.

Como en los efectos negativos mencionados anteriormente, en este caso al abandonar un pozo puede significar otras consecuencias, como el tener que abastecer de agua a esa comunidad de lugares alejados, o también el que se tengan que abandonar tierras de cultivo, pérdida de empleos y migración.

3.2.2.2 Abandono de tierras de agricultura

La agricultura es el principal usuario del agua subterránea por lo cual es la que mas sufre con los cambios en la disponibilidad de agua. Entonces al haber abandono de pozos por encontrarse los niveles del agua a profundidades muy grandes y disminución en el caudal de los ríos que abastecían a las tierras de cultivo, la agricultura se ve obligada a tomar otras medidas para no llegar a un abandono de tierras.

Al aumentar la profundidad de los niveles de agua hay que profundizar los pozos los cuales además del costo en infraestructura que esto tiene, hay que sumarle el costo por concepto de energía eléctrica, ya que este aumenta con la profundidad. O si el agua no es obtenida del subsuelo hay que realizar grandes inversiones para importarla.

Cualquiera de las situaciones anteriores provoca que se aumenten los costos en la producción, haciendo muchos cultivos que no sean rentables, pero dada la importancia que tiene la agricultura para el país, el gobierno subsidia el costo de la energía eléctrica para los agricultores siendo este de \$0.20/kwhr, \$0.40/kwhr mas bajo del costo real, ya que según Banco Mundial el costo real de la electricidad es del orden de \$0.60/kwh. Este subsidio tiene un costo muy alto para el gobierno. Y aún así hay cultivos que no resultan rentables, pero que se siguen cultivando por la importancia que estos tienen económica y socialmente.

Se puede llegar a dar el caso de que se abandonen las tierras de cultivo ya sea por no resultar rentable la actividad o por que definitivamente se han acabado las fuentes de abastecimiento. Si esto llega a pasar se tiene un altísimo costo, ya que se pierden zonas de cultivos, infraestructura, pérdida de empleos, migración a las ciudades y todos los problemas que esto conlleva, provocando de cualquier manera un costo muy grande para el país y gran variedad de problemas sociales.

3.2.3 Modificación del esquema de flujo subterráneo

La modificación del esquema del flujo subterráneo es provocada por las excesivas extracciones de agua subterránea provocando un cambio en los gradientes hidráulicos lo que hace que se cambie el flujo subterráneo.

Este cambio en el flujo se puede presentar en las zonas costeras rompiendo con el equilibrio que se tiene entre el agua dulce y el agua salada y produciéndose una intrusión salina hacia el continente, o bien entre acuíferos vecinos, haciendo que el flujo se invierta.

Interferencia entre zonas de producción

Al invertirse el esquema de flujo subterráneo entre acuíferos vecinos puede crear problemas entre las zonas que se abastecen de dichos acuíferos, ya que ahora si el agua sale de un acuífero del cual antes no lo hacía, provocado por la inversión de flujo, este no va a disponer de la misma agua que tenía anteriormente creando conflictos a los usuarios de dicho acuífero. Ahora si el acuífero, el cual tiene el flujo de salida, se encuentra en condiciones de sobre explotación, estas se van a agravar, o bien se encuentra contaminado consecuentemente también contaminará a su acuífero vecino.

Esto provoca que haya interferencia entre las zonas de producción que son abastecidas por los acuíferos, ya que el agua puede no ser suficiente, entonces se genera una competencia por el uso ya que algunos generan mas con menos agua. Esta situación conlleva a un conflicto entre los usuarios del agua subterránea provocando problemas sociales.

3.2.3.1 Modificación de la calidad del agua

La modificación de la calidad del agua subterránea puede darse por varias situaciones, que se explican a continuación:

En algunos acuíferos a mayor profundidad se tienen aguas con mayor tiempo de residencia, las cuales necesariamente son de menor calidad, ya que han disuelto elementos de las rocas que contaminan el agua, y al bombear a más profundidad se empieza a extraer agua contaminada que en muchos casos no puede ser utilizada como agua potable, principalmente.

En función de las actividades de la población el agua superficial del área de influencia de la población, presenta concentraciones variables de uno o más contaminantes y hace inminente el riesgo de contaminación de los acuíferos locales y cercanos; la materia orgánica, los detergentes y los metales pesados, son los contaminantes predominantes del agua ⁽⁴⁶⁾.

La contaminación del agua de un acuífero también se puede deber a la migración de aguas de acuíferos vecinos con mala calidad por el cambio en el flujo subterráneo, como ya se mencionó anteriormente. El caso de la Ciudad de México es

⁴⁶ Huizar R., Algunos Aspectos de la Problemática Actual del Agua Subterránea en México, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 1993

un ejemplo de este fenómeno, ya que se tiene una intrusión de agua de mala calidad del lago de Texcoco hacia el centro de la Ciudad de México ya que el nivel está por debajo del nivel de lago, y esto debido al cambio en el esquema del flujo subterráneo.

Y otro caso es la intrusión de agua de mar a los acuíferos por la disminución en el caudal vertido al mar de agua dulce. Este punto se tratará más a detalle a continuación.

Al extraerse agua contaminada que es utilizada como agua potable puede tener efectos nocivos en la población, por ejemplo se tienen casos en que se ha extraído agua contaminada con arsénico, lo que puede llegar a provocar serios problemas de salud. Entonces se tiene que invertir en recursos adicionales para su tratamiento.

3.2.3.2 Intrusión de agua de mar

Se llama intrusión de agua de mar al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce. La invasión de agua salada hacia los acuíferos es debido a la extracción en exceso de ésta, comúnmente ocurre en acuíferos costeros, donde el agua de mar se mueve tierra adentro si el nivel del agua subterránea desciende en el continente. En la figura 3.3 se presentan los acuíferos que actualmente sufren de intrusión salina, los principales se ubican en la zona árida del norte del país, principalmente los acuíferos del estado de Sonora y la península de Baja California.

El agua captada en un acuífero costero se contamina (saliniza) cuando la porción activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de agua dulce sobre agua salada o por la propia agua salada. Sin embargo, no es éste el único modo de salinización, ya que si la captación se establece en una masa de agua subterránea dulce sobre agua salada puede producirse una ascensión del agua salada formando un cono, como se muestra en la figura 3.4. También debe considerarse la contaminación por inundaciones de agua salada durante tormentas si el pozo está en una llanura costera de muy baja cota, o debido a la mayor penetración del agua del mar en ríos y lagunas costeras durante las mismas, o incluso por lluvias salinas originadas por fuertes tormentas litorales o tifones y mareas.

El límite entre dos fluidos inmiscibles, tales como agua y petróleo está claramente definido y es brusco, formando una interfase.

Generalmente, en una formación que contiene dos fluidos inmiscibles en contacto, la interfase tiene una orientación y profundidad que guarda relación con la velocidad y dirección del movimiento, con el potencial hidráulico y con la densidad de cada uno de los fluidos.

Si esos dos líquidos son miscibles, tales como agua dulce y agua salada, no existe una interfase brusca sino que pasa más de un fluido a otro a través de una zona de mezcla. Esta zona de mezcla también llamada zona de difusión o de transición, refleja con intensidad variable las propiedades químicas e hidráulicas de cada uno de

los líquidos originales y su anchura depende de la difusividad y dispersividad del medio y de las características del movimiento.

Figura 3.3
Acuíferos con intrusión salina (⁴⁷)



La zona de mezcla dentro de la cual se sitúa la interfaz teórica, es una zona dinámica en la cual el agua se mueve no sólo como consecuencia de las diferencias de densidad, sino también a consecuencia de cambios de nivel piezométrico en ambos líquidos.

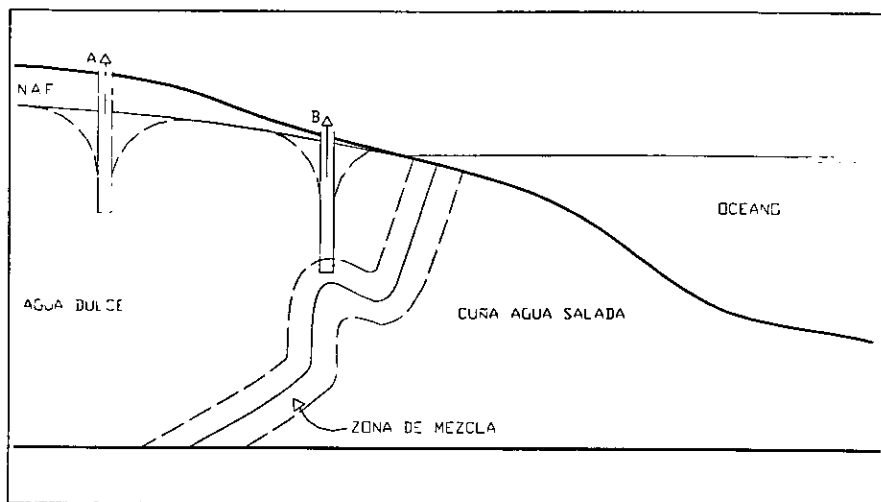
Dado que el agua de mar es más pesada que el agua dulce, se formará una cuña en los acuíferos costeros, como se muestra en la figura 3.5, en donde se ha asumido que el sistema es estático y que la interface agua salada – agua dulce es una línea recta y se origina en la playa. La presión del agua dulce en cualquier punto de la interface puede ser expresada como $(h+z)\rho_f$, donde h es la altura del nivel freático arriba del nivel del mar, z es la distancia de la interface abajo del nivel del mar, y ρ_f es la densidad del agua dulce. Esta presión debe ser igual a la presión del agua salada del otro lado de la interface, la cual es $z\rho_s$, donde ρ_s es la densidad del agua salada; igua-

⁴⁷ Escolero O., Panorámica del agua subterránea en México, Universidad Tecnológica de la Mixteca, 1993

lando las dos expresiones anteriores y despejando z, queda (fórmula de Ghyben-Herzberg):

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h \quad 3.1$$

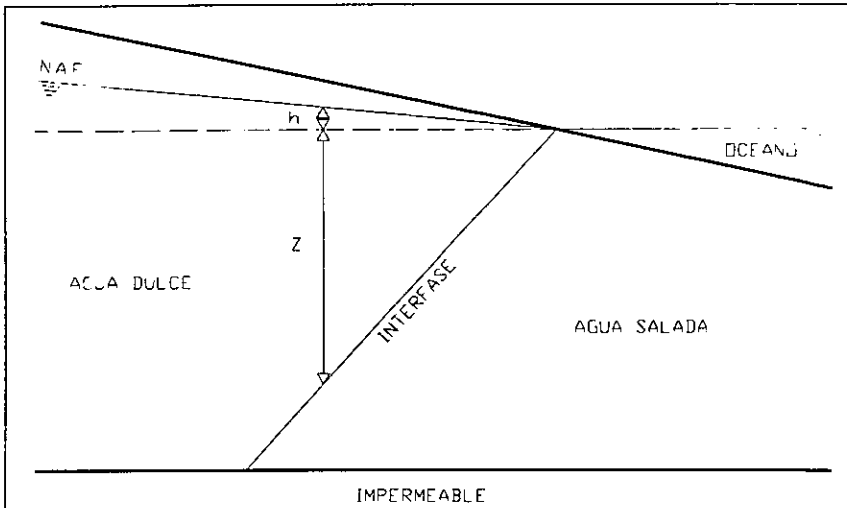
Figura 3.3
Intrusión de agua de mar, modificada por la extracción



El peso específico del agua dulce se puede tomar como $\gamma_d = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$ con escaso error dentro del margen de temperaturas normales. El peso específico del agua marina es mayor, y puede tomarse entre 1020 y $1030\ \text{kg/m}^3$ según la salinidad y temperatura, siendo el valor más usual el de $\gamma_s = 1025\ \text{kg/m}^3$. Sustituyendo estos valores en la ecuación anterior se ve que para acuíferos costeros $z = 40\ h$, lo que quiere decir, que por cada metro que el nivel del agua freática este arriba del nivel del mar, el agua dulce se extenderá 40 metros por debajo del nivel medio del mar⁽⁴⁸⁾.

⁴⁸ Bower, Groundwater Hydrology, Mc Graw Hill, 1978

Figura 3.4
Intrusión de agua de mar, problema estático



Si el agua subterránea es extraída excediendo el rendimiento seguro y el nivel del agua dulce baja en el continente, el agua salada subirá 40 metros por cada metro que el agua dulce baje disminuyendo drásticamente el volumen de agua dulce. Por lo tanto la extracción del agua subterránea debe ser manejada con mucho cuidado, para mantener el nivel del agua dulce.

La ecuación anterior es una representación muy simple, ya que en realidad el agua tiene un movimiento hacia el océano y los componentes del flujo ocurren en el acuífero según el nivel de agua dulce se mueva verticalmente a lo largo de la interfase. Tomando este factor de flujo hacia el mar dentro del modelo anterior, Glover (1964) desarrolló una ecuación en la que hace intervenir el caudal de agua dulce que es descargado al océano y hace posible mantener la interfase estable.

Además existe el fenómeno de difusión en la interfase que hace que esta no sea una línea recta sino una zona de mezcla, tal y como se muestra en la figura 3.3, efecto al que hay que agregar los conos formados por el bombeo puntual. Normalmente este fenómeno es muy difícil de calcular en forma precisa ya que los caudales de extracción de los pozos son distintos y variables, ya que cuando extraen agua salda paran de bombear haciendo que la interfase se retire hacia el mar y así sucesivamente haciendo muy complejo el seguimiento del fenómeno.

Al existir intrusión salina en los acuíferos costeros, se empieza a extraer agua salada de ellos, además de una salinización de los suelos y posteriormente un abandono pozos seguido de un abandono de las tierras de agricultura.

Una medida para contrarrestar la intrusión salina es la inyección dulce hacia los acuíferos, ya que se crea un "montículo" a lo largo de la costa invirtiendo el gradiente nuevamente hacia a fuera del continente. Parte de esta agua es perdida en el océano, pero esta cantidad es mucho menor que el agua que se perdería en caso de ocurrir una intrusión salina. Pero si tomamos en cuenta que se llega a ese estado de intrusión salina por la falta de agua de dulce, generalmente no hay disponibilidad para realizar dicha inyección, por lo que es en extremo difícil de remediar

La salinización de los suelos es un fenómeno muy grave, ya que no se puede dar ningún tipo de vegetación y hay una desertificación, provocando un desequilibrio ecológico casi irreversible, además del costo económico que representa el abandono de la infraestructura.

3.2.5 Consolidación de estratos arcillosos

Otro fenómeno asociado a al sobre explotación de los acuíferos que provoca grandes daños, es la consolidación de los estratos arcillosos, por la misma extracción de agua, provocando asentamientos diferenciales. En la figura 3.5 se muestran los principales acuíferos donde se han provocado asentamientos, incluido el principal de ellos que es el de la ciudad de México.

El fenómeno de consolidación se comporta de la manera siguiente: considérese un manto de arcilla suave, confinado entre dos mantos permeables de arena, el nivel freático se supone en la superficie superior del suelo (figura 3.6a).

Si el agua tiene una distribución lineal de presiones hidrostáticas, el único efecto mecánico del agua en la arcilla es la subpresión, o sea una distribución distinta a la mostrada, por ejemplo cuando se aplica una carga al suelo este sufre una consolidación debido a un desplazamiento del agua contenida.

Supóngase ahora (figura 3.6b) que una disminución rápida de presión p se induce en el manto arenoso inferior, por ejemplo, a causa de un bombeo. Se originará un flujo de agua hacia abajo en la arcilla, ocasionando una distribución final de presiones negativas en el agua y a su vez crea un asentamiento final producido por el gradiente hidráulico. El incremento medio en la presión efectiva \bar{p} de la arcilla es ⁽⁴⁹⁾:

$$\bar{p} = \frac{p}{2} = \frac{\gamma_w}{2} h = i \gamma_w \frac{H}{2} \quad 3.2$$

⁴⁹ Carrillo N., Influencia de los pozos artesianos en el hundimiento de la Ciudad de México

Donde:

p presión total
 γ_w peso específico del agua
h abatimiento
H espesor del estrato

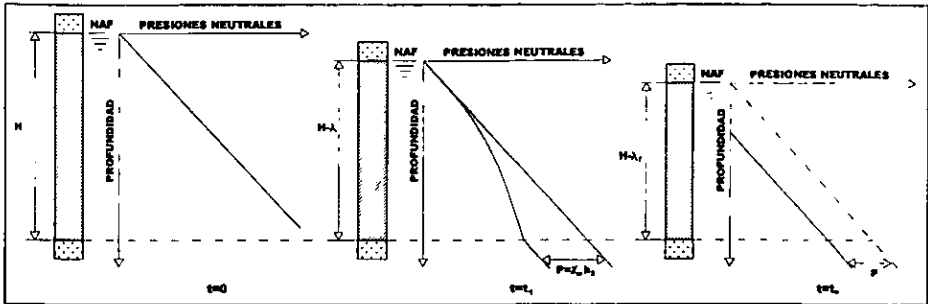
i gradiente hidráulico: $i = \frac{h}{H}$

Figura 3.5
Acuíferos con asentimientos ⁽⁵⁰⁾



⁵⁰ Escolero O., Panorámica del agua subterránea en México, Universidad tecnológica de la Mixteca, 1993

Figura 3.6
Evolución de las presiones neutrales por la extracción de agua



También de la siguiente figura 3.7 se tiene que si λ representa la disminución de espesor de una muestra de suelo, de espesor total $1+e$, podrá escribirse para un estrato de espesor H:

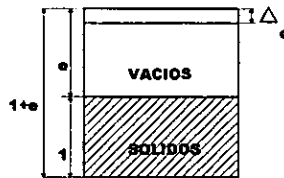
$$\frac{\lambda}{H} = \frac{\Delta e}{1+e} = \frac{a_v \bar{p}}{1+e} = \frac{\gamma_w}{2(1+e)} a_v h \quad 3.3$$

Donde:

- λ asentamiento
- Δe diferencia en la relación de vacíos
- e relación de vacíos
- a_v coeficiente de compresibilidad: $a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p}$

e y a_v se suponen constantes con la profundidad.

Figura 3.7 (⁵¹)
Asentamiento de un estrato de suelo.



⁵¹ Badillo E., Mecánica de Suelos, Ed. Umusa, 1992

Así,

$$\lambda = \frac{\gamma_w a_v}{2(1+e)} hH \quad 3.4$$

da el valor del asentamiento final. De aquí se observa que si las constantes del suelo no cambian, para un descenso en la carga hidrostática h , el asentamiento será proporcional a la profundidad H .

Analicemos ahora el proceso de consolidación. En un instante dado t , el grado de consolidación

$$U\% = 200 \frac{p_t}{p} = 100 \frac{\lambda_t}{\lambda}$$

donde p_t es el promedio del exceso de presión en el instante t y λ_t es el correspondiente asentamiento.

De la teoría de consolidación de Terzaghi,

$$t_{50} \approx \frac{0.2H^2}{C_v} ,$$

donde t_{50} es el tiempo necesario para el 50% de consolidación y C_v el coeficiente de consolidación:

$$C_v = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w}$$

siendo k el coeficiente de permeabilidad.

Para el 50% de consolidación, aproximadamente

$$\lambda_t = A\sqrt{t} = \frac{\sqrt{5}}{2} \frac{kh}{\sqrt{C_v}} \sqrt{t}$$

$$d\lambda_t = \frac{\sqrt{5}}{2} \frac{k}{\sqrt{C_v}} dh\sqrt{t} .$$

Suponiendo una disminución uniforme h en la presión: $h = Bt$, $B =$ constante. Obtengamos por integración:

$$\lambda_t = \frac{\sqrt{5}}{3} \frac{Bk}{C_v} t\sqrt{t} .$$

El 50% de consolidación, que es el valor de importancia práctica, λ_t es independiente de la profundidad H.

También, para una disminución uniforme de presión hidrostática en el manto acuífero, el asentamiento del suelo es acelerado.

De lo anterior se tiene que si existe una extracción de aguas subterráneas en un estrato arcilloso y sujeto a consolidación, se produce un hundimiento que dependerá de la compresibilidad de la arcilla, y que tal hundimiento en una zona urbana puede provocar diversos tipos de problemas, algunos de ellos de difícil determinación.

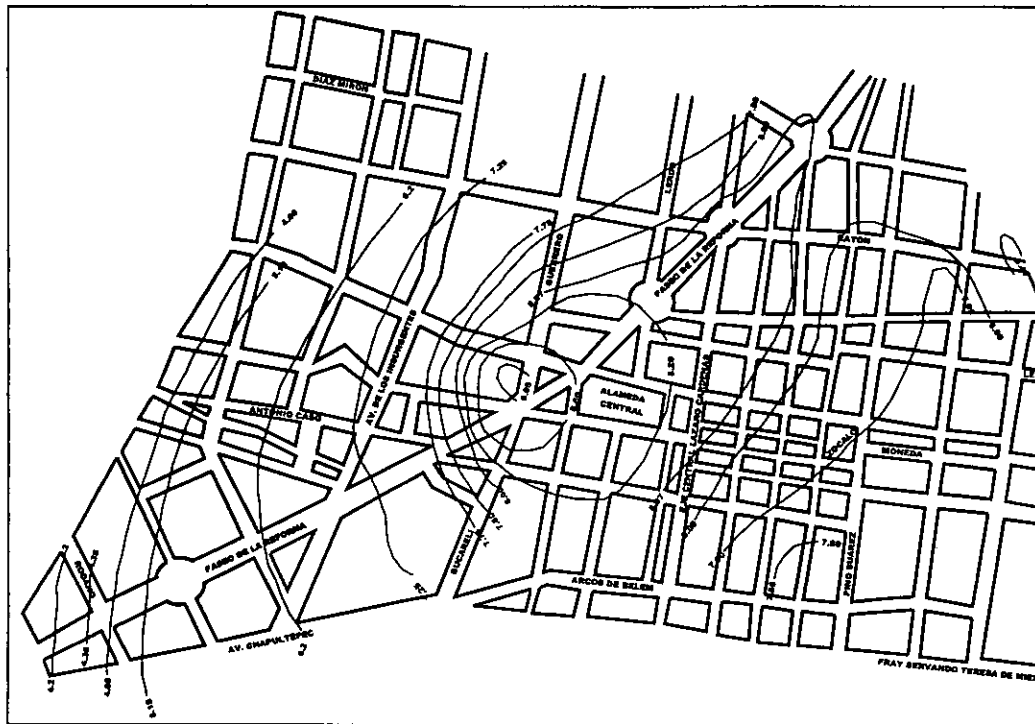
En la figura 3.8 se muestra la pérdida de presión hidrostática a 50 m de profundidad en la ciudad de México debido a la extracción de agua subterránea. En algunos lugares este valor alcanzó las 50 ton/m² en 1986, que son los datos más recientes con que se cuenta, y que en la actualidad se presumen mayores. Este incremento de presión es comparable a la que provocaría un edificio de 7 pisos desplantado en la superficie del terreno.

Las curvas de igual evolución del hundimiento del terreno en la ciudad de México, para el periodo comprendido entre 1891 y 1985, se presentan en la figura 3.9, donde se puede observar que en la zona centro de la ciudad se han alcanzado hundimientos que rebasan los 9 m.

Debido a los hundimientos diferenciales los sistemas de desagüe y eliminación de aguas negras se dislocan por la alteración de sus pendientes planteándose situaciones de escasez de agua y problemas sanitarios de contaminación directa de los acuíferos por las aguas negras de los drenajes, además causa inundaciones en distintas zonas de la urbe. Las descargas de aguas residuales que originalmente se hacían por gravedad por el gran canal de desagüe, en la ciudad de México, ahora tienen que evacuarse a partir de cárcamos y plantas de bombeo construidas para tal caso. Esto trae consigo grandes costos, ya que se tienen que instalar plantas de bombeo, además del costo en mantenimiento y operación de estas bombas. Se han realizado obras adicionales como la construcción en últimas fechas del drenaje profundo lo que tiene un costo económico muy alto.

Edificios sustentados por pilotes y aún inmuebles cimentados superficialmente, que en el pasado hablan tenido un buen comportamiento, acusan asentamientos diferenciales de importancia que ponen en peligro su integridad, en algunos casos, y debido a su tipo de cimentación, algunas obras pueden presentar menos hundimiento que el terreno circundante dando la impresión de que emergen. Además, los edificios construidos sin pilotes, junto a edificios con pilotes, presentan agrietamiento debido a la deflexión relativa local hacia arriba inducida por el terreno.

Figura 3.9
Curvas de Igual Hundimiento en el centro de la ciudad de México, 1891-1985



En otros casos como en los cauces de los ríos se presentan infiltraciones a lo largo de los cauces aliviando las presiones causadas por el bombeo, hecho que se refleja en un menor hundimiento del cauce que del terreno circundante, dislocando los drenajes de dicho cauce y obras construidas cerca de este.

En la Ciudad de México se puede observar otros problemas derivados por el hundimiento del terreno, como lo puede ser el hundimiento diferencial de las vías de comunicación en los pasos a desnivel, ya que los puentes no sufren hundimientos por estar soportados por pilotes apoyados en la capa dura, lo que provoca ruptura de pavimentos y de los pasos a desnivel, así como también en la línea del metro se tienen estos efectos negativos.

Algunos de los efectos anteriores pueden ser mensurables, mientras que otros no hay forma de cuantificar los daños de una manera objetiva; sin embargo, en la mayoría de los casos no se conocen valores económicos de estos efectos.

Ya que los efectos de la extracción del agua subterránea es la razón fundamental de dicho hundimiento obliga a cambiar proyectos y programas de inversión, haciendo imperativo buscar nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable alejadas de la superficie urbanizada y provocando restricciones en el consumo del agua.

CAPÍTULO 4

Estimación de costos y beneficios debidos a la sobre explotación de los acuíferos

Como se mencionó en el capítulo anterior, los efectos ambientales debidos a la sobre explotación de los acuíferos son de diversa índole, los principales y más fáciles de evaluar son los incrementos en los costos de bombeo debidos al aumento en la profundidad de bombeo, algunos otros como los hundimientos, desertificación, contaminación por aguas de mala calidad e intrusión salina, además de los efectos colaterales como las pérdidas de empleos, disminución de la producción agrícola, éxodo de la población rural hacia la urbana, resultan difíciles de cuantificar en forma económica.

Lo mismo puede afirmarse de los beneficios que resultan al disponer de mayor cantidad de agua durante etapas en que se cuenten con volúmenes adicionales a costa de los almacenamientos subterráneos; y más aún, cuando esta situación es planeada para lograr un desarrollo acelerado de una zona, es difícil saber el momento en que deberán disminuir las extracciones para regresar a una estabilización del acuífero, con base en un rendimiento seguro, y en consecuencia sustentar las actividades económicas y sociales que dependen del agua.

Por lo tanto en este capítulo sólo se evaluarán en forma económica algunos de estos efectos, para dar una idea de la problemática a la que se está enfrentado el país.

4.1 Costos debidos al incremento en la profundidad de bombeo

Al bajar el nivel del agua en los acuíferos, la carga de bombeo se hace mayor y en consecuencia aumentan los costos de extracción, principalmente debido al mayor consumo de la energía eléctrica. Además, de que al disminuir los niveles en los pozos, las perforaciones de éstos resultan insuficientes teniendo que abandonarlos o profundizarlos. Este incremento del costo en la extracción del agua, impacta principalmente a la agricultura, teniendo que dar más subsidios, a través de las tarifas eléctricas principalmente, ya que de otra manera se tendrían otros problemas de índole social y económico, como el abandono de tierras y la pérdida de empleos.

Para obtener los costos ambientales de la sobre explotación de los acuíferos debidos a la extracción de agua mediante pozos, primeramente es necesario obtener lo que costaría explotar un acuífero de manera que éste se mantenga en equilibrio, es decir, bajo condiciones de rendimiento seguro, situación en la que no existe abatimiento de los niveles; después se obtiene el costo de la explotación del acuífero, bajo condiciones actuales; es decir, sobre explotado y la

diferencia entre los dos costos corresponderá al costo debido a la sobre explotación.

Los costos totales de un sistema de bombeo tienen dos componentes principales, los costos fijos y los variables. Los costos fijos son los llamados costos de inversión que comprenden a los desembolsos que se realizan para la adquisición de la bomba, motor, subestación eléctrica, dispositivos de control, instalación y pruebas; es decir, son todos aquellos gastos que es necesario realizar para que el equipo de bombeo esté completamente instalado y listo para funcionar. Los costos variables son los que se requieren para operar el equipo, dar el mantenimiento adecuado, resolver los problemas que se presenten; es decir, son todos aquellos gastos que se originan para que el sistema opere.

Por lo tanto, es necesario calcular el costo y referirlo a un metro cúbico extraído, en función de la profundidad de bombeo, para poder calcular la variación que tiene este costo con respecto a la profundidad del agua, bajo dos condiciones la de rendimiento seguro o manteniendo estables los niveles y el de sobre explotación, bajo el incremento de los niveles de bombeo. Para esto es necesario integrar los costos de perforación del pozo, del equipo de bombeo y los correspondientes de mantenimiento y operación.

4.1.1 Costo de perforación de pozos

La profundidad de un pozo debe ser fijada con base en los espesores y profundidades de los acuíferos y sus rendimientos, tratando de cubrir la demanda de agua o las necesidades que se tengan. Lo anterior generalmente se realiza con base en estudios geológicos superficiales, prospecciones geofísicas y condiciones de operación de los pozos ya existentes en la zona, para identificar los acuíferos no sólo en lo que respecta a sus espesores y profundidades sino también a sus características hidrodinámicas, transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento.

En este caso para calcular el costo de perforación, se consideró un pozo tipo, como el mostrado en la figura 4.1, suponiendo un caudal de extracción fijo de 60 l/s y con profundidades diferentes. Las dimensiones del pozo tipo considerado se muestran en la tabla 4.1.

Para obtener el costo de perforación se siguió el proceso constructivo, como sigue: primeramente se hace una perforación exploratoria, generalmente de 12 1/4" de diámetro, y después se va agrandando o rimando a diámetros mayores mediante otras perforaciones adicionales; este costo de perforación depende de la dureza del material en el que se esté trabajando, por lo que se consideró que la perforación se realizó en tres diferentes tipos de materiales, proporcionándole a cada uno un porcentaje de la perforación, el tipo i es el más suave mientras el tipo iii es el más duro (tabla 4.2).

Figura 4.1
Características de un pozo tipo

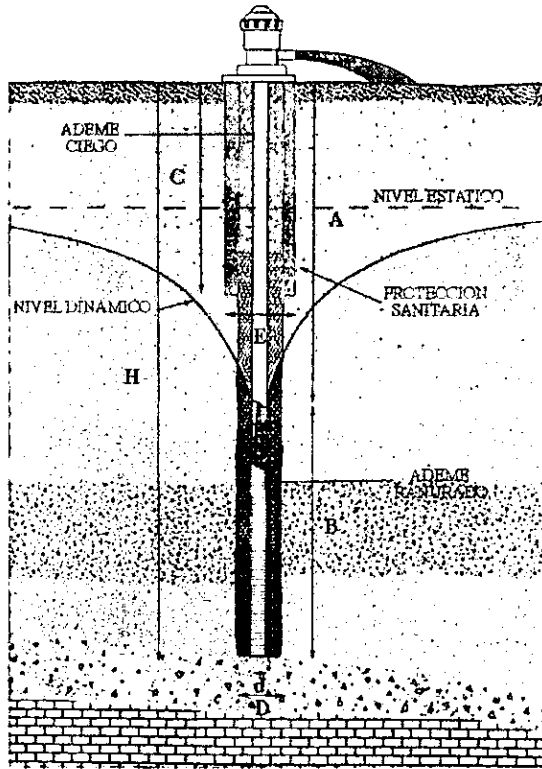


Tabla 4.1
Dimensiones de un pozo tipo para un gasto de 60l/s

GASTO 60 l/s		15	30	50	70	90
H	Profundidad del nivel de bombeo (m)	50	100	150	200	300
A	Ademe ciego (m)	15	30	50	70	90
B	Ademe ranurado (m)	35	70	100	130	210
C	Protección sanitaria (m)	10	20	25	30	30
D	Diámetro del contra ademe (plg)	18	18	20	20	20
d	Diámetro del ademe (plg)	12	12	14	14	14
E	Diámetro protección sanitaria (plg)	26	26	26	26	26

En este rubro también se deben considerar los costos relativos a la transportación del equipo y la construcción de la fosa de lodos, esta última necesaria para realizar la perforación.

Después de la perforación se sigue con la colocación de la tubería de ademe, la cual consta de las siguientes partes:

1. Tubería ranurada. Esta se coloca en la zona de admisión del agua al pozo, por lo tanto se encuentra abajo del nivel dinámico, hasta el fondo de la perforación.
2. Tubería lisa. La parte superior de la tubería es lisa ya que esa parte se encuentra arriba del nivel dinámico, por lo tanto no entra agua al pozo y no es necesario que esté ranurada.
3. Protección sanitaria (contra ademe). Aun cuando la tubería del ademe en la parte superior es ciega, es conveniente colocar otra tubería de mayor diámetro y también ciega, denominada contra ademe para evitar una posible migración de agua de mala calidad de los acuíferos superiores hacia los acuíferos en explotación.

La zona comprendida entre la tubería de contra ademe y la perforación se cementa con una mezcla de agua y cemento en proporción de unos 25 litros de agua por 50 kg de cemento; este cementado además de asegurar el sello entre los acuíferos someros y profundos, fija la tubería de contra ademe, para así descansar sobre ella, el ademe definitivo cuando se instale y no apoyarlo en el fondo evitando un posible flambeo antes de colocar el filtro de gravas. La profundidad del contra ademe y la zona cementada es generalmente de 30 a 50 metros, longitud que dependerá del grado de contaminación que se tenga en los acuíferos someros. Un pozo tipo con estas características se muestra en la figura 4.1

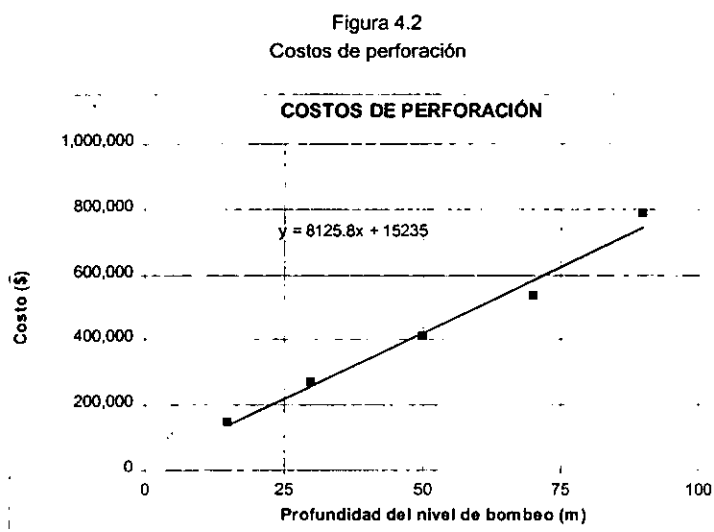
Entre la tubería y la pared de la perforación se coloca un filtro de grava, el cual tiene por objeto estabilizar la pared de la perforación evitando derrumbes y retener la mayoría de los materiales finos que contiene la formación acuífera, evitando que éstos penetren a la cámara de bombeo y además incrementa el diámetro efectivo del pozo, asegurar una buena porosidad y conductividad hidráulica alrededor del ademe ranurado.

Finalmente, también se consideró en los costos de inversión, la prueba de aforos, para obtener la eficiencia hidráulica del pozo y así poder determinar el caudal de extracción y el nivel de bombeo o dinámico, datos necesarios para seleccionar el tipo de bomba que se va a usar.

En la tabla 4.2 se muestra el cálculo del costo de la perforación para un pozo de 60 l/s a diferentes profundidades.

En la figura 4.2 se muestra gráficamente el costo de la perforación con respecto a la profundidad, al cual se le ajustó una curva, la cual tiene una tendencia lineal, como se muestra a continuación:

$$\text{Costo de perforación} = 8125.8 * (\text{profundidad N.D.}) + 15235 \quad 4.1$$



4.1.2 Costo del equipo de bombeo

El otro componente de un pozo es el equipo de bombeo, para el cálculo de éste se consideró una bomba tipo turbina vertical por la facilidad de integrar los costos de cada parte del equipo.

Primeramente se calculó la potencia teórica, y de acuerdo con ésta se seleccionó un motor cuya potencia comercial se asemejara y se consideró su costo, a éste se le aumento el costo del cabezal de descarga, de la columna y del cuerpo de tazones.

En este rubro también se consideró el tablero de control, el transformador y las cuchillas, que componen el equipo eléctrico. En la tabla 4.3 se muestra el cálculo del costo del equipo de bombeo.

Tabla 4.2
Costos de perforación

COSTO DE PERFORACIÓN						
	profundidad	50	100	150	200	300
	nivel dinámico	15	30	50	70	90
	Caudal	60	60	60	60	60
Tramp equipo		6,446	6,600	7,700	8,800	11,000
Fosas		4,620	5,500	6,600	8,250	9,900
Perforación sondeo exploratorio 12 1/4"						
P. U.						
0-100	tipo I	273	5,460	10,920	10,920	10,920
	Tipo ii	510	10,200	20,400	20,400	20,400
	Tipo iii	1,035	10,350	20,700	20,700	20,700
100-200	tipo I	291			5,820	11,640
	Tipo ii	531			10,620	21,240
	Tipo iii	1,124			11,240	22,480
200-300	tipo I	350				11,640
	Tipo ii	700				21,240
	Tipo iii	1,500				22,480
Ampliación de 12" a 17 1/2"						
0-100	tipo I	326	16,300	13,040	13,040	13,040
	Tipo ii	390		15,600	15,600	15,600
	Tipo iii	840		16,800	16,800	16,800
100-200	tipo I	424			8,476	16,952
	Tipo ii	507			10,140	20,280
	Tipo iii	1,092			10,920	21,840
200-300	tipo I	551				22,038
	Tipo ii	659				26,364
	Tipo iii	1,420				28,392
Ampliación de 17 1/2" a 20"						
0-100	tipo I	300	3,000	6,000	7,500	9,000
	Tipo ii	320				
	Tipo iii	900				
TOTAL DE LA PERFORACIÓN		56,376	115,560	176,476	237,942	373,946
Tubería contrademe						
	16"	516				
	18"	618	6,180	12,360		
	20"	720			18,000	21,600
Tubería lisa						
	10"	333				
	12"	400	6,000	12,000		
	14"	460			23,000	32,200
Tubería ranurada						
	10"	455				
	12"	580	20,300	40,600		
	14"	710			71,000	92,300
Cementado						
		10,560	13,750	17,050	20,350	26,455
Jodos						
		5,500	8,250	11,000	13,750	17,875
Registro eléctrico						
		4,400	5,500	6,600	7,700	10,010
colocación contrademe						
		9,350	13,750	18,150	22,550	29,315
Filtro						
		8,547	19,690	29,535	39,380	51,194
Dispensor						
		990	1,980	2,970	3,520	4,576
Agitación						
		3,520	7,040	10,560	14,080	18,304
Aforo						
		13,750	20,570	27,390	30,800	40,040
VARIOS		89,097	155,490	235,255	298,230	409,869
TOTAL POZO		145,473	271,050	411,731	536,172	783,815

En la figura 4.3 se muestra la gráfica del costo del equipo de bombeo contra el nivel de bombeo, para un equipo con una capacidad de 60 l/s y cinco profundidades diferentes, a las cuales se ajusto una curva de tendencia lineal:

$$\text{Costo del equipo de bombeo} = 3,538.3 (\text{profundidad N.D.}) + 5,099.7 \quad 4.2$$

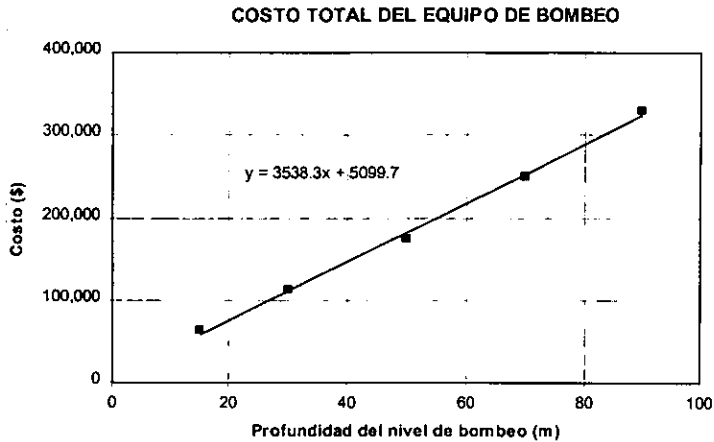
Tabla 4.3
Costo del equipo de bombeo

COSTO DE EQUIPOS DE BOMBEO					
Profundidad	50	100	150	200	300
Nivel dinámico	15	30	50	70	90
Caudal	60	60	60	60	60
Potencia teórica HP	29.6	59.2	98.6	138.1	177.5
Potencia comercial HP	30.0	60.0	100.0	150.0	200.0
Costo del motor eléctrico pesos	22,500	45,000	75,000	112,500	150,000
Cabezal de descarga	8" a 8" 9,500	8" a 8" 9,500	8" a 8" 9,500	8" a 8" 9,500	8" a 8" 9,500
Columna de la bomba	8" 25 m	8" 40 m	8" 60	8" 70 m	8" 100 m
	12,500	20,000	30,000	35,000	50,000
Cuerpo de tazones	2,250	4,500	9,000	13,500	27,000
Tablero de control y arrancador					
Transformador					
Cuchillas	13,959	27,917	46,528	69,793	93,057
MOTOR	22,500	45,000	75,000	112,500	150,000
BOMBA	22,000	29,500	39,500	44,500	59,500
IMPULSOR	4,500	9,000	13,500	22,500	27,000
ELECTRICO	13,959	27,917	46,528	69,793	93,057
TOTAL	62,959	111,417	174,528	249,293	329,557

4.1.3 Costos de bombeo

Para calcular el costo total del bombeo es necesario integrar los costos de inversión de la perforación y el equipo de bombeo con sus componentes adicionales como son la sub estación eléctrica, además de adicionar los costos de operación y mantenimiento y todos ellos referidos en forma unitaria a un metro cúbico de extracción.

Figura 4.3
Costo del equipo de bombeo



De los costos de mantenimiento aunque el más importante es el de energía eléctrica, también se incluyen los servicios de mantenimiento y la cuota de una persona encargada del pozo. La tarifa eléctrica considerada fue de \$0.60/kwhr, que según Banco Mundial ⁽⁵²⁾ es el costo real de la electricidad, aunque CFE considera diferentes tarifas, por ejemplo la tarifa 9, para uso agrícola, la cual debe estar subsidiada y es actualmente de \$0.207 (precios de 1998), y para el uso industrial es de 1.8167 ⁽⁵³⁾.

Para calcular las depreciaciones de las inversiones del pozo y del equipo de bombeo, se consideró una tasa de descuento del 10% anual, durante su vida útil, sin valor de rescate, la tasa de descuento se considera como un promedio aproximado durante su vida útil y como el interés bancario menos la inflación.

Los costos de bombeo fueron estimados para las diferentes opciones de profundidad y nivel de bombeo del pozo tipo mencionado. Los costos de perforación y adernado más los correspondientes al equipo de bombeo forman parte de los costos de inversión y dentro de los costos de operación el más importante resultó ser el de la energía eléctrica (tabla 4.4).

⁵² Banco Mundial, Opciones de Manejo en Acuíferos Sobre Explotados, 1999

⁵³ CFE, Internet.

Para calcular el costo de la energía eléctrica es necesario calcular la potencia:

$$P = \frac{\gamma QH}{\eta} \quad 4.3$$

En donde:

P es la potencia

H es la carga hidráulica

Q es el gasto

γ es la densidad del fluido, en este caso el agua.

La eficiencia del equipo de bombeo se consideró del 40%, el trabajo en kwh se obtiene al multiplicar la potencia por el tiempo de operación del pozo en un año el cual se consideró de 2 880 horas. Los costos de mantenimiento para los equipos aparecen en la tabla 4.4.

De acuerdo con los incisos anteriores, el costo de bombeo se obtuvo para un caudal supuesto de 60 l/s, y se consideró, para éste mismo caudal, 5 profundidades de perforación a 50, 100, 150, 200 y 300 metros, correspondientes a 15, 30, 50, 70 y 90 m de nivel dinámico o profundidad de bombeo, obteniendo así una función del costo en función de la profundidad de bombeo.

Como volumen de extracción se tomó el volumen de agua extraído durante la operación del pozo, para regar algún cultivo, y es igual a las horas en que esta en funcionamiento el pozo por el caudal de producción del pozo. Se supuso un tiempo medio de 4 meses al año, trabajando la bomba las 24 horas, lo que da un total de 2 880 horas de operación, que por el caudal de extracción de 60 l/s, la extracción resulta de 622,080 m³ por año.

Para obtener el pago anual que se tiene por la depreciación del equipo, se tomó la siguiente función que devuelve el pago de una anualidad basándose en pagos constantes y una tasa de interés constante (54).

$$A = \frac{Pi(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad 4.4$$

en donde:

A es una anualidad

P es el valor de la inversión,

i es la tasa de descuento o de interés

⁵⁴ James and Lee, Economics of water resources planning, Mc graw Hill, 1971

n el número de años, en que se van a realizar los pagos o vida útil del equipo.

En los costos de operación y mantenimiento se consideraron los servicios periódicos para su buen funcionamiento, que se le deben realizar a una bomba durante un año. Los resultados se muestran en la tabla 4.4 y en la figura 4.4.

Figura 4.4
Costos de bombeo

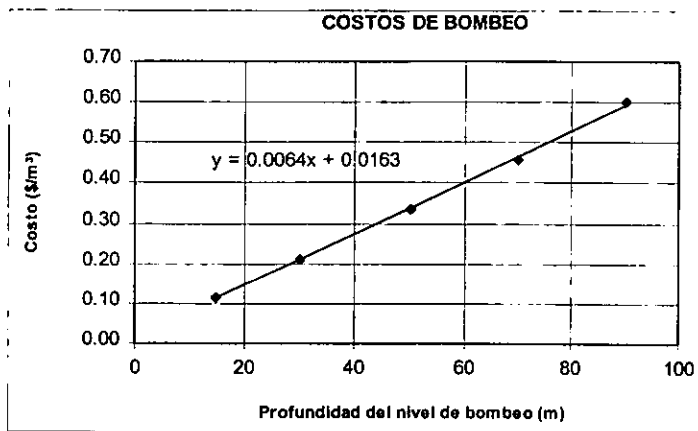


Tabla 4.4
Costo del bombeo

Dotación vol. de extracción m ³ /año		622,080		622,080		622,080		622,080		622,080										
Caudal en l/s	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60									
Nivel de bombeo en m	15	30	50	70	90															
Eficiencia electromecánica %	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%	40.0%									
Precio \$/kwh	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60									
Tasa de descuento	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%									
meses		meses		meses		meses		meses		meses										
Tiempo de operación en horas	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00	2,880 4.00									
COSTOS DE DEPRECIACION																				
	costo	vida años	Pago anual	\$/m ³ Car m ³	costo	vida años	Pago anual	\$/m ³ Car m ³	Costo	vida años	Pago anual	\$/m ³ Car m ³	costo	vida años	Pago anual	\$/m ³ Car m ³	costo	vida años	Pago anual	\$/m ³ Car m ³
Parforación	143,473	25	-18,026.48	-0.02576	271,050	25	-29,961.06	-0.04800	411,731	25	-45,359.61	-0.07252	536,172	25	-59,069.04	-0.09495	783,815	25	-86,351.34	-0.13681
Equipo bom	22,000	15	-2,892.42	-0.00485	29,800	15	-3,878.48	-0.00623	39,500	15	-5,193.21	-0.00835	44,500	15	-5,850.58	-0.00940	59,500	15	-7,822.69	-0.01258
Impulsor	4,500	5	-1,167.09	-0.00191	9,000	5	-2,374.18	-0.00382	13,500	5	-3,561.27	-0.00572	22,500	5	-5,935.44	-0.00954	27,000	5	-7,122.53	-0.01145
Motor y sub	38,459	30	-3,867.49	-0.00622	72,917	30	-7,734.98	-0.01243	121,528	30	-12,891.64	-0.02072	182,293	30	-19,337.46	-0.03109	243,057	30	-25,783.28	-0.04145
			-0.03854				-0.07049				-0.10771				-0.14499				-0.20428	
COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO																				
Energía eléctrica		1	-38,141.28	-0.06131		1	-76,282.56	-0.12283		1	-127,137.60	-0.20438		1	-177,992.64	-0.28613		1	-228,847.68	-0.36788
Rep. Bomba	13,300	5	-3,189.55	-0.00513	20,800	5	-4,988.17	-0.00802	29,300	5	-7,028.61	-0.01130	40,300	5	-9,664.58	-0.01554	50,800	5	-12,182.65	-0.01958
Serv Mant	4,000	1	-4,000.00	-0.00643	4,000	1	-4,000.00	-0.00643	4,000	1	-4,000.00	-0.00643	4,000	1	-4,000.00	-0.00643	4,000	1	-4,000.00	-0.00643
Lub	2000	1	-2,000.00	-0.00322	2000	1	-2,000.00	-0.00322	2000	1	-2,000.00	-0.00322	2000	1	-2,000.00	-0.00322	2000	1	-2,000.00	-0.00322
Cuota de mant.	300	1	-300.00	-0.00048	300	1	-300.00	-0.00048	300	1	-300.00	-0.00048	300	1	-300.00	-0.00048	300	1	-300.00	-0.00048
			-0.07857				-0.14077				-0.22580				-0.31179				-0.39739	
Total			-0.11516				-0.21128				-0.33351				-0.45677				-0.60187	

4.1.4 Incremento en los costos de bombeo debidos a la sobre explotación.

Los costos de la sobre explotación debidos al bombeo, son la diferencia de lo que costaría extraer el agua si la profundidad del nivel estático fuera el correspondiente al volumen de extracción obtenido en el rendimiento seguro (capítulo 2), menos lo que cuesta extraer el agua al nivel que realmente se encuentra.

Con los resultados anteriores es posible calcular el costo de la sobre explotación para el Valle de Aguascalientes, procediendo de la siguiente manera: primeramente con las funciones calculadas en el capítulo 1 de los niveles estático y dinámico, que se muestran a continuación:

$$NE = -133.43\text{Ln}(\text{tiempo}) + 1313.2 \quad 4.5$$

$$ND = -133.43\text{Ln}(\text{tiempo}) + 1283.7 \quad 4.6$$

se calcula el volumen de extracción para esas fechas con la siguiente función la cual también fue calculada a partir de algunos valores que se muestran en la tabla 1.2:

$$\text{Volumen} = 24.947e^{0.00009(\text{fecha})}, \text{ válida de abril de 1968 a enero de 1989} \quad 4.7$$

$$\text{Volumen} = -0.027(\text{fecha}) + 1387.1, \text{ válida de enero de 1990 a enero de 1998} \quad 4.8$$

Después se calcula el costo del bombeo teniendo en cuenta el precio de la energía eléctrica de 0.60 \$/kwhr, mediante la fórmula obtenida en la sección 4.1.3:

$$\text{costo} = 0.0064(\text{profundidad}) + 0.0163 \quad 4.9$$

Y finalmente se calcula el costo del bombeo en millones de pesos por año. Después se realizan los mismos cálculos suponiendo que el volumen de extracción es el que se obtuvo para el rendimiento seguro en el capítulo 2. Una vez calculado el costo del bombeo en millones de pesos por año para el rendimiento seguro se saca la diferencia entre lo que cuesta el bombeo para las condiciones actuales de sobre explotación y el rendimiento seguro que es la condición de no sobre explotación, y esta diferencia representa el costo de la sobre explotación por el concepto de bombeo. Adicionalmente se calculó el precio del metro cúbico de agua para todos los años

Los costos de la sobre explotación debidos al bombeo se presentan en la tabla 4.5. En este ejercicio al considerar el rendimiento seguro anotado en la tabla 3.1, la sobre explotación se inició en 1969 cuando el costo de bombeo era

de $\$0.43/\text{m}^3$, alcanzando un valor de $\$0.72/\text{m}^3$ en 1998, lo que da un incremento de casi el doble, debido a la sobre explotación.

Los valores anteriores multiplicados por el volumen en exceso bombeados, resultan de un monto de 196 millones de pesos que divididos entre el volumen sobre explotado adicional de extracción, representa un costo adicional de hasta $\$1.14/\text{m}^3$ actualmente.

4.2 Costos por el abandono de pozos

Como ya se ha mencionado, al ocurrir un abatimiento en los niveles, los pozos quedan obsoletos y son abandonados o repuestos, este costo adicional se puede tomar en cuenta considerando una disminución de la vida útil por lo que hay que amortizar la inversión en menos tiempo o como se anota a continuación.

Para obtener un costo por el abandono de pozos, primeramente se calculó el número de pozos abandonados por año considerando que fueron diseñados para funcionar a cierta profundidad del nivel dinámico y que el pozo puede trabajar mas o menos bien hasta 2/3 partes de esta profundidad, rebasada esta profundidad ya no es factible operar el pozo, por lo tanto hay que abandonarlo, y se tiene una pérdida de la perforación, valores que para el acuífero de Aguascalientes se presentan en la tabla 4.6.

Los valores de la tabla 4.6 se calcularon suponiendo que los pozos fueron diseñados para trabajar a un nivel dinámico de 70 metros, nivel que se tenía al principio de la sobre explotación, y ya que en el año de 1998 el nivel llegó hasta 115.4m, lo que representa que el nivel de diseño fue rebasado 2/3 partes, por lo que ya no tienen un buen funcionamiento estos se deben abandonar, por lo tanto se pierden los pozos que se tenían, y esta pérdida se repartió entre todos los años que a habido sobre explotación de una manera equivalente al número de pozos que funcionaban en esos años.

El criterio de que después de 2/3 partes de la profundidad de diseño, un pozo no tiene un funcionamiento adecuado, es un valor empírico. Se considera que la eficiencia de un pozo trabajando bajo esas condiciones es muy baja, y no resulta rentable.

En el cálculo de los pozos abandonados se consideró que desde el primer año se tenía ya una pérdida por este concepto, lo cual no es cierto, ya que el abandono de pozos tiene lugar hasta que la profundidad del nivel estático llega a ser considerable y aun en dado caso tal vez se puede profundizar el pozo saliendo más barato.

Tabla 4.5
Costos de bombeo debidos a la sobre explotación

Fecha	Prof N.E.	CONDICIONES ACTUALES					RENDIMIENTO SEGURO					Volumen del a costa del almacenamiento Mm ³ /año	Costo Adicional \$0.60/kwh M\$/año	Costo adicional \$/m ³
		N.D.	Volumen extracción Mm ³ /año	Costos de bombeo \$0.60/kwh		N.D.	Volumen extracción Mm ³ /año	Costos de bombeo \$0.60/kwh						
				\$/m ³	M\$/año			\$/m ³	M\$/año					
Nov-59	-40.8	-70.3	248.1	0.43	107.5	-70.3	248.1	0.43	107.5	0.0	0.0	0.00		
Ene-70	-41.0	-70.5	249.1	0.43	108.3	-70.3	248.1	0.43	107.5	1.1	0.8	0.81		
Ene-71	-42.9	-72.4	257.4	0.45	115.1	-70.3	248.1	0.43	107.5	9.4	7.6	0.81		
Ene-72	-44.8	-74.3	266.0	0.46	122.1	-70.3	248.1	0.43	107.5	18.0	14.6	0.81		
Ene-73	-46.6	-76.1	275.0	0.47	129.4	-70.3	248.1	0.43	107.5	26.9	21.9	0.82		
Ene-74	-48.4	-77.9	284.1	0.48	137.1	-70.3	248.1	0.43	107.5	36.1	29.6	0.82		
Ene-75	-50.2	-79.7	293.6	0.49	145.0	-70.3	248.1	0.43	107.5	45.5	37.5	0.82		
Ene-76	-52.0	-81.5	303.4	0.51	153.3	-70.3	248.1	0.43	107.5	55.4	45.8	0.83		
Ene-77	-53.7	-83.2	313.6	0.52	161.9	-70.3	248.1	0.43	107.5	65.5	54.4	0.83		
Ene-78	-55.4	-84.9	324.1	0.53	170.9	-70.3	248.1	0.43	107.5	76.0	63.4	0.83		
Ene-79	-57.1	-86.6	334.9	0.54	180.2	-70.3	248.1	0.43	107.5	86.8	72.7	0.84		
Ene-80	-58.8	-88.3	346.1	0.55	190.0	-70.3	248.1	0.43	107.5	98.0	82.5	0.84		
Ene-81	-60.5	-90.0	357.7	0.56	200.1	-70.3	248.1	0.43	107.5	109.6	92.6	0.85		
Ene-82	-62.1	-91.6	369.6	0.57	210.7	-70.3	248.1	0.43	107.5	121.5	103.2	0.85		
Ene-83	-63.7	-93.2	381.9	0.58	221.7	-70.3	248.1	0.43	107.5	133.9	114.2	0.85		
Ene-84	-65.3	-94.8	394.7	0.59	233.1	-70.3	248.1	0.43	107.5	146.6	125.6	0.86		
Ene-85	-66.9	-96.4	407.9	0.60	245.0	-70.3	248.1	0.43	107.5	159.8	137.5	0.86		
Ene-86	-68.5	-98.0	421.5	0.61	257.4	-70.3	248.1	0.43	107.5	173.5	149.9	0.86		
Ene-87	-70.0	-99.5	435.6	0.62	270.3	-70.3	248.1	0.43	107.5	187.5	162.8	0.87		
Ene-88	-71.5	-101.0	450.2	0.63	283.7	-70.3	248.1	0.43	107.5	202.1	176.2	0.87		
Ene-89	-73.0	-102.5	465.2	0.64	297.7	-70.3	248.1	0.43	107.5	217.2	190.2	0.88		
Ene-90	-74.5	-104.0	499.5	0.65	324.4	-70.3	248.1	0.43	107.5	251.4	216.9	0.88		
Ene-91	-76.0	-105.5	489.6	0.66	322.6	-70.3	248.1	0.43	107.5	241.6	215.1	0.89		
Ene-92	-77.5	-107.0	479.8	0.67	320.6	-70.3	248.1	0.43	107.5	231.7	213.1	0.92		
Ene-93	-78.9	-108.4	469.9	0.68	318.4	-70.3	248.1	0.43	107.5	221.8	210.9	0.95		
Ene-94	-80.3	-109.8	460.1	0.69	315.9	-70.3	248.1	0.43	107.5	212.0	208.4	0.98		
Ene-95	-81.7	-111.2	450.2	0.70	313.2	-70.3	248.1	0.43	107.5	202.1	205.7	1.02		
Ene-96	-83.1	-112.6	440.3	0.70	310.3	-70.3	248.1	0.43	107.5	192.3	202.8	1.05		
Ene-97	-84.5	-114.0	430.5	0.71	307.1	-70.3	248.1	0.43	107.5	182.4	199.6	1.09		
Ene-98	-85.9	-115.4	420.6	0.72	303.8	-70.3	248.1	0.43	107.5	172.5	196.3	1.14		
Suma			11320.4				7442.3			3878.1				

ESTA TESIS NO DEBE
SAIR DE LA BIBLIOTECA

Tabla 4.6
Costo del abandono de pozos

Fecha	N.E. msnm	N.D. m	Volumen extracción Mm ³ /año	Numero de pozos de 60 l/s	Pozos abandonados	Costo M\$
Nov-69	-40.8	-70.3	248.1	261	12	6.23
Ene-70	-41.0	-70.5	249.1	262	12	6.25
Ene-71	-42.9	-72.4	257.4	271	12	6.46
Ene-72	-44.8	-74.3	266.0	280	12	6.68
Ene-73	-46.6	-76.1	275.0	289	13	6.90
Ene-74	-48.4	-77.9	284.1	299	13	7.13
Ene-75	-50.2	-79.7	293.6	309	14	7.37
Ene-76	-52.0	-81.5	303.4	319	14	7.61
Ene-77	-53.7	-83.2	313.6	330	15	7.87
Ene-78	-55.4	-84.9	324.1	341	15	8.13
Ene-79	-57.1	-86.6	334.9	353	16	8.40
Ene-80	-58.8	-88.3	346.1	364	16	8.68
Ene-81	-60.5	-90.0	357.7	376	17	8.98
Ene-82	-62.1	-91.6	369.6	389	17	9.28
Ene-83	-63.7	-93.2	381.9	402	18	9.59
Ene-84	-65.3	-94.8	394.7	415	18	9.91
Ene-85	-66.9	-96.4	407.9	429	19	10.24
Ene-86	-68.5	-98.0	421.5	444	20	10.58
Ene-87	-70.0	-99.5	435.6	459	20	10.93
Ene-88	-71.5	-101.0	450.2	474	21	11.30
Ene-89	-73.0	-102.5	465.2	490	22	11.68
Ene-90	-74.5	-104.0	499.5	526	23	12.54
Ene-91	-76.0	-105.5	489.6	515	23	12.29
Ene-92	-77.5	-107.0	479.8	505	22	12.04
Ene-93	-78.9	-108.4	469.9	495	22	11.79
Ene-94	-80.3	-109.8	460.1	484	21	11.55
Ene-95	-81.7	-111.2	450.2	474	21	11.30
Ene-96	-83.1	-112.6	440.3	464	20	11.05
Ene-97	-84.5	-114.0	430.5	453	20	10.80
Ene-98	-85.9	-115.4	420.6	443	20	10.56
Suma					526	

La determinación del número de pozos que se abandonan por año es difícil determinarlo, ya que no se cuenta con censos confiables, y en ocasiones no se puede tener acceso a la información, o no se sabe con exactitud las causas del abandono, por lo que fue necesario hacer las suposiciones anteriores.

4.3 Costo por el abandono de tierras agrícolas

Otro costo que se tiene derivado de la reducción de los niveles piezométricos es el abandono de las tierras de agricultura ya que al modificarse el flujo base en los ríos las superficies de riego por derivación directa de las corrientes desaparecen. Según el estudio realizado por la CNA⁽⁵⁵⁾, el costo de tierras abandonadas fue de 9 millones de pesos en 1968 y en 1969 fue de 10 millones de pesos, a lo largo del río Aguascalientes.

El abandono de tierras en la agricultura proviene también de que los cultivos no resultan rentables, por el alto costo de la extracción del agua subterránea por lo que se abandonan tierras dejando toda la infraestructura que se tenía en esas tierras y la pérdida consecuente de empleos.

Debido a la dificultad de calcular el costo del abandono de tierras, además que esto realmente no sucede ya que el gobierno apoya a la agricultura mediante subsidios, principalmente de la energía eléctrica, se tomó otro criterio para calcular este sobre costo que sufre la agricultura por la sobre explotación de los acuíferos. Lo que se hizo fue calcular los beneficios que dejan los cultivos en el valle de Aguascalientes considerando el costo actual del agua y si estos son negativos tienen un costo para el gobierno.

Los cálculos de la tabla 4.8 se realizaron con base en los costos de producción de los diferentes cultivos del valle de Aguascalientes obtenidos por Palacios E. ⁽⁵⁶⁾, y de aquí al aplicar la diferencia del costo del agua debido al bombeo entre el actual y el rendimiento seguro ($0.29\$/m^3$), calculado en la tabla 4.5, se obtuvieron los beneficios de los cultivos, de los cuales la mayoría resultaron negativos, y tomando en cuenta el volumen de agua utilizado y las hectáreas sembradas se calculó el costo en millones de pesos de la agricultura.

En la tabla 4.8 se obtuvo que el costo de los cultivos que no resultaron rentables, sin considerar los que sí, fue de 69.98 millones de pesos para 1998.

4.4 Costos totales

Una vez que se obtuvieron los costos debidos al bombeo, abandono de pozos y agricultura, se sumaron para obtener el costo total, y poder así obtener el costo que se ha tenido a lo largo del tiempo que ha existido la sobre explotación, para lo que fue necesario actualizar los costos respecto al tiempo para hacerlos equivalentes y poderlos sumar (tabla 4.9).

⁵⁵ CNA, Gerencia de Aguas Subterráneas, Costos Económicos Ambientales, 1997

⁵⁶ Palacios E., Banco Mundial, 1999

Tabla 4.8
Costos por subsidios a la agricultura.

Cultivo	V.Bruto m ² /ha	Sup. ha	Vol total 10 ³ m ³	Rendim Ton/ha	Precio \$/ton	Valor Prod \$/ha	Benef.	Costo	Costo del agua		Costo	Costo	Benef.	Benef.	Benef.	Benef.	Costo de
							bruto M \$	Produc. \$/ha	Actual 0.72 \$/ha	Rs 0.43	total de Produc. \$/ha	total de Produc. \$/ha RS	neto \$/ha	neto RS	neto \$/m ³	neto RS	la agricultu- ra M\$
OTONO-INVIERNO																	
Avena forrajera	4,500	2,077	9.35	26.4	260	6,859	14.2	10,038	3,240.0	1,935.0	13,278	11,973	-6,420	-5,115	-1.43	-1.14	2.71
Pastos	11,000	706	7.76	62.1	200	12,415	8.8	15,921	7,920.0	4,730.0	23,841	20,651	-11,426	-8,236	-1.04	-0.75	2.26
Ajo	3,900	477	1.86	6.9	4,500	31,267	14.9	31,581	2,808.0	1,677.0	34,389	33,258	-3,123	-1,992	-0.80	-0.51	0.54
Brócoli	4,600	101	0.47	8.5	2,500	21,339	2.2	20,673	3,312.0	1,978.0	23,985	22,651	-2,646	-1,312	-0.58	-0.29	0.13
Coliflor	4,400	95	0.42	11.3	2,000	22,600	2.1	28,522	3,168.0	1,892.0	31,690	30,414	-9,090	-7,814	-2.07	-1.78	0.12
PRIM-VERA NO																	
Maiz grano	7,600	9,636	73.23	5.2	1,300	6,737	64.9	14,803	5,472.0	3,268.0	20,275	18,071	-13,538	-11,334	-1.78	-1.49	21.24
Maiz forrajero	7,500	6,251	46.89	44.8	200	8,969	56.1	13,273	5,400.0	3,225.0	18,673	16,498	-9,704	-7,529	-1.29	-1.00	13.60
Frijol	7,000	1,790	12.53	2.0	6,000	11,751	21.0	13,204	5,040.0	3,010.0	18,244	16,214	-6,492	-4,462	-0.93	-0.64	3.63
Chile seco	8,400	793	6.66	1.4	32,000	45,439	36.0	26,047	6,048.0	3,612.0	32,095	29,659	13,344	15,780	1.59	1.88	
Jitomate	10,900	424	4.63	34.3	4,200	144,094	61.1	41,655	7,848.0	4,687.0	49,503	46,342	94,590	97,751	8.68	8.97	
Chile verde	7,500	369	2.77	6.9	3,100	21,421	7.9	25,247	5,400.0	3,225.0	30,647	28,472	-9,226	-7,051	-1.23	-0.94	0.80
Tomate	10,000	294	2.94	19.6	1,100	21,560	6.3	25,327	7,200.0	4,300.0	32,527	29,627	-10,967	-8,067	-1.10	-0.81	0.85
PERENNES																	
Alfalfa verde	16800	3,348	56.25	104.7	150	15,705	52.6	23,617	12,096.0	7,224.0	35,713	30,841	-20,008	-15,136	-1.19	-0.90	16.31
Guayaba	10000	2,878	28.78	13.5	4,000	53,913	155.2	35,885	7,200.0	4,300.0	43,085	40,185	10,828	13,728	1.08	1.37	
Praderas	19700	835	16.44	77.9	300	23,363	19.5	29,833	14,184.0	8,471.0	44,017	38,304	-20,654	-14,941	-1.05	-0.76	4.77
Vid	11,400	500	5.70	8.4	2,300	19,205	9.6	28,975	8,208.0	4,902.0	37,183	33,677	-17,978	-14,672	-1.58	-1.29	1.65
Durazno	10,000	470	4.70	9.9	5,500	54,395	25.5	57,608	7,200.0	4,300.0	64,808	61,908	-10,413	-7,513	-1.04	-0.75	1.36
Total		31,044.0	281.4														69.98

La actualización de los costos se realizó mediante la siguiente función:

$$F = P(1 + i)^n \quad 4.7$$

donde:

- n es el número de años.
- i es el interés.
- P es el valor en cierto año.
- F es el valor actual.

Después de haber aplicado esta función a la suma de los tres conceptos antes calculados se obtuvo que el costo actual que ha tenido la sobre explotación debido al bombeo es de 20 mil millones de pesos.

En el cálculo anterior se consideraron valores subjetivos establecidos sobre ciertas suposiciones que no son del todo reales y otros basados en la experiencia, ya que no se cuenta con estadísticas confiables o en algunos casos ni siquiera con ellas, además de que en ocasiones no es fácil obtener la información, por lo que a los valores anteriores hay que hacerles ciertos ajustes para acercarlos más a la realidad aunque algunos valores no son posibles obtenerlos, ya que no se cuenta con ellos. Pero debido al alcance de esta tesis, se hicieron algunas suposiciones que dependen del criterio.

Además existen otros costos que son difíciles de obtener debido a la complejidad en su determinación, pero no menos importantes. Uno de ellos se refiere al hundimiento en terrenos compresibles, el caso típico es el de la ciudad de México, donde se han presentado varios problemas como los son los bombeos que hay que realizar para evacuar las aguas negras de la ciudad y la construcción del drenaje profundo. A lo anterior habría que agregar los costos de mantenimiento de líneas de conducción de agua potable y drenaje, por lo que respecta a las roturas y dislocamientos por asentamientos diferenciales; mantenimiento de las líneas del metro, pasos a desnivel, reconstrucción de monumentos históricos, etc. Todo lo anterior debe de representar costos muy elevados, aunque difíciles de estimar ya que no se sabe con exactitud la causa de estos problemas y mucho menos los costos que esto representa.

Tabla 4.9
Costos totales

Año	COSTOS AMBIENTALES TOTALES				VNA
	Bombeo	Abandono de pozos	Cultivos	Total	a 1998
	M\$	M\$	M\$	M\$	10.00%
Nov-69	0.0	6.2	41.27	47.5	\$753.46
Ene-70	0.8	6.3	41.45	48.5	\$700.08
Ene-71	7.6	6.5	42.83	56.9	\$745.61
Ene-72	14.6	6.7	44.26	65.5	\$781.09
Ene-73	21.9	6.9	45.74	74.6	\$808.02
Ene-74	29.6	7.1	47.27	84.0	\$826.95
Ene-75	37.5	7.4	48.85	93.7	\$839.14
Ene-76	45.8	7.6	50.48	103.9	\$845.47
Ene-77	54.4	7.9	52.17	114.4	\$846.95
Ene-78	63.4	8.1	53.91	125.4	\$843.82
Ene-79	72.7	8.4	55.71	136.8	\$836.95
Ene-80	82.5	8.7	57.58	148.7	\$826.88
Ene-81	92.6	9.0	59.50	161.1	\$814.30
Ene-82	103.2	9.3	61.49	173.9	\$799.27
Ene-83	114.2	9.6	63.54	187.3	\$782.37
Ene-84	125.6	9.9	65.67	201.2	\$763.95
Ene-85	137.5	10.2	67.86	215.6	\$744.45
Ene-86	149.9	10.6	70.13	230.6	\$723.84
Ene-87	162.8	10.9	72.47	246.2	\$702.52
Ene-88	176.2	11.3	74.89	262.4	\$680.68
Ene-89	190.2	11.7	77.40	279.3	\$658.62
Ene-90	216.9	12.5	83.10	312.6	\$670.01
Ene-91	215.1	12.3	81.46	308.9	\$601.94
Ene-92	213.1	12.0	79.82	305.0	\$540.30
Ene-93	210.9	11.8	78.18	300.8	\$484.50
Ene-94	208.4	11.5	76.54	296.5	\$434.07
Ene-95	205.7	11.3	74.90	291.9	\$388.50
Ene-96	202.8	11.1	73.26	287.1	\$347.36
Ene-97	199.6	10.8	71.62	282.0	\$310.24
Ene-98	196.3	10.6	69.98	276.8	\$276.80
TOTAL					\$20,378.14

Otro problema es el de la intrusión salina de agua de mar en acuíferos costeros, el abandono de pozos y tierras de cultivo ya se han dado en Sonora, específicamente en los acuíferos de Guaymas y Hermosillo, con una desertificación de la zona lo que provoca un desequilibrio ecológico con costos incalculables.

En la agricultura al resultar poco rentables ciertos cultivos se aplican nuevos sistemas de riego, o si el cultivo es necesario se subsidia pero se reduce su área sembrada, hasta lograr en costo mínimo, lo que produce pérdidas de empleos, problemas sociales, efectos todavía más difíciles de cuantificar.

Para evitar estos problemas es necesario una buena planeación ya que como se ha visto el costo que ha tenido la sobre explotación ha sido altísimo y va seguir aumentando, por lo que hay que buscar nuevas alternativas, que probablemente no sean tan caras considerando que las situación actual a acareado costos económicos muy altos.

4.6 Beneficios

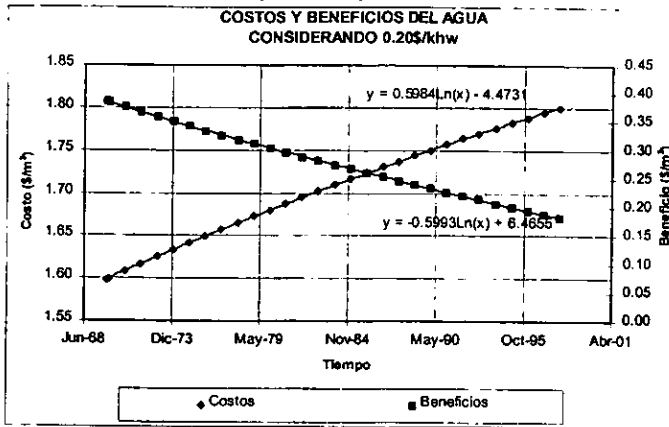
Los beneficios de la sobre explotación son cuantiosos pero resultan efimeros, ya que deben planificarse sólo en forma temporal.

Entre estos beneficios los más importantes se refieren a un auge económico regional, y si la sobre explotación se continúa, no hay pérdida de empleos, y no se sufrirían los costos debido a esto, por lo que la sobre explotación tiene sus beneficios importantes.

En la figura 4.5 se muestran los costos y beneficios en la agricultura para la zona de Aguascalientes los cuales fueron calculados de la misma forma que se hizo en el inciso 4.3, con la diferencia de que se partió de un costo de bombeo calculado a partir de considerar 0.20\$/kwh, tarifa eléctrica que se aplica al sector agrícola.

Los costos van aumentando con los años ya que el costo de bombeo aumenta por el abatimiento de los niveles, al aumentar los costos disminuye el beneficio que esta actividad genera. Estos cálculos son valores promedios, ya que consideran todos los cultivos aunque unos sean más redituables que otros.

Figura 4.5
 Costos y beneficios del agua en la agricultura considerando 0.20\$/kwh.



La evolución de los costos y beneficios se manifiestan de forma lenta ya que estos varían muy poco año con año, hecho que hace que no se tomen medidas para evitar la sobre explotación. Una extrapolación de la gráfica 4.5 de la figura nos arroja que los beneficios de la agricultura serán nulos en unos 30 años, siguiendo la tendencia actual y la tarifa eléctrica subsidiada. Desde luego mucho antes la mayoría de los cultivos ya no serán redituables.

CAPITULO 5

Conclusiones

El agua es un recurso vital para el desarrollo de la vida y a pesar de ésto la sociedad no le da su justo valor repercutiendo en un mal uso, ineficiencia y desperdicio, llegando a situaciones de escasez en muchos lugares. A lo largo de este trabajo se han presentado los problemas colaterales que trae consigo la sobre explotación de los acuíferos que como se ha expuesto son muy variados y con un alto costo económico y social.

Uno de los factores más importantes que influyen en la sobre explotación de los acuíferos es el mal uso que se le da al agua, provocado por una falta de conciencia de la población acerca de la escasez y efectos secundarios que esto conlleva. Por lo que es imperativo concientizar a la sociedad en general, pero sobre todo a aquellas que son responsables de alguna manera del manejo del agua. Se han hecho campañas publicitarias las cuales no han sido lo suficientemente eficaces para combatir este problema, por lo que es necesario tomar otro tipo de medidas, como lo puede ser el cobrar el precio real del agua o por lo menos un precio más alto al actual. También al aumentar el costo se propiciaría la rehabilitación de las redes de distribución, cambios de tecnología en la industria, tratamiento de aguas residuales, con lo que se lograrían mejoras sustanciales en la situación actual de los acuíferos, al evitar el desperdicio y propiciar el reuso del agua.

Pero el valor del agua no es fácil calcularlo, ya que si se considera que el agua es indispensable para la vida y para el desarrollo futuro de la sociedad su costo es incalculable. En el valor del agua influyen muchas variables, depende de factores particulares para cada caso, además de que para cada actividad tiene un valor distinto, para unos es un factor ecológico, para otros es un insumo económico y en otras ocasiones es un factor vital.

El incremento de las cuotas trae como consecuencia una gran cantidad de problemas sociales por lo que no es fácil implementarlas; por otro lado en la agricultura de riego por bombeo los rendimientos actuales son muy bajos y tienden a disminuir aun más con la sobre explotación, si a esto se le suma el costo del agua, los rendimientos podrían a llegar a ser nulos, trayendo otro tipo de problemas.

Otra medida se refiere a modificar los reglamentos o por lo menos vigilar la aplicación los actuales, básicamente en los que respecta a las medidas del no desperdicio; tomando medidas adicionales que ayuden a la recarga de los acuíferos como puede ser la construcción de pozos de absorción en edificaciones que cubran una superficie importante para que el agua de lluvia sea recargada a

los acuíferos; además, construir presas que sirvan para el mismo efecto, exigir en general áreas verdes o zonas de infiltración en las zonas urbanas, tratamiento y reuso del agua.

Otro de los problemas es que no se cuenta con datos confiables sobre el uso, la distribución de los volúmenes, las pérdidas que se tienen en la distribución y sobre la dotación adecuada para el bienestar de las personas, una mejor y mayor información haría posible hacer mejores evaluaciones y por lo tanto planear mejores políticas sobre el agua.

Se podría pensar que la mejor solución es el no explotar los acuíferos más allá del rendimiento seguro, y traer el agua de fuentes externas, pero esto tampoco es lógico ya que al explotar este recurso se obtienen beneficios que ayudan al bienestar social, entonces surge la pregunta de hasta donde explotarlo y por cuanto tiempo.

En referencia al tiempo se tiene que si se explota el recurso de una manera excesiva se tienen grandes beneficios en poco tiempo, lo cual es mejor económicamente, a explotarlo poco pero por mucho tiempo ya que los intereses que genera un gran capital durante pocos años, es más grande que el que se genera con poco dinero durante muchos años. Ahora, si se sobre explota en gran medida por un tiempo corto se puede dejar que el acuífero se recupere durante las siguientes décadas. Pero la primera opción plantea nuevos problemas, ya que un auge económico pero efímero de cierta región, no se puede parar así nada más.

Ahora viene la otra pregunta de hasta que nivel explotarlo. Tal vez un nivel en el cual se debería parar la sobre explotación es el nivel económico dado por la igualdad entre el costo de bombeo y costos ambientales asociados y dependiendo del caso, por el costo de importar el agua o de darle tratamiento, esto garantizaría una sustentabilidad para la el futuro.

Uno de los problemas de la importación del agua es de donde se va a traer, probablemente la región de la cual sea factible conducir el agua tenga una demanda que no permita ceder este recurso, lo que provoca una competencia entre los usos por el agua y entre las regiones. Por lo que resultaría mejor reubicar o desarrollar las zonas industriales, agrícolas o habitacionales en donde se tenga una disponibilidad adicional del recurso.

Adicionalmente a lo mencionado anteriormente son los efectos ambientales que entre otros se genera una desertificación de los suelos, contaminación de los mismos por uso de agua de mala calidad resultado de la intrusión salina de agua de mar lo que conlleva a un desequilibrio ecológico poniendo en riesgo la vida en la tierra y sus costos son incalculables.

Durante este trabajo se obtuvieron algunos costos para hacer de alguna forma más objetivo el problema de la sobre explotación, pero la realidad a la que nos enfrentamos es la escasez y la disminución de los almacenamientos subterráneos, que en gran parte se debe al mal uso que se le da, en poblaciones las pérdidas por distribución llegan a ser superiores al 40% y de igual forma en la agricultura donde los sistemas de riego son muy ineficientes lo que da como resultado extraer el agua a profundidades tales que el costo ha llegado a ser muy elevado y además, en algunos casos, con una calidad menor. Estos fenómenos ponen en peligro la sustentabilidad de las actividades económicas actuales y futuras y de la vida misma.

Como se ha visto el problema del agua es muy complejo y para encontrar una solución es necesario integrar una gran diversidad de factores que influyen en este problema. El manejo del agua subterránea y en general de los recursos hídricos se da bajo una interacción compleja entre la sociedad y el marco físico regional. Los acuíferos son explotados por decisión humana, pero llegan a estados de sobre explotación cuando las metas económicas y sociales que implican estas decisiones, se disocian de las estructuras técnicas y del marco físico del aprovechamiento. Con estas premisas, se entiende la sobre explotación, como una opción administrativa que incluye, entre otras consideraciones el bienestar de la población, la maximización de beneficios y la conservación del medio ambiente, de manera interdependiente con multiplicidad de condiciones geohidrológicas y técnicas, que deben ser tomadas en cuenta para desarrollar las políticas de explotación del recurso y el desarrollo económico y social de los países.